

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Некоммерческое акционерное общество  
«Алматинский университет энергетики и связи имени  
Гумарбека Даукеева»**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»**

**ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**Международная научно-техническая конференция  
(Алматы, Казань, 20-21 октября 2022 г.)**

**Электронный сборник научных статей по материалам конференции**

**В трех томах**

**Том 1**

**Алматы, Казань**

**2023**

УДК 620+004+378  
ББК 31.1+32.81+74.48  
М43

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»  
Национального исследовательского университета «МЭИ» К.В. Суслов

д-р экон. наук, зав. сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной  
академии наук Беларуси Зорина Т.Г.

*Редакционная коллегия:*

Э.Ю. Абдуллазянов, С.С. Сагинтаева, И.Г. Ахметова, А.А. Саухимов, Ю.С. Валеева,  
Р.С. Зарипова, Ж.Б. Суйменбаева

М43 Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование»: электронный сборник научных статей по материалам конференции: [в 3 томах] / ред.кол. Э.Ю. Абдуллазянов, С.С. Сагинтаева, И.Г. Ахметова, А.А. Саухимов, Ю.С. Валеева, Р.С. Зарипова, Ж.Б. Суйменбаева. – Казань: КГЭУ, 2023. – Т. 1. – 621 с.

ISBN 978-5-89873-615-6 (т. 1)  
ISBN 978-5-89873-618-7

В электронном сборнике представлены научные статьи по материалам Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» по следующим научным направлениям:

1. Теплоэнергетика и теплотехнологии;
2. Электроэнергетика;
3. Радиотехника, электроника и телекоммуникации;
4. Энергообеспечение сельского хозяйства;
5. Промышленная и экологическая безопасность;
6. Математическое моделирование и системы управления;
7. Информационные технологии и кибербезопасность;
8. Космическая инженерия и робототехника;
9. Социально-политическое и культурное развитие Евразии;
10. Экономика знаний как фактор инновационного развития высшего образования.

Предназначены для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики, а также для обучающихся образовательных учреждений энергетического профиля.

Статьи публикуются в авторской редакции. Ответственность за содержание статей возлагается на авторов.

УДК 620+004+378  
ББК 31.1+32.81+74.48

ISBN 978-5-89873-615-6 (т. 1)  
ISBN 978-5-89873-618-7

© КГЭУ, 2023

УДК 620.92

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА РСМ-ИНТЕНСИФИКАТОР НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ИЗ МЕДНЫХ ГРАНУЛ И МЕДНОЙ СТРУЖКИ

Ахметова Ирина Гареевна <sup>1</sup>, Соловьева Ольга Викторовна <sup>2</sup>, Соловьев Сергей Анатольевич <sup>3</sup>, Мурзаев Александр Сергеевич <sup>4</sup>, Шакурова Розалина Зуфаровна <sup>5</sup>, Гилязов Альберт Ильдарович <sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup>irina\_akhmetova@mail.ru, <sup>2</sup>solovyeva.ov@kgeu.ru, <sup>3</sup>solovev.sa@kgeu.ru, <sup>4</sup>erodonov@list.ru, <sup>5</sup>shakurova.rz@gmail.com, <sup>6</sup>keni82590@gmail.com

**Аннотация:** *Материалы с фазовым переходом (PCM) применяются в качестве компонента теплоаккумуляторов, радиаторов, строительных перекрытий, теплоизоляционных материалах и др. Для интенсификации теплообмена и распределения температуры, в качестве матрицы используют высокопористые ячеистые материалы. Изменяя материал образцов пористой среды, пористость, размер ячеек и структуру, возможно рационально подойти к подбору матрицы, для достижения наибольшей эффективности и производительности. В данной работе исследуется два вида металлического наполнителя — медная стружка и медные гранулы, с целью определения характера нагрева, времени, необходимого для совершения фазового перехода и скорости его протекания. Экспериментальные данные показывают, что композит с матрицей на основе медных гранул может применяться в приложениях, где требуется быстро саккумулировать относительно небольшое количество теплоты, а после — так же быстро отдать теплоту. Композиты с матрицей из медной стружки целесообразно применять для аккумуляирования бóльшего количества тепловой энергии.*

**Ключевые слова:** *фазовый переход, интенсификаторы теплообмена, гранулы, стружка, аккумуляирование тепловой энергии, эксперимент.*

## DETERMINATION OF THE HEAT-STORAGE PROPERTIES OF A PCM-INTENSIFIER COMPOSITE BASED ON A MATRIX FROM COP- PER GRANULES AND COPPER CHIPS

Akhmetova Irina Gareevna <sup>1</sup>, Soloveva Olga Viktorovna <sup>2</sup>, Solovev Sergey Anatolievich <sup>3</sup>,  
Murzaev Alexander Sergeevich <sup>4</sup>, Shakurova Rozalina Zufarovna <sup>5</sup>, Gilyazov Albert Il-  
darovich <sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>irina\_akhmetova@mail.ru, <sup>2</sup>solovyeva.ov@kgeu.ru, <sup>3</sup>solovev.sa@kgeu.ru, <sup>4</sup>erodonov@list.ru,  
<sup>5</sup>shakurova.rz@gmail.com, <sup>6</sup>keni82590@gmail.com

**Abstract:** Phase change materials (PCM) are used as a component of heat accumulators, radiators, building floors, thermal insulation materials, etc. Highly porous cellular materials are used as a matrix to intensify heat transfer and temperature distribution. By changing the material of the samples of the porous medium, porosity, cell size and structure, it is possible to rationally approach the selection of the matrix to achieve the greatest efficiency and productivity. In this paper, we study two types of metal filler - copper chips and copper granules, in order to determine the nature of heating, the time required to complete the phase transition and its rate. Experimental data show that a composite with a matrix based on copper granules can be used in applications where it is required to quickly accumulate a relatively small amount of heat, and then release heat just as quickly. It is expedient to use composites with a matrix of copper shavings for accumulating a larger amount of thermal energy.

**Keywords:** phase transition, heat transfer intensifiers, granules, shavings, thermal energy accumulation, experiment.

## **Введение**

В условиях повышения спроса на тепловую энергию использование традиционных источников энергии приводит к ряду негативных последствий для окружающей среды. Значительное количество низкотемпературного тепла промышленных процессов может использоваться как «полезное тепло» с пользой для экономики и экологии. Таким образом, материалы с фазовым переходом (PCM) все чаще внедряются в различные системы накопления и последующего использования тепловой энергии. В настоящее время существует множество исследований, в которых рассматривается повышение эффективности аккумулирования тепла с помощью PCM. Перед исследователями стоят задачи повышения теплопроводности, энергоемкости, производительности систем с PCM и их оптимизации при сохранении экономичности.

В работе [1] численно исследовалась эффективность различных форм металлических пен в композите парафин/пена. По словам авторов, оптимизация геометрической формы пены (матрицы) позволяет существенно сократить время плавления, а также увеличить среднюю скорость плавления и средний тепловой поток. Авторами работы [2] частично заполняли медную пену парафином с тремя различными способами расположения пены в композите. Исследовались 3 способа расположения медной пены: двухрядная, распределенная по кольцу (1); по кольцу, перпендикулярной направлению витка (2) и по кольцу в направлении (3), параллельном горизонтальной оси. Фиксировались распределение температуры и скорость аккумулирование тепла. Было выявлено, что вариант (1) расположения

пены способствует равномерности распределения пены в радиальном направлении, а вариант (2) может повысить распределение температуры вдоль периферийного направления.

Оптимизация тепловых характеристик композита металлическая пена-парафин в зависимости от пористости матрицы ( $\epsilon$ ) и плотности пор (PPI) исследовалась в работе [3]. Рассматривались пены с 10 PPI с шестью пористостями — от 88% до 98%, а также варьировалась плотность пор: от 5 до 30 PPI при постоянной пористости 94%. По результатам, полученным в процессе численного моделирования, авторы выделили следующие выводы: 1) снижение пористости способствует снижению времени полного плавления и увеличению скорости температурного отклика; 2) увеличение плотности пор улучшает тепловые характеристики и более существенно для плотности пор от 5 до 15 PPI; 3) уменьшение пористости приводит к снижению теплоаккумулирующей способности, значение плотности пор на теплоаккумулирующую способность не влияет.

Исследованием влияния морфологии ребер медных матриц на внутреннюю скорость накопления тепла, термическую однородность и теплопроводность композитных материалов занимались в статье [4]. К рассмотрению предлагалось 5 геометрических форм (структур) ребра. Сообщается, что с увеличением пористости уменьшалась эффективная теплопроводность. Структуре треугольной призмы характерна наибольшая скорость накопления тепла. Авторы акцентируют внимание на возможности оптимизации подготовки композитных материалов для достижения наибольшей эффективности путем работы с морфологией, пористостью и PPI пен.

Авторы работы [5] методом вакуумной пропитки изготавливали композит парафиновый воск-металлическая пена. Теплопроводность изготовленного композита парафин-никелевая пена оказалась в 6 раз выше, чем у чистого парафина, тогда как теплопроводность композита с алюминиевой пеной превышает теплопроводность чистого парафина в 18 раз. Согласно результатам исследования, на теплопроводность композита влияет теплопроводность металлической пены, а размер пор оказывает незначительное влияние. Путем внесения поправок была усовершенствована существующая аналитическая модель [6] по прогнозированию эффективной теплопроводности.

В работе [7] исследовали улучшение теплопередачи композитного материал с РСМ с помощью добавления пенометалла, изготовленного из опилок алюминиевого сплава путем спекания и растворения. Термические свойства исследуемого композитного материала сравнивались со свойствами чистого парафина, а также с композитом, изготовленным с использованием неспеченной стружки. Сообщается, что применение повторно используемой стружки при изготовлении композитов на основе парафина, позволяет значительно улучшить тепловую реакцию композитов.

Авторы работы [8] отмечают, что в случае поглощения энергии композитом пенометалл-РСМ на скорость плавления существенно влияет распределение пор по размерам, таким образом, пене с преобладанием мелких пор характерны более быстрое протекания

ние процесса плавления и более высокая скорость теплопередачи. Сообщается, что обнаруженный принцип свойственен как пенам с высокой, так и с низкой пористостью.

Влияние конвекции на тепловые характеристики плавления системы накопления тепловой энергии с фазовым переходом численно исследовали в работе [9]. Влияние конвекции изучалось для трех диапазонов размеров пор (3–4 мм, 4–5 мм, 5–6 мм) при одинаковом значении пористости, равном 50%. Сообщается, что при меньшей пористости скорость плавления выше; конвекция увеличивает скорость теплообмена и сокращает время завершения плавления. Конвекция играет важную роль при большем размере пор (от 5 до 6 мм), таким образом снижение кондуктивной теплопередачи компенсируется увеличением конвективной теплопередачи, что приводит к уменьшению времени, требуемого для плавления.

На характеристики теплового поведения композитного материала с РСМ существенное влияние оказывает геометрия структуры пеноматериала [10]. Для кубической периодической конфигурации пеноматериала при одинаковой плотности пор эффективная теплопроводность снижается при уменьшении пористости; в то же время плотность пор при одинаковой пористости не оказывает существенного влияния на эффективную теплопроводность. Авторы отмечают явление естественной конвекции в области жидкой фазы парафина в процессе фазового перехода.

Авторы работы [11] исследовали повышение эффективности композита пеноматериал-РСМ с учетом общего времени плавления, производительности и экономии. Оценивалась стратегия частичного заполнения. Применение металлической пены повышает эффективную теплопроводность композита, что влияет на ускорение процесса плавления, к негативным аспектам можно отнести подавление естественного конвективного переноса и уменьшение массы РСМ. Улучшению кондукторного переноса тепла способствует размещение пеноматериала только в области низкой скорости плавления чистого РСМ, таким образом, исключается явление подавления кондуктивного переноса полным (большим) объемом металлической пены. В зависимости от поставленной задачи по достижению требуемых тепловых характеристик системы, авторы предложили использовать одну из предложенных ими конфигураций с различными коэффициентами заполнения.

### ***Основная часть***

Ввиду относительно невысокой теплопроводности материалов с фазовым переходом, существует задача по интенсификации теплообмена и равномерному распределению температуры по всему объему РСМ. Одними из самых распространенных материалов с фазовым переходом являются парафины, гидратированные соли и жирные кислоты. В качестве материала матрицы обычно используют металлы с высокой теплопроводностью: медь, алюминий, никель и др. Однако производство таких высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМов) является очень дорогостоящим. В данной работе исследуются интенсификаторы теплообмена, способные заменить металлические пены — медные грану-

лы и медная стружка, с целью определения эффективности применения типа наполнителя, а также характера протекания процессов нагрева, фазового перехода и остывания исследуемых образцов композита РСМ-интенсификатор. В качестве материала с фазовым переходом используется парафин.

На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

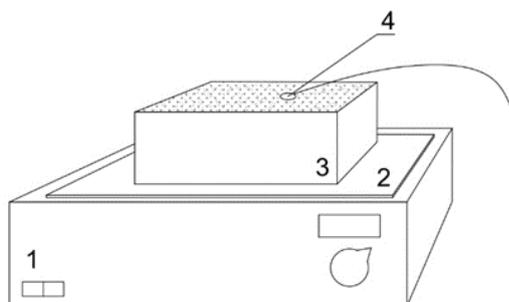


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – нагреватель; 2 – алюминиевая пластина; 3 – контейнер для измерения с матрицей и парафином; 4 – термопара.

Исследуемый образец, представляющий из себя металлический контейнер, внутрь которого помещался композит парафин-интенсификатор, помещался на алюминиевую пластину для исключения конвективных потоков горячего воздуха, а также для выравнивания температуры по всему дну контейнера. Пластина с контейнером устанавливалась сверху нагревателя. Композит был помещен в контейнер для исключения вытекания парафина и состоял из материала с высокой теплопроводностью. В процессе эксперимента фиксировались температура матрицы (наполнителя); время начала фазового перехода; время, затраченное на фазовый переход; время, необходимое для нагрева образца до температуры 55 °С. При температуре 55 °С фазовый переход завершился для всех образцов медного наполнителя, поэтому данная температура была выбрана в качестве контрольного значения. Задачей исследования явилось определение целесообразности применения двух видов наполнителя (медная стружка и медные гранулы) в качестве интенсификатора теплообмена в композитном материале РСМ/медный наполнитель при различном содержании парафина. На рисунке 2 представлены фотографии образцов медной матрицы со структурами в виде гранул и стружки.



Рис. 2. Фотографии медных матриц с различными структурами в виде: (а) гранул; (б) стружки.

На рисунке 3 представлены фотографии композитного материала с медными матрицами различной структуры с изменяемым содержанием парафина. Общий объем композитного материала для всех образцов сохранялся постоянным и составлял  $9,6 \text{ см}^3$ .

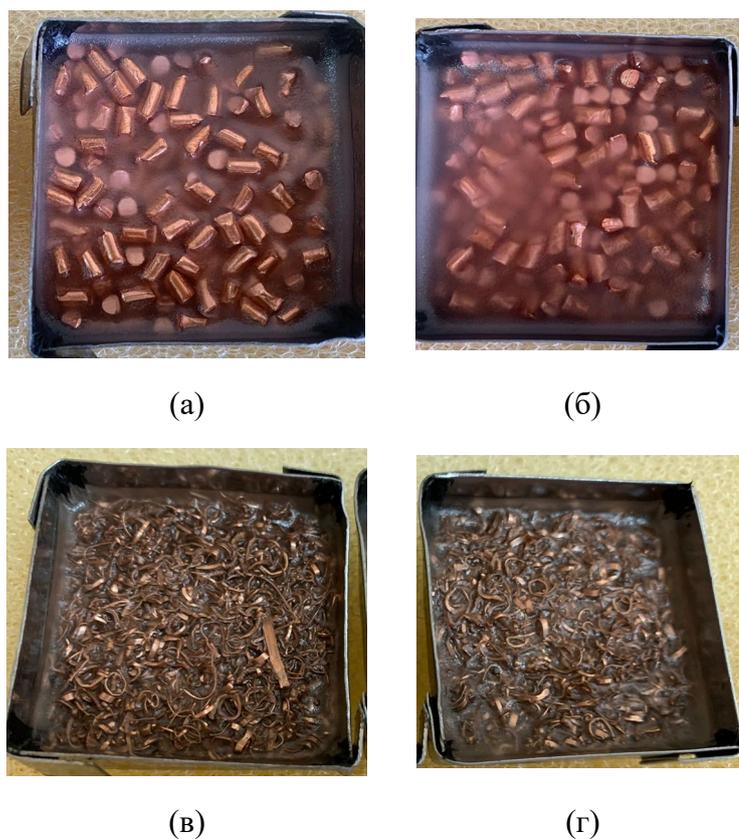


Рис. 3. Фотографии композитных материалов с различными типами матриц и при различном содержании парафина: (а) композит с медными гранулами с содержанием па-

рафина 43%; (б) композит с медными гранулами с содержанием парафина 52%; (в) композит с медной стружкой с содержанием парафина 63%; (г) композит с медной стружкой с содержанием парафина 80%.

Процентное содержание парафина определялось как объемная доля его содержания в композитном материале. При этом учитывалось изменение объема парафина в процессе перехода в жидкую фазу, поэтому контейнер заполнялся не полностью.

### ***Результаты и обсуждение***

В настоящем исследовании постоянной величиной был объем заполняемого контейнера, содержащий парафин и медный наполнитель. При этом для разных вариантов наполнителя содержание парафина тоже менялось. Постоянным всегда оставался общий объем. Исследовалось влияние содержания парафина и структуры медной матрицы на теплоаккумулирующие свойства композита.

На рисунке 4 представлены графики изменения температуры матрицы по времени в процессе нагрева для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43% от общего объема, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

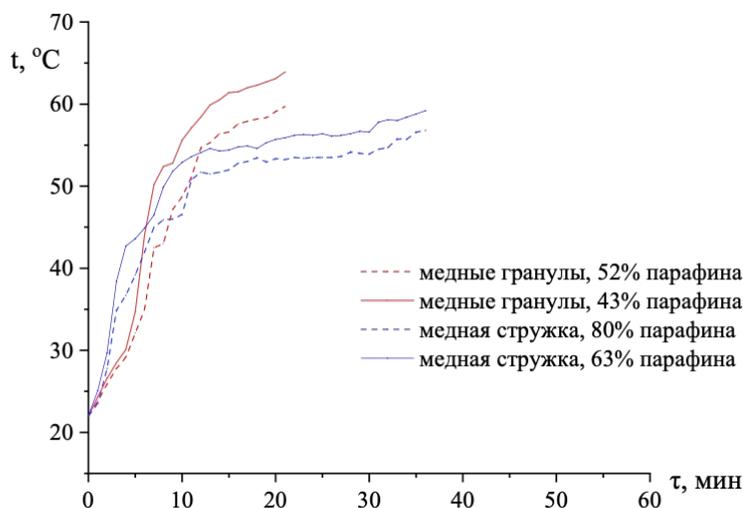


Рис. 4. Изменение температуры по времени в процессе нагрева для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

Анализируя график изменения температуры по времени, можно сделать вывод: быстрее нагрелась матрица с медными гранулами, медленнее грелась матрица с медной стружкой.

На рисунке 5 представлены графики изменения температуры по времени при фазовом переходе в процессе нагрева для четырех образцов медной матрицы: матрица с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матрица со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

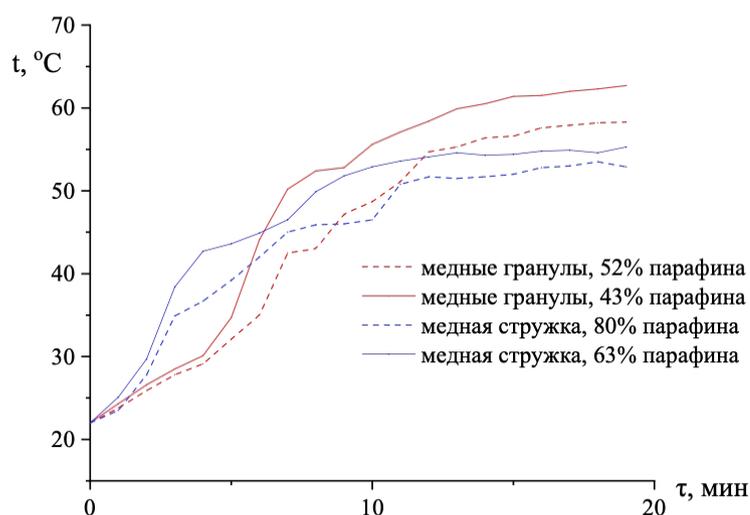


Рис. 5. Изменение температуры по времени при фазовом переходе в процессе нагрева для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

Для образцов матриц со стружкой и гранулами из графика распределения температур по времени (рисунок 5) видно, что повышенное содержание парафина приводит к тому, что процесс плавления сдвигается по оси времени вправо, то есть происходит позже. Процесс нагрева матрицы со стружкой и гранулами с большим содержанием парафина так же происходит медленнее, чем однотипных матриц с меньшим содержанием парафина. При повышенном содержании парафина температура матрицы растет значительно медленнее, поскольку увеличение содержания парафина требует большего количества теплоты на нагрев парафина. В образцах матриц с гранулами время аккумуляции самое короткое, что можно объяснить ее малой пористостью и как следствие меньшим содержанием парафина. В свою очередь матрица со стружкой имеет более высокую пористость и более высокое содержания парафина, поэтому время, требуемое на фазовый переход, больше.

На рисунке 6 представлены графики изменения температуры матрицы по времени в процессе остывания для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

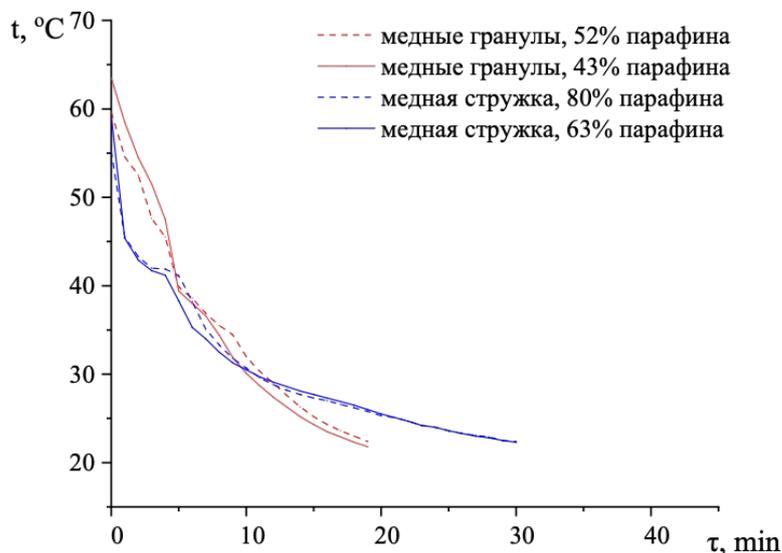


Рис. 6. Изменение температуры матрицы по времени в процессе остывания для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

Для образца композитного материала с матрицей из медной стружки можно отметить самое продолжительное время остывания по сравнению с матрицами на основе гранул. Это связано с тем, что в процессе нагревания композит на основе матрицы из медной стружки позволил аккумулировать большее количество энергии. Интенсивнее остывает композит на основе матрицы из медных гранул за счет её высокой металлоемкости и низкого содержания парафина в композитном материале.

На рисунке 7 представлен график изменения температуры матрицы по времени при фазовом переходе в процессе остывания для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

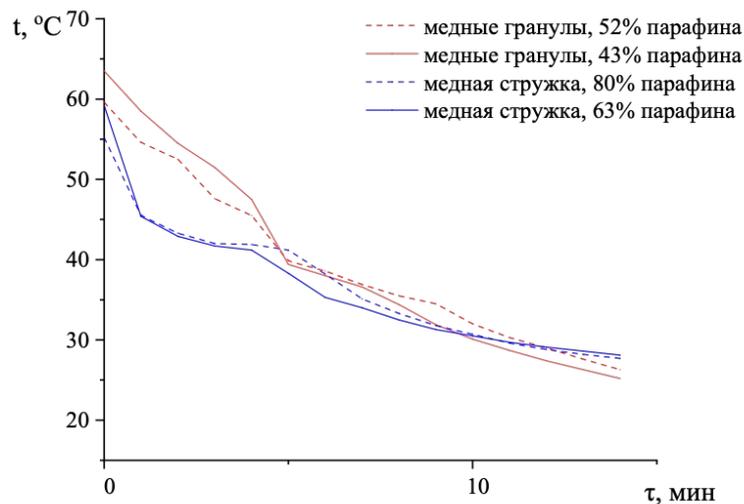


Рис. 7. График изменения температуры матрицы по времени при фазовом переходе в процессе остывания для четырех образцов матриц: матриц с медными гранулами с пористостью  $\varepsilon=0,55$  при содержании парафина 52% и 43%, матриц со стружкой с пористостью  $\varepsilon=0,85$  при содержании парафина 63% и 80%.

Для всех образцов матриц можно отметить, что повышение содержания парафина увеличивает время кристаллизации. Например, у образца композита с медными гранулами при содержании парафина 52% время кристаллизации составило 4 минуты (с 5й до 9й минуты). В то время как образец с медными гранулами с содержанием парафина в 43% показал время кристаллизации 2 минуты (с 5й по 7ю минуту). Наиболее продолжительное время фазового перехода (5 минут, при содержании парафина 80%) показал образец композита с матрицей из медной стружки. Наименьшее время кристаллизации показали образцы с медными гранулами. Можно заключить, что матрица из медной стружки позволяет увеличить время зарядки/разрядки композита благодаря тому, что в объеме композита с матрицей из медной стружки заключается больший объем парафина. Это полезно в приложениях, где важна не скорость аккумуляции тепла, а количество с аккумуляцией энергии.

В приложениях, где важна скорость аккумуляции тепла, целесообразнее применять композиты на основе матрицы из медных гранул. Пористость такой матрицы как правило меньше, соответственно объемная доля содержания парафина меньше, и требуется меньше времени для процессов фазового перехода.

### **Выводы**

В данной работе проведены экспериментальные исследования теплоаккумулирующих свойств композитов, состоящих из парафина и различных типов медной матрицы:

на основе гранул и на основе стружки. Исследовалась целесообразность использования в различных приложениях определенного типа матрицы для интенсификации теплообмена в композитном материале. В процессе экспериментальных исследований изучалось влияние содержания парафина и типа матрицы на продолжительность фазового перехода в процессе нагрева и остывания композитного материала. В результате можно сделать следующие выводы:

- композитный материал на основе матрицы из медной стружки целесообразно использовать в случаях с большим подводом тепловой энергии которую требуется саккумулировать;
- композитный материал на основе матрицы из медных гранул предлагается использовать в приложениях, где требуется быстро саккумулировать энергию при ее непродолжительном подводе, и так же быстро ее отдать.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28 января 2022 г. (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 с 31 января 2022 года).

#### **Источники**

[1] Gao Y. et al. Influence of the copper foam shape on thermal performance of phase-change material //Journal of Energy Storage. – 2021. – Т. 36. – С. 102416.

[2] Hou Y., Chen H., Liu X. Experimental study on the effect of partial filling of copper foam on heat storage of paraffin-based PCM //Renewable Energy. – 2022. – Т. 192. – С. 561-571.

[3] Meng X. et al. Effect of porosity and pore density of copper foam on thermal performance of the paraffin-copper foam composite Phase-Change Material //Case Studies in Thermal Engineering. – 2020. – Т. 22. – С. 100742.

[4] Yang X. et al. Effects of morphology and internal voids of copper ribs on heat transfer performance in copper foam/paraffin composite phase change materials //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 152. – С. 119526.

[5] El Idi M. M., Karkri M., Kraiem M. Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/Metal Foam composite //Journal of Energy Storage. – 2021. – Т. 33. – С. 102077.

[6] Белобородов С. С. Повышение системной эффективности ТЭЦ как фактор перехода к ресурсосберегающей и экологически безопасной энергетике / С. С. Белобородов, А. А. Дудолин, Е. М. Лисин, В. О. Киндра // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 135-145.

[7] Boomsma K., Poulidakos D. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – Т. 44. – №. 4. – С. 827-836.

[8] Thalmaier G., Sechel N. A., Vida-Simiti I. Heat transfer enhancement of paraffin phase change composite material using recycled aluminum sawing chips //Jom. – 2019. – Т. 71. – №. 3. – С. 1049-1055.

[9] Dinesh B. V. S., Bhattacharya A. Comparison of energy absorption characteristics of PCM-metal foam systems with different pore size distributions //Journal of Energy Storage. – 2020. – Т. 28. – С. 101190.

[10] Запольская И. Н. Влияние индивидуальных водо-водяных подогревателей на потребление тепловой энергии многоквартирными домами / И.Н. Запольская // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 146-155.

[11] Parida A., Bhattacharya A., Rath P. Effect of convection on melting characteristics of phase change material-metal foam composite thermal energy storage system //Journal of Energy Storage. – 2020. – Т. 32. – С. 101804.

[12] Hu X., Gong X. Pore-scale numerical simulation of the thermal performance for phase change material embedded in metal foam with cubic periodic cell structure //Applied thermal engineering. – 2019. – Т. 151. – С. 231-239.

[13] Joshi V., Rathod M. K. Thermal performance augmentation of metal foam infused phase change material using a partial filling strategy: An evaluation for fill height ratio and porosity //Applied Energy. – 2019. – Т. 253. – С. 113621.

[14] Генбач А. А. Пути повышения эффективности охлаждения камер сгорания и сопел ГТУ / А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, И.К. Илиев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 114-134.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Бадретдинова Гузель Рамилевна<sup>1</sup>, Дмитриев Андрей Владимирович<sup>2</sup>, Гумерова Гузель  
Хайдаровна<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический  
университет»

<sup>1</sup>nice.badretdinova@mail.ru, <sup>2</sup>ieremiada@mail.ru, <sup>3</sup>gumerova@kstu.ru

***Аннотация.** Авторами работы был разработан и внедрен теплообменный аппарат с оребренными трубами в ООО «ПАЛП Инвест», г. Казань. На основе полученных экспериментальных данных был определен режим работы теплообменного аппарата, предназначенного для передачи тепла от парогазовой смеси, содержащей твердые частицы целлюлозы к нагреваемой воде, протекающей внутри трубок. Получены зависимости времени работы от теплового потока между процессом восстановления и объемом воды затрачиваемому на одно восстановление поверхности, а также от стоимости воды.*

***Ключевые слова:** теплопередающая поверхность, загрязнения твердыми частицами, коэффициент теплопередачи, оптимальный режим работы*

## RESTORATION OF THE HEAT TRANSFER SURFACE IN CASE OF CONTAMINATION BY SOLID PARTICLES OF CELLULOSE CONTAINED IN THE VAPOR-GAS MIXTURE

Badretdinova Guzel Ramilevna<sup>1</sup>, Dmitriev Andrey Vladimirovich<sup>1</sup>, Gumerova Guzel  
Khaydarovna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>1</sup>nice.badretdinova@mail.ru, <sup>2</sup>ieremiada@mail.ru, <sup>3</sup>gumerova@kstu.ru

***Annotation.** The authors of the work developed and implemented a heat exchanger with finned pipes in «PULP Invest», the city of Kazan. Based on the experimental data obtained, the operating mode of a heat exchanger designed to transfer heat from a vapor-gas mixture containing solid cellulose particles to heated water flowing inside the tubes was determined. The dependences of the operating time on the heat flow between the restoration process and the volume of water spent on one restoration of the surface, as well as on the cost of water, are obtained.*

*Key words: heat transfer surface, solid particle contamination, heat transfer coefficient, optimal operating mode*

## **Введение**

Большинство промышленных предприятий используют теплообменники для процессов предварительного нагрева, конденсации и испарения. Внутри и на поверхности этих аппаратов часто образуются нежелательные отложения [1, 2]. Эти отложения известны как загрязнения или засорения мелкими твердыми частицами и вызывают множество эксплуатационных проблем, таких как снижение коэффициента теплопередачи, увеличение гидравлического сопротивления или ухудшение качества продукта. С учетом технических и экономических требований все большее значение приобретают стратегии по уменьшению загрязнения. Зачастую с загрязнением теплообменного оборудования сталкиваются нефте- и газовые отрасли, тепловые электростанции, заводы по изготовлению, транспортировке, фракционированию сыпучих материалов и порошков, пищевые производства, целлюлозно-бумажные комбинаты и т.д. [3,4]. Современные исследования предлагают различные модификации конструкций теплообменников, а также различные способы очистки теплопередающих поверхностей как средства для минимизации загрязнений [5].

На тепловых электростанциях отложение золы на поверхности теплообменника влияет на его характеристики теплопередачи и срок службы аппарата, что снижает эффективность рекуперации и использование отработанного тепла, получаемого от дымовых газов [6, 7]. В работе [8] был разработан численный метод для исследования характеристик золоотложения в кожухотрубчатых теплообменниках. С помощью интегрированной модели загрязнения, включающая в себя такие механизмы, как перенос, отскок, осаждение и удаление частиц, прогнозировалось поведение частиц. В исследовании было изучено влияние диаметра частиц и скорости дымовых газов на образование слоя осадка, а также на абсолютный и относительный коэффициенты осаждения. Проведено сравнение механизмов образования осадков трех труб различной геометрии. Исходя из этого, образование осадков золы можно уменьшить за счет увеличения скорости потока дымовых газов, фильтрации средних и крупных частиц, а также использования эллиптических и плоских круглых труб.

Авторами статьи [9] был разработан численный метод исследования характеристик загрязнения типичного теплообменника. В ходе исследования была разработана интегрированная модель загрязнения, состоящая из процессов отложения и удаления слоя твердых частиц, имитирующая поведение загрязнений. Экспериментально было исследовано влияние скорости потока на входе и диаметра частиц на сопротивление загрязнению. Результаты показали, что движение частиц легко контролировалось различными вихревыми структурами, а засорение в основном происходило в области торможения и рециркуляции потока. Также увеличение скорости потока на входе и диаметра частиц приводит к уменьшению загрязнения.

В работе [10], направленной на повышение теплопередачи, снижения гидравлического сопротивления и уменьшения отложений на поверхностях теплообмена в условиях повышенной запыленности были предложены линейно-эллиптический и сотовый трубные пучки, а также исследованы характеристики слоев осадка и теплогидравлические характеристики до и после загрязнения. На основе модели зольного обрастания и метода прогнозирования были получены уравнения распределения слоя осадка и их морфология, а зольные обрастания и теплогидравлические характеристики были исследованы путем параметризации.

Отложение золы на поверхности теплообмена является серьезной проблемой, которая имеет решающее значение для работы котла-утилизатора [11]. В данной работе были проведены исследования по уменьшению отложений и сохранению характеристик теплопередачи. Методом численного моделирования исследовалась новая ромбическая поверхность теплообмена, анализировались характеристики осаждения и распределения частиц различного диаметра, а также скорости потока. Было проведено сравнение различных вариантов расположения трубок: ромбических, выровненных и расположенных в шахматном порядке. Результаты показывают, что из всех рассматриваемых вариантов компоновки трубок ромбическая поверхность теплообмена лучше всего способствует уменьшению зольных отложений.

В статье [12] дана численная оценка нового теплообменника с пучком труб с поперечным потоком, который сочетает в себе трубы разного диаметра во встроенной компоновке с целью снижения скорости загрязнения твердыми частицами со стороны газа при сохранении оптимальных значений коэффициента теплопередачи. Проведено сравнение трех схем: кожухотрубчатый теплообменник с цилиндрическими трубами одинакового диаметра и две другие схемы, состоящие из чередующихся цилиндров с отношением диаметров  $d/D = 0,5$ , при двух разных поперечных расстояниях. Результаты показывают, что стандартная компоновка пучка труб с неравными цилиндрами, размещенными на максимальном поперечном расстоянии друг от друга, обеспечивают значительное снижение скорости осаждения частиц без изменений оптимальных значений коэффициентов теплопередачи на единицу объема и низкого перепада давления.

Многие исследования посвящены анализу влияния состава теплопередающей поверхности на степень загрязнения. Например, алмазоподобные углеродные покрытия поверхностей теплообменников используются для уменьшения кристаллизационного загрязнения [13]. В промышленности стабильность удельных свойств поверхности, подверженных жидкостным, термическим и химическим воздействиям, определяет их эффективность. Поэтому исследуются теплогидравлические и очищающие напряжения, приложенные к покрытию.

В пищевой отрасли загрязнение технологического оборудования частицами молока и биопленки являются распространенными проблемами в молочной

промышленности [14, 15]. Один из предлагаемых способов уменьшить загрязнение частицами молока и образование биопленок является изменение характеристик поверхностей, контактирующих с молоком. В исследовании [16] изучается возможность использования модификационной поверхности нержавеющей стали на основе золь-геля во время термической обработки молока для оценки обрастания и адгезии бактерий. Проведена оценка восприимчивости модифицированных образцов из нержавеющей стали к загрязнению в пластинчатом теплообменнике. Наблюдается значительное уменьшение количества загрязненного слоя на модифицированных поверхностях и их устойчивость к образованию биопленки. В целом модифицированная поверхность продемонстрировала хорошие результаты при термической обработке молока, обеспечивая значительно меньшее загрязнение и прилипание бактерий.

### ***Основная часть***

В данной работе авторами была изучена проблема загрязнения твердыми частицами целлюлозы поверхности теплообменного аппарата, внедренного на предприятии ООО «ПАЛП Инвест», г. Казань (рис.1). В процессе эксплуатации теплообменника, его поверхность покрывалась слоем осадка и конденсата, получаемого от парогазовой смеси. Вследствие данного процесса начали ухудшаться тепловые характеристики оборудования, а именно снижаться эффективность теплопередачи. Для того чтобы поддерживать значения коэффициентов теплопередачи оптимальными на протяжении всей работы теплообменника, необходимо реже проводить очистительные работы путем смывания водой слоев осадка. Так как эффективнее всего чаще проводить очистку, а не бороться с последствиями, то перед авторами возникает задача в выявлении режима работы аппарата и получении зависимостей для расчета времени, по истечению которого необходимо восстанавливать поверхность теплообмена путем смывания ее водой для дальнейшей ее эксплуатации.



Рис. 1. Внедренный теплообменный аппарат на предприятии «ПАЛП Инвест».

В ходе приведенного исследования была построена методики расчета режима восстановления поверхности. Для этого распределение потока тепла во времени прогнозировалось по графику на рисунке 2.

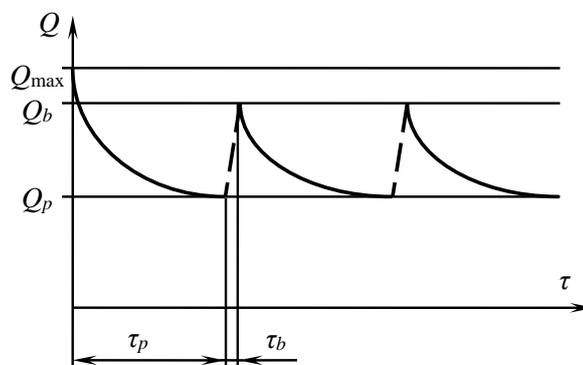


Рис. 2. График распределения теплового потока на оребренных трубах подверженных интенсивному загрязнению внешней поверхности

Из графика видно, что в начальный момент времени  $\tau = 0$  максимальный тепловой поток составляет  $Q_{\max}$ . Восстановление поверхности происходит за период времени  $\tau_p$ , когда тепловой поток уменьшается до значения  $Q_p$ . Так как очистка поверхности теплообменного оборудования осуществляется путем смывания отложений водой, то ее полное восстановление невозможно. Вследствие этого теплопередающая поверхность восстанавливается до значения  $Q_b$  за период времени  $\tau_b$ .

Тепловой поток за один цикл можно определить по формуле:

$$Q_1 = \int_0^{\tau_p} Q(\tau) d\tau \quad (1)$$

где  $\tau_p$  – время работы между процессами восстановления поверхности, с;  $Q(\tau)$  – зависимость теплового потока от времени, Вт.

### **Результаты**

Экспериментальные данные, полученные в ходе изучения осадений на теплообменнике, установленном на предприятии «ПАЛП Инвест» показывают, что осадок имеет симметричный профиль относительно оси труб. Данный механизм образования осадка свидетельствует о том, частицы целлюлозы перемещаются к поверхности теплопередачи вместе с каплями конденсирующегося пара. Поэтому поток массы частиц, осаждаемый к теплопередающей поверхности одинаковый по всем направлениям.

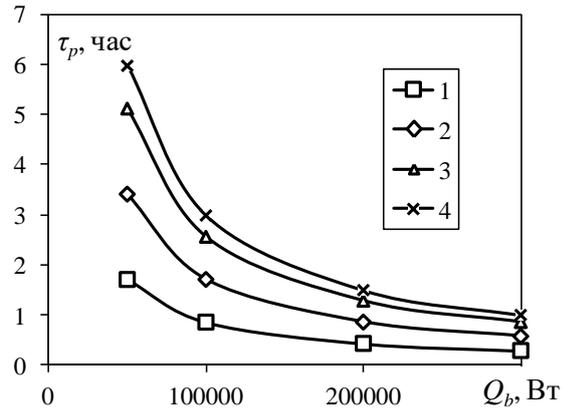


Рис. 3. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности.  $V_1$ , м<sup>3</sup>: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75.

В процессе восстановления поверхности путем смывания водой по графику, представленном на рисунке 3 видно, что с увеличением значения восстановленного теплового потока  $Q_b$  период  $\tau_r$  заметно снижается. Это объясняется тем, что необходимо снижать термическое сопротивление, которое создается слоем осадка. То есть для того, чтобы поддерживать тепловой поток, равный 50 кВт, необходимо смывать осадок каждые 6 часов, а для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут. В ходе исследования была получена зависимость от объема подаваемой воды на одну промывку. Например, подавая 0,5 м<sup>3</sup> воды необходимо повторять процедуру восстановления каждые 1,7 часов, а при 1,75 м<sup>3</sup> это значение составит 6 часов.

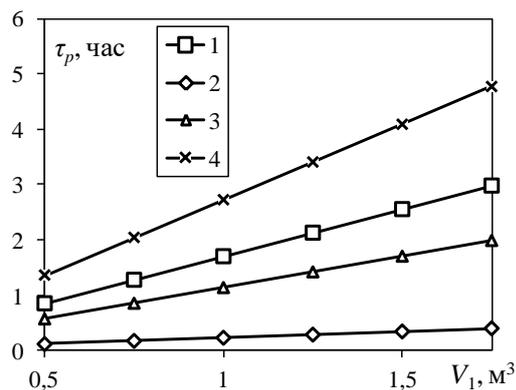


Рис.4. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды.  $PV_1$ , руб./м<sup>3</sup>: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Так как объем воды, затрачиваемый на восстановление поверхности, и ее стоимость являются не мало важными факторами, была получена соответствующая зависимость (рис. 4). Как показано на графике, если для одной промывки необходимо  $1,75 \text{ м}^3$  воды при ее стоимости  $100 \text{ руб./м}^3$ , то время работы между процессом восстановления составит  $0,44$  часа, а если стоимость увеличится в  $12$  раз, то и время, соответственно, должно быть увеличено примерно в  $12$  раз.

### ***Обсуждение и выводы***

Выявлено, что возможно существенное сокращение расхода воды на восстановление поверхности и увеличение эффективности использования теплообмена. Обнаружены условия, при которых наблюдается слабая зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности при высокой ее стоимости. оценочные расчеты показали, что время, через которое необходимо восстанавливать поверхность, может составлять  $6$  часов в диапазоне параметров, в которых производились расчеты.

### **Источники**

- [1] Khazhidinova A., Stepanova O., et al. // Heat Transfer Research. 2022. V. 53. №. 1.
- [2] Bujak J.W. // Energy. 2015. V. 90. P. 1721-1732.
- [3] Bansal B., Chen X.D. // Comprehensive reviews in food science and food safety. 2006. V. 5. №. 2. P. 27-33.
- [4] Young A. et al. // Heat Transfer Engineering. 2011. V. 32. №. 3-4. P. 216-227.
- [5] Schnöing L., Augustin W., Scholl S. // Food and Bioproducts Processing. 2020. V. 121. P. 1-19.
- [6] Kukulka D. J., Smith R. // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 61. №. 1. P. 60-66.
- [7] Kukulka D. J., Smith R., Li W. // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 89. P. 1079-1086.
- [8] Guo Z., et al. // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. V. 24. №. 1. P. 77-93.
- [9] Wang F. L., et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 104. P. 774-786.
- [10] Tang S. Z., et al. // Fuel. 2019. V. 251. P. 316-327.
- [11] Li J., Du W., Cheng L. // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 113. P. 1033-1046.
- [12] Mavridou S. G., Bouris D. G. // International journal of heat and mass transfer. 2012. V. 55. №. 19-20. P. 5185-5195.
- [13] Siebeneck K. et al. // Heat Transfer Engineering. 2017. V. 38. №. 7-8. P. 818-828.
- [14] Walmsley T. G., et al. // Advanced Powder Technology. 2013. V. 24. №. 4. P. 780-785.
- [15] Piepiórka-Stepuk J., Diakun J., Mierzejewska S. // Journal of cleaner production. 2016. V. 112. P. 946-952.
- [16] Liu D. Z. et al. // Journal of dairy science. 2017. V. 100. №. 4. P. 2577-2581.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ В РАБОТУ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Варганова Ангелина Михайловна<sup>1</sup>, Закиров Ринат Нургалиевич<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup>linavrgnv@gmail.com, <sup>2</sup>askar-zrn@mail.ru

***Аннотация:** в данной работе предложен способ повышения эффективности систем теплоснабжения за счет применением инновационных технологий в условиях цифровизации энергетики. Предлагается проектировать в новых многоквартирных домах современные системы отопления с горизонтальной лучевой разводкой для возможности установки поквартирных приборов учета тепловой энергии, а также использование интеллектуальной системы регулирования потребления теплоты.*

***Ключевые слова:** цифровизация, теплоснабжение, жилищно-коммунальное хозяйство, система отопления, горизонтальная разводка, теплосчетчик.*

## POSSIBILITY OF INTRODUCING DIGITALIZATION INTO THE OPERATION OF HEATING SYSTEMS AT HOUSING AND UTILITIES

Varganova Angelina Mikhailovna<sup>1</sup>, Zakirov Rinat Nurgalieovich<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>linavrgnv@gmail.com, <sup>2</sup>askar-zrn@mail.ru

***Abstract:** in this paper, a method is proposed to improve the efficiency of heat supply systems through the use of innovative technologies in the context of digitalization of the energy sector. It is proposed to design modern heating systems with horizontal beam distribution in new apartment buildings for the possibility of installing apartment-by-apartment heat energy meters, as well as the use of an intelligent heat consumption control system.*

***Key words:** digitalization, heat supply, housing and communal services, heating system, horizontal wiring, heat meter.*

### **Введение**

Развитие отрасли ЖКХ в современном мире направлено на усовершенствование систем теплоснабжения за счет создания интеллектуальной системы, которая поможет более точно контролировать потребление тепловой энергии дистанционно. Под цифровизацией

понимается простое преобразование информации в цифровую форму. Информация в цифровом формате позволяет достаточно легко обеспечивать её сохранность, защищённость, оперативное копирование и распространение без потери точности, возможность переработки огромных массивов данных [1].

### ***Основная часть***

Эффективно работающая система отопления на объектах жилищно-коммунального хозяйства является важной составляющей для поддержания комфортного микроклимата в помещениях. Согласно Постановлению Правительства РФ № 354 от 06.05.2011 г. «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов», нормативная температура воздуха в жилых помещениях устанавливается не ниже  $+18^{\circ}\text{C}$  (в угловых комнатах  $+20^{\circ}\text{C}$ ), в районах с наиболее холодной пятидневкой (обеспеченностью 0,92)  $-31^{\circ}\text{C}$  и ниже, температурный режим устанавливается  $+20^{\circ}\text{C}$  (в угловых комнатах  $+22^{\circ}\text{C}$ ). Однако нарушением считается невыполнение нормативного, а не комфортного теплового режима, что является большим плюсом для ресурсоснабжающей организации. Превышение нормативных значений температуры отапливаемых помещений допустимо, но не более  $4^{\circ}\text{C}$ , исходя из этого ресурсоснабжающая организация чаще всего подает теплоноситель с завышенной температурой, что не всегда хорошо для потребителей, ведь оплачивать они будут по показаниям приборов учета за потребленную тепловую энергию, которая им не нужна.

Для предотвращения перетопа и температуры воздуха в помещении ниже  $18^{\circ}\text{C}$  в настоящее время проектируются современные отопительные приборы с автоматическими терморегуляторами на основе «Умный дом», а для индивидуального учета тепловой энергии устанавливаются поквартирные счетчики (рис. 1) на отопление в распределительных коллекторах на этажах многоквартирного дома, что возможно только при горизонтальной разводке.



Рис. 1. Автоматизированная система учета тепловой энергии в распределительных коллекторах

Горизонтальная схема предполагает наличие одного главного стояка и поэтажных горизонтальных ответвлений в однотрубном или двухтрубном исполнении, бывает периметральная или лучевая (рис. 2).

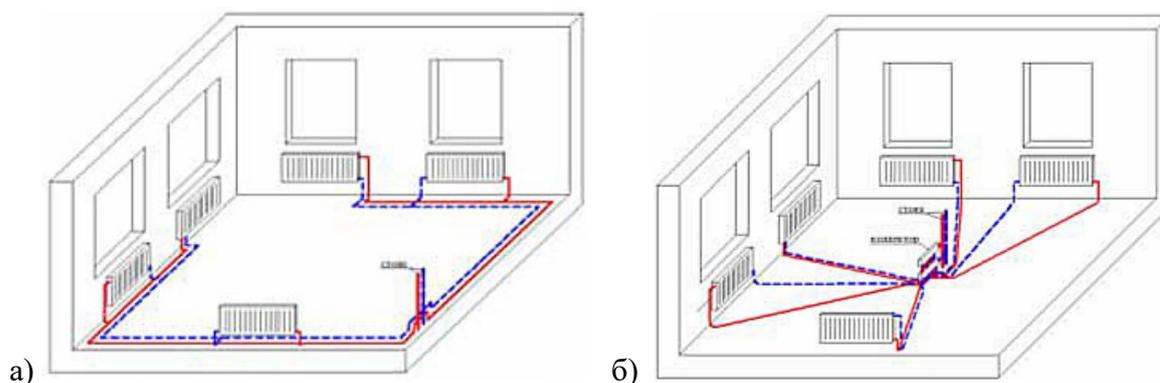


Рис. 2. Горизонтальная разводка системы отопления:  
а) периметральная или тройниковая; б) лучевая (коллекторная)

Периметральная характеризуется поэтапным движением по всем радиаторам отопления в пределах периметра этажа или квартиры. Подключение осуществляется к центральному стояку отопления. Тройниковая разводка более привычная и требует меньшего метража труб, но при этом соединений и фитингов потребуется больше. В случае ремонта отдельного отопительного прибора необходимо отключение всего периметра. Достоинством такой системы является возможность скрытой разводки.

Лучевая (коллекторная) разводка системы отопления предполагает параллельное подключение отопительных приборов к распределительному коллектору. От каждого его узла к радиатору отдельно идут две трубы: подающая и обратная. Сам коллектор является крупногабаритной техникой, поэтому в большинстве случаев его предпочитают размещать в специальном шкафу [2].

Основой горизонтальной разводки является подающий стояк, проходящий через все этажи. К стояку подключаются лежаки, подающие тепло в отдельные квартиры. Использование горизонтальной разводки требует тщательного утепления стояка, так как здесь возникают значительные теплопотери. Для максимально возможного сокращения потерь тепла стояки нередко устанавливают в специально оборудованных шахтах. При двухтрубной коллекторной поэтажной системе на каждом этаже монтируется по два коллектора на квартиру - подающий и обратный, а уже от них идут трубопроводы, подводящие теплоноситель к радиаторам (рис. 3.).



Рис. 3. Распределительный коллектор горизонтальной лучевой системы отопления, установленный в техническом помещении этажа многоквартирного жилого дома

В отличие от традиционных вариантов, коллекторная поэтажная схема обладает значительной протяженностью трубопровода. Учитывая, что для монтажа схемы применяются металлопластиковые трубы, реализация такого проекта оказывается дороже обычных вариантов. Несмотря на этот недостаток коллекторные схемы с точки зрения эксплуатационных особенностей значительно эффективнее и проще других вариантов: тепловые показатели обеспечивают максимально комфортный микроклимат в квартире, а при установке умных регуляторов можно задать комфортную температуру воздуха в помещении, которая будет поддерживаться автоматически, что подразумевает в дальнейшем экономию и эффективное расходование средств. В целом монтаж дорогостоящей коллекторной схемы окупается в течение 2–3 отопительных сезонов [2].

Помимо экономических и эксплуатационных преимуществ горизонтальных двухтрубных коллекторных систем нельзя не отметить эстетичность: все трубопроводы прокладываются в стяжке пола (рис. 4). Укладка труб в стяжку возможна благодаря применению современных материалов - пластика и металлопластика.



Рис. 4. Монтаж горизонтальной лучевой системы отопления в помещениях многоквартирного жилого дома

Проектирование горизонтальной системы отопления для автоматизированного учета тепловой энергии управляющих компаний и других ресурсоснабжающих организаций подразумевает:

- сбор показаний с теплосчетчиков;
- ведение архивов потребления ресурсов;
- формирование отчетов различного вида;
- осуществление технологического контроля параметров энергосбережения;
- мониторинг нештатных ситуаций.

Счетчики тепла «Пульсар» устанавливаются в трубопровод, обеспечивающий теплоснабжение объекта, и представляют собой компактный прибор, предназначенный для учета расхода тепловой энергии в квартире, частном доме, небольшом офисном или торговом помещении (рис. 1). Программное обеспечение PULSAR SET осуществляет подбор отопительных приборов, диаметров трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры; определяет настройки балансировочных клапанов, клапанов терморегуляторов на подводках к отопительным приборам; позволяет использовать несколько источников тепла в одном проекте, что применимо при проектировании, например, четырехтрубных систем [3].

Монитор нештатных ситуаций позволяет диспетчеру отслеживать аварии и протечки, возникающие на объектах в режиме реального времени, в том числе в виде мнемосхем.

### ***Выводы***

Цифровизацией в работе систем отопления является перевод информации в цифровую форму и создание высокоэффективных систем управления, позволяющих повысить эффективность экономики и качество жизни граждан за счет проектирования в новых МКД современных систем отопления с умными терморегуляторами и горизонтальной разводкой, позволяющей установить поквартирные автоматизированные счетчики тепловой энергии.

Для цифровизации в сфере теплоснабжения применяется следующее оборудование: специализированные контрольно-измерительные приборы и контроллеры для управления системами отопления, ГВС, насосами и т.д.;

датчики температуры, давления, комплекты термосопротивлений;

частотные преобразователи;

средства диспетчеризации: модемы, преобразователи интерфейсов, коммуникационные контроллеры [4].

### **Источники**

[1] Семенов В.Г. Цифровизация ЖКХ. Тезисы для «Стратегии развития ЖКХ на период до 2035 года» Источник: Некоммерческое Партнерство «Российское тепло-снабжение», [www.rosteplo.ru](http://www.rosteplo.ru)

[2] Запольская И. Н. Влияние индивидуальных водо-водяных подогревателей на потребление тепловой энергии многоквартирными домами / И.Н. Запольская // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 146-155.

[3] Горизонтальная разводка системы отопления в многоквартирном доме // Всё об отоплении 2022 [Электронный ресурс] URL: <https://teplosten24.ru/gorizontalnaya-razvodka-sistemy-otopleniya-v-mnogokvartirnom-dome.html>.

[4] Оморов Т. Т. Методика идентификации параметров магистральной линии распределительной сети по данным АСКУЭ / Т. Т. Оморов, Р. Ч. Осмонова, Б. К. Такырбашев, Ж. С. Иманакунова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 168-177.

[5] Программный комплекс «Пульсар» // Тепловодохран, 1997-2022 [Электронный ресурс] URL: <https://pulsarm.ru/programmnoe-obespechenie/programmnyu-kompleks-pulsar/>

[6] Варганова А.М. Повышение эффективности работы систем отопления // VI Всероссийская научно-практическая конференция «ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» 104-1 // 8-10 декабря 2021г

## РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ Г. КАЗАНЬ

Вьюгова Ксения Дмитриевна<sup>1</sup>, Зверева Эльвира Рафиковна<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань,  
Российская Федерация

<sup>1</sup>vjugova.k@yandex.ru, <sup>2</sup>belvira6@list.ru

***Аннотация.** С развитием науки и техники обостряется вопрос защиты окружающей среды. Растет загрязнение воздуха, окружающего человека, ввиду токсичных выбросов промышленных предприятий. Загрязнения воздушного бассейна предприятиями топливно-энергетического комплекса являются наиболее распространенным явлением. Особое место занимают выбросы оксидов азота, возникающие при сгорании любых видов органических топлив ТЭС. Целью данной статьи было исследование образующихся при горении топлива оксидов азота в котельной г. Казань. Был проведен расчет, по результатам которого сделаны выводы о количестве выбросов оксида азота, их соответствии ГОСТ 13. 38. 02- 2019.*

***Ключевые слова:** оксиды азота, котельные агрегаты, тепловые электрические станции, защита окружающей среды.*

## CALCULATION OF THE AMOUNT OF NITROGEN OXIDE EMISSIONS FOR BOILER HOUSES IN KAZAN

Vyugova Ksenia Dmitrievna <sup>1</sup>, Zvereva Elvira Rafikovna <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

ova.k@yandex.ru, <sup>2</sup>belvira6@list.ru

***Annotation.** With the development of science and technology, the issue of environmental protection is becoming more acute. Air pollution surrounding humans is increasing due to toxic emissions from industrial enterprises. Pollution of the air basin by enterprises of the fuel and energy complex is the most common phenomenon. A special place is occupied by emissions of nitrogen oxides arising from the combustion of any types of organic fuels of thermal power plants. The purpose of this article was to study the nitrogen oxides formed during the combustion of fuel in the boiler room of Kazan. Gorenje. A calculation was carried out, based on the results of which conclusions were made about the amount of nitrogen oxide emissions, their compliance with GOST 13. 38. 02- 2019.*

*Key words: nitrogen oxides, boiler units, thermal power plants, environmental protection.*

## **Введение**

Охрана окружающей среды – одна из первичных задач современного человека. Развитие промышленности тесно коррелирует с вопросами выбросов вредных веществ в среду. Антропогенное воздействие, эвтрофикация – все это стало продуктами жизнедеятельности человека.

Одним из источников вредных выбросов, несомненно, является топливно-энергетический комплекс, а главенствующую роль занимают тепловые электрические станции. На ТЭС приходится около 70 % отпуска токсичных веществ, при производстве всего 20 % энергии. [1]

Особое внимание в энергетике уделяется выбросам  $CO_2$  и  $NO_x$ , последнее из которых стало объектом данного исследования.

Оксиды азота – монооксиды и диоксиды ( $NO_x = NO + NO_2$ ), образуются при сжигании всех видов топлива в котлах ТЭС. Стоит отметить, что оксиды поступают в атмосферу преимущественно в виде  $NO$ , однако большая часть выбросов (около 80 %) доокисляется в атмосфере до диоксидов. Источниками являются: азот, находящийся непосредственно в воздухе, а также азотсодержащие компоненты органической массы топлива.

Количество выбросов оксида азота зависит от множества факторов: видов топлива, способов организации топочных процессов, степени очистки уходящих газов. Здесь следует отметить, что количество выбросов строго регламентируется нормативно-технической документацией для каждой ТЭС и их совокупности. При превышении заданных норм проводится комплекс мероприятий, аппаратами которых являются: ступенчатое или стехиометрическое сжигание, оптимизация процессов горения.

На данный момент существуют множество способов снижения выбросов окисей азота. Приведем некоторые из них:

1. Рециркуляция продуктов сгорания, включающая в себя подвод топочных газов в зону горения. (Уменьшение концентрации  $NO_x$  объясняется снижением температуры горения из-за уменьшения скоростей цепных реакций, которые, в свою очередь, обуславливаются присутствием инертных газов.) [2,3]

2. Ступенчатое (обычно из 2-х ступеней) сжигание. Процесс горения здесь организуется, когда через горелки с топливом подается воздух, количество которого меньше стехиометрического, остальная же часть вводится в топочную камеру по длине факела.

3. Сгорание обогащенных смесей или деазотирование топлива. При уменьшении содержания азота в топливе на 18 %, количество выбросов снижается на 50 %.

## Основная часть

С целью оценки соответствия регламентированного количества выбросов, был выполнен расчет котельной г. Казани, содержащей 4 котла типа ТГМ-84Б, имеющий П-образную компоновку и состоящий из топочной камеры и опускной конвективной шахты, разделенной на два газохода. Технические характеристики котла представлены в табл.1.

Таблица 1.

Технические характеристики котлоагрегата ТГМ-84Б

Номинальная паропроизводительность	420 т/ч
Номинальное давление пара за котлом	13,72 МПа
Номинальное давление пара в барабане	15,20 МПа
Номинальная температура пара за котлом	560 °С
Номинальная температура питательной воды	230 °С

Схема котлоагрегата изображена на рис. 1.

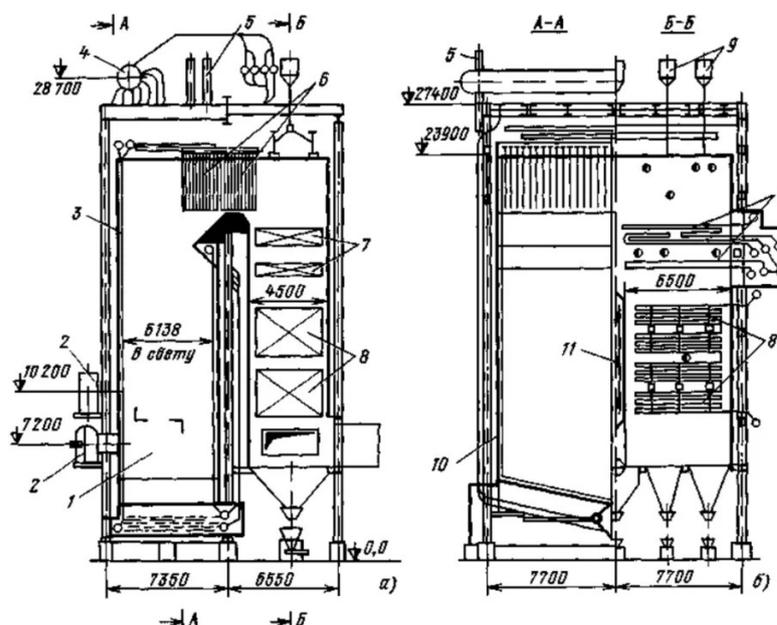


Рис.1. Газомазутный паровой котел ТГМ-84Б  
а – продольный разрез, б – поперечный разрез

1 – топка, 2 – горелки, 3 – радиационный настенный пароперегреватель, 4 – барабан, 5 – устройства сепарации пара от влаги, 6 – ширмы пароперегревателя, 7 – конвективная часть пароперегревателя, 8 – водяной экономайзер, 9 – дробеструйная установка, 10 – боковой экран испарительной поверхности нагрева, 11 – двухсветный экран.

Топливо котельной – мазут.

Метод расчета выполнена согласно [4]. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Исходные данные для расчета выбросов котлоагрегата ТГМ-84Б

Наименование	параметр	Единица измерения
Фактический расход топлива	28,8	$\frac{m}{ч}$
Потери тепла от механической неполноты сгорания	2	%
Низшая теплота сгорания топлива	33,9374	$\frac{МДж}{кг}$
Фактическая производительность котла	116,7	$\frac{m}{ч}$
Степень рециркуляции дымовых газов	30	%
Температура горячего воздуха	268	°C
Доля воздуха, подаваемого в промежуточную зону факела	20	%

Суммарное количество оксидов азота  $NO_x$  в пересчете на  $NO_2$ , выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, определяется по формуле:

$$M_{NO_x} = B_r \cdot Q_1^r \cdot K_{NO_2}^M \cdot \beta_t * \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_2) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_n \quad (1)$$

где  $B_r$  – расчетный расход топлива на котел,

$$B_r = B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad (2)$$

где  $B$  – фактический расход топлива, ( $m/g \text{ o } \delta$ )

$q_4$  – потери тепла от механической неполноты сгорания ;

$\beta_\alpha$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов азота при сжигании мазута. Ввиду работы котла в соответствии с режимной картой  $\beta_\alpha = 1$ ;

$Q_1^r$  – низшая теплота от механической неполноты сгорания топлива ;

$K_{NO_2}^M$  – удельный выброс оксидов азота при сгорании мазута; ( $l/l$ )

Для паровых котлов:

$$K_{NO_2}^M = 0,01 \cdot \sqrt{D} + 0,1 \quad (3)$$

где  $D$  – фактическая паропроизводительность котла;

$\beta_t$  – безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения, определяется по формуле:

$$\beta_t = 1 + 0,02 \cdot (t_{zg} - 30) \quad (4)$$

При подаче газов рециркуляции в смеси с воздухом:

$$\beta_\delta = 0,17 \cdot \sqrt{r} \quad (5)$$

где  $r$  – степень рециркуляции дымовых газов ;

$\beta_\delta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру:

$$\beta_{\delta} = 0,018 \cdot \delta$$

(6)

где  $\delta$  – доля воздуха, подаваемого в промежуточную зону факела;

$k_n$  – коэффициент пересчета;

Для определения выбросов в тоннах в год:

$$k_n = 10^{-3}$$

### **Выводы**

При численном вычислении количество выбросов оксидов азота составило:  $M_{NO_x} = 176,8 \text{ т/год}$ , что удовлетворяет ГОСТ Р 113.38.02 – 2019 [5].

### **Источники**

[1] Pamathi, Petchi Muthu K., Selladurai and Kulendran Balamurugan. “Predictive Modelling and Optimization of Power Plant Nitrogen Oxides Emission.” (2012).

[2] Мехтиев А. Д. Энергоустановка на базе свободнопоршневого двигателя и генератора возвратно-поступательного перемещения / А. Д. Мехтиев, Д. Л. Калужский, Е. Г. Нешина [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 178-188.

[3] Жуйков А.В., Кулагин В.А., Радзюк А.Ю. Способ уменьшения выбросов оксидов азота от котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на ирша-бородинских углях// Промышленная энергетика. 2011. No8. С. 9-11.

[4] G. Jarquin-López, G. Polupan, M. Toledo-Velázquez, R. Lugo-Leyte, Analytical and experimental research for decreasing nitrogen oxides emissions, Applied Thermal Engineering, Volume 29, Issues 8–9, 2009, Pages 1614-1621.

[5] Генбач А. А. Пути повышения эффективности охлаждения камер сгорания и сопел ГТУ / А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, И.К. Илиев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 114-134.

[6] РД 34.02.305-98 Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС.

[7] ГОСТ Р 113.38.02-2019 Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по оценке затрат предприятий электроэнергетики по снижению выбросов загрязняющих веществ для достижения ими технологических показателей наилучших доступных технологий.

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ

Гатауллина И.М.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Россия  
*ttolin@inbox.ru*

*Аннотация.* Высокая надежность и экономичность энергоснабжения городов и промышленных объектов во многом зависит от своевременной оценки фактического технического состояния энергетических коммуникаций, самыми распространенными из которых являются различные трубопроводы. Своевременная и качественная оценка их технического состояния является приоритетным мероприятием обеспечения безаварийной работы и надежной эксплуатации таких энергосистем.

*Ключевые слова:* энергетические коммуникации, диагностика, неразрушающий контроль, виброакустические колебания, теплоноситель, дефект.

## ON THE ISSUE OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ENERGY COMMUNICATIONS

Gataullina I.M.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan  
*ttolin@inbox.ru*

*Annotation.* The high reliability and efficiency of energy supply to cities and industrial facilities largely depends on the timely assessment of the actual technical condition of energy communications, the most common of which are various pipelines. Timely and high-quality assessment of their technical condition is a priority measure to ensure trouble-free operation and reliable operation of such power systems.

*Key words:* energy communications, diagnostics, non-destructive testing, vibroacoustic oscillations, coolant, defect.

### **Введение**

Стремительное развитие новейших теплоэнергетических технологий однозначно очерчивает круг необходимых мероприятий, направленных на повышение надежности и безаварийности эксплуатации энергетического оборудования, среди которого различные энергетические трубопроводы являются одним из основных элементов.

Одним из наиболее востребованных элементов теплоэнергетического оборудования выступают различные энергетические коммуникации. Оценка технического состояния средств транспортировки тепловых носителей проводится различными методами, основанными на разных физических явлениях с разнообразным приборным обеспечением [1]. К основным методам относятся: проведение внутренней диагностики трубного пространства, проведение шурфовок, тепловой контроль с помощью контактного или бесконтактного термографирования, диагностика магнитометрическими методами, оценка прочностных характеристик и т.д. Однако необходимо отметить, что в этом случае происходит контроль только локальных участков, ограниченных конструктивными особенностями применяемых методов, при этом также существенными недостатками является необходимость вывода оборудования из режима эксплуатации наряду с высокой стоимостью применяемого оборудования, необходимости привлечения специально обученного технического персонала и длительного процесса получения результатов контроля [2].

Все это обуславливает актуальность проблемы диагностирования применением перспективных методов неразрушающего контроля, к которым относится анализ виброакустических колебаний стенок трубопроводов [3].

### ***Основная часть***

В процессе эксплуатации одной из возможных причин колебаний элементов и узлов энергетических коммуникаций могут быть различные динамические нагрузки. При этом вследствие взаимодействия внутреннего слоя трубопровода при относительном скольжении теплоносителя относительно микро-шероховатой неподвижной поверхности, возникает усталостный износ, который приводит к увеличению микротрещин в материале и увеличению уровня вибрации [4]. Оценка параметров этой вибрации позволяет оценить наличие и размер внутренних дефектов поверхности исследуемого трубопровода.

При проведении виброакустической диагностики вибрации в объекте являются не только помехой, которую необходимо подавить, но и источником полезной информации. В связи с этим возможно измерение параметров как акустических, так и вибрационных колебаний. Учитывая сказанное, измерению и анализу возможно подвергать и те и другие виды колебаний.

Вибрационные колебания стенок энергетических трубопроводов регистрируют с помощью вибродатчика, установленного непосредственно на объекте контроля. Возможна установка нескольких датчиков на определенном расстоянии, обеспечивающем нормальное прохождение вибрационного сигнала по стенкам трубопровода. Здесь все необходимые параметры извлекается из зарегистрированного упругого колебания оболочки трубопровода, которое распространяется во всей длине

объекта во время вибрационного воздействия. Таким образом обеспечивается достаточно протяженная область диагностики [5].

Регистрация параметров колебаний производится с помощью различных вибрационных датчиков, записанные сигналы обрабатываются различными методами.

Если полезный сигнал, получаемый с датчика, имеет слишком низкую амплитуду, необходимо его усилить. Для этого необходимо использовать различные усилители, такие как дифференциальные, основным преимуществом которого является в компенсации помех, в том числе синфазных. В настоящее время широко распространено применение вибрационных регистраторов со встроенным предусилителем, источником питания которого является сигнальный провод, что значительно упрощает работу с таким датчиком.

Что касается способов обработки полезного сигнала, то наиболее распространенным и хорошо изученным является спектральный анализ параметров вибрационных колебаний. Здесь под спектром вибрационных колебаний подразумевается временная совокупность зависимостей изменения частоты и амплитуды колебания в порядке возрастания собственных частот исследуемого колебания.

В тоже время под энергетическим спектром понимают спектр колебаний, в котором величинами, характеризующими гармонические составляющие колебаний, являются квадраты амплитуд скорости, характеризующие удельную энергию указанных составляющих. В итоге спектр образуется из собственных частот анализируемой линейной системы.

Возможно применение гармонического анализа взамен спектрального. В этом случае анализ параметров вибрации производится в построении суммы гармонических колебаний. При этом применяют понятие номера гармоники – как целое число, получаемое отношением частоты этой гармоники к анализируемой частоте.

В частном случае проведения диагностических операций при отдельных неисправностях применяют построение и анализ огибающей вибрационного сигнала. Здесь для надежного определения огибающей необходимо применять фильтрацию высокочастотной составляющей полезного сигнала и детектирования сигнала в области низких частот.

К информативным параметрам виброакустических сигналов, получаемым с помощью вибродатчика, относятся частота, амплитуда и фаза колебаний. В нашем случае используются первые два параметра, фаза не используется в связи с отсутствием эталонного сигнала [6].

### ***Результаты и выводы***

Экспериментальные исследования проводились на трубопроводе диаметром 72 мм и толщиной стенки 4 мм. В результате получена зависимость изменения

собственной частоты нагруженного дефектного и бездефектного трубопроводов. Наличие дефекта привело к снижению собственной частоты в диапазоне от 1500 до 6000 Гц на таких основных модах, как 3860 Гц и 4890 Гц.

В результате можно сделать вывод, что виброакустическая диагностика трубопроводов является одним из наиболее приемлемых способов неразрушающего контроля и оценки технического состояния протяженных энергетических коммуникаций.

### Источники

[1] Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом / М. В. Акутин, Ю. В. Ваньков, А. Е. Кондратьев, Ю. Я. Петрушенко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 2. – С. 55-57.

[2] Митрофанов С. В. Разработка программного модуля внутростанционной оптимизации для целей краткосрочного планирования режима работы ГЭС / С. В. Митрофанов, А. Е. Светличная, А. Ю. Арестова, А. Г. Русина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 156-167.

[3] Загретдинов, А. Р. Разработка прибора и методики ударно-акустического контроля многослойных композиционных конструкций / А. Р. Загретдинов, А. Е. Кондратьев, Ю. В. Ваньков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9-10. – С. 97-104. – EDN RUHUDR.

[4] Vankov Yu V and Kondrat'ev A E, 2004 Pribory i Sistemy Upravleniya (2) 45-53

[5] Разработка методики определения размера коррозионного поражения оболочек акустическим методом / Ш. Г. Зиганшин, Ю. В. Ваньков, А. Е. Кондратьев, С. П. Кузнецов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 1(57). – С. 36-38. – EDN JWBVZB.

[6] Оморов Т. Т. Методика идентификации параметров магистральной линии распределительной сети по данным АСКУЭ / Т. Т. Оморов, Р. Ч. Осмонова, Б. К. Такырбашев, Ж. С. Иманакунова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 168-177.

[7] Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes / S. O. Gaponenko, R. Z. Shakurova, A. E. Kondratiev, R. Dimova // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 18–20 сентября 2019 года. – Kazan: EDP Sciences, 2019. – P. 01021. – DOI 10.1051/e3sconf/201912401021. – EDN UXIYTB.

[8] Загретдинов, А. Р. Аппаратно-программное обеспечение ударно-акустического контроля композиционных конструкций / А. Р. Загретдинов, А. Е. Кондратьев, Ш. Г. Зиганшин // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4-1(31). – С. 27.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРФА В МИРОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ

<sup>1</sup>Дремичева Елена Сергеевна, <sup>2</sup>Зверева Эльвира Рафиковна, <sup>3</sup>Эминов Абдысердар  
<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Рос-  
сийская Федерация

<sup>1</sup>lenysha@mail.ru, <sup>2</sup>belvira6@list.ru, <sup>3</sup>kfu.kazan@mail.ru

**Аннотация:** в условиях кризиса нефтегазового комплекса в мире обостряются энергетические проблемы. В этой связи с целью решения экономических проблем и перехода на «зеленую» энергетику все более актуален становится поиск доступных возобновляемых экологических топливных источников. Это обуславливает возвращение интереса к торфу как к топливу. Поэтому возникла необходимость в инвентаризации торфяного фонда, а также оценке современного состояния торфяных ресурсов и перспектив развития отрасли в регионах. Цель работы заключается в определении перспектив торфа в биоэнергетике. Вопрос поиска энергетической перспективы и альтернатив нефтегазовой действительности в мире приобретает исключительную актуальность. Богатство Российской Федерацией нефтью и газом, однако снижение цен на черное золото активизируют необходимость поиска новых источников энергии и перехода на биоэнергетику.

**Ключевые слова:** торфяные ресурсы, анализ, обезвоживание, слои торфа, торф, биоэнергетика.

## PROSPECTS FOR THE USE OF PEAT IN THE WORLD ENERGY BAL- ANCE

<sup>1</sup>Dremicheva Elena Sergeevna, <sup>2</sup>Zvereva Elvira Rafikovna, <sup>3</sup>Eminov Abdyserdar.

<sup>1,2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

<sup>1</sup>lenysha@mail.ru, <sup>2</sup>belvira6@list.ru, <sup>3</sup>kfu.kazan@mail.ru

**Abstract:** The conditions of the crisis of the oil and gas complex in the world, energy problems are aggravated. In this regard, in order to solve economic problems and switch to "green" energy, the search for affordable renewable environmental fuel sources is becoming increasingly important. This causes a return of interest in peat as a fuel. Therefore, there was a need for an inventory of the peat fund, as well as an assessment of the current state of peat resources and the prospects for the development of the industry in the regions. The purpose of

*the work is to determine the prospects for peat in bioenergy. The issue of searching for promising prospects for the oil and gas industry in the world is becoming extremely relevant. The wealth of the Russian Federation in oil and gas, however, the decline in black gold prices will intensify the search for new energy sources and the transition to bioenergy.*

**Keywords:** *peat resources, analysis, dehydration, peat layers, peat, bioenergetics.*

## **Введение**

Установленные в 2015 г. Генеральной ассамблеей ООН цели устойчивого развития нацелены на улучшение благосостояния и защиту нашей планеты. Всего принято 17 целей устойчивого развития, и цель №7 касается энергетики, а именно обеспечения всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех.

Биоэнергетика – это отрасль альтернативной энергетики, основанная на использовании биотоплива, производимого из биомассы. В свою очередь, биомасса восстанавливается в виде вещества органического происхождения, включающее отходы сельского, лесного хозяйства и т.д.

Нами проведена оценка потенциала биомассы для наращивания энергетических мощностей. Из данного анализа следует, что в общем потенциале биомассы для наращивания энергетического потенциала наибольший удельный вес занимают солома зерновых культур (23,1 %), и энергетические культуры (ива, тополь, мискантус) – 21,1 %; а наименьший удельный вес – биогаз из сточных вод (0,8 %).

## **Основная часть**

Оценка потенциала биомассы для наращивания биоэнергетических мощностей в Российской Федерации.

Россия относится к странам с высоким уровнем накопления торфа (более 35 % запасов торфа находится в недрах РФ). Основными источниками торфа выступают недра Западно-Сибирского экономического района (около 103,9 млрд т), Северо-Западного экономического района (около 19,8 млрд т), Уральского округа (около 9,1 млрд тонн), также значительные запасы расположены в Дальневосточном и Центральном (приблизительно 5,2 млрд тонн) экономических районах [5].

Далее была проведена оценка количество полученной от сжигания торфа энергии:

$$Q = m \cdot q, \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия топлива (кВт);  $m$  – масса топлива (кг);  $q$  – удельная теплота сгорания (кВт/кг).

Эквивалентное количество природного газа, необходимого для получения такого же количества теплоты сгорания:

$$\rho \cdot q = \frac{Q}{V}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность топлива,  $V$  – объем топлива.

Для расчета экономии от сжигания торфа вместо сжигания природного газа использовалась формула:

$$C = P_{\text{пр.газ}} \cdot V, \quad (3)$$

где  $C$  – стоимость природного газа, необходимого для получения энергии;  $P_{\text{пр.газ}}$  – цена за  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

### **Выводы**

Таким образом, пользуясь данной методикой можно оценить экономию предприятия от использования торфа производства в качестве топлива. Нами проведена оценка потенциала биомассы для наращивания биоэнергетических мощностей [4]. Следовательно, в общем потенциале биомассы для наращивания энергетического потенциала наибольший удельный вес занимают солома зерновых культур – 23,1%; энергетические культуры (ива, тополь, мискантус) – 21,1%; а наименьший удельный вес занимают биогаз из сточных вод – 0,8%. Учитывая вышеперечисленное, развитие энергетики оказывает значительное влияние на возможности реализации мер направленных на переход к сбалансированному развитию, сочетанию экономических, социальных и экологических приоритетов. Анализ топливной составляющей производства тепловой энергии и коэффициенты для расчета выбросов  $\text{CO}_2$  в Российской Федерации брикетного торфа и фрезерного торфа указывает на возможности снижения углеродного следа, как при его производстве, так и его использования.

Учитывая высокую зависимость Российской Федерации от доходов нефтегазового комплекса, очевидно, что использование биомассы является серьезным средством не только усиления экономической безопасности страны, а снижения нагрузки на экологию Российской Федерации путем снижения углеродного следа. Учитывая вышеперечисленное развитие энергетики развитие торфяной промышленности оказывает значительное влияние на возможности реализации мер, направленных на переход к сбалансированному развитию, сочетанию экономических, социальных и экологических приоритетов.

### **Источники**

[1] Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/>.

[2] Тимофеева С. С. Термохимическая переработка низкосортного торфа на основе газификации / С. С. Тимофеева, Ю. В. Караева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 15-26.

[3] Распоряжение Правительства РФ от 01.06.2021 N 1447-р (ред. от 14.09.2021) «Об утверждении Плана мероприятий по реализации Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года»

[4] Дремичева Е. С. Перспективы использования загрязненного нефтепродуктами торфа в энергетике / Е. С. Дремичева, А. Эминов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 133-141.

[5] Технологическая Платформа «БИОЭНЕРГЕТИКА» Стратегическая Программа Исследований–2021. 2021. 227 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi\\_bioenergy\\_2021.pdf](http://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi_bioenergy_2021.pdf).

[6] Дремичева Е.С., Эминов А. Перспективы использования загрязненного нефтепродуктами торфа в энергетике // Вестник КГЭУ. 2021. Т. 13. № 2 (50). С. 133-141.

## ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА В СИСТЕМЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Дятлова<sup>1</sup> Д.В., Подыганова<sup>2</sup> К.Е., Савельева<sup>3</sup> Д.С.

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

<sup>1</sup>dyatlovadarya89@gmail.com, <sup>2</sup>Ksyhaway@yandex.ru, <sup>3</sup>savelievadiana218@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам надежности и качества работы теплоэлектростанций и ее безопасности. На сегодняшний день эта тема является одной из наиболее актуальных в вопросах теплоэнергетики. В статье подробно рассматриваются наиболее пожароопасные отделения теплоэлектростанций и причины возникновения пожара в них. Приводится статистика аварий за последние 30 лет, а также их последствия. Предоставляются меры по сокращению рисков возникновения аварийных ситуаций на теплоэлектростанциях, принятые государством.

**Ключевые слова:** теплоэлектростанция, энергетика, авария, риск, пожар, оборудование.

## RELIABILITY AND QUALITY PROBLEM IN THE HEAT POWER SYSTEM

Dyatlova<sup>1</sup> D.V., Podyganova<sup>2</sup> K.E., Savelyeva<sup>3</sup> D.S.

<sup>1,2,3</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>dyatlovadarya89@gmail.com, <sup>2</sup>Ksyhaway@yandex.ru, <sup>3</sup>savelievadiana218@gmail.com

**Annotation.** The article is devoted to the issues of reliability and quality of operation of thermal power plants and its safety. To date, this topic is one of the most relevant in matters of thermal power engineering. The article discusses in detail the most fire hazardous departments of thermal power plants and the causes of a fire in them. The statistics of accidents over the past 30 years, as well as their consequences, are given. Measures are provided to reduce the risks of emergencies at thermal power plants, taken by the state.

**Key words:** thermal power plant, energy, accident, risk, fire, equipment.

### Введение

Теплоэнергетика – одна из ведущих отраслей энергетики как в России, так и в мире. Россия занимает четвертое место по количеству выработанной электроэнергии в мире в 2020-ом году. Большая часть вырабатываемой электроэнергии приходится именно на теплоэнергетику. По статистике, в России суммарная установленная электрическая мощность тепловых электростанций ЕЭС России на 1 января 2018 года составляла

162,8 ГВт или 67,9 % от суммарной установленной мощности электростанций. Огромная доля городов нашей страны снабжается электроэнергией благодаря теплоэлектростанциям. Теплоэлектростанции расположены почти в каждом крупном городе страны, бесперебойно насыщая миллионы человек электричеством. Благодаря высокому развитию теплоэнергетики население получает огромные объемы электроэнергии на потребление, но и также получает снабжение теплом и горячей водой.

### ***Основная часть***

Важной проблемой теплоэнергетики является надежность и качество работы теплоэлектростанций. Теплоэлектростанции производят большую часть электроэнергии в России, обеспечивая города необходимой электроэнергией. Такая ответственность на теплоэнергетику обязует её быть одной из самых надежных отраслей по выработке электроэнергии, в противном случае возможны необратимые последствия. Безопасность теплоснабжения следует рассматривать как неотъемлемую и обязательную часть энергетической безопасности. И вопрос стоит не только о необходимости бесперебойной работы станций на протяжении длительного времени, а также о эффективности добычи электроэнергии и выбросе вредных веществ в окружающую среду.

Угрозой безопасности в теплоэлектростанциях является полиблочная компоновка, то есть, расположение всех энергоблоков в одном здании. При таком расположении энергоблоков высока вероятность возникновения и распространения пожара, что может привести к выходу из строя сразу нескольких агрегатов теплоэлектростанции. Основными составляющими объектами теплоэлектростанций, являющимися наиболее опасными и приводящие наибольшее поражающее действие на персонал, население и прилегающую территорию считаются система мазутоснабжения (мазутное хозяйство), цех зимводоочистки с баками хиреагентов и система маслоснабжения теплоэлектростанции [5].

Основными причинами аварий на теплоэлектростанциях являются или связаны со следующими факторами:

1. Выход из строя фитинговых соединений
2. Ошибка оператора
3. Ослабление или разрушения из-за вибрации масляных трубопроводов
4. Аварии электрических компонентов

За последние тридцать лет в главных корпусах теплоэлектростанций произошло около тридцати крупных аварий с выходом из строя более одного энергоблока. Стоит ли говорить о более мелких аварийных ситуациях, которые возникают на теплоэлектростанциях. Произошедшие аварии нанесли немалый ущерб, так как поставили под удар не только жизнь и здоровье сотрудников теплоэлектростанций, но и население близлежащих районов. По статистике, около 72% от общего числа аварий возникают по

причине отказа в работе оборудования в машинных отделениях, около 23% в котельных отделениях, а в кабельных туннелях лишь 5% [4].

Машинные отделения являются местом сосредоточения наибольшей пожарной опасности так как в нем находятся системы смазки генераторов, большие объемы машинного масла, электрических обмоток генераторов и множество специализированной электрической аппаратуры и устройств. Основными причинами пожаров в машинных залах являются нарушение целостности систем смазки и регулирования турбоагрегатов, содержащих масло [1].

Котельный цех в себе хранит и использует большое количество топлива, что может являться причиной возникновения пожаров. Из-за сбоя систем топливоподачи могут возникнуть взрывы отложений угольной пыли на строительных элементах или в бункерах угля, а также могут возникать механические повреждения мазутопроводов, взрывы топлива в топке котла [3].

В целях сокращения вероятности возникновения аварийных ситуаций, согласно государственной программе Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» были осуществлены технические мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности тепло- и электростанциях, что включает в себя замену вывод из эксплуатации неэкономичного, небезопасного паросилового оборудования газовых тепловых станций и замена его новыми установками газотрубных и парогазовых технологий [2]. Модернизация и реконструкция действующих конденсационных и теплофикационных установок и станций с использованием современного энергоэффективного оборудования, что позволит существенно снизить риск появления пожаров и иных аварийных ситуаций.

### ***Выводы***

Таким образом, теплоэнергетика – это основополагающая всей энергетики России. Безопасность на теплоэлектростанциях является одним из важнейших аспектов стабильной работы станции и удачной ее эксплуатации. Основными причинами пожаров на теплоэлектростанциях являются выход из строя оборудования в машинном отделении из-за систем смазок генераторов, а также высокий риск возникновения пожара в котельном цехе из-за больших объемов топлива, использующих в цехе в процессе производства. Мерой для сокращения вероятности возникновения аварийных ситуаций является программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», позволяющий существенно сократить вероятность поломки оборудования, в следствие чего сокращение риска возникновения аварийных ситуаций.

### **Источники**

[1] Волков А.В, Рыженков В.А., Парыгин А.Г., Волков Т.А. Повышение надежности и экономичности систем централизованного теплоснабжения на основе эффективного использования избыточного магистрального давления // Надежность и безопасность энергетики. - 2010. - №2(9). - С. 45-47.

[2] Зорина Т. Г. Совершенствование методологии оценки цифровой трансформации объединенной энергетической системы Республики Беларусь. Проблемы и перспективы / Т. Г. Зорина, С. Прусов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 99-113.

[3] Государственная программа Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года" (утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 2446-р)// [Электронный ресурс]. (дата обращения: 13.09.19). URL:[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_109625/1c6de4ecab11da862539d19b94ae677f09ba7caa/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_109625/1c6de4ecab11da862539d19b94ae677f09ba7caa/)

[4] Гуменюк В.И., Николаева И.А. Пространственно-временные показатели опасности аварий на теплоэлектростанциях // Безопасность в чрезвычайных ситуациях. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2014. - С. 178-184. Тютин Р.А., Аввакумов Д.А. Повышение надежности систем теплоснабжения при реконструкции // Академическая публицистика. - 2018. - №12. - С. 71-74.

[5] Звонарева Ю. Н. Изменение параметров работы систем теплоснабжения при поэтапном внедрении АИТП / Ю. Н. Звонарева, К. С. Кузборская // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 109-118.

[6] Короткова Т.Г., Бушумов С.А., Ксандопуло С.Н., Солонникова Н.В., Кобелева М.М. Типовые сценарии возможных аварий на складе химводоочистки теплоэлектростанций // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. - 2017. - №131. - С. 1602-1611.

[7] Хабибрахамов Э.И., Аксенов С.Г. Анализ обеспечения пожарной безопасности на теплоэлектростанциях // Студенческий форум. - 2021. - №32-2(168). - С. 41-44.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Зверев<sup>1</sup> Л. О., Злобин<sup>2</sup> В. Г., Зверева Э. Р.<sup>3</sup>, Липатов Д. В.<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологии и дизайна, заведующий кафедрой

<sup>3,4</sup>Казанский государственный энергетический университет

<sup>1</sup>zverevleonid28@mail.ru, <sup>2</sup>zlobin\_v@list.ru, <sup>3</sup>belvira6@list.ru, <sup>4</sup>Lipatow\_dv@mail.ru

***Аннотация.** В процессе эксплуатации надежность оборудования снижается вследствие изнашивания деталей, коррозии, усталости и старения материала и других вредных процессов, протекающих в технике. В связи с этим возникает необходимость в техническом обслуживании и ремонте. Обозначены способы устранения данных дефектов и изучены новые технологии. Описана высокая эффективность восстановления деталей энергетического оборудования при использовании триботехнических составов «СУПРОТЕК» на турбокомпрессоре ЦК-135/8.*

***Ключевые слова.** Оборудование, надежность, дефект, материал, обработка, триботехнический состав, турбокомпрессор.*

## IMPROVING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT

Zverev<sup>1</sup> L. O., Zlobin<sup>2</sup> V. G., Zvereva<sup>3</sup> E. R., Lipatov<sup>4</sup> D.V.

<sup>1,2</sup> Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia

<sup>3,4</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup>zverevleonid28@mail.ru, <sup>2</sup>zlobin\_v@list.ru, <sup>3</sup>belvira6@list.ru, <sup>4</sup>Lipatow\_dv@mail.ru

***Abstract.** During operation, the reliability of the equipment decreases due to wear of parts, corrosion, fatigue and aging of the material and other harmful processes occurring in technology. In this regard, there is a need for maintenance and repair. The ways of eliminating these defects are indicated and new technologies are studied. The high efficiency of restoration of power equipment parts when using tribotechnical compositions "SUPROTEK" on the CC-135/8 turbocharger is described.*

***Keywords.** equipment, reliability, defect, material, processing, tribotechnical composition, turbocharger.*

## ***Введение***

В процессе эксплуатации надежность энергетического оборудования снижается вследствие изнашивания деталей, коррозии, усталости и старения материала и других нежелательных процессов, протекающих в оборудовании. Эти процессы вызывают появление различных неисправностей и дефектов, которые необходимо периодически и своевременно устранять.

При физическом износе происходит ухудшение эксплуатационных качеств оборудования – снижение производительности (мощности), повышение расхода эксплуатационных материалов и изделий. При определенном уровне физического износа оборудования дальнейшая его эксплуатация становится экономически нецелесообразной и неэффективной. Появляется опасность внезапного (аварийного) выхода оборудования из рабочего состояния с вытекающими отсюда потерями от нарушений производственного режима и расходов на последующий ремонт. Ухудшение эксплуатационных качеств в результате физического износа оборудования может быть преодолено проведением мероприятий по ремонту, модернизации и реконструкции [1].

В условиях ограниченности финансовых ресурсов необходимо снизить затраты на эксплуатационные издержки и ремонт оборудования. Снижение этих затрат возможно путем применения ремонтных работ с восстановлением изношенных деталей; путем упрочнения деталей различных агрегатов и механизмов в процессе эксплуатации [2].

Прочностные свойства деталей зависят от физико-механических характеристик их материала. Для создания поверхностных слоев с требуемыми физико-химическими и эксплуатационными характеристиками применяют различные методы обработки — механические, термические, электрофизические, электрохимические, химические и их сочетание. В результате формируются поверхностные слои толщиной от нескольких микрометров до 1 мм и более, с улучшенными характеристиками и противостоящие истиранию, повышенной температуре, коррозии, эрозии и другим факторам, инициирующим изнашивание рабочих поверхностей деталей [3].

Износ деталей связан с изменением геометрической формы и номинальных размеров. Для его устранения используют восстановление деталей, комплекс операций по устранению основных дефектов, обеспечивающих возобновление работоспособности и параметров, установленных в нормативно-технической документации [4-5].

## ***Основная часть***

Были проведены опытно-промышленные испытания триботехнических составов «СУПРОТЕК» на турбокомпрессоре ЦК-135/8.

Турбокомпрессор ЦК-135/8 предназначен для подачи воздуха в блоки разделения кислородных установок, а также для сжатия атмосферного воздуха, используемого для пневмооборудования, пневмоинструмента и технологических процессов в различных отраслях промышленности, включающие предприятия энергетики.

Проведенные испытания на машине трения показали, что в процессе обкатки образцов трения формируется слой, который отличается от исходной поверхности и типичной приработанной поверхности. Коэффициент трения после приработки образцов снижался с 0,1 до 0,005, а скорость изнашивания уменьшалась в 3-5 раз.

Новый слой формируется самой системой трения, при включении механизмов самоорганизации. Смазочная композиция компании «СУПРОТЕК» выполняет функцию инициатора качественного перехода системы трения в новое равновесное энергетическое состояние.

Возможны следующие способы внесения триботехнических составов «СУПРОТЕК»: заливка ТС «СУПРОТЕК» в маслозаливную горловину агрегата; нанесение концентрата ТС «СУПРОТЕК» на поверхности трения при разборке – сборке механизма; нанесение ТС «СУПРОТЕК» спреем на основе спирта с последующим его испарением; пробивка шприцом концентрата ТС «СУПРОТЕК» подшипниковых и др. узлов с пластичной смазкой.

При проведении промышленных испытаний эффект ТС «СУПРОТЕК» от обработки компрессоров оказался следующим:

- произошло увеличение ресурса деталей ЦПГ и КШМ до 2-х раз;
- параметры компрессора восстановились до номинальных значений по давлению и по производительности;
- наблюдалось снижение расхода электроэнергии до 15 %;
- уменьшился расход масла до 3 раз;
- шумы и вибрации снизились на 3 - 5 дБ.

### ***Выводы***

По результатам, полученным в ходе выполнения Программ опытно-промышленных испытаний триботехнических составов «СУПРОТЕК» и методики её применения на турбокомпрессоре ЦК-135/8 сделаны следующие выводы:

1. В результате обработки турбокомпрессора ЦК-135/8 триботехническими составами «СУПРОТЕК» произошло снижение коэффициента трения в тракте передачи энергии турбокомпрессорной установки, вследствие чего удельное потребление снизилось с 121,5 до 120,5 Вт/м<sup>3</sup>, что при нагрузках в 7000 м<sup>3</sup>/час и режиме работы 8700 час/год даст экономию 60 900 кВт·ч в год.

2. Общий уровень вибрации по турбокомпрессорной установке ЦК-135/8 после обработки снизился на 17,14%, что приводит к улучшению состояния уровня вибрации по агрегату.

3. Несмотря на то, что после обработки турбокомпрессорная установка работала в условиях более высокой входной температуры воздуха и при бóльшей производительности, температура на поверхности агрегатов либо незначительно поднялась, либо снизилась на 0,5 – 1%.

Таким образом, доказана высокая эффективность восстановления деталей энергетического оборудования триботехническими составами «СУПРОТЕК».

### **Источники**

[1] Лялякин, В.П. Восстановление деталей - важный резерв экономии ресурсов / В.П. Лялякин // Вестник ОрелГАУ. 2011. №2(11). С. 95-97.

[2] Злобин, В.Г. Повышение эффективности котельных установок на жидком топливе / В.Г. Злобин, Л.О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Том 22. № 4. С.24-32.

[3] Амосов, А.П. Наноматериалы технологии СВС для триботехнического применения. Обзор / А.П. Амосов // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. № 4. С. 17-33.

[4] Морозов, А.В. Экспериментальная оценка триботехнических характеристик эпилемированных материалов, работающих в резьбовых соединениях в условиях сухого трения / А.П. Амосов // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 3. С. 236-244.

[5] Корнопольцев, В.Н. Новые трибологические композиционные материалы на основе политетрафторэтилена / В.Н. Корнопольцев, Д.М. Могнонов, О.Ж. Аюрова, С.Л. Буянтуев // Материаловедение. 2016. № 7. С. 31-35.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Кондратьев Александр Евгеньевич  
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия  
aekondr@mail.ru

***Аннотация.** В настоящее время особое внимание уделяется техническому состоянию энергетических трубопроводов с целью снижения аварийности эксплуатации и повышению их надежности. Проведение неразрушающего контроля коммуникаций также позволяет провести оценку остаточного ресурса, спрогнозировать сроки последующего ремонта или замены энергетических коммуникаций. Одним из важных этапов неразрушающего контроля является математическое моделирование поведения коммуникаций под нагрузкой.*

***Ключевые слова:** техническая диагностика, неразрушающий контроль, математическое моделирование, колебание трубопровода*

## MATHEMATICAL MODELING OF OSCILLATIONS OF THE WALLS OF EN- ERGY PIPELINES

Kondratiev Alexander Evgenievich  
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
aekondr@mail.ru

***Annotation.** Currently, special attention is paid to the technical condition of energy pipelines in order to reduce the accident rate of operation and increase their reliability. Non-destructive testing of communications also allows you to assess the residual resource, predict the timing of subsequent repair or replacement of energy communications. One of the important stages of non-destructive testing is the mathematical modeling of the behavior of communications under load.*

***Keywords:** technical diagnostics, non-destructive testing, mathematical modeling, pipeline oscillation*

### **Введение**

Применение технической диагностики энергетических трубопроводов позволяет провести с большой степени достоверности оценку их технического состояния. Извест-

но значительное количество способов контроля, из которых наиболее приемлемым является неразрушающий контроль. Основным преимуществом неразрушающего контроля является физическая целостность объекта исследования, при этом есть возможность оценить степень его годности [1].

Из всего многообразия методов неразрушающего контроля наиболее приемлемым является метод колебаний. При динамической нагрузке трубопровода в результате взаимодействия потока теплоносителя с неподвижными стенками трубопровода возникают механические колебания [2]. Параметры этих колебаний зависят не только от свойств трубопровода, но и его состояния. Так, имеется возможность оценить степень чистоты внутренней поверхности энергетического трубопровода, а также наличие внутренних механических дефектов [3].

### ***Основная часть***

С целью определения информативного частотного диапазона проводится построение математической модели процесса колебания трубопровода. Для расчета частот собственных колебаний применяется программный комплекс ANSYS. Это наиболее удобная программная среда с универсальной программой конечно-элементного анализа [4]. С помощью этого программного комплекса возможно решение линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач деформации твердого тела с учетом теплопередачи, теплообмена и виброакустики [5].

С целью оценки влияния дефектов различного рода произведено математическое моделирование упругих колебаний стенок трубопровода. Модальный анализ проводился как на бездефектном трубопроводе, так и трубопроводе с различными механическими дефектами различных размеров.

Математическое моделирование проводилось на трубопроводе со следующими параметрами: диаметр трубопровода 72 мм, толщина стенок 4 мм. Результаты модального анализа собственных колебаний показаны в таблице 1. В этом случае моделирование дефекта не производилось, трубопровод считался условно исправным. Проведен расчет первых 50 собственных мод колебаний, в таблице показан наиболее информативный диапазон от 2867 Гц до 3148 Гц.

Таблица 1

Результаты расчета частоты колебаний бездефектного трубопровода

Номер моды колебания	Частота, Гц.
19	2867,8
20	3037,5

21	3053,9
22	3083,
23	3105,
24	3148,5

На рисунке показана наиболее характерная мода колебания на частоте 3053 Гц (Рис.1).

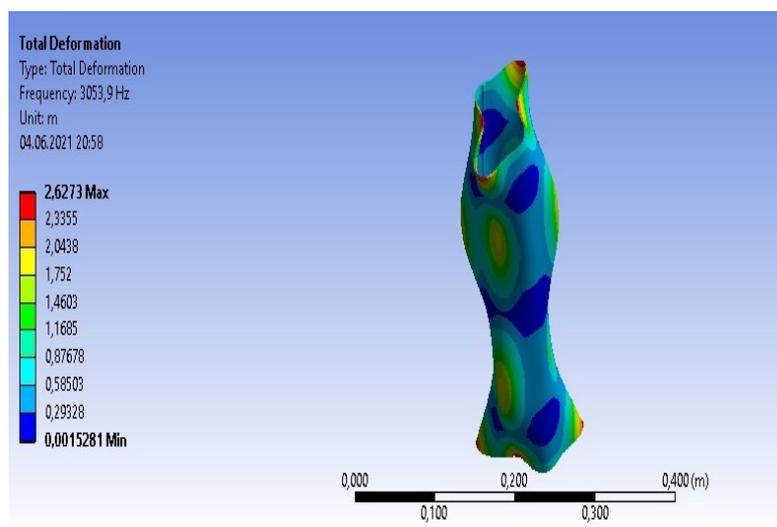


Рис. 1. Форма колебания 21 моды на частоте 3053 Гц.

Таким же образом проведен модальный анализ собственных колебаний исследуемого трубопровода диаметром 72 мм и толщиной стенки 4 мм, но с введенным дефектом. Дефект моделировался в виде продольной трещины длиной 5 мм, результаты показаны в таблице 2. Здесь также проведен расчет первых 50 собственных мод колебаний, в таблице показан наиболее информативный диапазон от 1605 Гц до 2798 Гц.

Таблица 2

Результаты расчета частоты колебаний трубопровода с дефектом

Номер моды колебания	Частота, Гц.
18	1605,3
19	2225,

20	2230,
21	2693,4
22	2707,3
23	2709,4
24	2723,3
25	2798,3

На рисунке показана наиболее характерная мода колебания на частоте 2230 Гц (Рис.2).

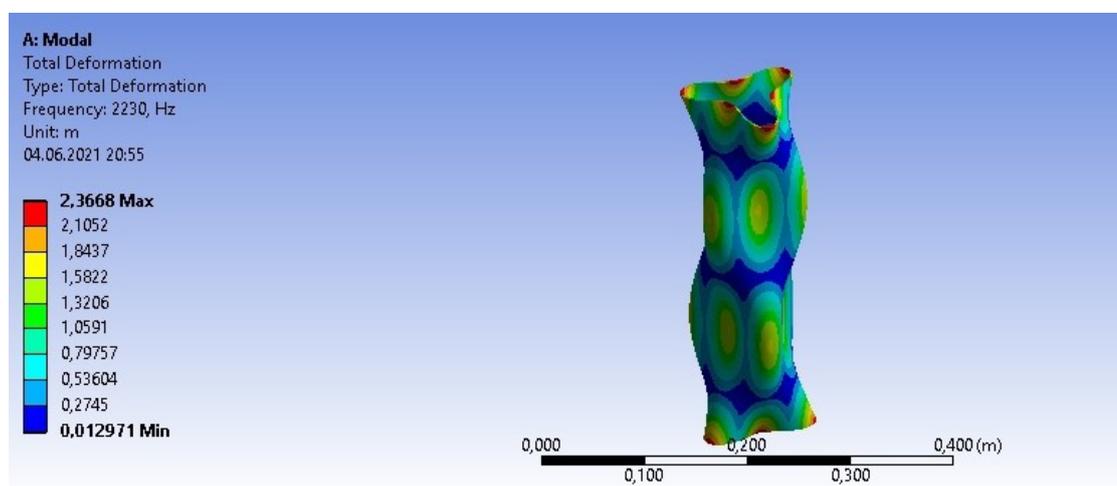


Рис. 2. Форма колебания 20 моды на частоте 2230 Гц.

Таким образом, для выбранного трубопровода рассчитана наиболее информативная частота колебаний, на основе которой возможно построение диагностической системы виброакустическим методом [6]. Сравнение частот колебаний дефектного и бездефектного трубопроводов позволяет сделать вывод, что основные моды колебания стенок исследуемого трубопровода при наличии дефекта смещаются в область более низких частот. При этом замечено, что снижение частотного диапазона напрямую связано с размером дефекта.

#### Источники

[1] Разработка методики определения размера коррозионного поражения оболочек акустическим методом / Ш. Г. Зиганшин, Ю. В. Ваньков, А. Е. Кондратьев, С. П.

Кузнецов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 1(57). – С. 36-38. – EDN JWBVZB.

[2] Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes / S. O. Gaponenko, R. Z. Shakurova, A. E. Kondratiev, R. Dimova // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 18–20 сентября 2019 года. – Kazan: EDP Sciences, 2019. – P. 01021. – DOI 10.1051/e3s-conf/201912401021. – EDN UXИYTB.

[3] Колибаба В. И. Стоимостные модели в контроллинге устойчивого развития электроэнергетических компаний и кластеров / В. И. Колибаба, А. А. Морозова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 106-119.

[4] Vankov Yu V and Kondrat'ev A E, 2004 Pribory i Sistemy Upravleniya (2) 45-53

[5] Загретдинов, А. Р. Аппаратно-программное обеспечение ударно-акустического контроля композиционных конструкций / А. Р. Загретдинов, А. Е. Кондратьев, Ш. Г. Зиганшин // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4-1(31). – С. 27. – EDN TPMSOV.

[6] Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом / М. В. Акутин, Ю. В. Ваньков, А. Е. Кондратьев, Ю. Я. Петрушенко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 2. – С. 55-57. – EDN KPZDLZ.

[7] Оразбаев Б. Б. Исследование проблем моделирования и принятия решений при управлении установкой риформинга и подходы к решению / Б. Б. Оразбаев, М. Д. Кабибуллин, А. К. Жумадилаева и др. / Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 82-95.

[8] Загретдинов, А. Р. Разработка прибора и методики ударно-акустического контроля многослойных композиционных конструкций / А. Р. Загретдинов, А. Е. Кондратьев, Ю. В. Ваньков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9-10. – С. 97-104. – EDN RUHUDR.

## ВНЕДРЕНИЕ В РАБОТУ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПАССИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Майоров Егор Сергеевич

ФГБОУ «Казанский государственный энергетический университет»

*timetolegend@gmail.com*

*Аннотация.* Проблема увеличения выработки электроэнергии является одной из самых актуальных на сегодняшний день. Увеличение выработки мощностей возможно при улучшении основного процесса по выработке электроэнергии за счет создания новых видов турбин или путей генерации. К сожалению, данный вид улучшений не проходит быстро и требует большого количества времени в связи с большой инерционностью традиционностью энергетики. Системы же, которые не требуют изменения традиционного процесса генерации электроэнергии, будут пассивно генерировать электроэнергию, повышая при этом КПД электростанции. К таким системам можно отнести МГД-генератор и установки, работающие за счет эффекта Зеебека. Такие системы не повышают выработку на десятки процентов, их генерация составляет в районе 0.5-1% от генерации электростанции.

*Ключевые слова:* ТЭС, АЭС, магнитогидродинамический генератор, эффект Зеебека, элемент Пельтье.

## INTRODUCTION OF PASSIVE POWER GENERATORS INTO OPERATION OF THERMAL POWER PLANTS

Mayorov Egor Sergeevich

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*timetolegend@gmail.com*

*Abstract.* The problem of increasing power generation is one of the most pressing today. Increase in power generation is possible by improving the basic process of power generation by creating new types of turbines or generation paths. Unfortunately, this type of improvement is not quick and requires a lot of time due to the high inertia of traditional power generation. Systems that do not require changes to the traditional power generation process, however, will passively generate electricity while increasing the efficiency of the power plant. Such systems can include MHD-generators and installations that operate due to the Seebeck effect. Such systems do not increase generation by tens of percent, their generation is in the region of 0.5-1% of the power plant's generation.

**Key words:** TPP, NPP, magnetohydrodynamic generator, Seebeck effect, Peltier element.

## **Введение**

Системы пассивной генерации электроэнергии – системы, вырабатывающие электроэнергию параллельно от основной ветки генерации электроэнергии, не затрачивая при этом ресурсы, необходимые для основной ветки генерации. В данной статье будут рассмотрены такие пассивные системы генерации электроэнергии, как МГД-генератор и установка, генерация энергии которой основана на эффекте Зеебека, будут рассчитаны генерируемые мощности, сроки окупаемости, а также пути по повышению вырабатываемой электроэнергии.

## **Основная часть**

МГД-генератор – установка, созданная Майклом Фарадеем в 1832, в основе которой лежит физический закон, который преобразует движение рабочего тела в магнитном поле в электроэнергию.



Рис. 1. Устройство МГД-генератора

Заряженные частицы под действием магнитного поля начинают вращаться по орбитам, радиус которой зависит от самой заряженной частицы и значения магнитной индукции, задаваемой магнитами. Вращаясь, заряженные частицы разноименных зарядов попадают на электроды, что порождает электрический ток [1]. Мощность данной установки, зависит от скорости потока, коэффициента ионизации, магнитной индукции, числа частиц в потоке и вычисляется по формуле:

$$F_n = B * k * W * N * e \quad (1)$$

где  $B$ - магнитная индукция,  $k$ - коэффициент ионизации,  $W$ - скорость рабочего тела,  $N$ - кол-во молекул, прошедшее через сечение за единицу времени,  $e$ - заряд электрона.

Рассчитаем мощность, вырабатываемую данной установкой при включении ее в схему АЭС.

Рабочим телом является жидкий металл - свинец, используемый на АЭС типа БН в качестве теплоносителя, из чего мы можем сделать вывод о его скорости, которая будет составлять 3-5 м/с. В расчетах примем коэффициент ионизации  $k$  равным 0,4-0,5.

Кол-во ионов, прошедших через магнитное поле, будет зависеть от скорости течения, геометрических характеристик сечения и будет рассчитываться по формуле:

$$N = \frac{m}{M} N_A \quad (2)$$

где  $m$ -масса жидкости, прошедшая через сечение за единицу времени,  $M$ -молярная масса свинца,  $N_A$ - число Авогадро. Так как поток движется с некой постоянной скоростью, разумно вести расчет через массовый расход, в результате чего мы и получим кол-во ионов, прошедших через сечение с учетом скорости потока.

$$N = \frac{G}{M} N_A \quad (3)$$

где  $G$ - массовый расход, определяемый по формуле  $G = \rho SW$ , где  $\rho$ - плотность свинца при температуре 527С,  $S$ - площадь сечения трубы и  $W$ - скорость потока.

Установка состоит из 2-х основных частей: 1- «врезанная» труба длиной 1 метр и толщиной стенок 5 см, 2- магниты, установленные на противоположных сторонах трубы. Чтобы магниты находились строго друг на против друга, нами было выбрано квадратное сечение трубы со стороной 250 мм. (см. рисунок 2).

Имея данные о геометрических характеристиках, можем приступить к расчету кол-ва ионов, прошедших через сечение, и значения силы Лоренца. Подставляя значения в формулу (3) предварительно рассчитав значение объемного расхода получим:

$$N = 94,7 * 10^{25}$$

Магниты же, используемы в установке, могут принимать различные значения магнитной индукции. Их выбор будет влиять на экономическую составляющую внедрения, а именно на срок окупаемости.

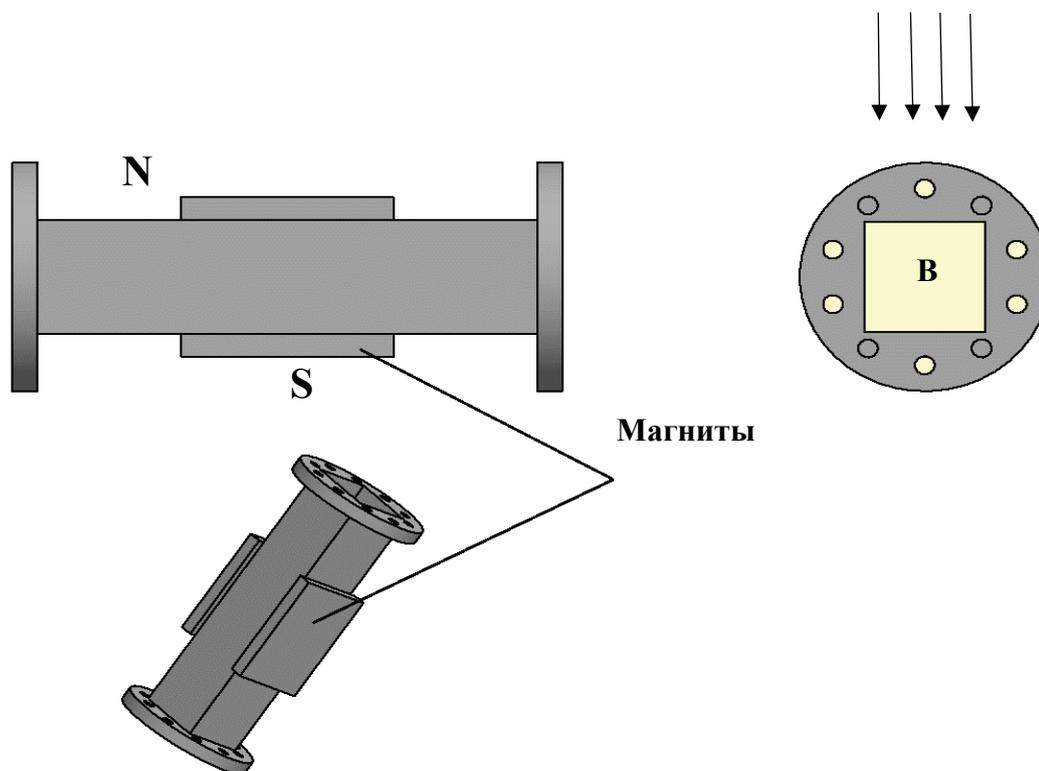


Рис. 2. Установка

Для расчета берутся неодимовые магниты (Nd2Fe14B) со значением магнитной индукции в 42 Тл. Значение же силы Лоренца, действующее на ионы в вакууме и рассчитываемое по формуле (1) будет равно:

$$F_{л} = 43 * 0,4 * 5 * 94,7 * 10^{26} * 1,6 * 10^{-19} = 130 \text{ ГН}$$

В связи с тем, что большое кол-во молекул будет сталкиваться под действием магнитного поля, некоторое кол-во энергии будет переходить из кинетической в тепловую, что повысит значение температуры, но уменьшит значение скорости проводника. Помимо этого, плотность свинца крайне высока, из-за чего магнитного поля магнитов с индукцией в 42 Тл будет недостаточно для обеспечения достаточной подвижности всех ионов для их попадания на электроды, поэтому для расчётов примем, что на электроды попадут ионы лишь с пограничных слоев, что составит 0,5-0,6% от их общего числа.

К тому же при расчете силы Лоренца большую роль играет среда, в которой находятся ионы. Свободный пробег электронов, находящихся в вакууме примерно в 1000 раз больше свободного пробега электронов, находящихся в свинце, что приведет к более вероятному столкновению заряженных частиц, примем, что в результате движения не столкнется около 1-го процента движущихся частиц. Приняв во внимание вышеописанные поправки, значение силы Лоренца будет равно:

$$F'_{л} = F_{л} * 0,005 * 0,001 = 0,65 \text{ МН}$$

Тогда сила тока будет рассчитываться по формуле [2]:

$$I = \frac{F'_l}{B * d} = 61 \text{ кА} \quad (4)$$

Рассчитаем значение ЭДС, возникающее между электродами:

$$\varepsilon = B * W * d * \sin \alpha \quad (5)$$

где  $d$ - расстояние между электродами.

Подставив значения получим:

$$\varepsilon = 42 * 5 * 0.25 = 52.5 \text{ В}$$

Для расчета мощности установки нужно рассчитать внутреннее сопротивление МГД-генератора, которое будет состоять из сопротивления свинца и сопротивления стенок нержавеющей стали.

Сопротивление свинца будет рассчитываться по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6)$$

где  $\rho$ - удельное электрическое сопротивление при температуре 527С,  $l$ - длина проводника,  $S$ - площадь поперечного сечения проводника.

Подставив значения, получим:

$$R = \frac{21 * 10^{-8} * 0.25}{0.25 * 1} = 40 * 10^{-8} \text{ Ом}$$

Сопротивление стенок нержавеющей стали рассчитаем по той же формуле и соответственно получим:

$$R_{cm} = 20 * 10^{-8} \text{ Ом}$$

Получим значения мощности установки с учетом потерь на внутреннее сопротивление:

$$P = I\varepsilon - I^2 R - I^2 R_{cm} = 3,1445 \text{ МВт}$$

Примем во внимание потери мощности на нагрев проводников в цепи, что в связи с их большой длиной будет составлять примерно 12 %. Тогда мощность с учетом потерь на сопротивление проводника будет составлять:

$$P = 7,264 * 0.88 = 2,7672 \text{ MВт}$$

Рассчитаем напряжение в цепи:

$$U = \frac{P}{I} = 46$$

Объем капитальных затрат состоит из 2-х магнитов стоимостью 24000р и врезной конструкции (затраты на электроды включены с стоимостью врезной конструкции) – 60000р. С учетом тарифа на электроэнергию данное внедрение окупится менее чем через неделю.

Малый срок окупаемости противопоставляется затратам, которые последуют в процессе монтажа и увеличении систем безопасности АЭС.

Из-за того, что заряженные частицы вовремя вращения сталкиваются, поток начинает двигаться медленнее при этом его температура будет расти. Насколько сильно будет происходить изменение параметров сказать на данном этапе невозможно. Повышение показателей будет напрямую зависеть от коэффициента ионизации, который может изменяться со временем цикла рабочего тела. Рассчитать коэффициент ионизации невозможно, но возможно узнать эмпирически, устанавливая термопары внутри потока перед входом в МГД-генератор и после.

Еще одной проблемой при установке МГД-генератора может стать избыточное напряжение в местах местных потерь. Переход из трубы круглого сечения в трубу квадратного сечения приведет к увеличению потерь давления на входе и выходе из МГД-генератора. Также изменение давления может привести к кавитации, которая может стать одной из причин аварий. Решить данную проблему можно заменив трубу квадратного сечения на трубу с сечением многоугольника. Данное решение приведет к уменьшению потерь на напоре, но увеличит затраты на отливку электродов и монтаж магнитов, ведь они должны находиться строго параллельно, для увеличения значения ЭДС.

Установка, для генерации электрической энергии за счет эффекта Зеебека, представляет собой систему из элемента Пельте, радиатора и системы присоединения элемента к трубе, по которой проходит нагретое рабочее тело. Разница температур между горячей и холодной поверхностью создаст в элементе термоЭДС, что приведет к возникновению тока в элементе [3]. Один из примеров элементов Пельте представлен на рисунке 3

Сегодня элемент Пельте используется в различных электрических схемах и радиоэлектронике, но свое применение в энергетике не нашел. Виной тому диапазон температур, при котором может элемент использоваться.

Для примера возьмем трубу теплоносителя, выходящую из ЦНД, теплоноситель в которой имеет температуру от 70-110С. При подсоединении элемента Пельте к трубе теплоносителя возникнет разность температур между горячей и холодной стороной элемента что вызовет эффект Зеебека, что создаст мощность в элементе. Заводские

элементы, которые производятся для электрических схем выдают напряжение в 66В и силу тока в 2.5А.

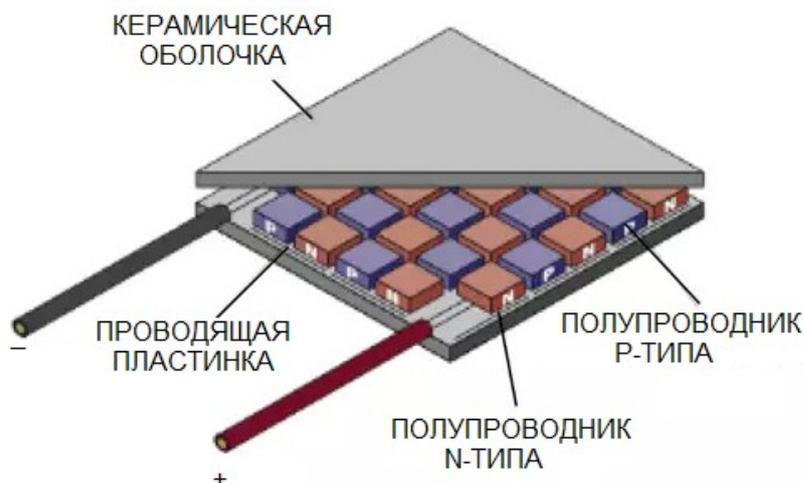


Рис. 3. Принципиальная схема элемента Пельте

Система, которая будет давать достаточно электроэнергии для использования в собственных нуждах, должна состоять из сотен элементов, параллельно соединенных под одной керамической пластиной.

К сожалению работа такой системы будет идти в противовес основному циклу ТЭС, отнимая нужно тепло из труб теплоносителя ЦНД.

Но данная система хорошо себя проявит в случаях, где требуется бесперебойная работа местных нагрузок (насосы и т.д.). В таком случае потребуются термостойкие пары полупроводников с температурой плавления 600 и выше. К примеру, можно взять теллурид висмута и станнид магния. Возможны и другие пары полупроводников. Для определения качества термоэлемента используют показатель добротности:

$$Z = \frac{\alpha^2 * \sigma}{\lambda} \quad (7)$$

где  $\alpha$  - коэффициент термоэлектродвижущей силы,  $\sigma$  -удельная электропроводность,  $\lambda$  -удельная электропроводность.

Чем выше показатель добротности, тем больше будет возможный перепад температур, при котором элемент Пельте будет выдавать максимальную мощность. Разница температур может быть высчитана по формуле:

$$\Delta T_{max} = 0,5Z * T_x^2 \quad (8)$$

где Z- коэффициент добротности,  $T_x$ - температура холодной стороны.

### **Выводы**

Использование систем пассивной генерации электроэнергии не является оптимальным решением при дефиците электроэнергии, а является точечным. Если брать в сравнение МГД-генератор и установку с элементом Пельтье, то последний имеет большее кол-во условий, при котором он будет работать не в убыток всей электрогенерирующей системы. В противовес этому можно сказать что установка с элементом Пельтье и может выдавать пассивную мощность даже при малом количестве термоэлементов. Такие установки могут использоваться как автономные батареи для прожекторов или малых насосов на ТЭС. МГД-генератор в свою очередь менее универсален и может быть использован там, где есть движение проводящего рабочего тела (вода, жидкий металл). С другой стороны, МГД-генератор может генерировать в сотни раз больше электроэнергии, которая может быть направлена как на собственные нужды или отдана в сеть, так и быть поставщиком электроэнергии в малом производстве водорода через электролизёры.

### **Источники**

- [1] Енохович А. С. Справочник по физике и технике. М.: Просвещение, 1983. 255с.
- [2] Сафин А. Р. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами / А. Р. Сафин, Е. И. Грачева, К. В. Ranjan, Т. И. Петров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 47-55.
- [3] Электростатический способ обогащения урана А.И. Минибаев, С.М. Власов // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. канд. техн. наук Э.Ю. Абдуллазянова. В 4-ч т.; Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т., 2012. – 250 с.
- [4] Савенко А. Е. Оптимизация схемы присоединения рассредоточенных источников электроэнергии к распределительным электрическим сетям Темрюкского района / А. Е. Савенко, А. Г. Рыбин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 76-85.
- [5] Рыжов К. В. 100 великих изобретений. – М.: Вече, 2001. – 528с

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕХНИЧЕСКУЮ ВОДУ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НАКИПИ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОТЕЛЬНЫХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Мехтиев<sup>1</sup> А.Д., Сарсикеев<sup>2</sup> Е.Ж., Герассименко<sup>3</sup> Т.С., Нурабай<sup>4</sup> Ж.Б.

<sup>1,2,3,4</sup>«Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина»

<sup>1</sup>*barton.kz@mail.ru*, <sup>2</sup>*sarsikeev.ermek@yandex.ru*, <sup>3</sup>*gerko883@gmail.com*,

<sup>4</sup>*zhibek.nurabay29@gmail.com*

*Аннотация.* В статье приводится обзор перспективного метода предотвращения отложений на нагревательной поверхности котельных агрегатов и теплообменников. Рассмотрен подход в практической реализации магнитной обработки оборотной воды в системы водоподготовки, для устранения накипи солей жёсткости. Накипь является причиной выхода из строя нагревательных элементов бойлеров, стиральных машин, электрических чайников и другого оборудования, предназначенного для нагрева воды. Накипь формируется путем осаждения карбоната на поверхности нагрева в виде белого налета и постепенно увеличивается, превращаясь в довольно прочный слой, препятствующий теплообмену. Цель исследований заключается в изменении качественного состава воды после магнитного (электромагнитного) воздействия и создание экспериментального образца устройства предназначенного для регулирования показателя жесткости воды и рН, используемой для котельных и теплообменных агрегатов систем трубопроводов. Для проведения исследований специально разработан лабораторный стенд позволяющий производить обработку воды с помощью постоянных и электрических магнитов. Эксперименты проводились как с использованием постоянных магнитов, когда их число можно выбирать от 10 до 40 шт. Также использовались электромагниты постоянного и переменного тока, мощность создаваемого магнитного поля регулировалась при помощи источников питания. Проведенные исследования показали, что магнитное (электромагнитное) поле способно влиять на поток воды и изменять ее показатель рН, жёсткость и содержание в ней кислорода, а также существенно снизить процесс образования накипи на поверхностях нагрева.

**Ключевые слова:** вода, магнитная обработка, жесткость воды, системы охлаждения, электронагреватели.

# INVESTIGATION OF THE MAGNETIC EFFECT ON PROCESS WATER TO REDUCE SCALE ON THE HEAT EXCHANGE SURFACES OF BOILER HOUSES AND HEAT EXCHANGE UNITS

Mehtiev<sup>1</sup> A.D., Sarsikeev<sup>2</sup> E.Zh., Gerassimenko<sup>3</sup> T.S., Nurabay<sup>4</sup> Zh.B.

«Kazakh Agrotechnical university named after S.Seifullin», Kazakhstan

<sup>1</sup>barton.kz@mail.ru, <sup>2</sup>sarsikeev.ermek@yandex.ru, <sup>3</sup>gerko883@gmail.com,

<sup>4</sup>zhibek.nurabay29@gmail.com

***Annotation.** The article provides an overview of a promising method for preventing deposits on the heating surface of boiler units and heat exchangers. An approach is considered in the practical implementation of magnetic treatment of recycled water in water treatment systems to eliminate the scale of hardness salts. Scale is the cause of failure of heating elements of boilers, washing machines, electric kettles and other equipment designed for heating water. Scale is formed by precipitation of carbonate on the heating surface in the form of a white plaque and gradually increases, turning into a fairly strong layer that prevents heat exchange. The purpose of the research is to change the qualitative composition of water after magnetic (electromagnetic) exposure and to create an experimental sample of a device designed to regulate the water hardness index and pH used for boiler houses and heat exchange units of pipeline systems. A laboratory stand has been specially developed for conducting research, which allows water treatment with the help of permanent and electric magnets. The experiments were carried out both using permanent magnets, when their number can be selected from 10 to 40 pcs. Electromagnets of direct and alternating current were also used, the power of the created magnetic field was regulated using power sources. The conducted studies have shown that the magnetic (electromagnetic) field is able to influence the flow of water and change its pH, hardness and oxygen content in it, as well as significantly reduce the process of scale formation on heating surfaces.*

***Keywords:** water, magnetic treatment, water hardness, cooling systems, electric heaters.*

## **Введение**

Образование накипи на различных поверхностях нагрева теплообменных аппаратов, котельных агрегатов, бойлеров и другого теплоэнергетического оборудования, достаточно остра. Так как в центральном Казахстане вода имеет достаточно высокую жёсткость. Накипь приводит к снижению эффективности работы теплоэнергетического оборудования и снижает его ресурс работы, а также приводит к перерасходу топлива, потраченного на нагрев воды. Для регулирования жёсткости воды используются химические реагенты, которые позволяют бороться с этим негативным явлением. Отложение солей жёсткости можно встретить не промышленном

оборудовании, но и в быту. Накипь является причиной выхода из строя нагревательных элементов бойлеров, стиральных машин, электрических чайников и другого оборудования, предназначенного для нагрева воды. Накипь формируется путем осаждения карбоната на поверхности нагрева в виде белого налета и постепенно увеличивается, превращаясь в довольно прочный слой, препятствующий теплообмену.

В основе идеи научной работы лежит создание экспериментального образца комплексного магнитного (электромагнитного) устройства, предназначенного для уменьшения жесткости воды на этапах водоподготовки с последующим ее использованием для нужд энергетики и водоснабжения с целью снижения негативного влияния солей жесткости. Использование магнитного и электромагнитного устройства в качестве дополнительного средства позволит снизить используемое количество химических реагентов и тем самым снизить их вредное влияние на экологию.

Цель исследований заключается в изменении качественного состава воды после магнитного (электромагнитного) воздействия и создание экспериментального образца устройства предназначенного для регулирования показателя жесткости воды и pH, используемой для котельных и теплообменных агрегатов систем трубопроводов

Важным показателем качества воды является жесткость воды, характеризующаяся наличием ионов кальция и магния. Этот показатель измеряется преимущественно в моль/м<sup>3</sup>, мг-экв/л и характеризуется четырьмя диапазонами: если вода имеет в своем составе 0-4 мг-экв/л, то она считается мягкой; если 4-8 мг-экв/л – вода считается средней жесткости; 8-12 мг-экв/л - жесткая вода и более 12 мг-экв/л – вода считается очень жесткой [1].

Проведенные предварительные исследования позволили сформировать основную идею и гипотезу проекта связанные с использованием электромагнитного поля для изменения свойств воды и ее очистки. В статьях [2-5] приведены основные предварительные результаты исследований. Предварительными результатами является разработка и практическая апробация электромагнитного устройства для обработки технической воды, применяемой на Карагандинской ТЭЦ-3. Новизна предложенных технических решений подтверждена патентами [6,7], там же можно ознакомиться с основными принципами обработки технической воды. Существуют несколько традиционных способов, используемых в настоящее время для снижения концентрации солей жесткости. К ним относятся: дистилляция; использование реагентов; термическое умягчение; катионирование; электродиализ; обратный осмос. Все эти методы достаточно изучены и применяются в зависимости от условий и уровня загрязнения воды. Данные методы имеют определенную сложность, так как по большей мере требуют использование химических реагентов, которые впоследствии загрязняют окружающую среду и требуют значительных материальных затрат на обработку 1 м<sup>3</sup> воды [1-7].

## ***Литературный анализ***

Литературный анализ показал, что данный научный вопрос уже рассматривался ранее, имеются положительные результаты и опыт использования в различных областях деятельности человека [8,9]. Большая часть статей посвящена решению проблемы образования накипи на поверхностях нагрева и разработки методов защиты этих поверхностей и очистки. В статьях отражены различные направления по концепции водоподготовки, с использованием устройств, работающих на постоянных магнитах или электромагнитов [10]. Под действием электромагнитного поля происходит образование центров кристаллизации и уменьшается концентрация растворенных в воде ионов солей жесткости. Образовался мелкодисперсионный кристаллический осадок, который выпал в виде шлама. После обработки воды количество образовавшейся накипи на поверхностях нагрева сокращается [8-10]. Проведенный анализ мировой литературы показал [11], что достаточно остро стоит проблема образования накипи на поверхностях нагрева и трубопроводов систем водоснабжения причиной чего является высокий показатель жесткости воды. Ежегодно во всем мире интерес к электромагнитной и магнитной обработке воды возрастает, это подтверждает объем публикаций [12]. Положительным моментом является, что данный способ является экологически чистым и позволяет сократить или полностью исключить использование химических реагентов, применяемых для борьбы с образованием накипи [13].

## ***Материалы и методы исследования***

Для проведения исследований специально разработан лабораторный стенд позволяющий производить обработку воды с помощью постоянных и электрических магнитов. Эксперименты проводились как с использованием постоянных магнитов, когда их число можно выбирать от 10 до 40 шт. Также использовались электромагниты постоянного и переменного тока, мощность создаваемого магнитного поля регулировалась при помощи источников питания. Для экспресса контроля использован цифровой измеритель рН и TDS с точность 0,01. Для измерения силы магнитного поля был использован гауссометр TD8620 (измеритель Теслы) с осевым зондом, точность 0-2400mT 2%.

Для точного определения параметров обработанной и не обработанной воды использовалось оборудование Агроэкологической испытательной лаборатории при НАО «Казахский агротехнический университет имени С.Сейфуллина». Испытательная лаборатория, аккредитованная по стандарту KZ.T.01.2238 в области контроля продукции (объектам) «Питьевая вода». Имеющиеся приборы позволяют с высокой точностью оценить параметры жесткости и рН фактор (согласно ГОСТ 31867- 2012, ГОСТ 31869-2012, ГОСТ 31862-2012, СТ РК 1322-2005, СТ РК ГОСТ Р 51592-2003). Вес замеры производились ежедневно в течении одного месяца для повышения степени

достоверности результатов и их точности. Контроль параметров проб воды проводился до и после проведения магнитной (электромагнитной) обработки. На рисунке 1 показан лабораторный стенд и приборы, используемые для измерения параметров магнитной обработки воды.

Рис.



1.

Лабораторный стенд и приборы, используемые для измерения параметров магнитной обработки воды.

Схема лабораторного стенда для магнитной (электромагнитной) обработки воды представлена на рисунке 2. Вода перекачивалась из емкости 1 в емкость 6 при помощи насоса, при этом она проходила через 2-5 модулей с постоянными магнитами и медной немагнитной трубки. Каждый модуль содержит 20 неодимовых магнитов N52 диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. Диаметр медной трубки равен 8 мм. Производительность насоса работающего от сети постоянного тока 12 В, регулировалась при помощи управляемого блока питания. Скорость движение жидкости по трубкам составляла от,01 до 3 л / мин. После обработки вода сливалась из емкости 6 и паковалась в герметичную тару для отправки в лабораторию. Перед проведением эксперимента часть воды из емкости 1 помещалась в бутылки и тоже отправлялась в лабораторию для определения начальных параметров.

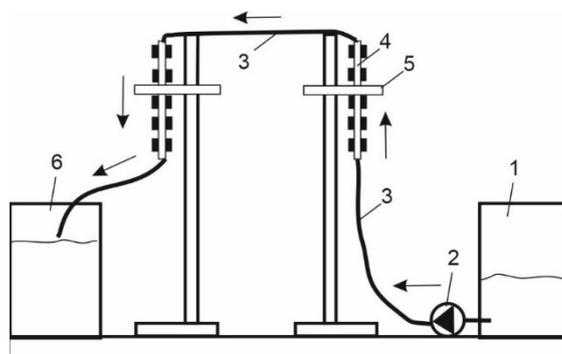


Рисунок 2 - Схема лабораторного стенда для магнитной (электромагнитной) обработки воды.

На рисунке 2 позициями обозначены: 1 – емкость с необработанной водой; 2 – насос для перекачки; 3 - пластиковая трубка для соединения; 4 – модуль с постоянными магнитами и медной немагнитной трубки; 5 – штатив для закрепления модуль с постоянными магнитами; 6 – емкость для обработанной воды.

Для проведения производственных испытаний создан образец, который находится на Карагандинской ТЭЦ-3. В нем используются электромагниты постоянного тока и импульсные катушек. Планируется проведение исследований процессов электромагнитного воздействия на питательную воду котельного агрегата (рисунок 4). Для снижения риска получения заведомо ложных результатов и исключения ошибок в измерениях параметров обрабатываемой воды планируется использовать возможности химической лаборатории Карагандинской ТЭЦ-3 (ТОО Караганда Энергоцентр). Для установки использована электромагнитная система двигателя постоянного тока и, в частности, его катушки основных полюсов. Всего использовано 4 катушки, две снизу и две сверху. Внешний вид экспериментальной установки приведен на фотографии, рисунок 4.

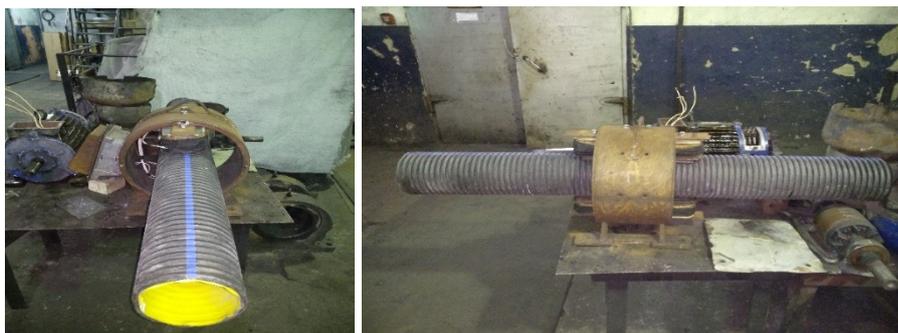


Рис. 4. Опытный образец

### ***Результаты лабораторных исследования системы электромагнитной обработки воды***

Усредненные значения параметров воды и результаты ее магнитной обработки, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры воды до и после обработки

Параметры, ед измерения	До электромагнитной обработки	После электромагнитной обработки
рН	7,98	8,38
Карбонаты	512	418
Общая жёсткость	9,5	7,45
Сухой остаток	612	628

Также проведенные исследования образовавшейся накипи на поверхности электрического трубчатого нагревательного элемента стенда, которые подтвердили исследования других ученых, что перерасход электрической энергии или топлива котельного агрегата увеличивается с увеличением слоя накипи. При нагревании 30 литров необработанной электромагнитом воды, перерасход топлива по сравнению с обработанной в течение часа, составил около 11% при общей толщине накипи 2 мм. Данный слой образовался в пределах 600 циклов кипячения необработанной воды. При проведении опыта вода была предварительно обработана, следующим образом, мощность электромагнита составила 200 Вт, вода прогонялась в течение часа по кольцевому трубопроводу через электромагнитное поле и сбрасывалась в бак, от куда снова закачивалась в трубопровод. Результаты исследований приведены на рисунке 3.

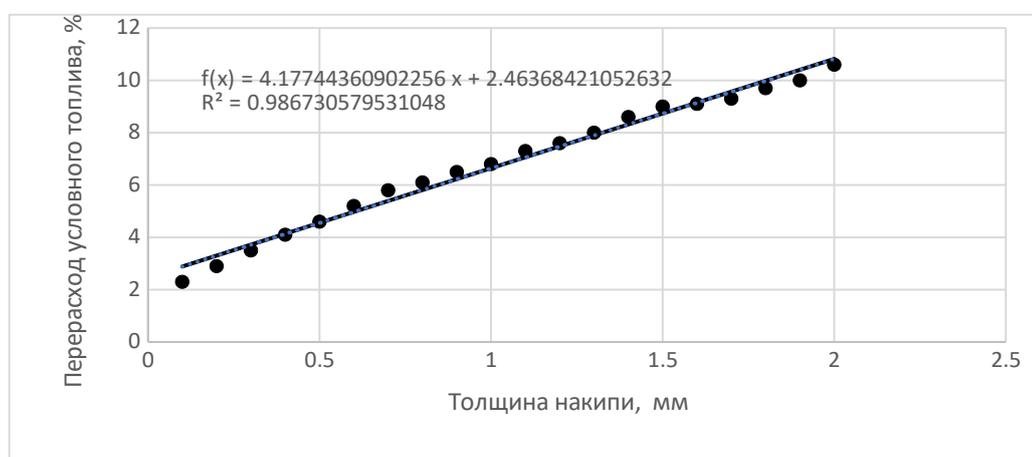


Рис. 3. Увеличение энергозатрат при увеличении слоя накипи на поверхности электронагревателя

### **Вывод**

Проведенные исследования показали, что магнитное (электромагнитное) поле способно влиять на поток воды и изменять ее показатель pH, жёсткость и содержание в ней кислорода, а также существенно снизить процесс образования накипи на поверхностях нагрева. Физико-химический состав обработанной воды электромагнитным полем имеет иные показатели жесткости и щелочности воды, а также содержание хлоридов, сульфатов, кальция, железа, кислорода, магния. Электромагнитное поле ускоряет процесс кристаллизации солей жёсткости интенсифицирует развитие процесса шламообразования, благодаря чему ускоряется их осаждение и способствует удалению из жидкости разного рода взвесей. Также возможно достижение эффекта самоочистки поверхностей, имеющих слой накипи. Рекомендуется использование электромагнитов постоянного тока, так как это наиболее эффективный вариант при минимальных материальных вложениях, так как есть

возможность использования не пригодных для эксплуатации двигателей постоянного тока. Учитывая низкую стоимость энергии собственных нужд ТЭЦ, данный способ может составить конкуренцию системе химической водоподготовки.

### Источники

[1] СТ РК 1514-2006. Вода питьевая. Методы определения жесткости. [Электронный ресурс].-URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293739/4293739488.htm>

[2] А.Д. Мехтиев, Е.Ж. Сарсикеев, М.К. Ибраев, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина, Е.Н. Биличенко. Использование генераторов электромагнитного поля для предотвращения образования накипи на поверхностях нагрева // Механика и технологии / Научный журнал. 2021. №2(72). С.94-105. (<http://journal.tarsu.kz/public/mehan/2/94-105-100>)

[3] Мехтиев А.Д., Сарсикеев Е. Ж., Жумажанов С. К., Герасименко Т. С. Снижение уровня твердых отложений на теплообменных поверхностях котельных агрегатов при помощи электрогидродинамического активатора воды. Вестник науки казахского агротехнического университета имени С.Сейфуллина № 1 (112) 2022, 361 - 370. DOI 10.51452/kazatu.2022.1(112).842

[4] A.D. Mekhtiyev, YE.ZH. Sarsikeyev, A.V. Atyaksheva, A.D. Atyaksheva, T.S. Gerassimenko, A.D. Alkina. Method of preventing deposits on the inner surface of circulating water pipelines of fer-roalloy electric furnace cooling systems // METALURGIJA 60(2021) 3-4, pp. 321-324. (<https://hrcak.srce.hr/256098>)

[5] Иманов Ж.Ж., Мехтиев А.Д., Исакова А.М. Аппараты электромагнитной обработки воды технологических циклов тепловых электрических станций. // Булатовские чтения. Сборник статей-2020

[6] Таджибаева А.А., Такибаева А.Т., Мехтиев А.Д., Югай В.В., Алькина А.Д., Амиров А.Ж., Калиаскаров Н.Б., Есенжолов У.С., Жумабекова Б.М., Даниярова А.Т. Электромагнитное устройство для предупреждения солевых отложений в теплообменной аппаратуре. // Патент на полезную модель № 3955. Оpubл. 23.10.2018.

[7] Даниярова А.Т. Мехтиев А.Д., Югай В.В., Алькина А.Д., Демец О.В., Калиаскаров Н.Б., Есенжолов У.С., Амиров А.Ж., Таджибаева А.А., Жумабекова Б.М. Устройство для предотвращения образования накипи // Патент на полезную модель № 3769. Оpubл. 23.10.2018.

[8] Prokof'ev A.B. Magnitno-impul'snaya obrabotkamaterialov (MIOM): monografiya / A.B. Prokof'ev i dr. – Samara: ANO «Izdatel'stvo SNTs», 2019. – 140 s.

[9] А.Р. Bessonova, I.E. Stas'. Vliyanie vysokochastotnogo elektromagnitnogo polya na fiziko-khimicheskie svoystva vody i ee spektral'nye kharakteristiki // Polzunovskiy vestnik. – 2008. - № 3, s. 305-309

[10] Sergio Martínez Moya, Nuria Boluda Botella. Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale.// Water 2021, 13(17), 2365; <https://doi.org/10.3390/w13172365>

[11] Mark Landefeld, Extension Educator, Agriculture and Natural Resources, Monroe County Jeff Bettinger, Lead District Conservationist, Natural Resources Conservation Service. Water Effects on Livestock Performance. [Электронный ресурс].-URL: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/ANR-13>

[12] 12-29-2014 How Water Quality Affects Your Plants. [Электронный ресурс].-URL: <https://blog.1000bulbs.com/home/how-water-quality-affects-your-plants>

[13] Water quality for livestock Page last updated: Friday, 16 July 2021. [Электронный ресурс].-URL: <https://www.agric.wa.gov.au/livestock-biosecurity/water-quality-livestock>

## КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И КОМБИНИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

<sup>1</sup>Онгар Булбул, <sup>2</sup>Мергалимова Алмагуль Каирбергеновна, <sup>3</sup>Смагулова Гулдана Кашкинбаевна, <sup>4</sup>Нурмадиева Эльмира Амиржановна

<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>НАО «Казахский агротехнический университет имени С.Сейфуллина», г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>3,4</sup> НАО "Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева", г. Алматы, Казахстан

<sup>1</sup>[b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university), <sup>2</sup>[almagul\\_mergalimova@mail.ru](mailto:almagul_mergalimova@mail.ru), <sup>3</sup>[gu.smagulova@aues.kz](mailto:gu.smagulova@aues.kz),  
<sup>4</sup>[e.nurmadieva@aues.kz](mailto:e.nurmadieva@aues.kz)

**Аннотация.** На водном транспорте технологии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (технологии когенерации) используются уже значительное время. Известно [1], что на судах различного назначения имеются в составе энергетической установки блоки утилизации тепловой энергии (БУТ). БУТ энергетических установок судов позволяют утилизировать тепловую энергию охлаждающей жидкости и отработанных газов их двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Для автомобильного и железнодорожного транспорта подобные технологии снабжения их тепловой и электрической энергией только начинают развиваться. Когенерация или комбинированное производство тепло и электроэнергии (ТЭЦ) определяется как последовательное производство двух различных форм полезной энергии из одного первичного источника энергии, обычно механической энергии и тепловой энергии. Механическая энергия может использоваться либо привода генератора переменного тока для производства электроэнергии, либо для вращающегося оборудования, такого как двигатель, компрессор, насос или вентилятор, для предоставления различных услуг. Тепловая энергия может использоваться либо для непосредственного технологического процесса, либо для косвенного производства пара, горячей воды, горячего воздуха для осушителя или охлажденной воды для технологического охлаждения. Когенерация предоставляет широкий спектр технологий для применения в различных сферах экономической деятельности. Общій коэффициент использования топлива установок комбинированного производства тепловой и электрической энергии может достигать 85-90 % [2]

**Ключевые слова:** когенерация, когенерационная установка, оборудование когенерационных установок, паровой котел, биомасса, биогаз, дизельное топливо, тепловая энергия.

## COGENERATION TECHNOLOGY AND COMBINED HEAT AND ELECTRICITY

<sup>1</sup>Ongar Bulbul, <sup>2</sup>Mergalimova Almagul Kairbergenovna, <sup>3</sup>Smagulova Guldana Kashkinbaevna, <sup>4</sup>Nurmadieva Elmira Amirzhanovna

<sup>1</sup>Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU),  
Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>NJSC "Kazakh Agrotechnical University named after S.Seifullin", Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>3,4</sup> NJSC "Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek  
Daukeev", Almaty, Kazakhstan

<sup>1</sup>[b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university), <sup>2</sup>[almagul\\_mergalimova@mail.ru](mailto:almagul_mergalimova@mail.ru), <sup>3</sup>[gu.smagulova@aes.kz](mailto:gu.smagulova@aes.kz),  
<sup>4</sup>[e.nurmadieva@aes.kz](mailto:e.nurmadieva@aes.kz)

**Annotation.** *In water transport, technologies for the combined generation of heat and electricity (cogeneration technologies) have been used for a considerable time. It is known [1] that ships for various purposes have thermal energy recovery units (HRUs) as part of the power plant. ECUs of power plants of ships make it possible to utilize the thermal energy of the coolant and exhaust gases of their internal combustion engines (ICE). For road and rail transport, such technologies for supplying them with thermal and electrical energy are just beginning to develop. Cogeneration or combined heat and power (CHP) is defined as the sequential production of two different forms of useful energy from a single primary energy source, usually mechanical energy and thermal energy. Mechanical energy can either be used to drive an alternator to generate electricity, or it can be used to power rotating equipment such as a motor, compressor, pump, or fan to provide a variety of services. Thermal energy can be used either for the direct process or for the indirect production of steam, hot water, hot air for the dryer, or chilled water for process cooling. Cogeneration provides a wide range of technologies for application in various areas of economic activity. The overall fuel utilization factor of combined heat and power plants can reach 85-90% [2]*

**Key words:** *cogeneration, cogeneration plant, cogeneration plant equipment, steam boiler, biomass, biogas, diesel fuel, thermal energy.*

### **Введение**

В настоящий момент топливно-энергетический комплекс Казахстана переживает кризисное состояние. Основное проявление кризиса заключается в том, что обыденным

явлением становится нарушение и перебои снабжения отдельных регионов и потребителей топливом, электрической и тепловой энергией.

Одним из наиболее перспективных решений сложившейся ситуации является развитие малой энергетики. Большим потенциалом здесь обладает процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии - когенерация, которая помимо всего прочего дает возможность для развития экономики страны.

Целью данной работы является показать актуальность и целесообразность использования когенерации.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Изучить основные элементы когенерационной установки;
2. Изучить разновидности установок;
3. Показать сравнительные характеристики разных типов установок;

Когенерация — это комбинированное производство тепла и электроэнергии. На электростанции с применением технологии когенерации топливо используется для получения двух форм энергии — тепловой и электрической. Приставка «ко» в слове когенерация и означает комби. Проще говоря когенераторная установка это тепловая электростанция.

Когенераторные электростанции более эффективны в сравнении с электростанциями производящими только электрическую энергию.

С технологией когенерации появляется реальная возможность использовать тепловую энергию, которая обычно улетучивается в атмосферу через градирни и вместе с дымовыми газами.

При использовании эффекта когенерации существенно возрастает общий коэффициент использования топлива (КиТ). Применение когенерации в значительной степени сокращает затраты на приобретение топлива.

### ***Понятие «когенерация» и когенерационные установки (мини-ТЭЦ) и Схема когенерационных установок***

**Когенерация** — это не отдельная технология, а комплексная энергетическая система, которую можно модифицировать в зависимости от потребностей конечного потребителя энергии.

Теплоэлектростанции первого поколения существовали десятилетиями – в 1996 г. в Дании 48% потребности в электроэнергии и 38% потребности в тепле покрывалось за счет когенерационных установок. Тем не менее, реструктуризация производства энергии облегчает для промышленности рассмотрение когенерационных установок с возможностью продажи избыточной электроэнергии в распределительную сеть.

В отличие от традиционной централизованной выработки электроэнергии местной компанией, системы когенерации располагаются на объектах пользователя или рядом с ними и полностью или частично удовлетворяют потребности пользователя.

Традиционное производство электроэнергии преобразует в среднем только около трети потенциальной энергии топлива в электричество, выделяя при этом значительное количество тепла [3].

Система когенерации улавливает это отработанное тепло, достигая полной эффективности системы от 75% до 85%, и преобразует его в полезную тепловую энергию для горячего водоснабжения, стерилизации, обогрева, охлаждения и даже сушки. Делает это более эффективно, экономично, надежно и с меньшим вредом для окружающей среды, чем централизованное производство электроэнергии.

Когенерационная установка (рисунок 1) обычно состоит из основного двигателя для производства электроэнергии и генератора для утилизации тепла пара. Это поможет вам в выборе типа первичного двигателя для системы и в выборе соответствующего размера. Наибольшая энергоэффективность достигается при работе устройства с полной нагрузкой. Следовательно, следует избегать ситуаций работы с частичной нагрузкой или длительных простоев, которые могут возникнуть в результате использования агрегатов увеличенного размера.

Когенерационные системы стремительно развиваются и производители предлагают агрегаты с широким диапазоном мощностей – от десятков мегаватт до 1 киловатта. Много усилий было направлено на развитие технологий малой когенерации. Они в основном основаны на эффективности цикла Ренкина или цикла паровой турбины, цикла поршневого двигателя или цикла газовой турбины.

Когенерация обеспечивает:

- Производство электрической и/или механической энергии на территории ее потребления;
- Использование отработанного тепла для отопления, охлаждения, сушки или технологических целей;
- Бесшовная интеграция систем с различными технологиями, тепловыми приложениями и видами топлива в существующую инфраструктуру здания. Две наиболее распространенные конфигурации системы когенерации;
  - Газовая турбина или двигатель с рекуперацией тепла;
  - Паровой котел с паровой турбиной.

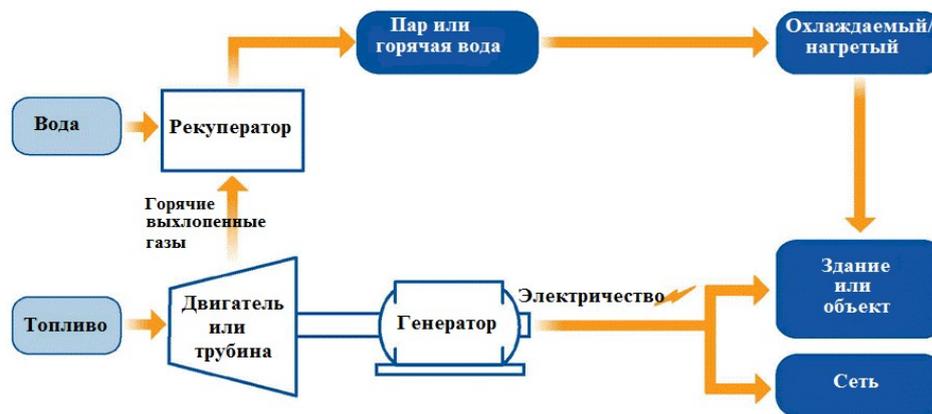


Рис. 1. Газовая турбина или двигатель с рекуперационной установкой

Газотурбинные или поршневые когенерационные системы вырабатывают электроэнергию путем сжигания топлива (природного газа или биогаза) для выработки электроэнергии, а затем используют установку для повторного использования тепловой энергии путем улавливания тепла потока выхлопных газов системы сгорания [4]. Это тепло преобразуется в полезную тепловую энергию, обычно в виде пара или горячей воды. Газотурбинные двигатели идеально подходят для крупных промышленных или коммерческих приложений когенерации, требующих достаточного количества электрической и тепловой энергии.

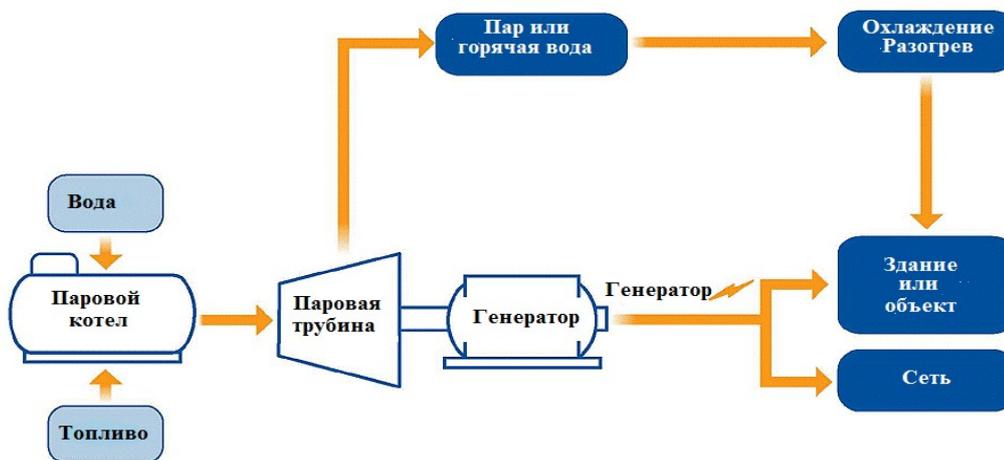


Рис. 2. Схема модуля когенерации с паровой турбиной

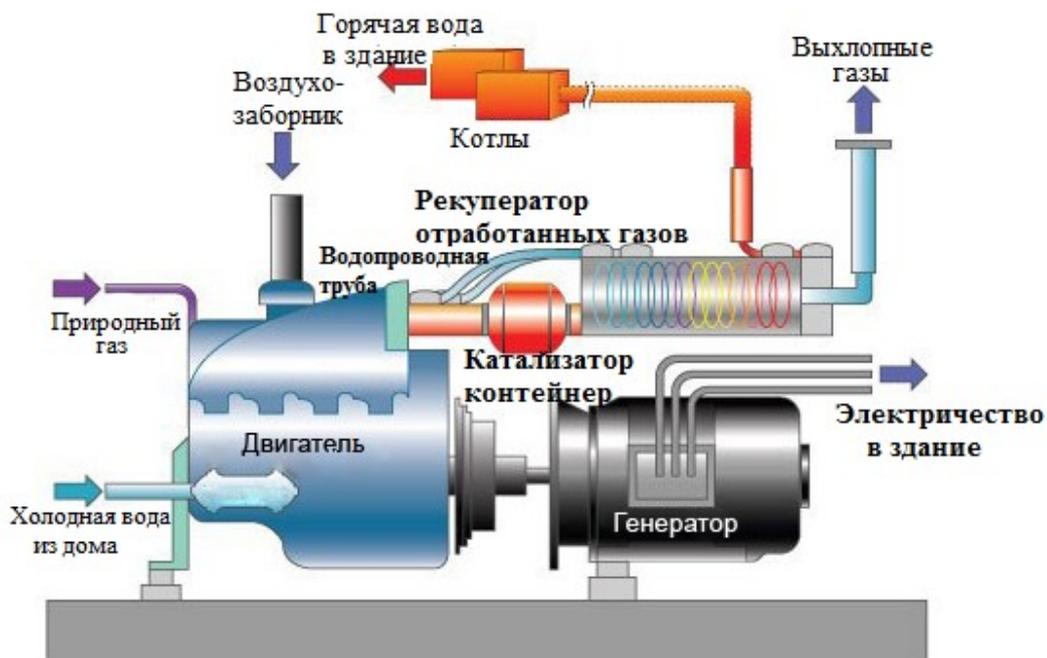


Рис. 3. Паровой котел с паровой турбиной.

Паровые турбины (рисунок 2 и рисунок 3) обычно вырабатывают электроэнергию как побочный продукт производства тепла (пара), в отличие от газовых турбин и поршневых когенерационных систем, где тепло является побочным продуктом производства электроэнергии (рисунок 4). Системы когенерации на основе паровых турбин обычно используются в промышленных процессах, где твердое топливо (биомасса или уголь) или отходы легко доступны для топлива котловой установки. Газовые и паровые турбины больше подходят для производств, где есть устойчивый и высокий спрос на пар высокого давления, например в деревообрабатывающей и бумажной промышленности, а также на предприятиях нефтехимии. Газовые двигатели в основном используются в установках мощностью 1-3 МВт в отраслях, где есть потребность в паре низкого давления и/или горячей воде, например, в пищевой промышленности. Паровые турбины используются там, где есть избыток пара [5-6].

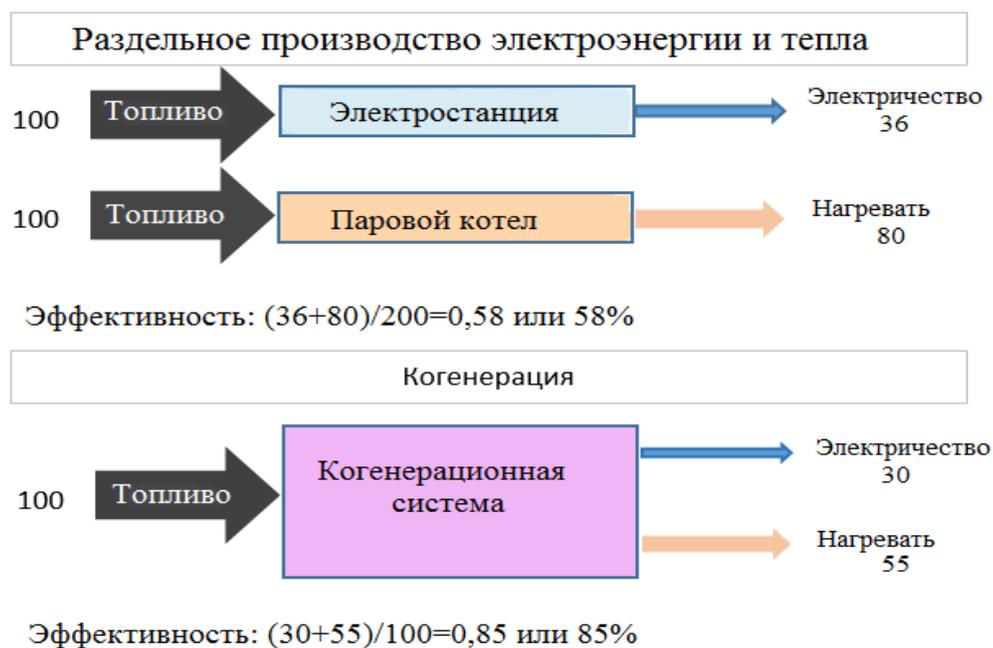


Рис. 4. Раздельное производство электроэнергии и тепла

Источником энергии в основном является природный газ, хотя в некоторых конфигурациях могут использоваться отходы, биомасса, биогаз, дизельное топливо, бензин, уголь и жидкое топливо. Коэффициент производства «электроэнергия-тепло» улучшается с прежнего значения 0,5 до нынешних 0,6–0,7 и продолжает повышаться до 1,0 при общем КПД 80%. Простой срок окупаемости ТЭЦ может варьироваться от 1,5 до 10 лет, в среднем 4,5 года.

Улучшения в автоматическом мониторинге и управлении позволяют большинству систем ТЭЦ работать без постоянного персонала на станции, один человек может обслуживать несколько агрегатов [7]. Для газовых микротурбин (мощностью 500 кВт и менее) и с топливными элементами характерны новые разработки. Их компактный размер позволяет устранить потери при передаче и распределении за счет расположения источника энергии/тепла близко к месту использования.

Капитальные затраты на микро турбины в настоящее время превышают те системы, которые используют поршневые двигатели в качестве первичных двигателей. Однако более высокая начальная стоимость этих систем компенсируется их практически необслуживаемой конструкцией [8]. Их общая эффективность увеличивается еще больше, потому что турбина, компрессор и постоянный магнит установлены на одном валу, что позволяет избежать механических потерь.

Сравнение малогабаритных когенераторов [1].

Технология	К.п.д., %			
	NO <sub>x</sub> , ppm	Нагревать	Эл. энергия	Общий
Турбина 1 МВт - природный газ	< 20	60 - 65	20 - 25	85 – 90
Поршневая турбина мощностью 1 МВт - природный газ	108	50	35 - 40	85 – 90
Новая газовая турбина комбинированного цикла (без трансмиссии и распределения)	n/a	n/a	55	55
Энергетическая система (включая передачу и распределение)	n/a	n/a	30	30
Новый промышленный газовый котел	24	85	n/a	85
Средний установленный промышленный котел	120	65		75 – 85
Паровая турбина с противодавлением	n/a	65		75 - 85
Топливные элементы	0,05	-	50	-

Топливные элементы преобразуют химическую энергию непосредственно в электричество. Они фактически не загрязняют окружающую среду, бесшумны и не требуют особого ухода. Промышленные установки включают топливные элементы с фосфорной кислотой мощностью 200 кВт и недавно представленную энергоустановку с протон обменной мембраной мощностью 250 кВт. Тем не менее, тепловая мощность относительно низкая (80 ° C), в будущем ожидается увеличение до 150 ° C, что должно облегчить производство пара.

### **Выводы**

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что очевидной необходимостью для Казахстана является развитие систем совместного производства электрической и тепловой энергии. Эти системы, по сравнению с существующими монопольными тарифами, позволяют существенно снизить затраты на потребляемую энергию, а также решить важную проблему пиковых нагрузок и недостатков централизованных систем.

Когенерационные установки имеют большой ресурсный потенциал, а так же преимущества в надежности, диапазоне мощностных ресурсов. Очевидным является и то, что монопольное владение электроэнергетическим рынком, подкрепленное технико-правовыми нормами и существующей практикой ставит российского промышленного, сельскохозяйственного и гражданского потребителя в безвыходное положение, вынуждая его к приобретению когенерационных установок.

### **Источники**

[1] Жаров А. В., Павлов А. А., Фавстов В. С., Горшков Р. В. Экспериментальное изучение характеристик дизельной когенерационной установки транспортного средства // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9–5. – С. 971–977

[2] Ольховский Г.Г. Совершенствование технологий комбинированной выработки электроэнергии и тепло на ТЭЦ росси // *Новости теплоснабжения*. – 2003. №10.

[3] Дубин В.С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 1. // *Промышленная энергетика*, №9, 2015.

[4] Григорьев А. В. Малая энергетика в России (состояние и перспективы развития) // *Электросистемы*, №4(16)/2006.

[5] Кривобок А.Д. Микро турбинные установки для автономных мини-ТЭС // *Электросистемы*, №4(16)/ 2006.

[6] Асеев С. Н., Курунов Ю.С. Повышение эффективности работы ГТУ-ТЭЦ в условиях переменных нагрузок // *Энергосбережение в городском хозяйстве. Мат. III-й российской научн.-тех. Конф.*, 04.2001. — Ульяновск: улгту, 2001.

[7] Лешкович В.В., Николаев Н. Н., Николаев Ю. Н. Особенности оценки показателей энергоэффективности когенерационных установок // *Энергосбережение*, №7/2007.

[8] Петриченко Д. А., Папкин И.А. Конструкция системы преобразования энергии отработавших газов для когенерационных энергоустановок // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5.

## ҚАТТЫ ОТЫННАН ЖАНҒЫШ ГАЗ АЛУДЫ ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫ

М.Б. Сатымғалиева<sup>1</sup>, Г.Ә. Әкімбек<sup>2</sup>, Б.К. Алияров<sup>3</sup> М.С. Коробков<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және Байланыс университеті

<sup>1</sup>mo.satymgaliyeva@aes.kz, <sup>2</sup>g.akimbek@aes.kz, <sup>3</sup>b.aliyarov@aes.kz,

<sup>4</sup>m.korobkov@aes.kz

***Аннотация.** Мақала ұсынылып отырған қондырғыда қатты отыннан жанғыш газдардың бөлінуін зерттеуге арналады. Бұл қондырғыда әртүрлі температурада зерттеулер жүргізілді, сонымен қатар қатты отындардан бөлінген жанғыш газдардың шығарылуы анықталды. Табиғи газды немесе көмірді негізгі отын ретінде пайдаланатын барлық жылу электр станцияларында отынды тұтандыру үшін мазут қолданады, ол қымбат отын түріне жатады. Мазут, отын ретінде, бірқатар сөзсіз қасиеттерге ие екендігі анық, бірақ айтарлықтай маңызды кемшіліктері де бар. Мазутты тасымалдау кезінде қатып қалмау үшін белгілі бір температурада ылғи қыздырылып отырылады, сонымен қатар, станцияларда сақтауда қыздыру үшін арнайы аккумуляторлар арқылы қатып қалмауы қадағаланып тұрады. Мазут бағасының жоғары болуы, оның тапшылығы, техникалық-экономикалық сипаттағы бірқатар келеңсіз салдарлар, оны эксплуатациялаудағы қиындықтар көмірмен жұмыс істейтін қазандық агрегаттарының отын балансындағы мазут үлесін азайтуды керек етеді. Осыған байланысты қазандық агрегаттарының алауын жағу және жарықтандыру кезінде мазутты бағасы төмен сұйық отынмен немесе көмірді қыздыру кезінде алынатын газ тәріздес жанғыш ұшпа заттармен ауыстырудың өзектілігі айқындалады. Зерттеу нәтижесі экология, экономика және энергетика салаларында өте тиімді жаңалық болады деген сенімдеміз.*

***Түйінді сөздер:** ЖЭС, мазут, отын, газдандыру, қондырғы, экономика, энергия үнемдеу.*

## EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR STUDYING THE RECOVERY OF FUEL GAS FROM SOLID FUEL

Satymgaliyeva<sup>1</sup> M.B., Akimbek<sup>2</sup> G.A., Aliyarov<sup>3</sup> B.K., Korobkov<sup>4</sup> M.S.

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeeva

<sup>1</sup>mo.satymgaliyeva@aes.kz, <sup>2</sup>g.akimbek@aes.kz, <sup>3</sup>b.aliyarov@aes.kz,

<sup>4</sup>m.korobkov@aes.kz

**Abstract.** *The article is devoted to the study of the process of separation of combustible gases from solid fuel in the proposed installation. This installation was used to conduct research at different temperatures, and also determined the release of combustible gases separated from solid fuel. All thermal power plants using natural gas or coal as their main fuel use fuel oil, which is an expensive type of fuel, for ignition. It is clear that fuel oil, as a fuel, has a number of undeniable properties, but there are also significant drawbacks. Fuel oil is always heated to a certain temperature so as not to freeze during transportation, and is also controlled by special accumulators for heating during storage at stations. The high price of fuel oil, its shortage, a number of negative technical and economic consequences, difficulties in its operation make it necessary to reduce the share of fuel oil in the fuel balance of coal-fired boilers. In this regard, the importance of replacing fuel oil with cheap liquid fuel or gaseous combustible volatile substances obtained by heating coal during ignition and ignition of boiler units has been determined. We believe that the result of the study will be a very useful innovation in the field of ecology, economics and energy.*

**Key words:** *CHP, fuel oil, fuel, gasification, plant, economics, energy saving.*

### ***Kіpіcne***

Дүние жүзіндегі көмір қоры орасан зор. Мұнай мен табиғи газбен салыстырғанда олар кең таралған. Экономикалық тұрғыдан алынатын көмір қоры 1 триллион тоннаға жуық деп бағаланады, бұл қазіргі қарқынмен 200 жылға жуық аралыққа жетеді [1].

Энергияның әртүрлі түрлерін жан-жақты салыстыру көмір болашақтың отыны болып қала береді деген қорытындыға әкеледі. Осыған байланысты қатты отынды тек жағып қана қоймай одан газ алу жолдарын қарастыру қажет.

Қазіргі таңда жыл сайын көптеген ғылыми конференциялар өтуде. Солардың бірі 2021 жылғы Париж келісімі, ол болашақта арзан технологияларға және декарбонизацияға бағытталған.

Жаңа технологияларға көшу ұзақ кезеңдерді қамтитындықтан, болашақтың энергиясына жаңаша көзқарас пен мемлекеттердің алдына қойылған міндеттерін қысқа мерзімде орындау мүмкін емес. Еліміздің энергетика нарығының жаңа стратегиялары аралас режимде электр және жылу энергиясын өндіруге бағытталған. Осыған байланысты жоғарыда айтылғандай арзан технологияларды жандандыру керек [3]. Осы ұсынылып отырған қондырғы арқылы энергия мен уақытты үнемдеп, арзан технология көзі ретінде қарастырамыз. Өзімізден шыққан қондырғылар қолдауды қажет етеді.

Қазіргі таңда жылу энергетикасында ұнтақ көмір қазандықтарын жағу кезінде және ұнтақ көмір алауының жануын (жарықтандыруын) тұрақтандыру үшін мазут немесе табиғи газ қолданылады. Бұл мақсаттарға әлемде жылына 50 млн тоннадан астам мазут жұмсалады. Энергетикалық көмір сапасының кеңінен төмендеуі ЖЭС-та

мазут шығынын көбейтуге әкеп соқтырады, осы орайда мұнай өңдеудің тереңдеуі мазут өндірісін төмендетеді [4].

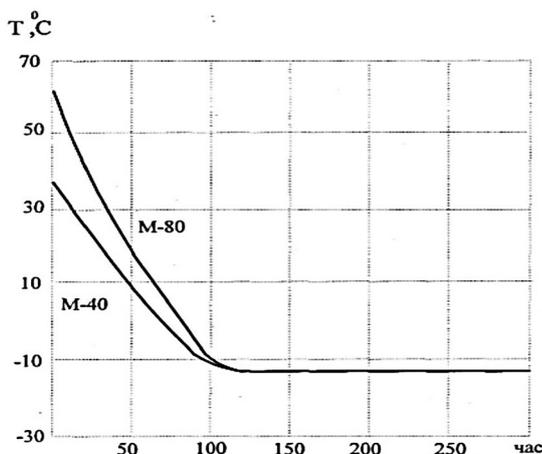
Мазутты пайдаланудағы көрсетілген проблемалар шағын энергетикада, қуаттылығы 35-75 т/сағ болатын турбулентті, құйынды шаң-көмір жанарғылары бар қазандықтар пайдаланылатын станцияларда одан да өткір өзекті мәселе болып отыр. Көптеген жылыту қазандықтары ауыспалы жылу жүктемесі бар режимде жұмыс істейді, оларда бір күн ішінде жүктеме қазандықтың толық қуатының 50-ден 100% - ға дейін өзгеруі мүмкін, ондай жағдайда шаң-көмір жанарғыларының мазутты жарықтандыруы барлық уақытта қажет болады. Осылайша, мазут қосымша емес, екінші негізгі отынға айналып отыр. Мазутты осындай көп тұтыну кезінде отынның екі түрін жағудан қазандықтардың экологиялық - экономикалық көрсеткіштерінің нашарлауы одан да арта түспек. Мазут бағасының жоғары болуы, оның тапшылығы, техникалық-экономикалық сипаттағы бірқатар келеңсіз салдарлар, оны эксплуатациялаудағы қиындықтар көмірмен жұмыс істейтін қазандық агрегаттарының отын балансындағы мазут үлесін азайтуды қарастыру мәселесі тек Қазақстанда емес, әлемдік масштабта шешімі табылуы қажет өзекті міндетке айналды [12].

Бұл тақырыпты көптеген ғалымдар зерттеген, бірақ біз ұсынып отырған қондырғының артықшылықтары бар. Осыған дейінгі қондырғылардан ерекшелігі, қондырғыда отын бөлшектерінің фракциясы бірдей температурада болуы және тәжірибе жүргізуге кететін уақыт пен энергия үнемділігі болып отыр. Бұл өзіне кететін шығынды төмендетеді деген сөз.

Қазандықтарды жағу және олардағы шаң көмір алауын жарықтандыру кезінде мазут шаруашылығын пайдалану шығындарын ескере отырып, ЖЭС-те мазутты тасымалдау мен сақтаудың техникалық-экономикалық сипаттамаларын анықтайық. ЖЭС-терге жағу мазуты негізінен темір жолмен көлемі 50 және 61 м<sup>3</sup> болатын цистерналармен жеткізіледі. Мазут оны құрайтын коллоидтардың қозғалғыштығының төмендеуіне байланысты қалыңдайды. Мазуттың қозғалғыштығының жоғалуы ондағы ерітілген қатты көмірсутектердің (парафиндер мен церезиндер) бөлінуі мен кристалдануына байланысты болады [9]. Осыған байланысты парафинді мазут тіпті оң температурада да ағып кете алмайды. Мазуттың қату температурасы, мысалы, маркасы М-100  $T_з=25^{\circ}\text{C}$ , парафин құрамының өсуімен қату температурасы  $T_з=52^{\circ}\text{C}$  жетеді [10,11]. Цистерналар жолда мазутты қыздыруға арналған құрылғылармен жабдықталмағандықтан, цистерналарды құю кезіндегі температурасы 60-75<sup>o</sup>C болған мазут жолда айтарлықтай тасымалдау қашықтығында салқиндайды да, оның температурасы қату температурасынан төмендеп кетеді.

1-суретте ауа температурасы -15<sup>o</sup>C кезінде жүріс уақытына байланысты көлемі 50 м<sup>3</sup> цистерналарда М-40 және М-80 маркалы мазуттардың температурасын төмендету кестелері келтірілген [12]. 1-суреттен 75 және 90 сағат өткеннен кейінгі

цистерналардағы мазуттың температурасы 0°C-қа тең болғандығын көруге болады, ал 150 сағаттан кейін сыртқы ауаның температурасына жеткен.



1-сурет. М-40 және М-80 маркалы мазуттардың кәдімгі және термос цистерналарында тасымалдау барысындағы температураларының төмендеу кестесі

1-кестеде ТМД және Қазақстанның әртүрлі климаттық белдеулері үшін жылдың суық мезгілінде тұтынушыға жеткізілген цистерналардағы мазут температурасы бойынша статистикалық деректер келтірілген [13].

1-кесте.

Жылдың суық мезгілінде цистерналардағы мазут температурасы бойынша орташаланған деректер

ТМД аймағы	Климаттық белдеу	Цистернадағы мазуттың температурасы, °C		
		Төмен тұтқырлықты	Парафинді	Жоғары тұтқырлықты
Европалық бөлік	Солтүстік	-10	-2	-7
	Орта	-5	+2	-3
	Оңтүстік	0	+5	-2
Сібір	Солтүстік	-16	-5	-10
	Оңтүстік	-12	-3	-7
Қазақстан	Солтүстік	-15	-6	-9

Осының бәрінен жылу электр станциялары күрделі климаттық жағдайларға байланысты цистерналардан мазутты ағызу қиындықтарына тап болатындығын көруге болады. Ағызуға қымбат жылу энергиясының белгілі бір мөлшері өз қажеттіліктеріне жұмсалады, бұл тұтынушыларға жылу энергиясын беру үлесін азайтады және

өндірілетін жылу мен электр энергиясының құнын арттырады. Осыған байланысты қазандық агрегаттарының алауын жағу және жарықтандыру кезінде мазутты бағасы төмен сұйық отынмен немесе көмірді қыздыру кезінде алынатын газ тәріздес жанғыш ұшпа заттармен ауыстырудың өзектілігі айқындалады.

Көмірді жағу алдында термиялық өңдеу газ тәрізді жанғыш өнімді алуға мүмкіндік береді, ол тез тұтанады, ал алынған алау оттықты жылытуы мүмкін. Мысалы, Магнитогорск металлургия зауытының орталық электр станциясында ондаған жылдар бойы қазандар  $1000 \text{ ккал/м}^3$  шамасында жанудың меншікті жылуы бар домна газында қызады.

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, зерттеудің негізгі мақсаты - қазандықтарды жағудың ғылыми-техникалық және техникалық-экономикалық негіздемесі мен жанғыш заттарды алу үшін көмірді алдын-ала термиялық өңдеу жүйелерін қолдана отырып мазутсыз жағу технологиясын әзірлеу. Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін қазақстандық көмірдің үш түріне: Шұбаркөл, Екібастұз және Қаражыра және т.б отындарымен эксперименттік зерттеу жүргізу қажет:

1) белгілі бір температура диапазонында көмірді қыздыру кезінде ұшпа жанғыш заттардың массалық шығуын анықтау.

2) көмірді қыздыру нәтижесінде алынған жанғыш газдың жану құрамы мен жылуын міндетті анықтау.

3) көмірді қыздырудың энергетикалық және экономикалық тұрғыдан неғұрлым қолайлы температурасын анықтау.

4) қыздыру уақыты мен жылдамдығының жанғыш газдардың сандық және сапалық құрамына әсерін зерттеу.

Табиғи газ, отын ретінде, мазутқа қарағанда маңызды артықшылықтарға ие: оның жоғары калориялық мәні бар, оны жағуға дайындаудың және пешке жеткізудің қарапайым технологиясы бар, бұл шығындарды айтарлықтай азайтады. Сондай-ақ, табиғи газ мазутпен салыстырғанда таза отын болып табылады. Табиғи газ - органикалық заттардың анаэробты ыдырауы кезінде жер қойнауында пайда болған газдардың қоспасы. Табиғи газ пайдалы қазбаларға жатады. Табиғи газдың негізгі бөлігін метан ( $\text{CH}_4$ ) құрайды - 92-ден 98% - ға дейін. Табиғи газдың құрамына метанның ауыр гомологты көмірсутектері де кіруі мүмкін: этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). сондай-ақ басқа көмірсутекті емес заттар: сутегі ( $\text{H}_2$ ), күкіртсутек ( $\text{H}_2\text{S}$ ), көмірқышқыл газы ( $\text{CO}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), гелий (жоқ). Таза табиғи газдың түсі мен иісі жоқ. Иіс арқылы ағып кетуді анықтау үшін газға аз мөлшерде жағымсыз иісі бар заттар қосылады (шіріген қырыққабат, жаңа піскен шөп, шіріген жұмыртқа) (одоранттар деп аталады). Көбінесе одорант ретінде этилмеркаптан қолданылады (16 текше метрге  $1000 \text{ г}$  табиғи газ).

Қазіргі уақытта өндірілетін көмір негізінен жылу электр станцияларында жағылады. Көмір негізінде электр энергиясының 20%-дан астамы өндіріледі,

металлургиялық кокстың 100% - ы өндіріледі және коммуналдық-тұрмыстық шаруашылық пен халықтың сұранысының 50% - ы қанағаттандырылады.

Әлемдік технологиялық трендтерді талдау көмірді терең өңдеу және кешенді пайдалану технологияларын енгізуді көздейтін индустриялықтан постиндустриалды дамуға көшу табалдырығында екенін көрсетеді. Қазақстанда елеулі қорлары бар, елдің барлық дерлік аумағында шоғырланған көмір кен орындарының көп мөлшерінің болуы табиғи газды, электр энергиясын, сондай-ақ сұйық отын мен химиялық өнімдерді алмастырғышты ала отырып, көмірді қайта өңдеу технологияларының дамуын өзектендіреді. Бұл ретте елдің отын-энергетикалық теңгеріміне көмірді тереңдете қайта өңдеу өнімдерін енгізу, энергия ресурстарының шикізат базасын едәуір кеңейту, елдің экономикалық қауіпсіздігіне нұқсан келтірмей көмірсутектер мен оларды тереңдете қайта өңдеу өнімдерінің экспортын қамтамасыз ету мүмкін болады. Қазіргі уақытта Қазақстанда және шетелде электр энергиясын алу үшін энергетикалық өнімдерді өндіру мақсатында, сондай-ақ бағалы химиялық өнімдерді алу мақсатында көмірді терең өңдеу бойынша ғылыми жұмыстар жүргізілуде. Қазіргі уақытта көмірді пайдаланудың синтез-газ, метанол, сұйық отын және басқа да тапшы өнімдерді алуды көздейтін екінші бағыты ерекше өзекті болып табылады. Бұл көмірді көмірсутегі шикізатын алудың сенімді балама көзі ретінде, әсіресе оларды тұтыну көлемінің өсуіне және қосымша барлаудың төмен қарқынына байланысты мұнай мен газдың таусылып жатқан қорлары аясында қарауға мүмкіндік береді.

Көмірді терең өңдеудің перспективалы бағыты көмірді жерасты газдандырудың ұңғымалық технологиясы (ПГУ) болып табылады, ол жер асты жағдайында көмірдің толық емес тотығу реакцияларын көмір қабаттарының пайда болу орнында жүзеге асыруды қамтамасыз етеді, оның сипаттамалары бойынша табиғиға ұқсас газ бетінде тиісті өңдеуден кейін алынады. Бұл ретте ПГУ газы синтез-газ, метанол, аммиак, карбамид және басқа да бағалы химиялық өнімдерді алу үшін шикізат болып табылуы мүмкін. Синтез газы метанолға, мотор отынына немесе сутегі алу үшін химиялық өңдеу үшін қолданылады. ПГУ станциясымен, энергия қондырғысымен және синтез блогымен бірге кәсіпорындарды тау-кен энергетикалық-химиялық кешен ретінде сипаттауға болады. Шикізат көзі ретінде 45% деңгейіне дейін оттегімен байытылған үрлеуді қолдану арқылы алынған газ қарастырылды.

Көмірді қайта өңдеудің перспективалық процестері - технологиялары жетілдіріліп жатқан үшінші буын процестері құрамындағы плазмохимиялық процестер белгілі бір орын алып отыр. Плазмохимиялық процестердің жоғары селективтілігі, шикізаттың әр түрін қайта өңдеу мүмкіндігі, негізгі жабдықтың шағын өлшемдері, толық автоматтандыру мүмкіндігі, күл, күкірт және азот оксидтері мен басқа да зиянды заттардың қоршаған ортаға шығарылуының болмауы қатты отынды (тас және қоңыр көмір, тақтатаc, шымтезек) қайта өңдеудің бұл әдісін өте перспективалы етеді.

Синтез-газ (синтез газ, оның ішінде энергетикалық газ) алу арқылы көмірді плазмалық газдандырудың жоғары температуралық процесі - бұл күрделі гетерогенді физика-химиялық процесс, онда көміртегі мен оның қосылыстарының газдандырушы реагенттермен (оттегі, су буы және т.б.) бірқатар химиялық өзара әрекеттесуі жүзеге асырылады. Плазмалық газдандыру плазма түзетін газдың диссоциациясы кезінде радикалдар мен иондардың пайда болуымен сипатталады, бұл көлем бірлігінде энергияның жоғары концентрациясы кезінде физика-химиялық процестердің жоғары жылдамдығын тудырады [14].

Қатты отын бөлшектері бар екі фазалы плазмалық газ жүйелеріндегі химиялық түрлендірулер өте күрделі және әр түрлі реакцияларды қамтиды: ұшпа өнімдерді шығарумен қатты отынның деструкциясы, шығарылған өнімдердің «газ - қатты дене» түріндегі газ фазалық реакциясы. Көмірді плазмохимиялық газдандыру өнеркәсіптік қолдану үшін орынды, ол метанол өндіру үшін экологиялық таза отын мен шикізат алуға мүмкіндік береді.

Көмірді қайта өңдеудің газ тәріздес өнімдерін ғана емес, сонымен бірге қатты қалдықты да ұтымды пайдаланса, плазманы газдандырудың экономикалық тиімділігін айтарлықтай арттыруға болады. Мысалы, оны резеңке бұйымдарға толтырғыш ретінде пайдалану мүмкіндігі, ауыз суды тазартуға арналған адсорбент немесе оның негізінде ферросилиций, карбосилиций, техникалық кремний және т. б. сияқты құнды материалдарды алу мүмкіндігі.

Қазіргі уақытта көмірді газдандырудың бірнеше ондаған технологиялары бар. Әрқайсысы процестің температуралық режимі (1000-нан 2000 градусқа дейін), қысым, тотығу (ауа, оттегі, су буы), реакторлардың құрылымдық шешімдері, шикізатты дайындаумен (көмір, көмір эмульсиясы, шаң тәрізді көмір және т. б.) ерекшеленеді. [15, 14, 16, 17].

Тәжірбие нәтижесінде құрамында көміртегі тотығы (CO), сутегі, азот, метан, көмірқышқыл газы көп немесе аз болатын газ алу мүмкіндігі бар. Тиісінше, бұл өнімдерді химия өнеркәсібінде немесе жылу мен электр энергиясын өндіру үшін пайдалануға болады.

Газдандыру үшін әдеттегі қазандық қондырғыларында пайдалануға тиімсіз, құрамында күкірт мөлшері жоғары төмен сапалы көмірлерді пайдалануға болады. Соған қарамастан, бұл технологияның бірқатар кемшіліктері бар. Бұл технологияны 60-80 жылдары іс жүзінде қолдануды тоқтатқан. Біріншіден, оның калориялық мәні бойынша синтез-газ табиғи газдан кем дегенде екі есе төмен. Екіншіден, көмірден құнды өнімдерді алу үшін өте күрделі және қымбат технологияларды қолдану қажет.

Техникалық нәтижеге қол жеткізу үшін қазандық агрегаттарын майсыз жағу әдісі алаудың жануын тұрақтандыру және жанатын отынды дайындау арқылы жүзеге асырылады. Пайдалы модельге сәйкес қосымша жағу құрылғысында жылыту жолымен және оттегісіз көмірден алынатын жанғыш ұшпа заттар жағу отыны болып табылады,

бұл ретте бөлінген жанғыш ұшпалы заттар тікелей қазандыққа желдеткішпен (компрессормен) беріледі, ал тұтатқаннан кейін белгілі бір қысым кезінде одан әрі жинақталуы мүмкін алаудың жануын сақтау үшін қолданылатын газ қоймасы - рессиверге жіберіледі.

### ***Эксперименттік зерттеулердің әдістемесі***

Зерттеудің мақсаты: ұсынылған қондырғыда қатты отынды газдандыру арқылы алынған газды тұтандыру үшін қолданылатын мазутпен алмастыру және бұл қондырғы Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетикалық қондырғылар» кафедрасының зертханалық стенд ретінде оқу процесіне енгізу жұмыстарын қарастыру.

Ғылыми зерттеудің жаңалығы келесідей:

- қазандық агрегаттарын мазутсыз, көмірді термоөңдеу кезінде алынатын ұшпа жанғыш заттармен жағу тәсілі әзірленді және патентпен қорғалды;
- қазандық агрегаттарын сығылған табиғи газбен жағу тәсілі әзірленді, патентке өтінім берілді;
- мазутсыз жағу технологиясында пайдалану мүмкіндігіне қазақстандық көмірдің үш түрі эксперименттік зерттелді;
- көмірден ұшпа жанғыш заттардың шығуының температураға, қыздыру уақыты мен жылдамдығына тәуелділігі туралы эксперименттік деректер алынды;
- қажетті жану жылуы бар ұшпа жанғыш заттарды алу үшін көмірді қыздыру температурасының оңтайлы, энергетикалық және экономикалық тұрғыдан неғұрлым қолайлы диапазоны айқындалды.

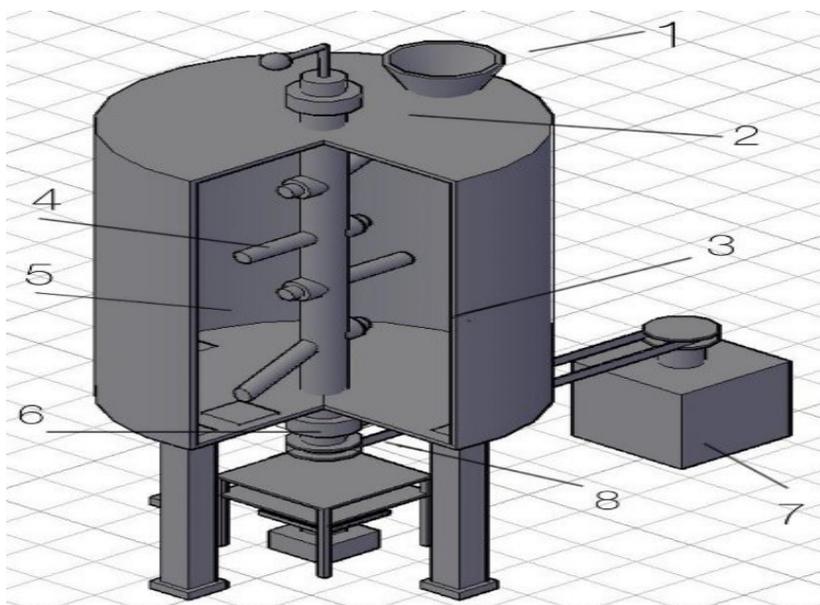
Зерттеу міндеттері:

- көмір тозаңды қазандық агрегаттарын мазутты мазутсыз жағудың қолданыстағы әдістеріне талдау жүргізу.
- сығылған және сұйытылған табиғи газбен жануды салыстырмалы талдау жүргізу.
- қолда бар артықшылықтарды ескере отырып, сығылған табиғи газды жағу технологиясын жасау.
- көмірден алынатын ұшпа жанғыш заттармен мазутсыз жағу технологиясын әзірлеу.
- қазақстандық көмірдің үш түріне мазутсыз жағу технологиясында қолданылатын ұшпа жанғыш заттарды алу мүмкіндігіне эксперименттік зерттеу жүргізу:
- ұшпа жанғыш заттардың шығуының көмірдің температурасына, жылдамдығына және қыздыру уақытына тәуелділігін алу.
- көмірді жылыту нәтижесінде алынған жанғыш газдың жану құрамы мен жылуын анықау.

– алынған тәуелділіктерге сүйене отырып, көмірді қыздырудың энергетикалық және экономикалық тұрғыдан ең қолайлы температурасын анықтау.

### **Ұсынылған қондырғының сипаттамасы**

Қатты отыннан бөлінетін жанғыш газдарды зерттеу және анықтау үшін жалпы көрінісі 2-суретте көрсетілген желдетілмеген диірменге ұқсас қондырғы ұсынылады.



2-сурет. Тәжірибе қондырғысының сұлбасы

Қондырғы сипаттамасы:

1-тиеу люгі

2,6-ыстыққа төзімді подшипниктер

3-құбырлы электржылытқыштар (ТЭН)

4-түрлі градустарда орнатылған цилиндрлі ұстағыштар

5-бункер

7-электрқозғалтқышы

8-ішкі қозғалыс білігі

Қатты отыннан бөлінетін жанғыш газдарды анықтау үшін жасалған қондырғыда эксперимент жүргізу кезінде бөлшектердің температурасы бірдей болуы маңызды. Атап айтқанда, белгілі бір уақыт өткеннен кейін қатты отыннан бөлінген жанғыш газдарды бөліп, оны газдағышпен анықтау. Отын бөлшектерінің өзара қозғалыс жылдамдығы мен температурасын қадағалау зерттеу параметрлерінің бірі болып табылады.

Газдандыру қондырғысы бойынша көптеген зерттеулер мен ғылыми жұмыстармен танысып, бұл қондырғының басқа газдандыру қондырғыларынан айырмашылығы - зерттелген көмірдің көлемі бір уақытта қызып, электр қуаты мен тәжірибе уақытын үнемдейтініне көз жеткіздік.

Газдандыру бойынша тәжірибелер жүргізу үшін қондырғыны герметикалық және 600<sup>0</sup>С жоғары қыздыру мүмкіндігімен жасау қажет және отын бөлшектері газдандыру барысында бір орында тұрмай, айналып, үнемі қозғалыста тұру керек. Қондырғыға қолданылатын метал түрі: Болат 20 және Х12МФ.

**Тәжірибе нәтижелері.** Осы қондырғыда М.Б. Сатымғалиева 4 курс оқып жүргенде ғылыми-зерттеу жұмысын жүргізіп, студенттің ғылыми-зерттеу жұмысы СҒЗЖ-2022 Республикалық конкурсына жіберілді және аталған студент Қазақстан ЖОО студенттері арасында үздік жұмыс үшін "Қатты отыннан жанғыш газдардың бөлінуін зерттеу" тақырыбы бойынша І дәрежелі министрлік дипломымен мадақталды. Енді осы жұмысты одан әрмен жалғастырып, терең зерттеу үстіндеміз. Қондырғы бойынша патент және енгізу актісін алу көзделуде. Осыған дейінгі зерттеулер алғаш құрастырылған қондырғымен жасалған болатын [5], біраз кемшіліктер тудырған соң қайта өңдеп жаңашаланған осы қондырғыны ұсынып отырмыз. Нақты нәтижелерге қол жеткізу үшін көптеген зерттеулер жүргізетін боламыз.

### **Қорытынды**

Қорытындылай келе, ұсынылып отырған қондырғы отынды газдандыруға арналған тиімді және арзан технология болмақ. Қондырғы өз кезегінде энергияны үнемдеп, одан алынған жанғыш газ станцияда мазутты алмастырады деп қарастырылады, сонымен бірге мазутты пайдалану барысындағы барлық қиындықтар алынып тасталынады. Шын мәнінде, станция бір отынға айналады, ал станцияда қолданылатын көмір негізгі және жанғыш отын болады. Егер көмірдің жылу техникалық сипаттамалары сәйкес келмесе жанғыш газдарды алу үшін станцияға ұшпа заттары жоғары басқа көмір түрлерін әкелуге болады деген болжам жасап отырмыз.

Нәтижесінде, бұл қондырғы зертханалық жағдайда сенімді нәтиже алуға мүмкіндік береді.

### **Пайдаланылған әдебиеттер**

- [1] Мировая электроэнергетика 1994 №2
- [2] Чокин Ш.Ч., Сартаев Т.С. Шкрет А.Ф. Энергетика и электрификация Казахстана, т.1. Алматы, Наука, 1985 257 с
- [3] Әкімбек Г.Ә. Сусымалы заттарының абразиялығын зерттеу әдісі мен эксперименттік қондырғы ұсыну.
- [4] Алияров Б.К., Мерғалимова А.К. О преимуществах использования газа для растопки котлоагрегатов. Материалы 1 международной научно-практической конференции «Современные тенденции котлоостроения», Барнаул, 2017

- [5] Г.Ә. Әкімбек, М.Б. Сатымғалиева, Б.К. Алияров, Б.Б. Бахтияр. Исследование выделения горючих газов из твердого топлива. Том 121 № 2 (2022): Вестник КазАТК
- [6] Лебедев Б.П., Файбисович Д.Л. Электроэнергетика мира в 1995 году // Электрические станции. 1998. - №8. – С.65-70
- [7] Бабий В.И., Куваев Ю.В. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с
- [8] Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. Алма-Ата: Наука. КазССР, 1993. – 259 с
- [9] Смирнов Е.К. Слив высоковязких грузов из железнодорожных цистерн. –М.: Трансжелдориздат, 1949. 151 с
- [10] Рябов В.Д. Химия нефти и газа – М.: Техника, 2004. – 228 с
- [11] Эрих В.Н., Расина М.Г., Рудин М.Г. Химия и технология нефти и газа. – Л.: Наука, 1985
- [12] Папок К.К., Семенидо Е.Г. Моторные топлива, масла и жидкости. М.: Гостоптехиздат, 1957
- [13] Геллер З.И. Мазут как топливо. М.: Недра, 1965
- [14] Vladimir E. Messerleab and Alexandr B. Ustimenko. Plasma Gasification of Coal with the Extraction of Valuable Components of the Mineral Mass. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 2016, 9 (8), 1311-1313
- [15] Dexiang Zhang. Thermal Decomposition of Coal. COAL, OIL SHALE, NATURAL BITUMEN, HEAVY OIL AND PEAT – Vol. I
- [16] YulongZhaoaShixueWang. Analysis of thermoelectric generation characteristics of flue gas waste heat from natural gas boiler, Energy Conversion and Management 148, 2017 (820-829)
- [17] D. Reid, J.E. Cabe, M.D. Bearden. PNNL Coal Gasification Research. Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington, July 2010

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Сафаров<sup>1</sup> И.М., Баймурзин<sup>2</sup> А.Х.

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», г. Казань, Россия

<sup>1</sup>ildarsafarov@mail.ru, <sup>2</sup>albertkhamitovich@gmail.com

***Аннотация.** Эффективность работы систем контроля теплоснабжения в системе ЖКХ на сегодняшний день является ключевой задачей. В статье представлена автоматизированная комплексная система управления и контроля температуры горячего водоснабжения в рамках программы энергосберегающих технологий. Устройство системы представляет из себя симбиоз промышленных контроллеров с интерфейсом Ethernet 100 Base-T, RS-232 и RS-485 и программного обеспечения, реализованного на архитектуре CoDeSys.*

***Ключевые слова:** Система контроля, энергоснабжение, параметры теплоносителя, промышленный ПЛК, программное обеспечение.*

## HOT WATER TEMPERATURE KEEPING SYSTEM

Safarov<sup>1</sup> I.M., Baimurzin<sup>2</sup> A.K.

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup>ildarsafarov@mail.ru, <sup>2</sup>albertkhamitovich@gmail.com

***Annotation.** The efficiency of heat supply control systems in the housing and communal services system is a key task today. The article presents an automated integrated system for controlling and monitoring the temperature of hot water supply within the framework of the energy-saving technologies program. The device of the system is a symbiosis of industrial controllers with Ethernet 100 Base-T, RS-232 and RS-485 interfaces and software implemented on the CoDeSys architecture.*

***Key words:** Control system, power supply, coolant parameters, industrial PLC, software*

### **Введение**

Системы автоматического управления с каждым годом занимают все больше места в различных сферах человеческой жизни. Они позволяют оптимизировать решение множества насущных задач. В данной работе, для решения задачи оптимизации контро-

ля теплоснабжения в системе ЖКХ, была разработана автоматизированная система контроля и управления параметрами теплоносителя в системе горячего водоснабжения. Основу предложенного решения составляют промышленные логические контроллеры со встроенным интерфейсом Ethernet 100 Base-T, RS-232 и RS-485, а также программное обеспечение, разработанное посредством инструментального программного комплекса промышленной автоматизации - CoDeSys.

### Основная часть

В настоящее время автоматические системы управления задействованы в самых разнообразных сферах народного хозяйства, способствуя решению широкого спектра производственных задач. Особенно это актуально для автоматического поддержания температуры горячего водоснабжения, обратной воды в системах приточной вентиляции, а также для регулирования температуры теплоносителя в центральных или блочных тепловых пунктах.

Существует множество различных технических решений для каждой из вышеупомянутых систем, которое позволяет изменять значения транспортируемой рабочей среды. Одним из таких решений являются аналоговые системы автоматического управления запорно-регулирующим клапаном (КЗР).

В таких системах коэффициенты регулирования исполнительного механизма зависят от производителя исполнительного механизма, от датчика, что делает систему неразделимой и далеко не универсальной. Следует также отметить, что не все такие системы имеют возможность дистанционного управления и требуют для этих целей использование множества преобразующих блоков на разных участках цепи, усложняя тем самым структуру системы.

Одним из наиболее универсальных решений данной задачи является использование пропорционально-интегрально-дифференцирующего-регулятора (далее ПИД-регулятор) для управления КЗР с электроприводом и дискретным управлением (рис. 1).

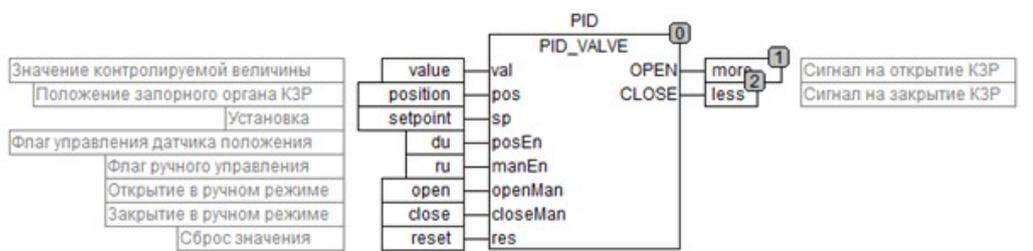


Рис.1.ПИД-регулятор для управления КЗР

Данное решение является актуальным, ввиду того, что система универсальна и позволяет удаленно контролировать и изменять значение установки контролируемой величины, в частности, температуры, кроме того, при наладке ПИД-регулятора, си-

система позволит дистанционно изменять его коэффициенты. Есть возможность интегрировать систему в уже существующие устаревшие КЗР без датчиков положения штока, посредством изменения программы или путем добавления в старую систему нового программируемого логического контроллера с данным решением, что позволит значительно сэкономить время и ресурсы на переустановку системы. Быстрое и качественное регулирование процесса за счет ПИД-блока так же является преимуществом данного решения.

Для представления полной визуализации, был смоделирован процесс регулирования горячего водоснабжения (ГВС) центрального теплового пункта, где вход VAL ПИД-регулятора получает значения, снятые с датчика температуры циркулирующей цепи ( рис.2 ).

Величина постоянной температуры составляет 63 С°. Чтобы подобрать постоянную интегрирования, коэффициент пропорциональности и постоянную дифференцирования PID блока , необходимо воспользоваться эмпирическим методом.

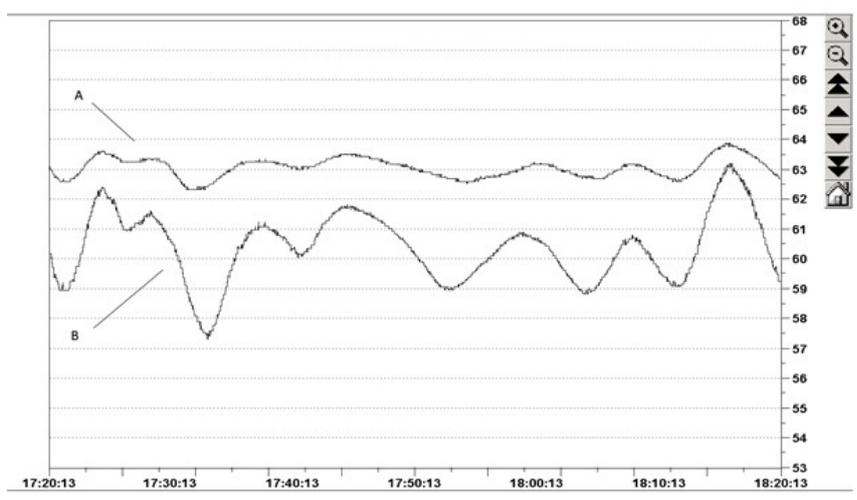


Рис. 2. поддержания температуры в среде CoDeSys 2.4

Дискретность отсчета  $d=200$  мс.

A – значения, снятые с датчика температуры ГВС. B – входные значения, снятые с датчика температуры циркулирующей цепи.

Таблица 1

Приблизительные расходы на модернизацию системы

КЗР не меняется			КЗР заменяется		
Требуемые ресурсы	Кол-во раб. ед. (ч.)	Оплата раб. вр. (руб.)	Требуемые ресурсы	Кол-во раб. ед. (ч.)	Оплата раб. вр. (руб.)

Инженер	3	700	Проектировщик	3	700
			Конструктор	3	700
			Слесарь	6	1 500
			КЗР		25 000
			Логистика	3	700
			Бухгалтерия	3	700
Итого					
		700			29 300

Чтобы рассчитать размер оплаты труда персонала, участвующего в модернизации, необходимо использовать следующую формулу:

$$\frac{C_{ЗП}}{C_{РЧМ}} K_{СН} K_{ДЗ} \quad (1)$$

где  $C_{ЗП}$  – средняя заработная плата в республике Татарстан (44 965 руб.);  
 $C_{РЧМ}$  – среднее число рабочих часов в одном месяце;  $K_{СН}$  – коэффициент отчислений на социальные нужды;  $K_{ДЗ}$  – дополнительная заработная плата.

### **Выводы**

В заключение можно сказать, что предложенная система значительно сократит персонал на обслуживание одного объекта, а также повысится уровень контроля и сокращения времени доступа к данным.

### **Источники**

[1] Русяева Е. Ю, Салтыков С. А. Концептуальные основы теории активных систем, их развитие в теории управления организационными системами: тенденции и перспективы // Проблемы управления. 2017. №4. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-osnovy-teorii-aktivnyh-sistem-ih-razvitie-v-teorii-upravleniya-organizatsionnymi-sistemami-tendentsii-i-perspektivy>

[2] Мозжечков В. А., Савин А. С. Компьютерное моделирование электроприводов трубопроводной арматуры // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. №5-1. <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-modelirovanie-elektroprivodov-truboprovodnoy-armatury>

[3] Гапоненко С. О. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов / С. О. Гапоненко, Р. А. Фазлиев, М. В. Калинина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 142-147

[4] Софиева Ю. Н., Абрамов К.В. Применение пакета моделирующих программ ChemCAD в учебнотренировочных комплексах для изучения систем автоматизации ректификационных установок // ИВД. 2012. №1.

[5] Мозжечков В. А., Холматов А. З. Автоматическое управление моментом силы уплотнения электроприводной трубопроводной арматуры // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №9. <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskoe-upravlenie-momentom-sily-uplotneniya-elektroprivodnoy-truboprovodnoy-armatury>

[6] Кнауб, В. В. Преимущества и проблемы развития автоматизации технологических процессов / В. В. Кнауб // Студенческий форум. – 2021. – № 4-1(140). – С. 53-55.

[7] Зверева Э. Р. Исследование механизма влияния многофункциональной присадки к котельному топливу / Э. Р. Зверева, В. П. Плотникова, Г. Г. Сафина [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 89-99.

[8] Калайтанов, В. В. CoDeSys - инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации / В. В. Калайтанов // Young Science. – 2014. – Т. 1. – № 3. – С. 7-9.

[9] Сафин, И. Н. Визуализация и программирование в codesys на примере терморегулятора / И. Н. Сафин, К. С. Семенова, Л. Ф. Хуснутдинова // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, Альметьевск, 26–29 сентября 2016 года / Альметьевский государственный нефтяной институт. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2016. – С. 182-183.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВКИ ПОРИСТЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОДУВКЕ ВОЗДУХОМ

Соловьева Ольга Викторовна<sup>1</sup>, Соловьев Сергей Анатольевич<sup>2</sup>, Мурзаев Александр Сергеевич<sup>3</sup>, Шакурова Розалина Зуфаровна<sup>4</sup>, Гилязов Альберт Ильдарович<sup>5</sup>, Голубев Ярослав Павлович<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup>[solovyeva.ov@kgeu.ru](mailto:solovyeva.ov@kgeu.ru), <sup>2</sup>[solovev.sa@kgeu.ru](mailto:solovev.sa@kgeu.ru), <sup>3</sup>[shakurova.rz@gmail.com](mailto:shakurova.rz@gmail.com), <sup>4</sup>[erodonov@list.ru](mailto:erodonov@list.ru),  
<sup>5</sup>[keni82590@gmail.com](mailto:keni82590@gmail.com), <sup>6</sup>[yar.8991@mail.ru](mailto:yar.8991@mail.ru)

***Аннотация.** Фильтрация через пористые и волокнистые фильтры различных материалов является одним из самых распространенных способов очистки газов. В работе проведены экспериментальные исследования перепада давления в пористых фильтрах с различной пористостью ( $\epsilon=0,75$  и  $\epsilon=0,58$ ). Воздушные фильтры в количестве от 2 до 5 штук располагались в канале последовательно, слитно или дискретно, в последнем случае расстояние между фильтрами равнялось высоте фильтра (1 см) и оставалось неизменным. Исследования проводились при следующих скоростях воздушного потока: 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с. Результаты исследований показали, что при дискретном расположении фильтров перепад давления снижается относительно слитного расположения. Эта разница увеличивается при повышении скорости воздушного потока и увеличения количества фильтров. При увеличении пористости фильтра отличие между перепадами давления при дискретном и слитном расположениях фильтра уменьшается.*

***Ключевые слова:** фильтр, пористость, дискретное расположение, перепад давления, фильтрация.*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF POROUS FILTERS LAYOUT ON PRESSURE DROP DURING AIR BLOWING

Soloveva Olga Viktorovna<sup>1</sup>, Solovev Sergey Anatolievich<sup>2</sup>, Murzaev Alexander Sergeevich<sup>3</sup>, Shakurova Rozalina Zufarovna<sup>4</sup>, Gilyazov Albert Ildarovich<sup>5</sup>, Golubev Yaroslav Pavlovich<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>[solovyeva.ov@kgeu.ru](mailto:solovyeva.ov@kgeu.ru), <sup>2</sup>[solovev.sa@kgeu.ru](mailto:solovev.sa@kgeu.ru), <sup>3</sup>[shakurova.rz@gmail.com](mailto:shakurova.rz@gmail.com), <sup>4</sup>[erodonov@list.ru](mailto:erodonov@list.ru),  
<sup>5</sup>[keni82590@gmail.com](mailto:keni82590@gmail.com), <sup>6</sup>[yar.8991@mail.ru](mailto:yar.8991@mail.ru)

***Annotation.** Filtration through porous and fibrous filters of various materials is one of the most common methods of gas purification. We carried out the experimental studies of*

*the pressure drop in porous filters with different porosities ( $\varepsilon=0.75$  and  $\varepsilon=0.58$ ). Air filters in the amount of 2 to 5 pieces were located in the channel sequentially, continuous or discretely, in the latter case, the distance between the filters was equal to the height of the filter (1 cm) and remained unchanged. The studies were carried out at the following air flow rates: 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25 m/s. The results of the research showed that with a discrete arrangement of filters, the pressure drop decreases relative to the continuous arrangement. This difference increases as the airflow rate increases and the number of filters increases. With an increase in the porosity of the filter, the difference between the pressure drops at discrete and continuous arrangements of the filter decreases.*

**Key words:** filter, porosity, discrete arrangement, pressure drop, filtration.

### **Введение**

Волокнистые фильтры нашли широкое применение при очистке воздуха, промышленных газов и аэрозолей [1,2]. Такие фильтры представляют собой набор волокон, ориентированных в основном поперек движению потока газа. Основными характеристиками фильтров являются эффективность улавливания и перепад давления, создаваемый фильтром [3-5]. Для повышения эффективности фильтрации, как правило, увеличивают плотность фильтра, что ведет и к повышению перепада давления, а значит и мощности, необходимой для прокачки потока газа через фильтр. Чем большее сопротивление потоку создает фильтр, тем ниже его энергоэффективность. Таким образом, перед исследователями встает проблема оптимизации структуры фильтра таким образом, чтобы повысить эффективность улавливания частиц и сохранить низкий перепад давления.

Одним из способов повышения эффективности фильтрации является оптимизация расположения волокон, изменение диаметра волокна и плотности упаковки. Ориентация волокон является важной характеристикой, влияющей на перепад давления. В случае, когда волокна ориентированы поперек потока, создается максимальный перепад давления, в случае ориентации по направлению потока – минимальный. В реальных моделях фильтров волокна, как правило, расположены под разными углами к потоку, что обеспечивает высокую эффективность улавливания частиц и относительно небольшой перепад давления [6]. Помимо структурных параметров фильтра на эффективность фильтрации и перепад давления влияют размер твердых частиц, а также условия эксплуатации (температура потока, скорость фильтрации, влажность). Исследованием характеристик фильтрации под влиянием вышеперечисленных параметров занимались многие исследователи [7-12].

Сао и др. [13,14] провели численные многопараметрические исследования эффективности фильтрации и перепада давления в волокнистом фильтре при различных диаметрах волокна (от 15 до 20 мкм), скоростях потока воздуха (0,1; 0,3 м/с) и диаметрах твердых фильтруемых частиц (от 0,1 до 0,9 мкм). Результаты

исследований показали, что повышение диаметра частиц и скорости потока воздуха приводит к увеличению эффективности фильтрации и перепада давления. В свою очередь, увеличение диаметра волокна привело к снижению эффективности фильтрации на 5-10%, но не оказало существенного влияния на перепад давления.

Сюо и др. [15] разработали волокнистый фильтр из муллитовой керамики и исследовали эффективность улавливания частиц пыли и перепад давления. Разработанный фильтр имеет высокую пористость (73%) и низкую плотность (0,64 г/см<sup>3</sup>). Фильтр показал высокую эффективность улавливания крупных частиц пыли (от 3 до 10 мкм) – 97%. Для частиц меньшего размера, 1 и 0,5 мкм, эффективность улавливания составила 87% и 82% соответственно. Авторы провели исследования на довольно низкой скорости потока – 1,25 м/мин, перепад давления на такой скорости составил менее 100 Па. Необходимо проводить дальнейшие исследования эффективности улавливания и перепада давления при больших скоростях воздушного потока.

Thomas и др. [16] разработали модель для прогнозирования перепада давления и эффективности фильтрации в нетканых фильтрах. Авторы исследовали как меняются характеристики фильтрации по мере загрузки фильтра. Результаты исследований показали, что по мере загрузки фильтра перепад давления увеличивается. Эффективность фильтрации растет по мере загрузки фильтра до достижения определенной собранной массы частиц (1 г/м<sup>2</sup>), после эффективности фильтрации остается неизменной из-за образования слоя частиц (корки) на поверхности фильтра.

Zhou и др. [17] численно исследовали характеристики фильтрации в волокнистом фильтре из стекловолокна в условиях синусоидального потока. Авторы выяснили, что увеличение скорости потока приводит к увеличению перепада давления. Исследования эффективности фильтрации показали интересные результаты: при увеличении размеров частиц пыли от 0,01 до 0,1 мкм эффективность фильтрации уменьшается от 100% до 40% и продолжает снижаться. При увеличении размера частиц до 1 мкм и выше эффективность фильтрации снова начинает возрастать. Такое поведение связано с тем, что воздушный поток движется синусоидально.

Анализ литературы по теме исследования показал, что ученые изучали влияние структуры фильтра, скорости потока и размера твердых частиц на эффективность улавливания и перепад давления. Целью нашего исследования является определение влияния компоновки пористых фильтров на перепад давления при продувке воздушным потоком.

### ***Материалы и методы***

В исследовании использовались волокнистые фильтры с пористостью  $\varepsilon=0,58$  и  $\varepsilon=0,75$ . Фотографии фильтров представлены на рисунке 1.

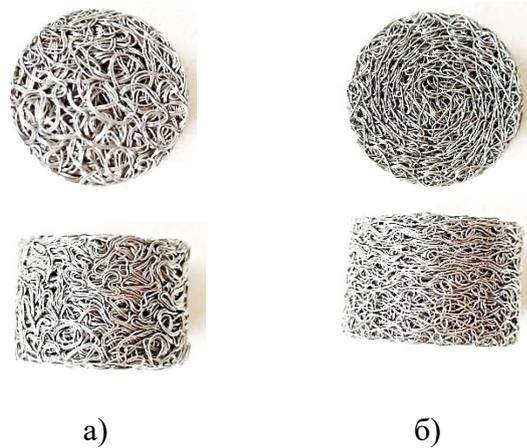


Рис.1. Исследуемые образцы фильтров: (а) фильтр со значением пористости  $\epsilon=0,58$ ; (б) фильтр со значением пористости  $\epsilon=0,75$ .

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

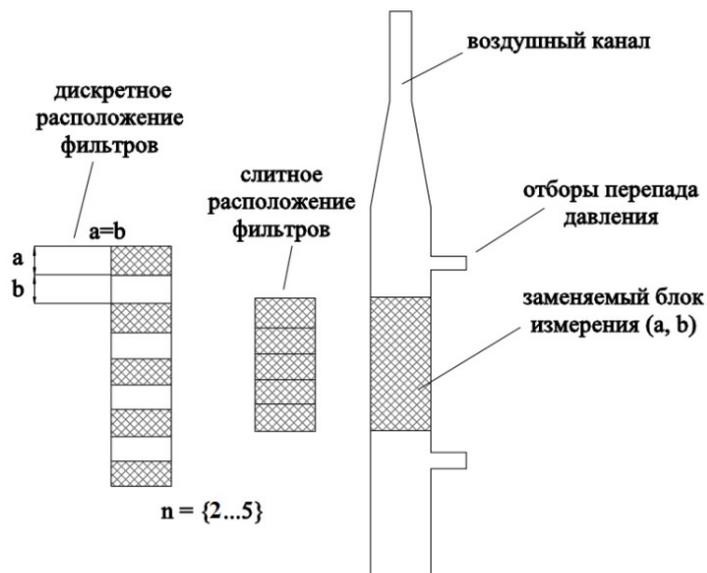


Рис. 2. Схема экспериментальной установки в случае дискретного и слитного расположения фильтров.

Экспериментальные исследования проводились при различных расположениях вставок (слитное или дискретное). Подача воздуха канал осуществлялась с помощью компрессора, скорость воздушного потока измерялась ротаметром. Исследования проводились при следующих скоростях потока:  $v = 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$  м/с. На каждой скорости проводилось по 5 измерений, результаты усреднялись. Количество пористых вставок варьировалось от 2 до 5. При слитном расположении пористые

фильтры располагались последовательно, без расстояния между ними. При дискретном расположении фильтры располагались также последовательно, но на фиксированном расстоянии друг от друга (1 см), равном толщине фильтра.

### ***Результаты и обсуждения***

В процессе исследований измерялось давление в канале до пористого фильтра и после него. Измерения перепада давления проводились с помощью дифманометра Testo 510i. Результаты измерений для фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,75$  представлены на рисунке 3. Сплошными линиями представлены результаты для слитного расположения фильтров, штриховыми – для дискретного расположения.

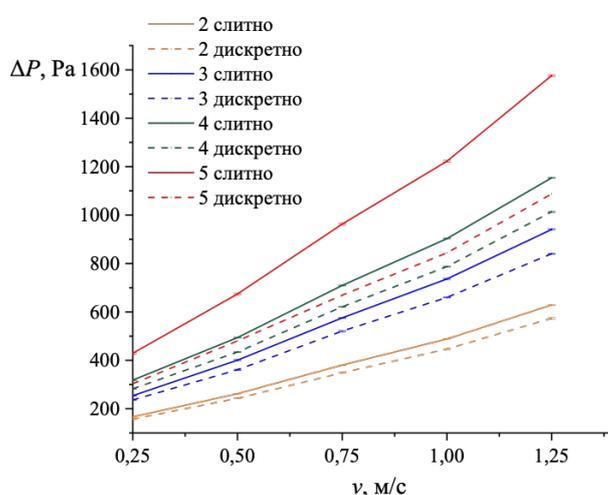


Рис. 3. Изменение перепада давления от скорости потока для фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,75$ .

При дискретном расположении фильтры показывают меньший перепад давления, чем в случае слитного расположения, и это различие увеличивается с повышением скорости потока воздуха. Такое поведение наблюдается для всех исследованных диапазонов количества вставок и на всех скоростях потока воздуха. Например, при скорости потока воздуха  $v=0,25$  м/с для случая двух фильтров разница между перепадами давления при дискретном и слитном расположениях составила 9,6 Па. При скорости  $v=1,25$  м/с было получено наибольшее отличие в перепадах давления для слитного и дискретного расположения фильтров – 366,6 Па. С увеличением количества фильтров в канале разница между перепадами давления в случаях слитного и дискретного расположений увеличивается. В таблице 1 представлены значения уменьшения перепада давления при дискретном расположении фильтров относительно слитного расположения, в процентах.

Таблица 1

Снижение перепада давления при дискретном расположении фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,75$  относительно слитного расположения, в процентах.

Количество фильтров	Скорость потока, м/с				
	0,25	0,5	0,75	1	1,25
2	5,8%	6,5%	8,4%	8,6%	8,8%
3	6,9%	10,0%	9,5%	10,4%	10,7%
4	11,1%	12,1%	12,5%	12,8%	13,2%
5	22,3%	28,7%	29,5%	30,9%	31,0%

Далее проанализируем результаты измерений фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,58$  (Рис.4). На графиках мы снова наблюдаем уменьшение перепада давления в случае дискретно расположенных фильтров. Например, рассмотрим случай с пятью фильтрами. При скорости 0,25 м/с разница в перепадах давлений в случае слитного и дискретного расположений составляет 299 Па. При скорости 1,25 м/с разница в перепадах давлений составила уже 911 Па. В целом, как и в случае с фильтром с пористостью  $\varepsilon=0,75$ , увеличение скорости приводит к увеличению разницы между перепадами давления при слитном и дискретном расположениях фильтров. Фильтры с меньшей пористостью ( $\varepsilon=0,58$ ) показали бóльшее снижение перепада давления при дискретном расположении.

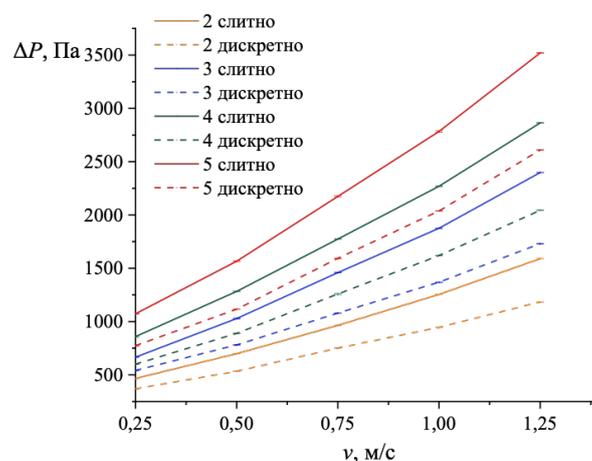


Рис. 4. Изменение перепада давления от скорости потока для фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,58$ .

В таблице 2 приведены значения уменьшения перепада давления при дискретном расположении фильтров относительно слитного расположения, в процентах, для фильтра с пористостью  $\varepsilon=0,58$ . Анализ результатов, представленных в таблицах 1 и 2 показал, что уменьшение пористости фильтра приводит к бóльшему снижению перепада давления при дискретном расположении фильтров относительно слитного расположения. Так, для фильтра с пористостью  $\varepsilon=0,58$  в случае трех фильтров снижение перепада давления при дискретном расположении относительно слитного составляет 27,8 % при скорости потока 1,25 /с. При тех же условиях фильтр с пористостью  $\varepsilon=0,75$  показал снижение перепада давления 10,7 %. При увеличении количества фильтров и скорости потока воздуха фильтры как с пористостью  $\varepsilon=0,58$ , так и с пористостью  $\varepsilon=0,75$  показывают примерно близкие значения снижения перепада давления при дискретном расположении. Так, например, при количестве фильтров  $n=5$  и скорости потока воздуха 1,25 м/с снижение перепада давления составило: для фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,58$  – 33,9%, для фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,75$  – 31%.

Таблица 2

Снижение перепада давления при дискретном расположении фильтров с пористостью  $\varepsilon=0,58$  относительно слитного расположения, в процентах.

Количество фильтров	Скорость потока, м/с				
	0,25	0,5	0,75	1	1,25
2	20,8 %	21,8 %	22,1 %	24,6 %	25,6 %
3	22,8 %	24,2 %	26,0 %	27,0 %	27,8 %
4	28,6 %	29,3 %	29,8 %	29,9 %	30,7 %
5	30,2 %	31,2 %	31,9 %	32,8 %	33,9 %

Необходимо отметить, что экспериментальные исследования перепада давления при движении воздуха через пористые волокнистые фильтры показали уменьшение измеренного перепада давления для всех случаев дискретного расположения фильтров относительно слитного расположения. Такой эффект может быть связан с сильным турбулентным режимом течения воздуха между фильтрами в случае их дискретного расположения. В области приближения потока воздуха к первому фильтру можно считать, что молекулы газа в среднем движутся параллельно оси симметрии воздушного канала. На выходе из фильтра потоки воздуха не параллельны оси

симметрии канала, и для выравнивания общего потока требуется пройти некоторое расстояние. При дискретизации материала фильтры недостаточно далеко друг от друга расположены, и поток воздуха не успевает выровняться при движении между ними. Можно сделать вывод, что при небольших значениях пористости фильтра дискретизация с образованием ступенчатого движения воздуха способствует снижению общего сопротивления, несмотря на увеличение общей длины образца.

### **Выводы**

Проведены экспериментальные исследования перепада давления при прохождении воздушного потока через волокнистые фильтры со значениями пористости  $\varepsilon=0,75$  и  $\varepsilon=0,58$ . Исследования проводились для случаев слитного и дискретного расположения пористых фильтров, количество фильтров варьировалось от 2 до 5, скорости воздушного потока составляли: 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с. Результаты исследований показали, что при дискретном расположении фильтров наблюдается меньший перепад давления, чем при слитном расположении. Отличие в перепаде давления при дискретном и слитном расположениях растет при увеличении скорости потока и количества фильтров. Пористость фильтра также оказывает влияние на сопротивление потоку: фильтры с большей пористостью  $\varepsilon=0,75$  показали меньшие отличия в перепаде давления между дискретным и слитным расположением фильтров (при  $n=2;3$ ). С увеличением количества фильтров ( $n=4;5$ ) и скорости потока пористость материала уже не оказывает большого влияния на величину снижения перепада давления при дискретном расположении фильтров относительно слитного расположения.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

### **Источники**

[1] Chaudhuri J., Boettcher K., Ehrhard P. Pressure drop in fibrous filter—Representative domain size and effect of fibre orientation //Chemical Engineering Science. – 2021. – Т. 246. – С. 116865.

[2] Bai H. et al. Theoretical model of single fiber efficiency and the effect of microstructure on fibrous filtration performance: A review //Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2020. – Т. 60. – №. 1. – С. 3-36.

[3] Soloveva O. et al. Study of the Influence of Porous Structure on the Efficiency of Emulsion Separation in Wastewater Purification on Transport //Transportation Research Procedia. – 2022. – Т. 61. – С. 402-409.

[4] Soloveva V. et al. Determination of the effective porosity of a single filter fiber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2094. – №. 2. – С. 022075.

- [5] Soloveva O. V. et al. Experimental study of pressure drop in porous structures created on the basis of Kelvin cells //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1076. – №. 1. – С. 012078.
- [6] Chaudhuri J. et al. Pressure drop in fibrous filters //European Journal of Mechanics-B/Fluids. – 2019. – Т. 76. – С. 115-121.
- [7] Chernyakov A. L., Kirsh A. A. Pressure Drop and Aerosol-Particle-Collection Efficiency of Polydisperse Fibrous Filters //Colloid Journal. – 2018. – Т. 80. – №. 3. – С. 331-338.
- [8] Abdolghader P. et al. Airborne nanoparticles filtration performance of fibrous media: A review //Science and Technology for the built Environment. – 2018. – Т. 24. – №. 6. – С. 648-672.
- [9] Sadeghifar H. Maximizing the transport properties of two-dimensional fibrous materials //Materials Today Communications. – 2022. – Т. 32. – С. 103897
- [10] Hsiao T. C. et al. Modeling of the Transitional Pressure Drop of Fibrous Filter Media Loaded with Oil-coated Particles //Aerosol and Air Quality Research. – 2019. – Т. 19. – №. 7. – С. 1625-1635.
- [11] Sadeghifar H. An optimized microstructure to minimizing in-plane and through-plane pressure drops of fibrous materials: Counter-intuitive reduction of gas diffusion layer permeability with porosity //Journal of Power Sources. – 2018. – Т. 385. – С. 100-113.
- [12] Zhang Y. et al. Prediction of flow characteristics in fibrous porous medium using a novel modeling algorithm and lattice Boltzmann method //Chemical Engineering Science. – 2020. – Т. 221. – С. 115647.
- [13] Cao B. et al. Investigation of the filtration performance for fibrous media: Coupling of a semi-analytical model with CFD on Voronoi-based microstructure //Separation and Purification Technology. – 2020. – Т. 251. – С. 117364.
- [14] Cao B. et al. Pressure drop model for fibrous media in depth filtration: Coupling simulation of microstructure and CFD porous media during dust loading //Building and Environment. – 2021. – Т. 202. – С. 108015.
- [15] Cuo Z. et al. Highly porous fibrous mullite ceramic membrane with interconnected pores for high performance dust removal //Ceramics International. – 2018. – Т. 44. – №. 10. – С. 11778-11782.
- [16] Thomas D. et al. Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model //Separation and Purification Technology. – 2019. – Т. 215. – С. 557-564.
- [17] Zhou B. et al. Filtration performance of glass fibrous air filter media under sinusoidal flow condition //Building and Environment. – 2020. – Т. 183. – С. 107182.
- [18] Соловьева О.В., Соловьев С.А., Зарипова Р.С., Тюрина М.М., Чупаев А.В. Численное моделирование движения газозвеси в трубе с пористой границей / Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 4. С. 115-118.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИПА И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ПЕН НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Соловьева Ольга Викторовна <sup>1</sup>, Соловьев Сергей Анатольевич <sup>2</sup>, Мурзаев Александр Сергеевич <sup>3</sup>, Шакурова Розалина Зуфаровна <sup>4</sup>, Гилязов Альберт Ильдарович <sup>5</sup>, Голубев Ярослав Павлович <sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup>[solovyeva.ov@kgeu.ru](mailto:solovyeva.ov@kgeu.ru), <sup>2</sup>[solovev.sa@kgeu.ru](mailto:solovev.sa@kgeu.ru), <sup>3</sup>[shakurova.rz@gmail.com](mailto:shakurova.rz@gmail.com), <sup>4</sup>[erodonov@list.ru](mailto:erodonov@list.ru),  
<sup>5</sup>[keni82590@gmail.com](mailto:keni82590@gmail.com), <sup>6</sup>[yar.8991@mail.ru](mailto:yar.8991@mail.ru)

***Аннотация.** Полиуретановые пены активно применяются для тепловой изоляции зданий и трубопроводов. Теплоизолирующие свойства материала определяются его теплопроводностью, которая, в свою очередь, зависит от морфологических параметров пены. Проведены экспериментальные исследования теплопроводности полиуретановых пен с различными типами ячеек (открытые, закрытые, смешанные) и их размерами. Задача исследования состояла в определении параметра (тип ячейки или размер), вносящего основной вклад в изменение теплопроводности пенополиуретана. Результаты исследований показали, что в случае близких размеров ячеек исследуемых образцов, пены с закрытыми ячейками обеспечивают меньший коэффициент теплопроводности. В случае, когда размеры ячеек образцов пен различны, пены с ячейками меньшего размера обеспечивают меньший коэффициент теплопроводности, независимо от типа ячейки.*

***Ключевые слова:** пенополиуретан, теплопроводность, ячейка, открытая ячейка, закрытая ячейка, тепловая изоляция, тепловые потери.*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TYPE AND SYZE OF POLYURETHANE FOAM CELLS ON THE THERMAL CONDUCTIVITY VALUE

Soloveva Olga Viktorovna <sup>1</sup>, Solovev Sergey Anatolievich <sup>2</sup>, Murzaev Alexander Sergeevich <sup>3</sup>, Shakurova Rozalina Zufarovna <sup>4</sup>, Gilyazov Albert Ildarovich <sup>5</sup>, Golubev Yaroslav Pavlovich <sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>[solovyeva.ov@kgeu.ru](mailto:solovyeva.ov@kgeu.ru), <sup>2</sup>[solovev.sa@kgeu.ru](mailto:solovev.sa@kgeu.ru), <sup>3</sup>[shakurova.rz@gmail.com](mailto:shakurova.rz@gmail.com), <sup>4</sup>[erodonov@list.ru](mailto:erodonov@list.ru),  
<sup>5</sup>[keni82590@gmail.com](mailto:keni82590@gmail.com), <sup>6</sup>[yar.8991@mail.ru](mailto:yar.8991@mail.ru)

***Annotation.** Polyurethane foams are actively used for thermal insulation of buildings and pipelines. The heat-insulating properties of the material are determined by its thermal conductivity, which, in turn, depends on the morphological parameters of the foam. Experimental studies of the thermal conductivity of polyurethane foams with different types (open, closed, mixed) cells and their sizes have been carried out. The task of the study was to determine the parameter (cell type or size) that makes the main contribution to the change in the thermal conductivity of polyurethane foam. The research results showed that in the case of similar cell sizes of the studied samples, closed-cell foams provide a lower thermal conductivity. In the case where the cell sizes of the foam samples are different, foams with smaller cells provide a lower coefficient of thermal conductivity, regardless of the type of cell.*

***Key words:** polyurethane foam, thermal conductivity, cell, open cell, closed cell, thermal insulation, heat loss.*

## **Введение**

В настоящее время около 75% производимой в мире электроэнергии получают путем сжигания ископаемого топлива (уголь, газ), что привело к масштабным экологическим проблемам. Возникла необходимость в сокращении потребления ископаемых ресурсов. Одним из направлений в решении этой проблемы является сокращение тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений, а также при транспортировке теплоносителей по трубопроводам. Снижение тепловых потерь достигается путем применения теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью, например: пенополиуретана, минеральной ваты, стекловаты, аэрогеля и т.д. [1,2]. Пенополиуретан (ППУ) получил наиболее широкое распространение ввиду невысокой стоимости производства, простоты монтажа, долговечности и низкой теплопроводности.

Пенополиуретан является пористым материалом, и его тепловые и гидравлические свойства могут изменяться в зависимости от таких параметров, как пористость, тип ячеек (закрытые, открытые, смешанные), размер ячеек и плотность пены [3-5]. Исследованием теплоизоляционных свойств пенополиуретана, а также влияния его морфологических параметров на теплопроводность занимались многие ученые [6-12]. Нермата и др. [6] провели численные исследования по определению теплопроводности полиуретановых пен с различными типами ячеек: открытые и закрытые. Результаты исследований показали, что при одинаковой объемной доле изменение типа ячеек приводит к изменению величины теплопроводности. Пена с закрытыми ячейками имеет меньшую теплопроводность, нежели пена с открытыми ячейками. Таким образом, доля открытых и закрытых ячеек в пене со смешанным типом ячеек оказывает значительное влияние на тепловые свойства. Sun и др. [7] провели численные исследования вынужденного конвективного теплообмена в пене в масштабе пор [8]. Авторы построили несколько моделей пористых сред с различными

значениями пористости (0,82, 0,87 и 0,9) и плотностей пор (10, 20, 40 PPI). Авторы исследовали влияние пористости и плотности пор на характеристики теплопередачи и пришли к выводу, что увеличение пористости пены и плотности пор приводит к улучшению теплопередачи. Skibinski и др. [9] провели численные исследования влияния размера пор на теплопроводность пен с открытыми ячейками. Модели пористых сред создавались с помощью тесселяции Лагерра-Вороного, а перенос тепла моделировался методом конечных элементов. Авторы пришли к выводу, что при неоднородном распределении пор по размерам наблюдается меньшая эффективная теплопроводность [10]. Таким образом, лучшую тепловую проводимость имеют пены с однородным распределением пор по размерам.

Zhang и др. [11] провели численные исследования влияния пористости на эффективную теплопроводность шести различных моделей пористых структур, построенных методом тесселяции Вороного. Результаты исследований показали, что по мере увеличения пористости теплопроводность материала снижается.

Kurańska и др. [12] экспериментально исследовали тепловые свойства полиуретановой пены с открытыми ячейками, модифицированной полиолом с различным содержанием. Результаты исследований показали, что добавление полиола приводит к образованию открытых ячеек меньшего диаметра, благодаря чему теплопроводность пены снижается.

Обзор литературы показал, что исследователями изучались вопросы влияния пористости, плотности пор и размеров ячеек на значение теплопроводности пены. Наша работа направлена на определение параметра, который в большей степени влияет на теплопроводность ППУ.

### ***Материалы и методы***

Исследования проводились на шести образцах полиуретановых пен, различающихся по типу ячеек (открытые, закрытые, смешанные) и их размеру. В таблице 1 приведены параметры исследованных образцов, на рисунке 1 приведены их фотографии.

Таблица 1

Параметры исследованных образцов полиуретановых пен

№	Название образца	Тип ячеек	Размер ячеек, мм
1	ППУ1	открытый	3,1
2	ППУ2	открытый	0,73
3	ППУ3	закрытый	6,3

4	ППУ4	смешанный	3,3
5	ППУ5	смешанный	3,4
6	ППУ6	смешанный, закрытые ячейки и открытые каналы	0,7 2,5

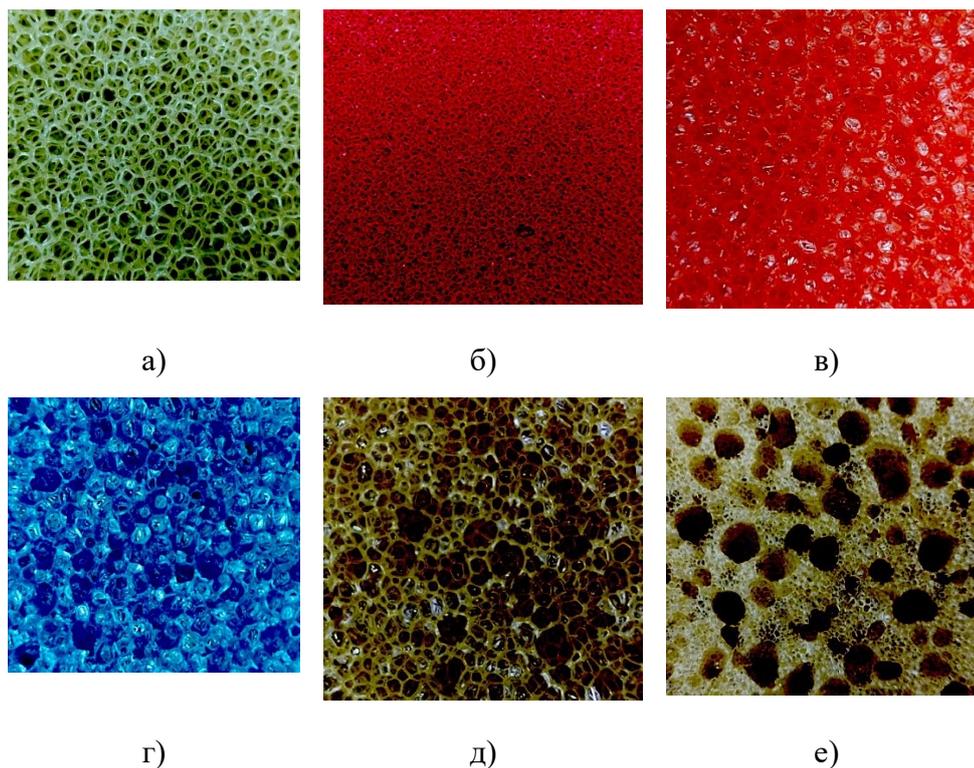


Рис. 1. Фотографии исследованных образцов полиуретановых губок: а) образец ППУ1; б) образец ППУ2; в) образец ППУ3; г) образец ППУ4; д) образец ППУ5; е) образец ППУ6.

На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки по измерению теплопроводности полиуретановых пен. На схеме позициями обозначены: 1 – индукционный нагреватель; 2 – алюминиевая плита; 3 – исследуемый образец пенополиуретана; 4 – тепловая изоляция; 5 – датчик плотности теплового потока; 6 – термопары; 7 – измеритель теплового потока; 8 – измеритель температуры.

Исследуемый образец (3) с трех сторон окружен изоляцией (4), при этом коэффициенты теплопроводности изоляции и исследуемого образца имели близкие значения. На образец сверху укладывалась алюминиевая пластина (2), обеспечивающая равномерный нагрев образца. На пластину, в свою очередь, устанавливался

индукционный нагреватель (1). Измерения проводились при следующих температурах нагревателя: 50, 100, 120, 150, 200, 220 и 240 °С. Одна из термопар (6) крепилась между алюминиевой пластиной и исследуемым образцом. Вторая термопара крепилась снизу, между образцом и теплоизоляцией. Таким образом, измерялась температура нагрева образца и температура поверхности пены с противоположной стороны. Датчик плотности теплового потока (5) устанавливался между образцом пены и изоляцией. Коэффициент теплопроводности образцов определяли с помощью закона Фурье.

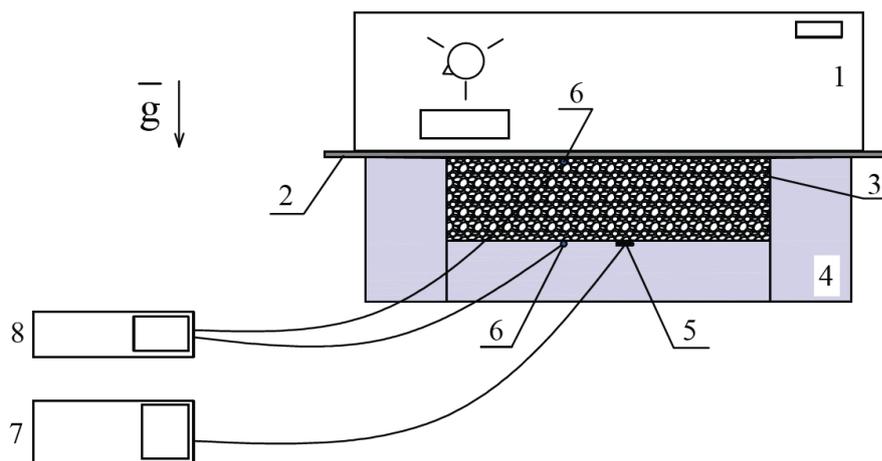


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности полиуретановых пен.

Известно, что в пористых материалах передача тепла осуществляется: теплопроводностью матрицы, теплопроводностью газа внутри ячеек, конвективными потоками и излучением. Таким образом, общую теплопроводность полиуретановой пены можно записать как [13]:

$$\lambda_t = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r \quad (1)$$

где  $\lambda_t$  – общая теплопроводность пены,  $\lambda_s$  – теплопроводность полиуретановой матрицы,  $\lambda_g$  – теплопроводность газа внутри ячеек,  $\lambda_c$  – передача тепла конвекцией,  $\lambda_r$  – передача тепла излучением. Величины теплопроводностей матрицы и газа внутри ячеек напрямую зависят от размера ячеек и плотности пены. Передача тепла конвекцией зависит от типа ячеек: открытые ячейки не препятствуют распространению конвективных потоков, в отличие от закрытых ячеек. Однако, из литературы [14] известно, что в случае, когда размер закрытых ячеек превышает 4 мм, внутри каждой закрытой ячейки возникают конвективные потоки, что приводит к интенсификации теплообмена и увеличению общей теплопроводности пены. В нашей работе исследуется пена с закрытыми ячейками (6,3 мм). Для исключения влияния конвекции

в открытых и закрытых ячейках, нагрев образцов пены осуществлялся сверху. Наконец, теплообмен излучением также зависит от размера ячейки. Из работы [15] известно, что увеличение размера ячейки приводит к росту передачи тепла излучением.

### ***Результаты и обсуждения***

Принято полагать, что в отличие от пен с открытыми ячейками, закрытые ячейки имеют меньшую теплопроводность, так как препятствуют распространению конвективных потоков. В нашем исследовании нагрев образцов ППУ осуществлялся сверху для того, чтобы исключить влияние конвекции. Такой способ измерения теплопроводности является традиционным. Результаты измерений представлены на рисунке 3.

Самые высокие значения теплопроводности (от 0,045 до 0,055 Вт/м·К) во всём исследованном диапазоне температур показал образец с закрытыми ячейками 6,3 мм (ППУ3), что можно объяснить большим вкладом теплопередачи излучением [15]. Пены с открытыми ячейками (ППУ1 и ППУ2) показали большое различие в теплопроводности: пена с более крупными ячейками (3,1 мм) показала высокие значения теплопроводности (от 0,044 до 0,050 Вт/м·К). Пена с маленькими ячейками (0,73 мм) показала самые низкие значения теплопроводности среди всех исследованных образцов пенополиуретана: от 0,028 до 0,030 Вт/м·К. Такие различия также объясняются большой разницей в размерах ячеек, и соответственно вклада излучения в общую теплопроводность.

Пены со смешанными ячейками (ППУ4, ППУ5, ППУ6) показали примерно близкие значения теплопроводности. Размер ячеек образца ППУ 5 (3,4 мм) немного превышает размеры образца ППУ4 (3,3 мм), что объясняет чуть более высокие значения теплопроводности образца ППУ5. Интересно отметить, что образец ППУ6, имеющий отличную от других пен морфологию, показал значения теплопроводности на том же уровне, что и другие образцы со смешанными ячейками. Несмотря на наличие маленьких закрытых ячеек (0,7 мм), данный образец показал неожиданно более высокие значения теплопроводности, что можно объяснить наличием крупных (2,5 мм) каналов, которые увеличивают вклад теплопроводности излучением [15].

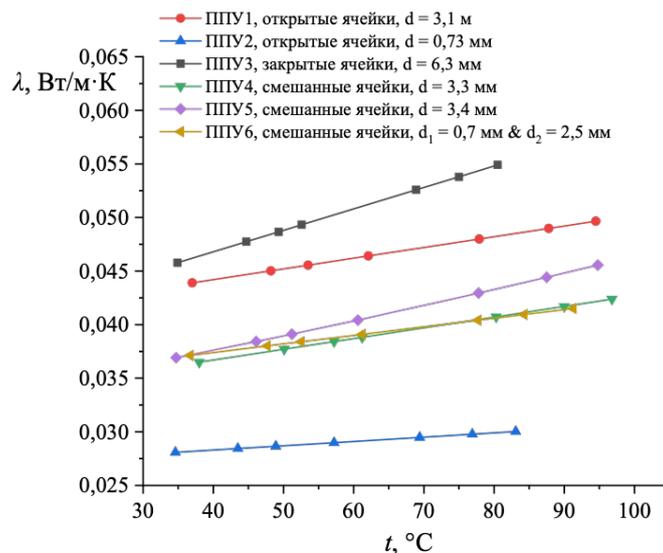


Рис.3. График теплопроводности образцов полиуретановых губок в зависимости от температуры.

На рисунке 4 приведена диаграмма эффективных теплопроводностей исследованных образцов полиуретановых пен при температуре  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Согласно диаграмме, наибольшие значения теплопроводности (0,049 Вт/м·К) соответствуют образцу ППУ3 с закрытыми ячейками 6,3 мм. Чуть меньшие значения (0,045 Вт/м·К) показала пена с открытыми ячейками ППУ1, размеры которой составляют 3,1 мм. Размеры ячеек пены ППУ3 более чем в 2 раза превышают размеры ячеек ППУ1, и несмотря на это мы наблюдаем совсем небольшие различия в значениях теплопроводности этих пен. Такое поведение можно объяснить различием в типах ячеек. Закрытые ячейки (Рис. 1, в) состоят из распорок, или по-другому струт, а также стенок, отделяющих одну ячейку от другой. Открытая ячейчатая структура образца ППУ1 состоит только из распорок (Рис. 1,а). В случае с закрытыми ячейками наличие стенок приводит к некоторому снижению теплопередачи излучением из-за того, что часть тепла поглощается материалом матрицы (стенками и распорками). В открытых ячейках излучение распространяется более свободно, при этом происходит незначительное поглощение тепла матрицей (распорками).

Наименьшие значения теплопроводности (0,029 Вт/м·К) показал образец ППУ2 с открытыми ячейками размером 0,73 мм, что объясняется низким вкладом излучения в общую теплопроводность.

Пены со смешанными ячейками (ППУ4, ППУ5, ППУ6) показали близкие значения теплопроводности 0,0377; 0,039 и 0,0382 Вт/м·К соответственно, что объясняется близкими размерами ячеек.

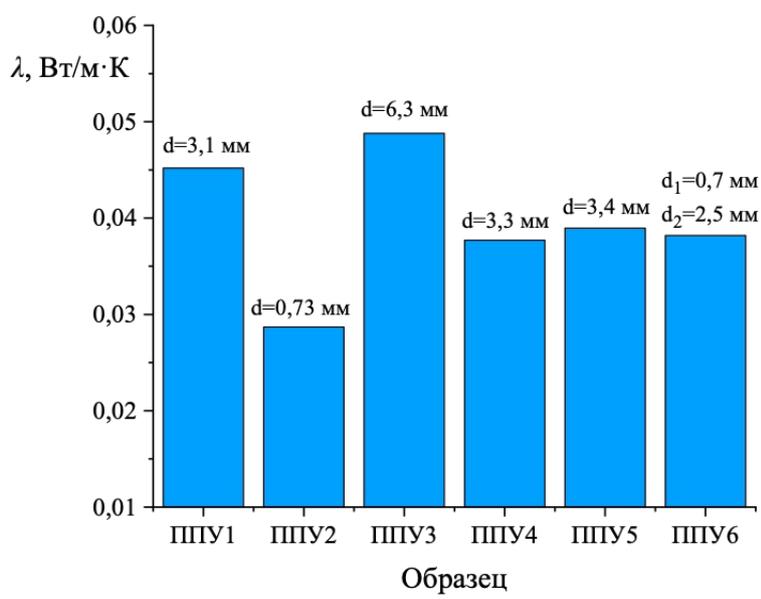


Рис. 4. Теплопроводности исследуемых образцов губок при  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

### **Выводы**

Проведены экспериментальные исследования теплопроводности шести образцов пенополиуретана с различными типами (открытые, закрытые, смешанные) и размерами ячеек (от 0,7 до 6,3 мм). Результаты исследований показали, что параметром, вносящим наибольший вклад в изменение теплопроводности, является размер ячеек: пены с маленькими ячейками независимо от типа ячеек будут иметь низкие значения теплопроводности. В то время как пены с крупными ячейками (6,3 мм) имеют более высокие значения теплопроводности. В случае, когда пены имеют близкие по размеру ячейки, на значение теплопроводности будет оказывать влияние уже тип ячеек. В нашей работе мы сравнили пены со смешанными ячейками близких размеров (3,3 мм; 3,4 мм), однако в одном из образцов преобладало количество открытых ячеек (ППУ5), в другом – закрытых ячеек (ППУ4). Образец с преобладанием открытых ячеек показал немного более высокие значения теплопроводности.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

### **Источники**

[1] Cao Z. J. et al. Polyurethane foams with functionalized graphene towards high fire-resistance, low smoke release, superior thermal insulation //Chemical Engineering Journal. – 2019. – Т. 361. – С. 1245-1254.

- [2] Nazeran N., Moghaddas J. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2017. – Т. 461. – С. 1-11.
- [3] Solovev S. et al. Influence of microgranules on the thermal insulation of the composite materials used in transport //Transportation Research Procedia. 2022. Т. 63. С. 1015-1023.
- [4] Soloveva O. et al. Estimation of energy efficiency factor for models of porous automotive heat exchangers //Transportation Research Procedia. 2022. Т. 63. С. 1081-1088.
- [5] Soloveva O. et al. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport //Transportation Research Procedia. – 2022. – Т. 63. – С. 1205-1210.
- [6] Hermama C., Elmaliki A., Lahbabi S. Computational Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Mixed Cell Foams //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 783. – №. 1. – С. 012024.
- [7] Sun M. et al. Pore-scale simulation of forced convection heat transfer under turbulent conditions in open-cell metal foam //Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т. 389. – С. 124427.
- [8] Vijay D. et al. Homogenized and pore-scale analyses of forced convection through open cell foams //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 123. С. 787-804.
- [9] Skibinski J. et al. Influence of pore size variation on thermal conductivity of open-porous foams //Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 12. – С. 2017.
- [10] Qiu L. et al. Inhomogeneity in pore size appreciably lowering thermal conductivity for porous thermal insulators //Applied Thermal Engineering. – 2018. – Т. 130. – С. 1004-1011.
- [11] Zhang M. et al. Numerical investigation of effective thermal conductivity of strut-based cellular structures designed by spatial Voronoi tessellation //Materials. 2020. Т. 14. №. 1. С. 138.
- [12] Kurańska M. et al. Thermal insulation and sound absorption properties of open-cell polyurethane foams modified with bio-polyol based on used cooking oil //Materials. – 2020. – Т. 13. – №. 24. – С. 5673.
- [13] Notario B. et al. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams //Polymer. – 2015. – Т. 56. – С. 57-67.
- [14] Alvarez-Lainez M., Rodriguez-Perez M. A., De Saja J. A. Thermal conductivity of open-cell polyolefin foams //Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2008. – Т. 46. – №. 2. – С. 212-221.
- [15] Choe H., Choi Y., Kim J. H. Threshold cell diameter for high thermal insulation of water-blown rigid polyurethane foams //Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2019. – Т. 73. – С. 344-350.
- [16] Соловьева О.В., Соловьев С.А., Зарипова Р.С., Тюрина М.М., Чупаев А.В. Численное моделирование движения газозвеси в трубе с пористой границей / Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 4. С. 115-118.

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В СХЕМУ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Сорокин<sup>1</sup> К.С., Гаврилин<sup>2</sup> В.В.

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «КГЭУ», г.Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup> kostya.sorokin.kostya.sorokin@mail.ru, <sup>2</sup> volodya.gavrilin.97@mail.ru

**Аннотация.** *Повышение экономичности работы тепловых электростанций является важным показателем в развитие энергетической инфраструктуры. Однако, несмотря на высокий рост показателя КПД ТЭС за последние 20 лет, эта цифра не является внушительной и составляет 35-40%. Основные потери, из-за которых КПД имеет столь невысокое значение, приходится на конденсатор. В данной статье приведены принципы работы конденсационной установки, градирни и теплового насоса, а также их показатели эффективности. Для повышения КПД работы градирни и конденсатора предлагается внедрение в уже существующую градирню ВЕНТА-3000 теплового насоса.*

**Ключевые слова:** энергетика, турбина, конденсатор, тепловой насос, градирня, вода, КПД, ТЭС, теплота.

## INTRODUCTION OF A HEAT PUMP IN THE TECHNICAL WATER- COOLING SCHEME

Sorokin<sup>1</sup> K.S., Gavrilin<sup>2</sup> V.V.

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup> kostya.sorokin.kostya.sorokin@mail.ru, <sup>2</sup> volodya.gavrilin.97@mail.ru

**Annotation.** *Increasing the efficiency of thermal power plants is an important indicator in the development of energy infrastructure. However, despite the high increase in the efficiency of thermal power plants over the past 20 years, this figure is not impressive and amounts to 35-40%. The main losses, due to which the efficiency is so low, fall on the capacitor. This article describes the principles of operation of a condensing unit, cooling tower and heat pump, as well as their performance indicators. To increase the efficiency of the cooling tower and the condenser, it is proposed to introduce a heat pump into the already existing VENTA-3000 cooling tower.*

**Key words:** energy, turbine, condenser, heat pump, cooling tower, water, efficiency, thermal power plant, heat.

## Введение

Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии оказывают влияние на тенденцию развития энергетической инфраструктуры. Существующее оборудование в сфере теплоэнергетики не позволяет достигать высоких цифр в получении полезной работы и экономии топлива. В следствии чего, появляется необходимость в использовании комбинированных энергоустановок для получения тепловой и электрической энергии. Однако, и такое решение не позволяет достичь должного эффекта. На сегодняшний день полученный КПД парогазовой установки (ПГУ) варьируется в пределах 58-64%.

Турбины делятся на следующие типы:

- 1) турбины типа Т - теплофикационные
- 2) турбины типа ПТ - теплофикационные с промышленным отбором пара
- 3) турбины типа Р - с противодавлением
- 4) турбины типа К – конденсационные

## Основная часть

Для производства наибольшего количества электрической энергии за единицу отработавшего пара используются конденсационные энергетические турбоустановки с использованием турбины типа К. Ключевой особенностью этой турбины является отсутствие отборов пара на теплофикацию. Весь использованный пар в турбине направляется в конденсатор для дальнейшего его охлаждения и повторного использования в замкнутом цикле. Конденсаторы подразделяются на два типа: поверхностные и смешивающие. На ТЭЦ устанавливаются поверхностные трубчатые конденсаторы, так как они более практичны и отделяют конденсат и техническую воду. Процесс преобразования пара в воду происходит за счет понижения температуры и давления. Принципиальная схема поверхностного конденсатора представлена на рисунке 1 [1].

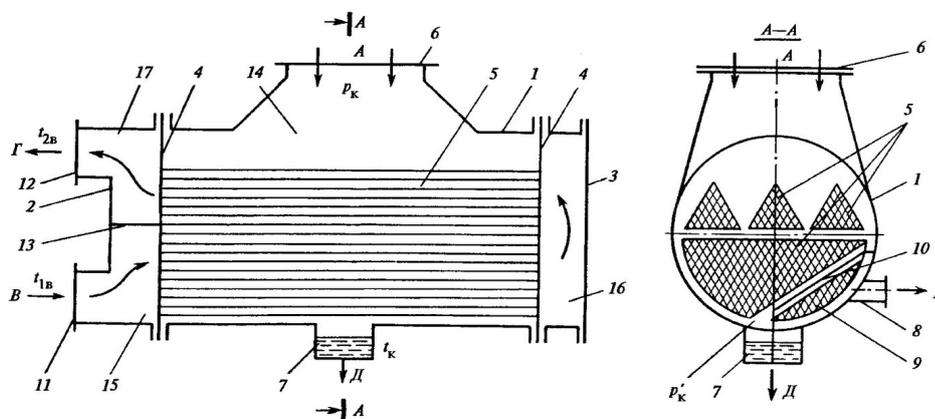


Рис. 1. Схема двухходового поверхностного конденсатора.

На рисунке 1 позициями обозначены: 1 - корпус; 2,3 - крышки водяных камер; 4 - трубные доски; 5 - конденсаторные трубки; 6 - приемный паровой патрубок; 7 - конденсатосборник; 8 - патрубок отсоса паровоздушной смеси; 9 - воздухоохладитель; 10 - паронаправляющий щит; 11,12 - входной и выходной патрубки для воды; 13 - разделительная перегородка; 14 - паровое пространство конденсатора; 15-17 - входная, поворотная и выходная камеры охлаждающей воды; А - вход пара; Б - отсос паровоздушной смеси; В, Г - вход и выход охлаждающей воды; Д - отвод конденсата.

По сравнению с другими, схема, включающая в себя конденсационную турбину, имеет наибольшие потери в конденсаторе, так как весь объем отработавшего пара поступает на охлаждение и конденсацию. Охлаждение пара происходит за счет теплообмена с технической водой, которая циркулирует в трубках внутри конденсатора, как показано на рисунке 1.

Сам же процесс подготовки технической воды представляет из себя минимальную необходимую степень очистки, чаще всего фильтрацию от механических примесей, и в зависимости от источника воды происходит охлаждение (при обратном тех. водоснабжении) или забор воды из русла реки выше по течению и сброс уже нагретой ниже. Забор воды из реки очень эффективен, но в наше время запрещен на законодательном уровне, так как наносит большой ущерб экосистеме водных объектов. Тогда остается два основных варианта для охлаждения. Это градирни и брызгальные бассейны. Они имеют свои плюсы и минусы. Несмотря на более высокую стоимость и наличие трудностей в строительстве и эксплуатации градирни в сравнении с брызгальным бассейном, она достигает большего эффекта охлаждения и требует в 4-5 раз меньше площади для размещения, так как для достижения перепада температуры более 10°C в брызгальных бассейнах требуется создание ступенчатой системы охлаждения [2].

### ***Решение***

В нашем проекте мы будем использовать существующую вентиляционную градирню ВЕНТА-3000, установленную на Казанской ТЭЦ-2, схема которой представлена на рисунке 2. В железобетонном бассейне находится вода, поступающая в конденсатор, при температуре 25°C. КПД конденсатора напрямую зависит от температуры этой воды, а КПД башенных вентиляторных градирен в среднем достигает порядка 70%.

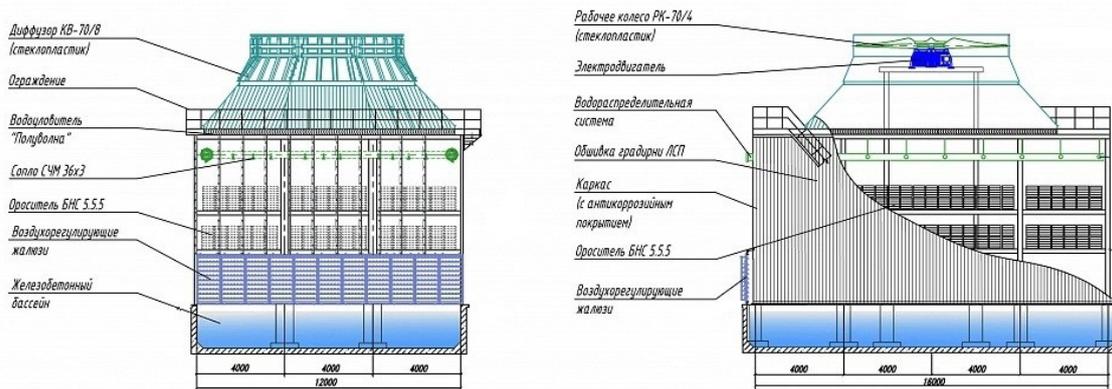


Рис. 2. Схема градирни ВЕНТА-3000.

Предложенное нами решение основано на использовании низкопотенциальной теплоты воды в накопительном бассейне градирни при помощи теплового насоса, с целью увеличения ее собственного КПД и использовании полученной теплоты на собственные нужды. А также полученный эффект понижения температуры воды положительно повлияет на работу конденсатора, который повысит эффективность его работы.

Принцип работы теплового насоса, показанный на рисунке 3, основан на повышении температуры сжатия газа (хладагента) и использовании полученной теплоты на нагревание другой среды. Основным процессом получения теплоты является испарение хладагента при относительно низкой температуре в испарителе, и дальнейшей конденсации его при более высоких параметрах температуры и давления, полученных за счет работы компрессора [3].

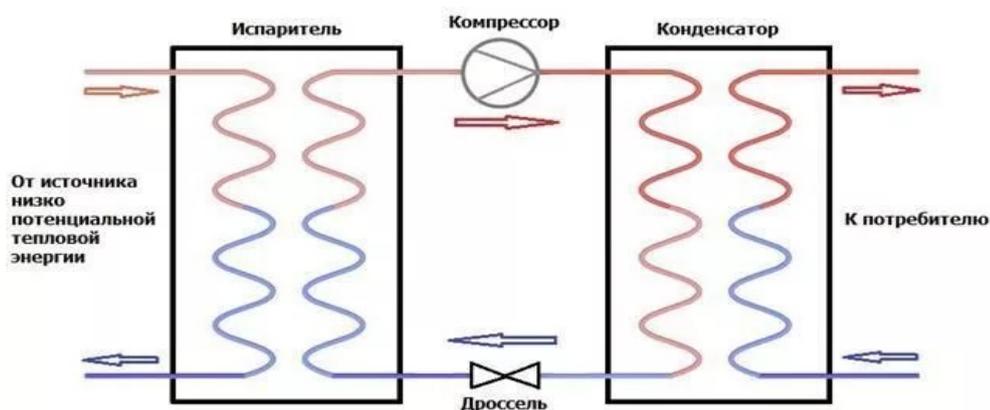


Рис.3. Принципиальная схема теплового насоса.

Расположение системы трубок испарителя не должно влиять на аэродинамические и гидродинамические параметры в самой градирне, так как это может негативно повлиять на плотность орошения и степень охлаждения воды. Поэтому мы предлагаем установить трубную систему вдоль стенок в железобетонном

бассейне. Это позволит охватить большую площадь взаимодействия поверхности испарителя с водой оказывая минимальное воздействие на течение жидкости. В качестве теплоносителя в тепловом насосе будет использоваться фреон марки R-11 (Хладон 11). Он имеет необходимую температуру испарения равную 23,65°C, которую возможно достичь, используя воду градирни при температуре 25°C. Полученную теплоту в результате работы теплового насоса возможно направить на собственные нужды предприятия, такие как отопление или горячее водоснабжение.

### **Выводы**

Благодаря внедрению предложенного нами решения получится повысить общий КПД станции. В результате внедрения теплового насоса в общую схему ТЭС, снижается расход из отборов пара на собственные нужды, повышается собственный КПД конденсатора в результате снижения температуры технической охлаждающей воды и повышения эффективности работы градирни. Было подобрано оптимальное месторасположение теплообменных поверхностей для минимизации негативного влияния на технологический процесс работы ТЭС. Сделанное нами исследование позволяет частично затронуть решение важных проблемы энергетики, повысить экономические показатели работы тепловых электростанций.

### **Источники**

[1] Авторское свидетельство № 1273715 А1 СССР, МПК F28B 1/00, F28G 9/00. Поверхностный конденсатор паровой турбины: № 3961400: заявл. 26.07.1985: опубл. 30.11.1986 / А. В. Безносков, А. П. Касьянов, И. Ю. Ляхов, В. Е. Серов; заявитель ГОРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.А. ЖДАНОВА.

[2] Белобородов С. С. Повышение системной эффективности ТЭЦ как фактор перехода к ресурсосберегающей и экологически безопасной энергетике / С. С. Белобородов, А. А. Дудолин, Е. М. Лисин, В. О. Киндра // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 135-145.

[3] Недоспасов, Д. С. Вентиляторные градирни, принцип работы и эксплуатация / Д. С. Недоспасов // Стратегии и тренды развития науки в современных условиях. – 2019. – № 1(5). – С. 46-48.

[4] Запольская И. Н. Влияние индивидуальных водо-водяных подогревателей на потребление тепловой энергии многоквартирными домами / Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 146-155.

[5] Дадацкий, А. В. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса / А. В. Дадацкий, П. Ю. Космовский // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года / Редколлегия: А.Р. Волик [и др.]. – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. – С. 172-174.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE TURBULENT FLOW OF A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID AROUND A CYLINDER

Tanasheva<sup>1</sup> N.K., Bakhtybekova<sup>2</sup> A.R., Botpaev<sup>3</sup> N.K., Kabylgani<sup>4</sup> Ch.K.

<sup>1,2,3,4</sup> E. A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

<sup>1</sup>nazgulya\_tans@mail.ru, <sup>2</sup>[asem.alibekova@inbox.ru](mailto:asem.alibekova@inbox.ru), <sup>3</sup>botpaev.nurlan@mail.ru,

<sup>4</sup>chinga.ks@gmail.com

**Annotation.** *Turbulent flow around a circular cylinder is of great interest for understanding and studying a wide range of fundamental and applied problems of fluid mechanics. In this paper, the authors carried out mathematical modeling of the flow around the cylinder at  $Re=2\div 12\cdot 10^4$ . The ANSYS FLUENT program was used to numerically study the turbulent flow of a viscous incompressible fluid around a cylinder. To solve this problem,  $k-\varepsilon$  is chosen as the turbulence model. The speed of the incoming flow varied in the range from 3 to 15 m/s, the number of cylinder rotations from 300 to 700 rpm. Pressure distribution patterns are obtained at different revolutions and flow rates.*

**Keywords:** *Mathematical modeling, cylinder, turbulence, Reynolds number, ANSYS FLUENT*

### **Introduction**

Many hydrodynamic and aeromechanical phenomena observed in technical processes due to moderate speeds of movement of the medium under study can be represented within the framework of the incompressible viscous fluid model. Currently, during practice, there are various types of tasks for applied scientists, including the study of which can be carried out in most cases only with a computational experiment or with the help of a carefully organized physical experiment. However, phenomena of practical interest and technological processes either do not lend themselves to comprehensive physical modeling, or the cost of conducting such experiments is too high [1].

These problems encountered in practice have such characteristics as multidimensionality, nonlinearity, non-stationarity, and also contain boundary layers and conditions that are described using the Navier-Stokes equations. The nonlinearity of the Navier-Stokes equations and the presence of a small parameter for higher derivatives (especially for large Reynolds numbers) create serious problems both in their experimental study (in fact, this is possible only for model equations or specific problems), the same happens when numerically solving these equations using a computer [2,3].

Most of the flows that are interesting from a practical point of view are turbulent, many of them are accompanied by the flow flowing into certain obstacles that can lead to the

separation of the viscous lower layer. When numerically modeling these flows, as a rule, one of the semi-empirical turbulence models is used (among which the most popular today is the k-models SST and k-ε) [4,5].

Many well-known representatives, such as ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Flow-3D, Star-CCM, etc., are represented as a tool for conducting numerical experiments on the commercial CFD market of the program.

***Problem statement***

Fluid flow around a cylinder is a classic object of experimental and theoretical problems. Despite the simplicity of the formulation of the problem, in which a uniform flow of velocity U flows around a cylinder D of a certain diameter, there is a complex map of modes [1], depending on the only dimensional criterion of the problem - the Reynolds number  $Re = UD/v$ , where v is the viscosity of the liquid.

In this paper, the problem of cylinder flow in large numbers  $Re = 2 \cdot 10^4$  is numerically studied.

The task is to simulate the flow around the cylinder (turbulent flow of a viscous incompressible fluid around the cylinder) using the ANSYS FLUENT software module [4,5]. The conditions for modeling are presented in Table 1.

Table 1

Initial data for modeling

Initial Parameters	Values
Cylinder length	330 mm
Cylinder diameter	120 mm
The speed of the incoming flow	3-15 m/s
Number of cylinder rotation	300, 500, 700 rpm

***The solution of the problem***

The calculation model includes:

- a) geometric model;
- b) grid model (grid);
- c) turbulence models;
- d) boundary conditions.

All components are closely related. The structural construction of the CFD calculation model is shown in Fig. 1.

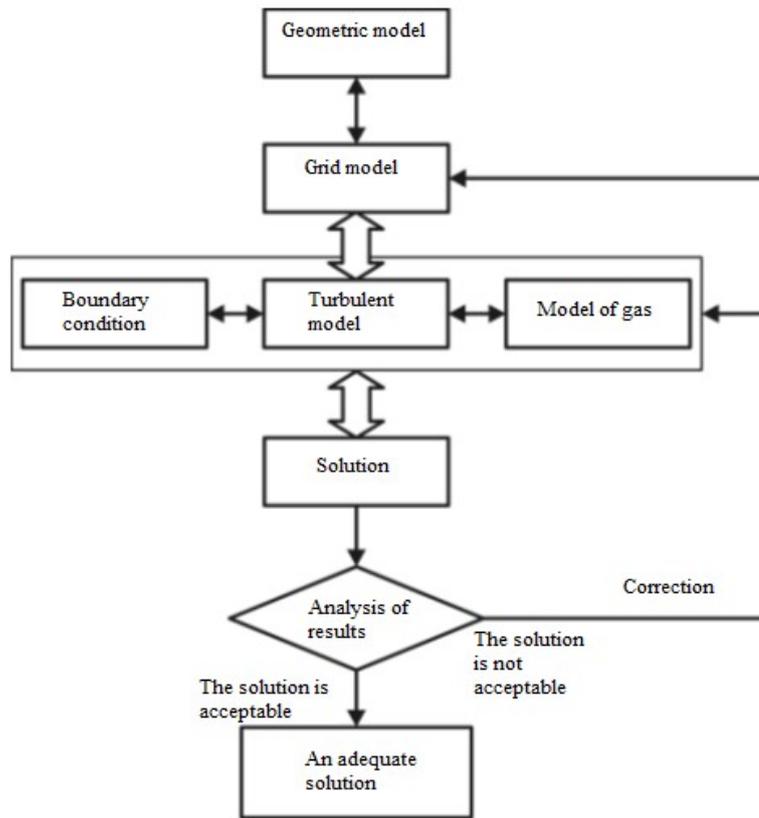


Fig. 1. Structure of the calculation model construction

The fundamental step in performing a numerical experiment on gas dynamics is the choice of a turbulent model. This choice determines which effects will be taken into account in the solution and which will not. To solve this problem, the  $k-\epsilon$  turbulence model was chosen.

The K-epsilon turbulence model ( $k-\epsilon$ ) is the most common model used in computational fluid dynamics (CFD) for the numerical study of medium flow parameters under turbulent flow conditions. This is a model with two equations, gives a general description of turbulence in terms of two transport equations. The initial incentive for the K-epsilon model was to improve the mixing length model, as well as to search for an alternative to the algebraic description of turbulent length scales in flows of medium and high complexity.

The first transferable variable is the turbulent kinetic energy ( $k$ ). The second transferable variable is the rate of dispersion of turbulent kinetic energy ( $\epsilon$ ). The constants for the turbulence model are shown in Figure 2.

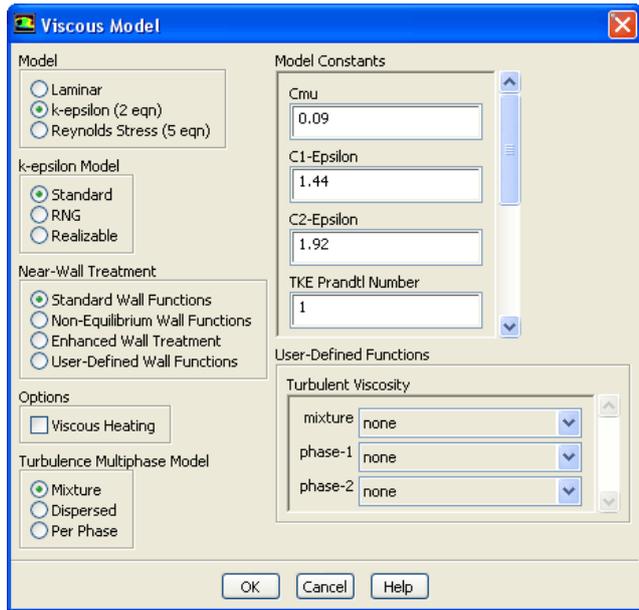


Fig.2. k- $\epsilon$  turbulence model

### *Results of mathematical modeling*

Figures 3,4 and 5 show pressure distribution patterns at different speed numbers.

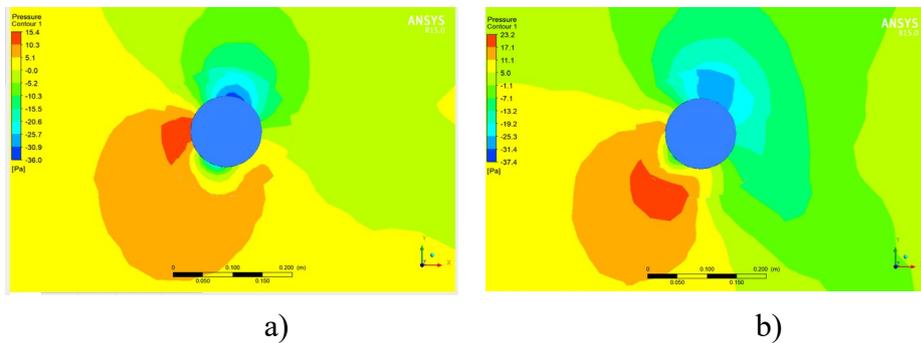


Fig. 3. Pressure distribution around the cylinder at  $n = 300$  rpm: a)  $v = 5$  m/s; b)  $v = 15$  m/s

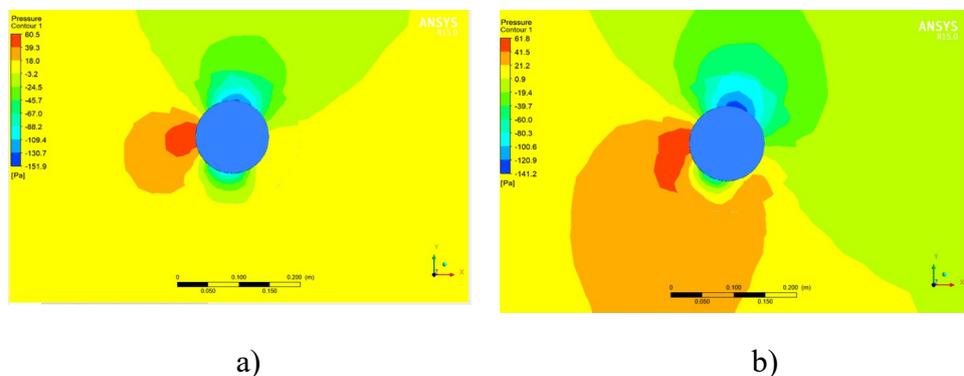


Fig. 4. Pressure distribution around the cylinder at  $n = 500$  rpm: a)  $v = 5$  m/s; b)  $v = 15$  m/s

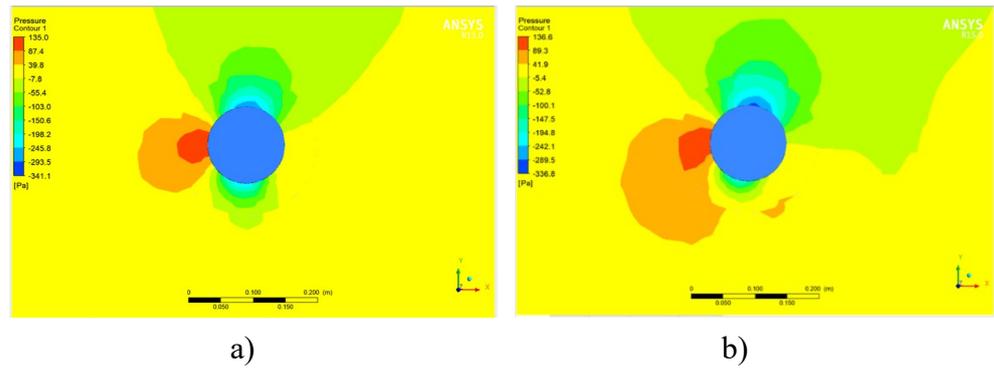


Fig. 5. Pressure distribution around the cylinder at  $n = 700$  rpm: a)  $v = 5$  m/s; b)  $v = 15$  m/s

Figures 3-5 show static pressure distributions ( $p_{st} = p - p_{atm}$ ) around a rotating cylinder (plane  $z=0$ ) obtained for different speeds of the incoming flow (wind) and the speed of rotation of the cylinder.

The rotation of the cylinder under the conditions of an incoming flow leads to the fact that on one side of the cylinder the air velocity will be greater than on the other side. According to Bernoulli's law, in the area where the flow velocity is higher, the pressure becomes lower. Therefore, on one side of the cylinder (in the figures shown, this left side), the pressure is lower than on the other, resulting in a force (lifting) acting on the cylinder, which is directed perpendicular to the axis of the cylinder and the direction of the wind. The cylinder rotates in the direction of the  $z$  axis according to the hour hands.

A possible cause of the formation of the lifting force is the circulation of air around the solid. Circulation can occur not only due to the rotation of the body, as in the Magnus effect, but also during the flow of a viscous liquid or gas towards a stationary, asymmetric body with respect to the flow. In an ideal fluid, where there are no shear stresses between different layers at all, circulation is impossible.

### ***Conclusion***

In this paper, flows around a rotating cylinder by an incoming air flow in an ANSYS package were investigated.

To solve this problem, the  $k-\varepsilon$  turbulence model is chosen. The K-epsilon turbulence model ( $k-\varepsilon$ ) is the most common model used in computational fluid dynamics (CFD) to model the flow parameters of a medium under turbulent flow conditions. This model with two equations provides a general description of turbulence. The initial incentive for the K-epsilon model was to improve the mixing length model, as well as to search for alternatives to describe the algebraic description of the turbulent length scales in medium and high complexity flows.

The patterns of the pressure field distribution around the cylinder are obtained at the air flow velocities from 3 to 15 m/s and at the cylinder rotation speed of 300,500,700 rpm.

The work was carried out with the financial support of the IRN AP14870066 project "Development and creation of an energy-efficient combined vertical-axial wind power plant using a gearless low-speed electric generator".

#### LIST OF LITERATURE

[1]. Gushchin V.A., Matyushin P.V. Mathematical modeling of incompressible fluid flows. Works of MIPT. - 2009. — Volume 1, No. 4. —P.18-33.

[2]. Chang T. J. Computational fluid dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 1021 p.

[3]. Ferziger J. H., Perry M. Computational methods of hydrodynamics. – 3., ed. – Berlin: Springer, 2002. – 423 p.

[4]. Tanasheva N.K., Bakhtybekova A.R., Shuyushbaeva N.N., Tusupbekova A. K., Tleubergenova A.J. Calculation of aerodynamic characteristics of a wind power plant with blades in the form of rotating cylinders. Letters on technical physics. - 2022. – DOI 10.1134/S1063785022020092.

[5]. Tanasheva N.K., Bakhtybekova A. R., Shaimerdenova K. M., Sakipova S. E. and Shabaeva N.N. Modeling of aerodynamic characteristics of a wind power plant with rotating cylindrical blades based on the ANSYS package. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, -2022. — Volume 95, No. 2, —.P.457-463.

## PILOT TESTS OF A WIND POWER PLANT WITH SAIL BLADES UNDER LOW WIND CONDITIONS

Tleubergenova<sup>1</sup> A.Zh., Tanasheva<sup>2</sup> N.K., Shaimerdenova<sup>3</sup> K.M., Kyzdarbekova<sup>4</sup> Sh.S.

<sup>1,2,3,4</sup> Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan,

<sup>1</sup>[shymkent.a7@mail.ru](mailto:shymkent.a7@mail.ru), <sup>2</sup>[nazgulya\\_tans@mail.ru](mailto:nazgulya_tans@mail.ru), <sup>3</sup>[gulzhan.0106@mail.ru](mailto:gulzhan.0106@mail.ru), <sup>4</sup>[sholp1@mail.ru](mailto:sholp1@mail.ru)

**Annotation.** *One of the reasons for the insufficient use of the huge reserve of wind energy is the lack of efficiently operating wind turbines for low wind speeds characteristic of the greater territory of the Republic of Kazakhstan. In this regard, the creation of wind power plants that work effectively in conditions of low average annual wind speeds is very relevant for Kazakhstan, corresponds to the priorities of the development of science in the republic. For this purpose, the authors have created an experimental wind power plant that works efficiently at low wind speeds, thanks to the dynamically changing shape of the blades. The diameter of the wind wheel was 4 m. Aerodynamic experiments were performed to study the aerodynamic thrust force from wind speed.*

**Keywords:** *Wind power plant, wind power, sail, aerodynamics, thrust forces.*

### **Introduction**

Currently, the search and active use of new alternative energy sources in many developed countries of the world are accepted as vital, strategically necessary resources that ensure the long-term development of the economies of these countries.

It is predicted that the share of alternative energy (solar, wind, tidal, solar energy, etc.) in global energy consumption will increase annually and by 2030 will amount to 30%, by 2050 – 50%. However, despite promising results, alternative energy sources have not yet found the level of optimal compliance with the expectations of the mass consumer [1-3].

On the threshold of Kazakhstan's accession to the WTO, the republic's economy is characterized by a raw material orientation and high consumption of fuel and energy resources. The high energy intensity of the economy in comparison with the developed countries of the world leads to the irrational use of fuel and energy resources, reduces the competitiveness of the economy, and, as a result, leads to significant environmental pollution, including greenhouse gases that affect global climate warming [4-6].

In this regard, the issues of efficient use of renewable resources are considered as a task for the future, including the instruction of the President of the Republic of Kazakhstan on the need to develop approaches to the Government to solve this problem. Here are just a few figures describing the intensity of innovation processes in the world in relation to alternative energy sources: in the USA, \$275 million was allocated from the federal budget for such

developments in 2005, in Japan – 30 billion annually. yen (about \$273 million), and the European budget for renewable energy research exceeds 2 billion. euro (period 2002-2006).

Thus, it can be stated that at present, the search and active use of new alternative energy sources in many developed countries of the world are accepted as vital, strategically necessary resources that ensure the long-term development of the economies of these countries.

In this regard, the creation of wind power plants that work effectively in conditions of low average annual wind speeds is very relevant and corresponds to the priorities of the development of science in the Republic of Kazakhstan [7, 8].

However, the disadvantage of existing wind power plants is the complexity of the design of the blades, leading to increased turbulence near the wind wheel, as well as the presence of drive electric motors that require an additional source of energy.

Sailing wind turbines have a unique feature – they work equally effectively both at low wind speeds and at high ones due to the dynamic changeable shape of the working surface under the influence of wind flow.

The main idea of the project is the efficient use of the energy of low-speed squat winds by using multi-blade wind turbines with a dynamic variable shape of the surface of the blades, made in the form of a triangular "sail" with a movable end.

### ***Characteristics of a wind power plant***

A prototype of a wind power plant based on wind turbines with blades of dynamic variable shape with a diameter of a wind wheel  $D = 4$  m has been created. The wind turbine shaft is a metal cylinder with a diameter of 32 mm and a length of 2330 mm. The diameter of the metal disk attached coaxially to the shaft is 302 mm, the thickness of the disk is 16 mm. The pulley has a diameter of 400 mm and a thickness of 40 mm, designed for belt drive with a generator. The support and frame rods of the wind wheel are duralumin tubes with a diameter of 20 mm, which are fixed to the disk. The length of each frame rod of the wind turbine is 2000 mm, and the length of the support rods of the wind wheel is 2429 mm. The rotation speed of the wind turbine wind wheel is 50-100 rpm, the minimum threshold of the working wind speed is 3-5 m/s.

Figure 1 shows a general view of the manufactured prototype image of a wind power plant with a diameter of a wind wheel  $D = 4$  m. To ensure maximum traction of the sail blades, the extension of the movable thread is selected 3-5 cm. The wind turbine is located at a height of 3 m from the Ground surface, the total height is 5 m.



a)



b)

Fig. 1. A view of the design of a wind turbine with a diameter of a wind wheel  $D = 4$  m: a- front view, b-side view.

### ***Test results***

The dependences of the aerodynamic thrust force on wind speed are investigated. Figure 2 and 3 show the dependence of the thrust force of the prototype wind turbine on the wind speed in the forward (i.e. towards the front of the wind wheel) and reverse wind directions relative to the location of the wind turbine (i.e. from the rear of the wind wheel).

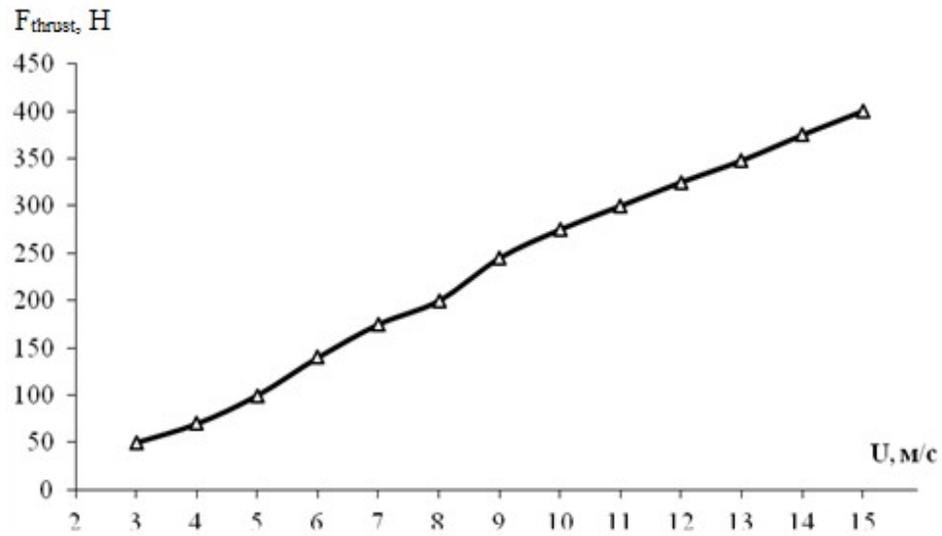


Fig. 2. Dependence of the thrust force of the prototype wind turbine on the wind speed in the forward direction of flow

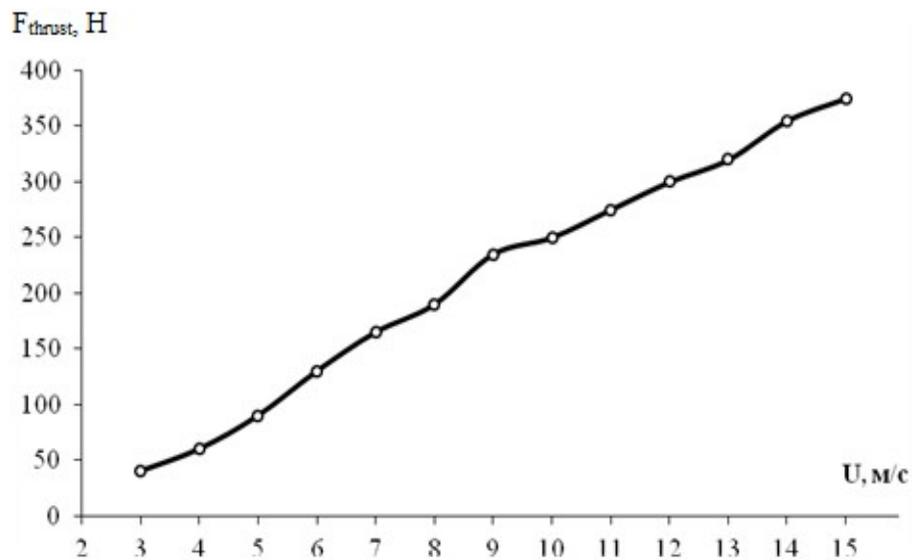


Fig.3. Dependence of the thrust force of the prototype wind turbine on the wind speed in the opposite direction of flow

From the comparison of Figures 2 and 3, it can be seen that with the forward direction of the wind flow, the value of the thrust force is higher than with the opposite wind direction. This is due to the fact that the working elements of the wind turbine are located in the rear of the wind turbine, which prevent the wind flow from blowing the sail blades, and thereby bring it into rotational motion.

### ***Conclusions***

The authors of the work created a prototype of a wind power plant with a diameter of a wind wheel of 4 m. Aerodynamic tests of a prototype wind power plant at the landfill were carried out, the dependences of the aerodynamic thrust force on the flow velocity were investigated.

The work was carried out with the financial support of the IRN AP14870066 project "Development and creation of an energy-efficient combined vertical-axis wind power plant using a gearless low-speed electric generator".

### **List of literature**

- [1] <https://www.irena.org/wind>
- [2] <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [3] "UNDP Report on Kazakhstan" (PDF). UNDP. Retrieved May 5, 2016.
- [4] "The Kyoto Protocol in the Republic of Kazakhstan". ClimateChange.kz . Retrieved May 5, 2016.
- [5] "Kazakhstan Fund for Financing Renewable Energy Sources". KazREFF-ser.com. Retrieved May 5, 2016.
- [6] <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>
- [7] Tanasheva N.K., Tleubergenova A.Zh., Shaimerdenova K.M., Minkov L.L., Uzbergenova S.Zh. Investigation of the aerodynamic forces of a triangular wind turbine blade for the low wind speeds. / Eurasian physical technical journal. – 2021 Vol. 18, No. 4(38) – P. 59 – 64. [https://up.ksu.kz/phtj/2021\\_18\\_4\\_38/8.pdf](https://up.ksu.kz/phtj/2021_18_4_38/8.pdf).
- [8] Tleubergenova A.Zh., N.K. Tanasheva, K.M. Shaimerdenova, L.L. Minkov, A.N. Dyusembaeva, S.Zh. Uzbergenova. Study of aerodynamic parameters of the sail blade. Bulletin of the Karaganda university. Physics series. № 1(105)/2022– pp. 58-65. <https://physics-vestnik.ksu.kz/apart/2022-105-1/6.pdf>

## ПОЛУЧЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОРАЗЛАГАЕМОЙ ФРАКЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Туманова<sup>1\*</sup> А.А., Идрисова<sup>2</sup> К.С., Колдасова<sup>3</sup> Г.А., Октябрь<sup>4</sup> К.А.

<sup>1,2,3,4</sup> НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева»,  
Алматы, Казахстан

<sup>1</sup>*ai.tumanova@aes.kz*, <sup>2</sup>*k.idrissova@aes.kz*, <sup>3</sup>*kuzyamake@mail.ru*, <sup>4</sup>*k.oktyabr@aes.kz*

***Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос получения альтернативного топлива из биоразлагаемой фракции твердых бытовых отходов полигона АО «Тартып» Алматинской области и исследованы характеристики полученного альтернативного топлива: низшая теплотворная способность, общая и аналитическая влага, выход летучих, зольность, а также химический состав пробы золы биофракции. Полученное альтернативное топливо может быть использовано в цементной промышленности как ресурсосберегающий компонент клинкера.*

***Ключевые слова:** твердые бытовые отходы (ТБО), альтернативное топливо, биофракция, SRF, характеристики АТ.*

## PRODUCTION OF ALTERNATIVE FUEL FROM BIODEGRADABLE FRACTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Tumanova<sup>1\*</sup> A.A., Idrissova<sup>2</sup> K.S., Koldassova<sup>3</sup> G.A., Oktyabr<sup>4</sup> K.A.

<sup>1,2,3,4</sup> Almaty University of Power Engineering and Telecommunications  
named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan

<sup>1</sup>*ai.tumanova@aes.kz*, <sup>2</sup>*k.idrissova@aes.kz*, <sup>3</sup>*kuzyamake@mail.ru*, <sup>4</sup>*k.oktyabr@aes.kz*

***Annotation.** The article considers the issue of obtaining an alternative fuel from a biodegradable fraction of municipal solid waste from the JSC "Tartyp" landfill in Almaty region and investigates the characteristics of the obtained alternative fuel: net calorific value, total and analytical moisture, volatile output, ash content, as well as the chemical composition of the biofraction ash sample. The resulting alternative fuel can be used in the cement industry as a resource-saving clinker component.*

***Key words:** municipal solid waste (MSW), alternative fuel, biofraction, SRF, AF characteristics.*

### **Введение**

Основная масса бытовых отходов в настоящее время не подвергается какой-либо переработке и вторичному использованию, а размещается на полигонах захоронения, на санкционированных и несанкционированных свалках, что в значительной мере осложняет общую экологическую ситуацию, создает серьезную опасность для здоровья населения, влечет за собой экономический ущерб за счет безвозвратных потерь потенциальных вторичных ресурсов.

В Казахстане сбор ТБО проводится без разделения на фракции, практически весь объем вывозится на полигоны, большая часть которых не отвечает санитарным требованиям, имеются многочисленные нелегальные свалки, которые сильно ухудшают санитарное состояние территорий, а утилизации и сжиганию подвергается менее 5% ТБО [1].

В 2014 году Правительством РК была утверждена Программа по модернизации системы управления ТБО, где планировалось усовершенствовать систему обращения с ТБО на основе современных технологий и методов управления при строгом соблюдении требований экологического законодательства Республики Казахстан [2]. Согласно указанной Программе, к 2030 г. ожидается достижение следующих целевых индикаторов по отдельным видам отходов: доля сбора биологически разлагаемых отходов – 30%, упаковочных материалов, бумаги и стекла – 50%, отходов бытовой техники – 70%, раздельного сбора опасных бытовых отходов – 65%, переработки опасных бытовых отходов – 85%, утилизация использованных автомобилей – 50%, утилизация использованных автомобильных шин – 80%.

Для решения вопросов управления ТБО в РК Правительством Казахстана в 2019 году была принята Концепция по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике», согласно которой доля переработанных отходов к 2030 году должна составить 40%, а к 2050 – 50% [3].

С 1 января 2019 года статья 301 Экологического кодекса запрещает захоронение на полигонах РК пластмассы, макулатуры, картона, бумажных отходов и стекла, а также прием пищевых отходов [4]. Местные исполнительные органы должны организовать мероприятия по сокращению захоронения биологически разлагаемых отходов, включая меры по их рециклингу, компостированию, производству биогаза и (или) использованию в целях производства продукции или энергии.

Утилизация и переработка органических отходов является в настоящий момент актуальным направлением развития отрасли управления отходами в Казахстане. В Республике ведутся разработки различных технологий утилизации и переработки органических отходов, в числе которых получение биогаза, сжигание с рекуперацией энергии, компостирование и другие.

Биофракцию ТБО можно рассматривать как богатый источник вторичных ресурсов [5]. Утилизация их путем разложения под действием температуры, биологических, химических или механических факторов позволяет получить из них

продукты в виде газообразного или жидкого топлива или тепла. Для сбора и переработки ТБО применяются различные технологии и оборудование. Каждая технология имеет свой экономический, экологический и социальный эффект.

До настоящего времени самым распространенным способом утилизации ТБО являлось его сжигание методами пиролиза, инсинерации и газификации [6]. Главным недостатком этих методов является загрязнение воздушной среды.

В странах Европы получило развитие направление использования ТБО в качестве альтернативного топлива в энергетике и в цементной промышленности. При этом большую роль в выборе направления применения АТ имеют морфологический состав и сортировка ТБО.

В Казахстане данное направление только начинает развиваться.

Для использования ТБО в качестве сырья для получения альтернативного топлива для цементной промышленности необходимы классификация, измельчение и сушка исходного материала.

Из ТБО можно получить следующие разновидности твердого альтернативного топлива [7]:

*RDF (Refuse Derived Fuel)* – твердое вторичное топливо, которое получают путем сортировки, измельчения и обезвоживания твердых бытовых отходов. Характеристики RDF определяются согласно действующим стандартам или техническим условиям производства топлива. Содержит высококалорийные компоненты (пластик, бумага, картон, текстиль, резина, кожа, дерево и т.д.). Состав: 44–51% углерода, 29–36% кислорода, 5–7% водорода, а также примеси азота, калия, серы, хлора и др.

*SRF (Solid Recovered Fuel)* – твёрдое рекуперированное (восстанавливаемое) топливо, полученное из твёрдых отходов. Производство SRF обычно сосредоточено прямо на участках сортировки мусора. SRF должно соответствовать требованиям классификации и спецификации [8]. Классификация SRF основана на предельных значениях 3 важных показателей топлива: среднеарифметических значениях низшей теплоты сгорания (NCV) и содержания хлора, а также медианном и 80-перцентильном значении содержания ртути. Согласно этой классификации, каждый показатель подразделяется на 5 классов.

В зависимости от состава SRF его теплотворная способность может составлять от 12 до 25 МДж/кг. В таблице 1 приведены типичные свойства SRF топлива [9].

Таблица 1

Типичные свойства SRF топлива

Химические свойства		Механические свойства	
Теплотворная способность	3-4 МДж/кг	Размер частиц	10-300 мм

Влажность	< 25% масс.	Объемная плотность	120-300 кг/м <sup>3</sup>
Зольность	< 20%		
Содержание Cl	1,5%		
Содержание Hg	0,5%		

Авторами работы [9] было проведено сравнение полученного из ТБО АТ: SRF и RDF. Авторы данного исследования показали, что в синтетическом SRF (58% бумаги, 22% пластика, 15% текстиля и 5% дерева) содержание хлора и ртути меньше, чем в угле и в RDF и оно по своим характеристикам пригодно для цементных заводов и энергетических секторов. Сравнение горения чистого угля, угля с добавлением 10% RDF и угля с добавлением 10% SRF показало меньшее количество выбросов в последнем случае. Таким образом, SRF показал себя наиболее подходящим АТ для тепловых установок, поскольку этот вид топлива является более чистым продуктом, чем его аналог. Следует отметить, что SRF является по составу более однородным, соответственно менее загрязнен, чем обычный RDF.

К качеству альтернативного топлива из ТБО предъявляются требования к спецификации [8], к которым относятся класс и выход ТБО, физические свойства, форма и размер гранул, метод испытания, содержание определенных химических элементов. Топливо должно обладать определенными геометрическими характеристиками, определяемыми транспортной системой подачи АТ на горелку и размером сопел самой горелки. Оценка пригодности топлив из отходов основывается на максимально допустимых концентрациях вредных веществ в отходах.

Целью настоящего исследования явилось получение SRF-топлива из биоразлагаемой фракции ТБО полигона «Тартып» и изучение специфических характеристик полученных гранул альтернативного топлива.

### ***Методы исследований***

Для производства альтернативного топлива из отходов ТБО требуется применение методов сепарации, измельчения, сушки, смешивания и др., а также проведение необходимых лабораторных исследований.

Важными характеристиками АТ из ТБО, необходимыми для его спецификации, являются зольность, влажность, низшая теплотворная способность, содержание микроэлементов (особенно ртути, кадмия и таллия), серы и хлора.

Высшая теплота сгорания альтернативного топлива была определена экспериментально на калориметрической установке [10].

Определение содержания общей и аналитической влаги проводилось методом высушивания образца топлива до постоянной массы [11,12].

Зольность ТБО определяли методом поэтапного сжигания пробы в муфельной печи [13]. Для определения выхода летучих веществ был использован

гравиметрический метод [14].

Для решения экологических и технологических задач на стадии производства АТ и в процессе его сжигания необходимо проведение количественного определения микроэлементов в пробах после разложения. Сжигание пробы биофракции проводилось в печи-инсинераторе с колосниковой решеткой Д8417. Для розжига и поддержания горения использовалась распылительная горелка на соляровом масле. Максимальная температура на поверхности слоя в топочной камере составила 968°C (по показаниям радиационного пирометра GM1500). Химический состава пробы после сжигания определяли рентгенофлуоресцентным полуколичественным методом анализа.

Для количественного определения микроэлементов в пробах после разложения был использован инструментальный метод анализа – атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой [15].

Гранулы SRF были получены нами путем измельчения, сушки, смешивания и прессования биологической фракции ТБО полигона АО «Гартып».

### ***Результаты и их обсуждение***

В таблице 2 представлены усредненные результаты определения аналитической и общей влаги, зольности, выхода летучих альтернативного топлива (SRF), полученного из биофракции с полигона АО «Гартып». Определение данных характеристик было проведено нами в лабораторных условиях по известным методикам. Значения низших теплот сгорания образцов АТ было рассчитано из результатов, полученных экспериментально на калориметрической установке.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований проб биофракции ТБО полигона АО «Гартып»

Проба	Аналитич. влага, $W^a$ , % 105±2°C	Общая влага, $W_t^r$ , % 105±2°C	Зольность, $A^a$ , % 250→550°C	Выход летучих, $V^a$ , % 900°C	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
SRF	9,52	10,27	24,70	74,3	16,6

Биофракция отходов ТБО была сожжена в условиях полигона АО «Гартып» при температуре 968°C. Химический состав золы биофракции был исследован методом рентгенофлуоресцентного полуколичественного анализа. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты рентгенофлуоресцентного полуколичественного анализа золы после сжигания биофракции

Определяемый элемент	Содержание, %	В пересчете на оксиды	Содержание, %
O	43,397	-	-
Na	2,144	Na <sub>2</sub> O	2,881
Mg	1,392	MgO	2,324
Al	3,581	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,864
Si	13,908	SiO <sub>2</sub>	30,601
P	0,795	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,924
S	1,405	SO <sub>3</sub>	3,725
Cl	3,232	Cl	3,458
K	1,518	K <sub>2</sub> O	1,985
Ca	13,368	CaO	20,582
Ti	0,913	TiO <sub>2</sub>	1,728
Cr	0,011	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,019
Mn	0,08	MnO	0,118
Fe	3,148	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,148
Co	0,037	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,058
Ni	0,014	NiO	0,02
Cu	0,143	CuO	0,207
Zn	0,156	ZnO	0,226
Br	0,009	Br	0,01
Rb	0,009	Rb <sub>2</sub> O	0,011
Sr	0,037	SrO	0,05
Zr	0,018	ZrO <sub>2</sub>	0,028
Ba	0,033	BaO	0,042
Pb	0,068	PbO	0,086
Hg	0,005	HgO	-

Как видно из результатов, в образце после сжигания биофракции ТБО преобладает содержание оксидов щелочных металлов (кальция, натрия, магния), кремния, алюминия, железа (III), серы (VI), присутствуют значительные содержания хлора.

Следует отметить, что оксиды кальция и магния являются составляющей клинкера - промежуточного продукта в процессе производства цемента [16].

Примерный состав типичного клинкера: 67% CaO, 22% SiO<sub>2</sub>, 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 3% других компонентов. Присутствие указанных компонентов в золе биофракции позволит в дальнейшем при проведении расчетов уменьшить количество добавляемых компонентов в клинкер за счет их присутствия в золе биофракции.

### **Выводы**

Таким образом, нами получены результаты, подтверждающие возможность использования АТ из биофракции ТБО в качестве топлива и сырья для цементной промышленности. Полученные значения низшей теплотворной способности SRF

вполне коррелируют с литературными данными. Для получения более точных результатов необходимо проведение дальнейших исследований в этой области.

#### **Источники**

[1] Национальный доклад о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов за 2011-2014 гг. – Режим доступа: <http://ecodoklad.kz>.

[2] Программа модернизации системы управления твердыми бытовыми отходами на 2014–2050 годы. Постановление №634 Правительства Республики Казахстан от 9 июня 2014 года.

[3] Концепция «Программы по развитию Национальной системы управления твердыми бытовыми отходами Республики Казахстан» от 11 января 2019 года, №17-12/2784.

[4] <https://informburo.kz/stati/v-2019-godu-uzhestochilis-trebovaniya-k-pererabotke-otходов-zachem-i-chto-izmenilos.html>.

[5]. Хантимирова С.Б., Мишустин О.А., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф. Анализ и обоснование выбора способа переработки отходов производства и потребления. / Инженерный вестник Дона, №1(2019).

[6] Клинков А.С. Утилизация и переработка твердых бытовых отходов: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. – 188 с.

[7] Rada E.C., Andreottoala G. RDF/SRF which perspective for its future in EU. / Waste Manage, 2012.

[8] Стандарт EN 15359:2011. Топливо твердое из бытовых отходов. Технические характеристики и классы.

[9] Constantinos S. Psomopoulos. Residue Derived Fuels as an Alternative Fuel for the Hellenic Power Generation Sector and their Potential for Emissions Reduction. / AIMS Energy, 2014, Volume 2, Issue 3: 321-341. doi: [10.3934/energy.2014.3.321](https://doi.org/10.3934/energy.2014.3.321)

[10] ГОСТ 33108-2014 (EN 15400:2011). Определение теплоты сгорания.

[11] ГОСТ Р 54231-2010. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 1. Общая влага. Стандартный метод.

[12] ГОСТ 33512.3-2015. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 3. Влага аналитическая.

[13] ГОСТ 33511-2015. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение зольности.

[14] ГОСТ 6382-2001. Методы определения выхода летучих веществ.

[15] ГОСТ Р 55131-2012. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение микроэлементов.

[16] <https://1beton.info/proizvodstvo/napolniteli/chto-takoe-tsementnyj-klinker-i-gde-primenyaetsya>.

## ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ТЭЦ

М.Д. Шавдинова

УО «Казахстанско-Немецкий Университет в Алматы»

e-mail: [shavdinova@dku.kz](mailto:shavdinova@dku.kz)

**Аннотация.** Приведена методика, учитывающая раздельное влияние присосов воздуха и загрязнений на величину давления пара в конденсаторе. Методика включает совместную работу конденсатора и пароструйного эжектора. На основе данной методики разработан программный комплекс в табличном редакторе Microsoft Excel.

Методика позволяет эксплуатационному персоналу ТЭЦ отслеживать состояние оборудования и оперативно принимать меры. Установлено, что на величину давления пара в конденсаторе большое влияние оказывают загрязнения в конденсаторе.

**Ключевые слова:** конденсатор, эжектора, диагностика, давление пара, загрязнения труб.

Методику учета раздельного влияния присосов воздуха и загрязнений на величину давления пара в конденсаторе разрабатывали в своих работах Шкловер Г.Г. [1], Аронсон К.Э. [2], Хаэт С.И. [3]. Методика базируется на совместной характеристике конденсатора и эжектора.

В работах [2], [3] разработана диагностическая модель конденсационной установки, основанная на совместной характеристике конденсатора и эжектора. Совместная характеристика конденсатора и эжектора состоит из двух участков. Участок один определяет работу конденсатора при расходах пара, близких к номинальным. Участок два – работу эжектора. Для расчета участка 1 можно использовать любую из известных методик расчета конденсатора [4] – [8].

Расчет первого участка выполнен по методике ВТИ. При расчете первого участка использовалась математическая модель конденсатора.

Расчеты проводились для значений расхода пара, близкого к номинальному  $D_k = (0,4-0,6) * D_k^{ном}$ , кг/с.

При значении температуры охлаждающей воды  $t_{lв}$  определяем давление пара. Определяем значения номинального давления пара  $P_k^{ном}$  и номинальной температуры пара  $t_k^{ном}$  при номинальном расходе пара  $D_k^{ном}$ .

Используя характеристику эжектора для сухого воздуха, полученную в результате математического моделирования, определяем давление в эжекторе  $P_{эж}^c$  при фактических присосах воздуха.

Разница между фактическим ( $P_ф$ ) и нормативным ( $P_{норм}$ ) давлением в конденсаторе определяется повышенными присосами воздуха  $\Delta P_{возд}$  и наличием загрязнений на внутренней поверхности теплообмена  $\Delta P_{загр}$ :

$$P_ф - P_{норм} = \Delta P_{возд} + \Delta P_{загр} \quad (1)$$

По этой методике разработан программный комплекс, реализованный в Microsoft Excel.

Используя программный комплекс, эксплуатационный персонал может проводить диагностику конденсационного оборудования и оперативно принимать меры.

Если  $\Delta P_э > 0,5$ , выводится диагностическое сообщение – «Отклонение вакуума в конденсаторе из-за повышенных присосов воздуха – велико. Провести поиск мест присосов вакуумной системы».

Если  $\Delta P_3 > 0,5$ , выводится диагностическое сообщение – «Отклонение вакуума в конденсаторе из-за отложений на трубках – велико. Необходима очистка конденсатор» (рисунок 29).

Используя программный комплекс, проведены расчеты для нескольких значений расхода пара в конденсатор для 3-х видов эжекторов: ЭПО-3-200, ЭП-3-25/75.

Из расчетов получено, что отклонение фактического давления от нормативного определяется преимущественно загрязнением. При расходах пара в конденсатор более 27,78 кг/с и присосах воздуха до 0,008 кг/с влияния воздуха может отсутствовать. Установлено, что влияние воздуха может появиться при  $D_k \leq 16,67$  кг/с.

На рисунке 1 приведена совместная характеристика конденсатора и пароструйных эжекторов.

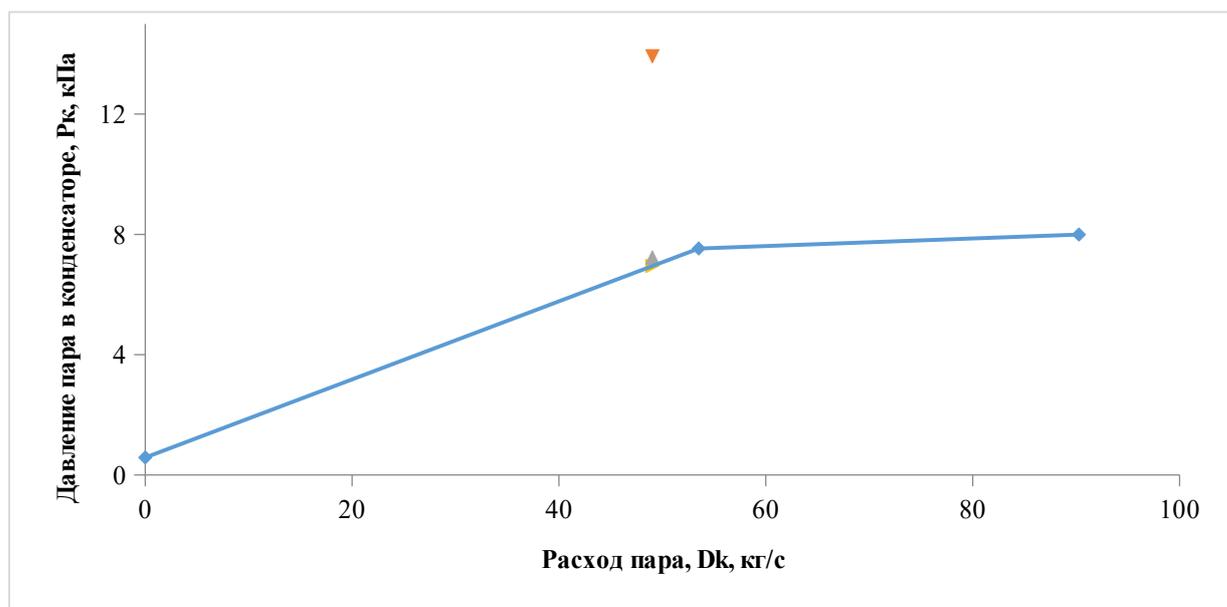


Рисунок 1 – Совместная характеристика конденсатора и эжектора ЭП 3-25/75 при  $D_k = 49,03$  кг/с.

Давление пара в конденсаторе: 1 – фактическое; 2 – расчетное; 3 – давление в конденсаторе с учетом влияния присосов воздуха. Участок: I–II – работа конденсатора; II–III – совместная работа конденсатора и эжектора

Получаем из расчетов, что отклонение вакуума в конденсаторе обусловлены отложениями в трубках.

Таким образом, установлено, что основной причиной отклонения вакуума в конденсаторе являются загрязнения поверхности оборудования. В результате чего, определили примерную толщину отложений, которые приводят к таким отклонениям вакуума (таблица 1).

Таблица 1 – Расчет толщины загрязнений

$D_k$ , кг/с	39,25	47,19	49,03	59,19
$k_{факт}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	2 277,48	2 147,39	2 474,21	3 068,71
$k_{расчет}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	1 046,78	1 043,23	751,79	1 669,25
$R_3$ , (м <sup>2</sup> К)/Вт	0,0005	0,0005	0,0009	0,0003
$\lambda_{3,2}$ , Вт/м*К	2			
$\delta_{3,2}$ , м	0,001032	0,000986	0,001852	0,000546

Расчетные значения толщины отложений в трубках для некоторых режимов превышают 1 мм. Для таких значений толщин отложений целесообразно оценить изменение гидравлического сопротивления конденсатора по воде по методике [9] (таблицы 2 и 3).

Таблица 2 – Гидравлическое сопротивление (без отложений)

Наименование	Значения			
Расход пара, $D_k$ , кг/с	39,25	47,19	49,03	59,19
Давление в конденсаторе, $p_k$ , кПа	8,675	9,111	13,925	7,305
Расход охлаждающей воды, $G_в$ , кг/с	2801	2571	2604	4565
Температура охлаждающей воды, $t_{1в}$ , °С	22,4	24,4	26,4	23,3
Гидравлическое сопротивление конденсатора по водяной стороне, $H_k$ , кПа	21,819	18,719	18,779	51,812
Паровое сопротивление конденсатора, $\Delta p_k$ , кПа	0,22	0,329	0,22	0,752

Таблица 3 – Гидравлическое сопротивление (с отложениями)

Наименование	Значения			
Расход пара, $D_k$ , кг/с	39,25	47,19	49,03	59,19
Давление в конденсаторе, $p_k$ , кПа	8,675	9,111	13,925	7,305
Расход охлаждающей воды, $G_в$ , кг/с	2801	2571	2604	4565
Температура охлаждающей воды, $t_{1в}$ , °С	22,4	24,4	26,4	23,3
Гидравлическое сопротивление конденсатора по водяной стороне, $H_k$ , кПа	33,819	29,019	44,411	122,32
Паровое сопротивление конденсатора, $\Delta p_k$ , кПа	0,22	0,329	0,22	0,752

На рисунке 2 представлена зависимость гидравлического сопротивления конденсатора по водяной стороне от расхода пара.

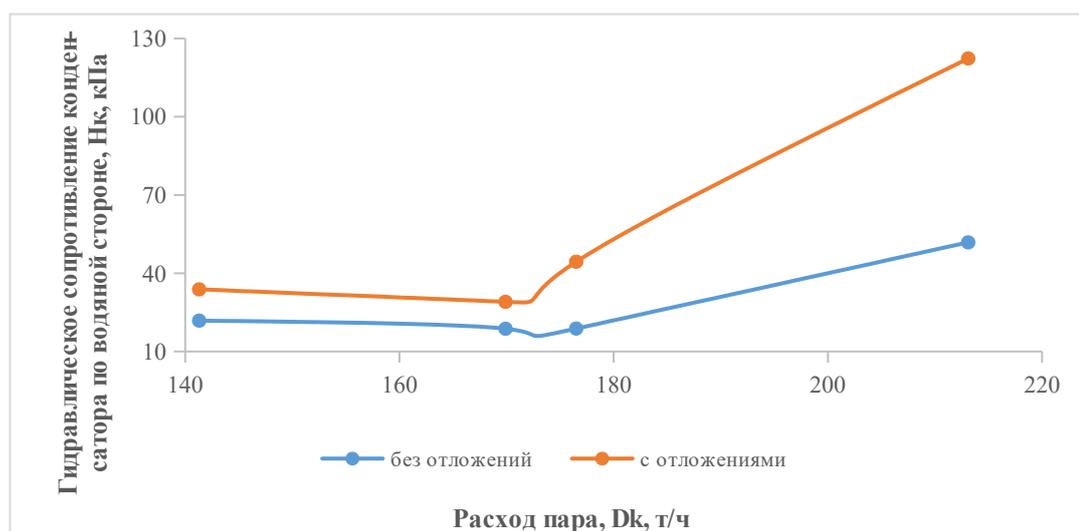


Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления конденсатора по водяной стороне от расхода пара

Из рисунка 2 видно, что гидравлическое сопротивление по водяной стороне конденсатора для рассмотренных расходов пара за счет влияния отложений на поверхности увеличивается от 1,5 до 2 раз. Повышение гидравлического сопротивления по водяной стороне приводит к некоторому сокращению расхода воды через конденсатор.

## Выводы

Разработан программный комплекс, позволяющий проводить диагностику состояния конденсационной установки. Программный комплекс реализован в *Microsoft Excel*.

В основу программного комплекса положена методика, учитывающая раздельное влияние присосов воздуха и загрязнений поверхности на давление пара в конденсаторе. Проведены расчеты конденсатора АлЭС ТЭЦ-2 КГ2-6200 и пароструйных эжекторов ЭП 3-25/75, ЭПО-3-200. Из результатов расчетов установлено, что основной причиной изменения давления пара в конденсаторе являются загрязнения поверхности оборудования.

Определены значения отложений на поверхности конденсатора и оценено влияние отложений на гидравлическое сопротивление по водяной стороне конденсатора. Получено, что гидравлическое сопротивление по водяной стороне конденсатора для рассмотренных расходов пара за счет влияния отложений на поверхности увеличивается до 2 раз.

## Список литературы

[1] М. О. Шкловер Г.Г. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. Москва: Энергоатомиздат, 1985.

[2] Аронсон. К.Э. Разработка и реализация системы мониторинга состояния теплообменных аппаратов паротурбинных установок в составе информационных комплексов ТЭС. Екатеринбург: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уральский государственный технический университет, 2008.

[3] Хаэт. С.И. Разработка и реализация элементов диагностического модуля для мониторинга состояния конденсационной установки паровой турбины. Екатеринбург: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук., 2004.

[4] Shavdinova. M., Borissova N.G. «Mathematical model of a steam turbine condenser». Вестник НИИ РК. Прикладная математика и информационные технологии. № №2 (80), pp. с. 41-46, 2021.

[5] Shavdinova M., Aronson K., Borissova N. «Development of condenser mathematical model for research and development of ways to improve its efficiency,» Journal of Applied Engineering Science (JAES), № Volume 18, Number 4, pp. 577-585, 2020.

[6] Шавдинова М.Д. «Разработка математической модели конденсатора и способы повышения его эффективности» в "Global science and innovations 2019: Central Asia: материалы IV Международной научно-практической конференции", Астана, 2019. - II том. с. 98-101.

[7] Шавдинова М.Д. «Методики расчета конденсатора паровой турбины». Материалы XI Международной научно-технической конференции, посвященная 45-летию образования Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева. Сборник тезисов докладов уч, Алматы, НАО "АУЭС", 2020, с. 76-78.

[8] Шавдинова М.Д. «Разработка математической модели конденсатора паровой турбины». IX Международная научно-практическая конференция "Культура, наука, образование: проблемы и перспективы" (KSE 2021), в очно-дистанционном формате в Нижневарттовском государственном университете, г. Нижневарттовск, Россия, 2021.

[9] Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: Учебн. пособие для вузов, Москва: Энергоатомиздат, 1994, 288с.

## DIAGNOSTIC MODEL OF THE CHP STEAM TURBINE CONDENSER

M.D. Shavdinova

IE "Kazakhstan-German University in Almaty"

e-mail: [shavdinova@dku.kz](mailto:shavdinova@dku.kz)

**Abstract.** A technique is given that takes into account the separate influence of air suction and pollution on the vapor pressure in the condenser. The technique includes the joint operation of a condenser and a steam jet ejector. Based on this technique, a software package was developed in the spreadsheet editor *Microsoft Excel*.

The methodology allows the operating personnel of the CHP plant to monitor the condition of the equipment and quickly take action. It has been established that the vapor pressure in the condenser is greatly affected by pollution in the condenser.

**Key words:** condenser, ejector, diagnostics, steam pressure, pipe pollution.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

У.Р. Шайхуллин, Р.С. Зарипова  
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан  
2002ural@mail.ru

***Аннотация:** В статье приводится методика определения наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети. Выявлены критерии оптимальности, отражающие конструктивные, эксплуатационные, экономические и другие факторы, влияющие на работу систем теплоснабжения. Описывается функционал информационной системы для расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы.*

***Ключевые слова:** программное обеспечение, управление, теплоснабжение, энергосбережение, тепловая сеть, многокритериальная оптимизация.*

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY AND INFORMATION SYSTEM FOR CALCULATING THE OPTIMUM ROUTE FOR THE PIPE NETWORK OF A HEAT SUPPLY SYSTEM

Shaikhullin Ural Rudikovich, Zaripova Rimma Soltanovna  
KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan  
2002ural@mail.ru

***Abstract:** The article provides a method for determining the most advantageous option for tracing the heat network. Optimality criteria reflecting constructive, operational, economic and other factors affecting the operation of heat supply systems are identified. The functional of the information system for calculating the optimal route.*

***Keywords:** information system, management, heat supply, energy saving, heating network, multi-criteria optimization.*

К числу основных проблем тепловых сетей относятся: плохое состояние систем теплоснабжения, высокий износ теплосетей, невысокая надежность функционирования, большие энергетические потери, загрязняющее воздействие на окружающую среду; потребность в больших инвестициях для надежного функционирования, разобщенность объектов и

систем теплоснабжения. В связи с этим для развития тепловых сетей необходимо основательно подходить к строительству новых и реконструкции действующих систем теплоснабжения [1].

Решение такой проблемы, как беспорядочное развитие систем теплоснабжения и повышение их эффективности, является важной задачей энергетического комплекса и напрямую связано с автоматизацией рассматриваемых систем. Основной проблемой при этом является перевод существующей информации в электронную форму и её последующее применение современными информационными системами [2]. На сегодняшний день нет единого решения задачи управления энергетическими системами городов. Каждая крупная энерговырабатывающая отрасль применяет свои разработки в решении задачи автоматизации своих объектов, что затрудняет их использование в смежных отраслях. Применяя эти подходы к системам теплоснабжения, можно добиться уменьшения затрат при строительстве новых или реконструкции существующих систем. Одним из основных вопросов при этом является выбор наиболее оптимального маршрута трубопроводной магистрали между источником и абонентом тепловой сети [3].

При проектировании тепловой сети можно столкнуться с проблемой трудоёмкости расчёта, так как чем больше подключаемых потребителей, тем разветвлённее должна быть тепловая сеть. Эту проблему можно решить путём их автоматизации различными программно-вычислительными системами, которые позволят сократить временные и трудовые затраты при проектировании сети. В этом случае необходимо разработать методику расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы системы теплоснабжения и реализовать её в виде программы. Данную задачу можно решить с помощью методов системного анализа [4]. Для этого необходимо определиться с критериями, относительно которых будет проводиться оптимизация, и подобрать для них методы анализа.

В условиях неизвестности исходных данных на первоначальном этапе проектирования за критерии оптимальности необходимо брать укрупнённые характеристики, которые описывают особенности проектируемой системы. В настоящее время можно выделить такие характеристики, как время строительства, тепловые потери, надёжность, металлоёмкость и оборот теплоты, а также в качестве дополнительной характеристики можно применить дисперсию температуры у абонента. Основным недостатком в данном методе оптимизации является человеческий фактор: ошибочный выбор экспертами веса критериев, что может привести к неправильному решению. Этого можно избежать путём

применения метода, ограничивающего заведомо невыгодные варианты трассировки [5]. Смысл этого метода состоит в последовательном рассмотрении пар трассировок. Если все параметры оптимизации в одном из двух вариантов содержат величины, строго большие соответствующих величин во втором варианте, то первую строку можно исключить из поиска оптимальных вариантов. Для реализации метода определения наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети необходимо разработать информационную систему для расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы. Её использование позволит сократить временные и трудовые затраты при проектировании.

Реализация информационной системы осуществляется на высокоуровневом объектно-ориентированном языке программирования Python. Разработанная программа дает возможность рассчитать наиболее оптимальный вариант трассировки с учётом укрупнённых критериев материалоемкости, надёжности, тепловых потерь времени строительства и равномерности распределения температуры у потребителя. На первом этапе расчёта необходимо выбрать метод и критерии оптимизации. Далее необходимо ввести исходные данные для расчёта, после чего выполняются проверка корректности введённой информации, и программа проводит расчёт. Затем вводятся данные по второй схеме и так далее для всех рассматриваемых вариантов трассировки. При выборе метода оптимизации с экспертными оценками на следующем этапе задаются значения каждого критерия и затем выводится информация, содержащая рассчитанные критерии, наиболее выгодный вариант трассировки и диаграмма для каждой схемы теплоснабжения.

Разработанная информационная система дает возможность получить не только графическое представление результатов расчёта оптимального маршрута, но и табличное представление, что упрощает анализ полученных данных. Кроме того имеется возможность расчета оптимального маршрута с использованием метода экспертных оценок, а также методом исключения заведомо невыгодных вариантов в независимости друг от друга. Всё это позволяет существенно уменьшить трудоёмкость и время выбора оптимального варианта трубопроводной магистрали при проектировании систем теплоснабжения.

## **Источники**

1. Лобода А.В., Чуйкина А.А. О согласовательном проектировании систем теплоснабжения на основе системного анализа. Российский журнал строительства и архитектуры. 2020. № 3. С. 35-45.
2. Галеев С.Р., Зарипова Р.С. Информационно-измерительная система технологического контроля параметров центрального теплового пункта / Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: Материалы IV российской молодежной научной школы-конференции. 2016. С.328-329.
3. Мелкумов В.Н., Тульская С.Г., Чукина А.А., Дубинин В.Ю. Решение многокритериальной задачи оптимизации транспорта тепловой энергии. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислительной техники. 2021. Том. 1258. С. 3-10.
4. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кобелев В.Н. Выбор математической модели трасс тепловых сетей / Научный вестник ВГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2021. №2. С. 31–36.
5. Шакиров А.А., Зарипова Р.С. Разработка информационной системы контроля параметров системы отопления / Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. КузГТУ, 2018. С. 335.1-335.3.
6. Гапоненко С. О. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов / С. О. Гапоненко, Р. А. Фазлиев, М. В. Калинина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 142-147.
7. Соловьева О.В. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности / О. В. Соловьева, С. А. Соловьев, А. Р. Талипова [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 56-64.
8. Ефремов А. А. Анализ зарубежного опыта в части построения энергетической структуры ТЭС на твердых коммунальных отходах / А. А. Ефремов, А. Н. Дудолин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 3-14.

МРНТИ 49.39.31,  
УДК 621.45.046.5

## ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ КОМПЕНСАТОРОВ ТРУБОПРОВОДОВ ОТБОРОВ ПАРА СЕТЕВЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ТУРБОУСТАНОВОК Т110/120-130 НА НЧ ТЭЦ.

**Р.Т.Шакирзянов, А.Г.Гараев**

Набережночелнинская ТЭЦ.

e-mail: [shakirustt@gmail.com](mailto:shakirustt@gmail.com) , [garaevag@nchtec.tatenergo.ru](mailto:garaevag@nchtec.tatenergo.ru)

***Аннотация.** В статье рассмотрен метод восстановления компенсаторов отборов пара на НЧ ТЭЦ турбоустановок Т110/120-130 имеющие сквозную коррозию металла линз с применением композитных материалов, проблемы при ремонтно восстановительных работах с применением дуговой сварки, преимущества применения композитных материалов их характеристики, требования к композитным составам применяемых при ремонте.*

***Ключевые слова:** подогреватель сетевой, отбор ПСГ, композит, ремонт компенсатора, линзовый компенсатор, присосы, восстановление компенсатора, сетевая вода.*

### **Введение**

Набережночелнинская ТЭЦ входит в состав АО «Татэнерго». Является одной из крупнейших тепловых станций России. Потребителями тепловой энергии являются жилые массивы Автозаводского и Центрального района города, заводы КамАЗа. Установленная мощность станции: 1180 МВт, тепловая мощность: 4092 Гкал/ч, используемое топливо топлива: природный газ, мазут.

Для производства электрической энергии и обеспечения тепловой энергией потребителей на набережночелнинской ТЭЦ установлены одиннадцать турбогенераторов, восемь из которых имеют теплофикационные отборы для подогрева сетевой воды — это турбины марок: Т-100-130, Т-175-130, Т-185-130. В данных турбинах нагрев сетевой воды горячего водоснабжения происходит в сетевых подогревателях отработавшим паром из отборов турбины. Для ступенчатого подогрева сетевой воды установлены два сетевых подогревателя на каждой из турбин. Один из подогревателей ПСГ-1 имеет постоянно действующие отборы и находится в работе в паре с турбиной, второй имеет отключаемые отборы пара ПСГ-2 и используется при увеличении тепловой нагрузки.

Производственную тепловую нагрузку удовлетворяют обычно паром, отработавшим в турбине и имеющим давление 0,7—4,0 МПа, отопительную—либо сетевой водой с температурой 70—150 °С, паром из отборов турбины с давлением 0,05—0,50 МПа. В холодное время года воду нагревают до 120—150 °С. Доля тепловой нагрузки горячего водоснабжения составляет примерно 25 % максимальной отопительной нагрузки зимой и 20 % летом. Продолжительность отопительного сезона в средней полосе России составляет около 5000 ч/год. Годовое время использования максимума отопительной нагрузки составляет около 3000 ч.

### **Основная часть**

Трубопроводы отбора пара на сетевые подогреватели по своему исполнению имеют как вертикальные, так и горизонтальные участки, на которых расположены компенсаторы тепловых расширений трубопроводов. При работе турбины ПСГ-1 находится в работе постоянно его трубопроводы отбора и компенсаторы больше подвержены постоянным температурным напряжениям, а также напряжениям, возникающим при линейном расширении трубопровода в отличии от ПСГ-2. Со временем температурные расширения, а также механические перемещения трубопроводов приводят к более быстрому износу компенсаторов и самих трубопроводов появлению на них трещин, свищей,

коррозионному износу, утонению стенок трубопроводов, линз компенсаторов, внутреннего стакана. Как показывает практика в первую очередь наибольшему износу подвержены линзовые компенсаторы так как технологически они имеют толщину стенки меньше чем трубопроводы к тому же на нем концентрируются температурные расширения трубопроводов. Обычно на линзовых компенсаторах образуются точечные свищи, хаотично расположенные по периметру, а также на гнутых частях линз, если компенсатор установлен на вертикальном участке, либо в нижней части если компенсатор расположен на горизонтальном участке трубопровода. Для устранения такого рода дефектов обычно применяют дуговую сварку, но у данного метода есть существенные недостатки, во время нагрева металл начинает расширяться, его расширению препятствуют более холодные части металла, в результате сопротивления расширению возникают внутренние напряжения что чревато повторным появлением трещин, свищей на линзах компенсатора при работе турбоустановки. Вторичной причиной возникновения напряжений и деформаций при сварке является усадка металла шва при переходе из жидкого состояния в твердое. Еще одним важным моментом при использовании дуговой сварки является то что линзы компенсатора при заварке точечных свищей будут иметь утолщения в местах сварки, что вызовет его неравномерную работу на сжатие и расширение, а также концентрацию в этих местах внутренних напряжений. Одним из наиболее простых вариантов является замена компенсаторов, однако замена возможна только в период капитального ремонта что в любом случае требует эксплуатации до наступления капитального ремонта. Произвести замену всех компенсаторов на турбинах с подобными дефектами задача, сложная и требующая затрат с учетом того, что на отборах пара ПСГ-1 их количество составляет шесть штук. Замена так же усложняется труднодоступностью месторасположения компенсаторов на вертикальных участках трубопровода отбора пара. На НЧ ТЭЦ для устранения такого рода дефектов и продления срока службы компенсаторов взамен использования метода наплавки используется двухкомпонентный ремонтно-восстановительный композитный материал BELZONA 1511 на основе эпоксидно-фенольной смолы с наполнителем из кремнистой стали, для восстановления оборудования, поврежденного эрозией и коррозией, которое эксплуатируется при температурах до 150°C-160°C при условиях погружения в рабочую среду а устойчивость к сухому жару 210 °C что выше температуры пара в отборах ПСГ.

• Основными преимуществами применения состава является то что: состав не подвержен эрозии и коррозии, подходит для эксплуатации при высоких температурах, не дает усадки при отвержении, высокая адгезия к таким металлам, как нержавеющая сталь и специальные стали. Подходит для применения в:

- Отстойники и осветлители
- Ректификационные колонны
- Корпуса двигателей и насосов
- Теплообменники
- Трубы
- Технологические емкости
- Скрубберы
- Резервуары

Материал должен наноситься при температуре от 10°C до 40°C время отверждения до возобновления эксплуатации зависит от условий окружающей среды указанных в таб. 1.

таб.1.

температура	10 °C	20 °C	30 °C	40°C
Легкая нагрузка	72ч	18ч	5ч	4ч
Полная механическая или тепловая нагрузка	Требуется доотверждение	30ч	24ч	6ч
Погружение химической среды	Требуется доотверждение	Требуется доотверждение	60ч	8ч

Завершение молекулярной реакции при нанесении дополнительного высокотемпературного покрытия Belzona материал Belzona 1511 будет доотвержден в процессе эксплуатации, в этом случае необходимо выдержать соответствующее время отверждения, указанное для покрытия Belzona . Необходимо выдержать время отверждения Belzona® 1511 до начала использования в условиях, указанных в таблице 2.

табл 2.

Температура	Легкая нагрузка	Полная механическая или тепловая нагрузка	Контакт с химическими веществами
10°C	72 часа	Требуется доотверждение	Требуется доотверждение
20°C	18 часов	30 часов	Требуется доотверждение
30°C	5 часов	24 часа	60 часов
40°C	4 часа	6 часов	8 часов

От начала смешивания состав Belzona® 1511 должен быть использован в сроки, указанные в таблице 3.

таб. 3.

температура	10 °C	20 °C	30 °C	40°C
Использование всего материала в течение	120мин	60мин	50миг	40мин

С учетом того что толщина стенок линз нового компенсатора составляет около 3х мм то толщина наносимого слоя состава для восстановление его геометрических размеров достаточна от 3х до 4х мм. На практике в среднем при ремонте компенсаторов температура окружающей среды будет составлять от 25 до 40 градусов что позволит составу укрепиться в течении 4-5 часов. И для полного отверждения до 24 часов. По сравнению с использованием дуговой сварки восстановительный ремонт занимает меньше времени что сокращает сроки ремонта и увеличивает его качество что уменьшает простой оборудования.

### Выводы

Применение композитных материалов при ремонтно-восстановительных работах в условиях ТЭЦ имеет ряд преимуществ: сокращение сроков ремонта и простоя оборудования, привлечение меньшего числа ремонтного персонала к устранению коррозионных дефектов компенсаторов, трубопроводов, а также меньшие требования к навыкам ремонтного персонала. Дефекты, устраненные с применением композитных материалов трубопроводов, компенсаторов паровых турбин при соблюдении технологии их нанесения исключают вероятность повторного появления так как не подвержены коррозионному износу, а также соответствуют температурным параметрам рабочей среды трубопроводов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ю. Б. Ивасишина, С. И. Валеев статья “БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛИНЗОВЫХ КОМПЕНСАТОРОВ С ДЕФЕКТАМИ ФОРМЫ” // <https://cyberleninka.ru/article/n/bezopasnaya-ekspluatatsiya-linzovyh-kompensatorov-s-defektami-formy>

[2] Компенсаторы линзовые осевые типа КЛО по ТУ 3683-016-00220302-98

[3] Н.Н. Галашов “ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ” стр. 51-56

[4] Композитные материалы [Электронный ресурс]  
<https://www.belzona.com/ru/applications/hex.aspx>

[5] Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]  
<https://www.ngpedia.ru/id137431p2.html>

## REFERENCE LIST

[1] Yu. B. Ivasishina, S. I. Valeev article “SAFE OPERATION OF LINEAR COMPENSATORS WITH SHAPE DEFECTS” // <https://cyberleninka.ru/article/n/bezopasnaya-ekspluatatsiya-linzovyh-kompensatorov-s-defektami-formy>

[2] Axial lens compensators of the CLO type according to TU 3683-016-00220302-98

[3] N.N. Galashov “THERMAL MECHANICAL AND AUXILIARY EQUIPMENT OF POWER PLANTS” pp. 51-56

[4] Composite materials [Electronic resource] <https://www.belzona.com/ru/applications/hex.aspx>

[5] Big Encyclopedia of Oil and gas [Electronic resource] <https://www.ngpedia.ru/id137431p2.html>

## RESTORATION REPAIR OF COMPENSATORS OF PIPELINES FOR STEAM EXTRACTION OF NETWORK HEATERS OF TURBINE INSTALLATIONS T110/120-130 AT LOW FREQUENCY CHP.

R.T.Shakirzyanov, A.G.Garaev

Naberezhnye Chelny CHP.

e-mail: [shakirustt@gmail.com](mailto:shakirustt@gmail.com) , [garaevag@nchtec.tatenergo.ru](mailto:garaevag@nchtec.tatenergo.ru)

*Annotation.* The article discusses the method of restoring steam extraction compensators at low frequency CHP turbine installations T110/120-130 having through corrosion of lens metal using composite materials, problems during repair and restoration work using arc welding, the advantages of using composite materials, their characteristics, requirements for composite compositions used in repair.

**Keywords:** water heater, boiler, composite, compensator repair, lens compensator, suction cups, compensator restoration, feed water heater.

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Эйтерник<sup>1</sup> А. Ю., Борисова<sup>2</sup> О. В.

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

<sup>1</sup> [adeleyternik@yandex.ru](mailto:adeleyternik@yandex.ru), <sup>2</sup> [vladimirobna@mail.ru](mailto:vladimirobna@mail.ru)

***Аннотация.** В статье рассмотрены преимущества внедрения инновационных технологий и возможные способы повышения производительности тепловых электростанций. Выявлены более эффективные технологии, также акцентировано внимание на решение экологических проблем в теплоэнергетике.*

***Ключевые слова:** тепловая электростанция, уголь, энергоэффективность, коэффициент полезного действия, установка, энергоблок, инновационные технологии.*

## WAYS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY WITH THE HELP OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THERMAL POWER ENGINEERING

Eyternik<sup>1</sup> A.Y., Borisova<sup>2</sup> O.V.

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup> [adeleyternik@yandex.ru](mailto:adeleyternik@yandex.ru), <sup>2</sup> [vladimirobna@mail.ru](mailto:vladimirobna@mail.ru)

***Annotation.** The article discusses the advantages of introducing innovative technologies and possible ways to increase the productivity of thermal power plants. More efficient technologies have been identified, and attention is also focused on solving environmental problems in the heat power industry.*

***Keywords:** thermal power plant, coal, energy efficiency, efficiency, installation, power unit, innovative technologies.*

### **Введение**

За прошедшие десять лет в России наблюдается стремительный рост строительства тепловых электростанций (ТЭС) для выработки энергии. За счет большого количества месторождений полезных ископаемых, таких как природный газ, нефтепродукты или же уголь, генерация теплоэнергии происходит за счет сжигания ископаемого топлива, а вследствие этого ТЭС будет сохранять конкурентоспособность,

несмотря на технологическое развитие нетрадиционной (альтернативной) и атомной энергетики (АЭС).

В силу того, что на АЭС возможны чрезвычайные ситуации с выбросом радиационных выбросов, а предприятия с использованием альтернативных видов источников энергии зависят от погодных условий, количество тепловых электростанций может продолжить увеличиваться. Но нельзя не учитывать значительный минус ТЭС – выбросы вредных веществ в окружающую среду, а также сокращение используемых природных ресурсов.

Главной же проблемой современной ТЭС является низкий уровень эффективности трансформации энергии при сжигании топлива из-за невысокого значения коэффициента полезного действия (КПД - 35-40%). Инновационные технологии позволяют максимизировать это значение и повысить производительность тепловых электростанций.

### ***Основная часть***

Одним из вероятных решений может являться переход на иной уровень параметров пара, т.е. суперсверхкритические параметры (ССКД), которым соответствуют давление свежего пара свыше 25 МПа и температура более 565°C [1].

Такой переход к энергоблокам ССКП обусловлен следующими обстоятельствами:

1. Для повышения КПД ТЭС требуется повышение параметров пара, что является особенно эффективным способом. Повышение параметров пара происходит за счёт нагрева насыщенного пара. Когда пар полностью выпарится из воды, он становится сухим и перегретым. Такое явление называется промежуточным перегревом пара. Для достижения необходимого эффекта вводят второй промежуточный перегрев. Также следует подчеркнуть, что используемое топливо не будет влиять на результат повышения параметров пара.

2. Значительное уменьшение тепловых выбросов в окружающую среду из-за повышения параметров пара. Это является практически главным путём решения глобального потепления климата.

3. Повышение первичных параметров при обычном способе сжигания. Этот метод подразумевает в себе сжигание твердого топлива, которое, вероятнее всего, будет вытеснять как жидкое, так и газообразное топливо.

Правильно подобранные параметры во многом определяют работу энергоблоков ССКП. Рациональный выбор диапазона зависит от уровня развития в стране машиностроения и металлургии. В России переход к энергоблокам ССКД может быть осуществлен в ближайшем будущем, так как этот переход имеет свои достоинства, изложенные ранее.

Вторым действенным методом является использование на ТЭС маневренных генерирующих установок с совмещенными газовым и паровым циклами [2]. В связи с тем, что с каждым днем растет количество потребляемой энергии, появляется проблема управления остропиковыми нагрузками в линиях электропередач.

Решение данного вопроса заключается в установке пиковых агрегатов. Важными условиями в использовании этого типа установок должны являться быстрое включение и максимальный набор мощности за короткий промежуток времени, т.е. они должны обладать наилучшими маневренными свойствами (промежуток времени от начала пуска до полного набора мощности должен отсчитываться минутами). Ими могут являться гидроаккумуляторные и гидроэлектростанции (ГЭС), паротурбинные и газотурбинные установки.

Первые две установки имеют высокие маневренные качества, но они нерентабельны в связи с тем, что гидроаккумуляторные станции имеют дополнительную потерю энергии, а для ГЭС природные ресурсы истощены.

Вторые две установки уже не имеют особые капитальные затраты. Из них большей маневренностью будут обладать газотурбинные установки, так как у них вращение лопаток турбин происходит не из-за пара, а за счет сжигания топлива. Но они обладают существенным недостатком. У таких установок значительно высокое потребление топлива. Выходом из данной ситуации может являться создание целостной парогазовой установки [3]. Остаточная теплота сгорания природного газа в таком агрегате идет на производство водяного пара, который уже, в свою очередь, приводит в движение паротурбинную установку. КПД парогазового агрегата может достигать до 55%.

В настоящий момент продолжают работы по изучению, модернизированию и применению парогазовых установок. За счет их маневренности будет компенсироваться перепад нагрузок в электросетях.

Третий способ повышения энергоэффективности при помощи инновационных технологий – применение водоугольного топлива (ВУТ) [4]. ВУТ- новый вид органического топлива, получаемого при смешивании тонкоизмельченного угля, пластификатора и воды. Внедрение ВУТ в ТЭС позволит существенно снизить количество вредных выбросов, имеет эксплуатационное преимущество над пылевым и слоевым сжиганием топлива и более высокие экономические показатели. Сжигание водоугольного топлива практически безотходно (не менее 97%), так как мелкие частицы угля не превышают размеров более 120 мкм и их горение происходит более полным образом, чем сгорание крупных частиц при слоевом сжигании угля [5].

Применение ВУТ не имеет широкое распространение по одной весомой причине - несовершенство технологий приготовления суспензии для ВУТ. Они включают в себя, такие процессы как: тонкое измельчение угля, механическое сгущение, а также стабилизацию суспензии. На данный момент разработаны только мельницы с

традиционной конструкцией, где составляющие ВУТ измельчаются до равных размеров [6]. Также для классического метода приготовления ВУТ требуются существенные энергозатраты, которые увеличивают себестоимость ВУТ.

Но несмотря на это, данная технология продолжает развиваться. Имея такие недостатки, она все равно является более экологичной, экономичной и эффективной, так как получение ВУТ обеспечивается получением угля низкого качества.

### **Вывод**

Таким образом, внедрение инновационных технологий в процессы теплоэнергетики позволяют увеличить энергоэффективность тепловых электростанций и сделать стандарты экологии более жесткими. В России постепенно начинают заменяться устаревшие энергоблоки на более новые и усовершенствованные. Данный перечень технологий по повышению энергоэффективности далеко неполный. Однако даже внедрение этих инноваций позволит существенно сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду и повысить производительность ТЭС.

### **Источники**

[1] Бабенко И. А., Шульман В. Л. Технологии суперсверхкритических параметров пара в современной энергетике. <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/66477/1/978-5-8295-0616-2-2018-17>.

[2] Барановский И. Н. Маневренные характеристики парогазовых установок утилизационного типа. <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6071/>

[3] Чумаков, Г. А. Инновационные технологии в теплоэнергетике / Г. А. Чумаков // Аллея науки. – 2020. – № 2(41). – С. 59-61. – EDN УНАНІВ.

[4] Режимы мощных паротурбинных установок – требования к маневренности паротурбинных паротурбинных установок. <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/rezhimy-moschnyh-paroturbinyh-ustanovok-8.html>

[5] Зацаринная Ю. Н. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения / Ю. Н. Зацаринная, С. М. Маргулис, Е. А. Федотов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10. № 1(37). С. 55-63.

[6] Лысак Д. В., Ростовщикова Д. В., Перминова Л. Г. Водоугольное топливо в теплоэнергетике. <https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/pdf/2/2d.pdf>

[7] А.В. Паздерин, В.О. Самойленко, Н. Д. Мухлынин, П. А. Крючков. Ценовые характеристики источников электроэнергии мини и микрогрид // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 122-139.

[8] Бекмуратова Б. Т. Применение водоугольного топлива в теплоэнергетике // Бюллетень науки и практики. 2020. №20.

## СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»

УДК 533.682

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

Дюсембаева А.Н., Танашева Н.К., Тусыпбаева А.С.  
НАО «Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова»,  
Караганда  
<sup>1</sup>aikabesoba88@mail.ru

***Аннотация.** В данной работе рассматриваются возможности использования системы вращающихся цилиндров в составе ветротурбины. Были измерены аэродинамические силы в поперечном потоке цилиндра и системы из двух цилиндров. Разработан метод определения оптимального расстояния между цилиндрами при их поперечном прохождении.*

*Мы экспериментально определили условия, при которых эффект Магнуса способствует наибольшему увеличению лобового сопротивления и, соответственно, повышению КПД ветротурбины. Это может быть использовано для создания многолопастных ветряных турбин нового поколения на основе эффекта Магнуса. Аэродинамические характеристики цилиндров диаметром 10 см, то есть вращательное движение, определяются максимальным значением с коэффициентом подъемной силы и коэффициентом лобового сопротивления. Эти результаты полезны для нас на практике, поскольку их можно использовать в двигателях с меньшей скоростью ветра. В местной экономике использование местной ветроэнергетики является удобным, доступным и экологически чистым способом при минимальной скорости ветродвигатель сосредоточен на сокращении дефицита электроэнергии, который является одной из ключевых проблем в сельской местности.*

***Ключевые слова:** вращающиеся цилиндры, эффект Магнуса, ветротурбины, коэффициент лобового сопротивления.*

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DRAG FORCE OF A COMBINED WIND TURBINE

A.N. Dyusembaeva<sup>1</sup>, N.K. Tanasheva<sup>2</sup>, A.S. Tussybaeva<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Karaganda Buketov University, Karaganda  
<sup>1</sup>aikabesoba88@mail.ru

***Annotation.** In this paper, the possibilities of using a system of rotating cylinders as part of a wind turbine are considered. The aerodynamic forces in the transverse flow of the cylinder and the two-cylinder system were measured. A method for determining the optimal distance between cylinders during their transverse passage has been developed.*

*We have experimentally determined the conditions under which the Magnus effect contributes to the greatest increase in drag and, accordingly, to an increase in the efficiency of the wind turbine. This can be used to create multi-blade wind turbines of a new generation based on the Magnus effect. The aerodynamic characteristics of cylinders with a diameter of 10 cm, that is, rotational motion, are determined by the maximum value with the coefficient of lift and the coefficient of drag. These results are useful for us in practice, since they can be used in engines with lower wind speeds. In the local economy, the use of local wind power is*

*a convenient, affordable and environmentally friendly way at a minimum speed. The wind turbine is focused on reducing the shortage of electricity, which is one of the key problems in rural areas.*

**Keywords:** *rotating cylinders, Magnus effect, wind turbines, drag coefficient.*

## **Введение**

Перспективы использования ветроэнергетики определяются наличием соответствующих ветроэнергетических ресурсов. Казахстан исключительно богат ветровыми ресурсами. Порядка 50% территории Казахстана имеет среднегодовую скорость ветра 4-5 м/с, а ряд районов имеет скорость ветра 6м/с и более, что предопределяет очень хорошие перспективы для использования этих ресурсов. По оценкам экспертов, Казахстан, одна из стран мира, с наиболее подходящими условиями для развития ветроэнергетики.

Основными преимуществами ветроэнергетики являются: отсутствие загрязнения окружающей среды - производство энергии из ветра не приводит к выбросам вредных веществ в атмосферу или образованию отходов; простое обслуживание, быстрая установка, низкие затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию [1-6].

Но, несмотря на это, в условиях существующего рынка электроэнергии ветроэнергетические ресурсы Казахстана практически не осваиваются. Главной причиной является неконкурентность ветроэнергетики на рынке электроэнергии. Стоимость за электроэнергию от ВЭС с учетом возврата инвестиций может составлять порядка 8-12 тг/кВтч.

Ветрогенераторы с вертикальной осью, работающие по принципу аэродинамического сопротивления, имеют относительно низкий КПД, составляющий от 20 до 30%, но у них есть большое преимущество, заключающееся в том, что они могут работать на полную мощность и производить энергию в районах с низким ветровым потенциалом. Существует несколько способов улучшить коэффициент мощности ветряной турбины этого типа, например, путем создания идеальной формы лопастей или путем выбора оптимального количества ступеней ротора [1].

Авторы работы провели экспериментальные исследования по нахождению наилучшего варианта конструкции, комбинированного ВЭУ с вертикальной осью в дозвуковой аэродинамической трубе при различных значениях скорости ветра. Результаты показывают, что в случае объединения двух турбин (ВЭУ с вертикальной осью вращения и ВЭУ типа Савониус) более высокая производительность получается по сравнению с ВЭУ с вертикальной осью вращения [2].

ВЭУ с вертикальной осью вращения работающие на основе эффекта Магнуса имеют достоинства в виде выработки электрической энергии начиная с 3 м/с [3-6]. В статье [3] описывается управление вихрями на концах цилиндров, создаваемыми ветротурбиной Magnus вертикального

типа. Ветрогенератор состоит из трех круглых цилиндров. Каждый цилиндр вращается вокруг своей собственной вертикальной оси и движется по орбите. Вихри на концах цилиндров приводят к снижению мощности выработки электроэнергии и аэродинамическому шуму. Установлено, что путем добавления защитных пластин, расположенных на обоих концах лопастей цилиндра можно увеличить эффективность работы ВЭУ.

Целью работы является изучения силы лобового сопротивления, а также его коэффициента комбинированного ветродвигателя с вертикальной осью вращения.

**Методика исследования.**

Аэродинамический расчет любого аппарата связан с определением аэродинамических сил и моментов, действующих на него. Только в некоторых частных случаях данная задача может быть решена теоретическим путем, но теоретическая схема явлений в аэродинамике не всегда точно описывает их. Поэтому экспериментальный путь оказывается в большинстве случаев более надежным, но при условии соблюдения условий гидродинамического подобия [4-6].

Для расчета коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  в ходе выполнения работы использовалась следующая формула:

$$C_x = \frac{\Delta F_x}{\rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S} \quad \text{ИЛИ} \quad C_x = \frac{2F_x}{\rho v^2 \cdot S}$$

Исследованы значения силы лобового сопротивления при числах оборотов комбинированных цилиндров 300 об/мин, 500 об/мин и 700 об/мин.

Ниже на рисунке 2 приведена зависимость силы лобового сопротивления вращающихся цилиндров диаметром 4 см, вращающихся в вертикальном направлении, от скорости потока.

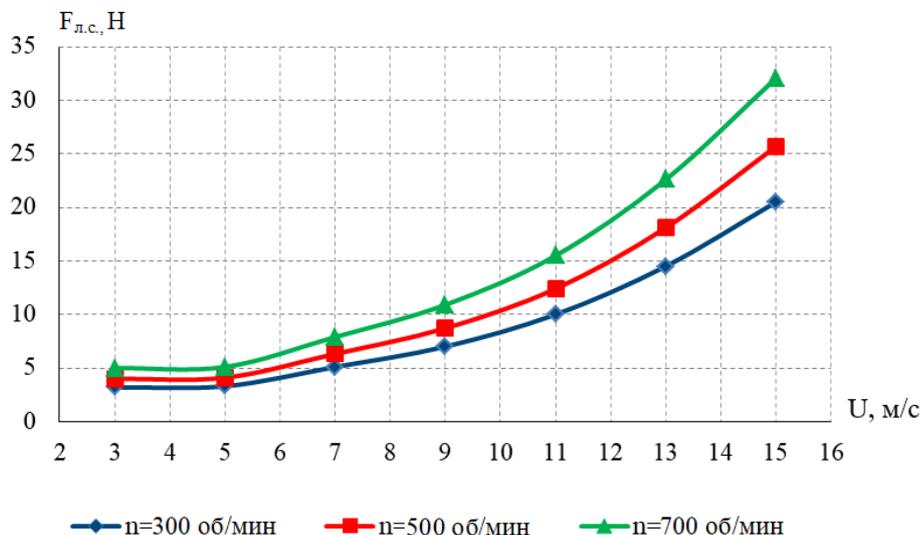


Рис. 1. Зависимость силы лобового сопротивления от скорости потока

Из зависимости видно, что с ростом числа оборотов комбинированных вращающихся цилиндров 300 об/мин, 500 об/мин и 700 об/мин увеличивается сила лобового сопротивления по мере увеличения скорости воздушного потока. Это объясняется тем, что поток, движущийся с определенной скоростью, воздействует на поверхность тела, с напорной силой. Величина этой силы прямо пропорциональна скорости потока, которая растет вместе со скоростью. А сила лобового сопротивления обратно направлена к той же напорной силе. При увеличении скорости потока под действием напорной силы возрастает и сила лобового сопротивления исследуемого ветродвигателя. Поэтому сила лобового сопротивления возрастает при увеличении скорости воздушного потока.

На рис.2 приведена зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса при изменении скорости потока от 3 до 15 м/с. Числа оборотов поворотных цилиндров комбинированного диаметра 4 см, вращающихся в вертикальном направлении, равны 300 об/мин, 500 об/мин и 700 об/мин.

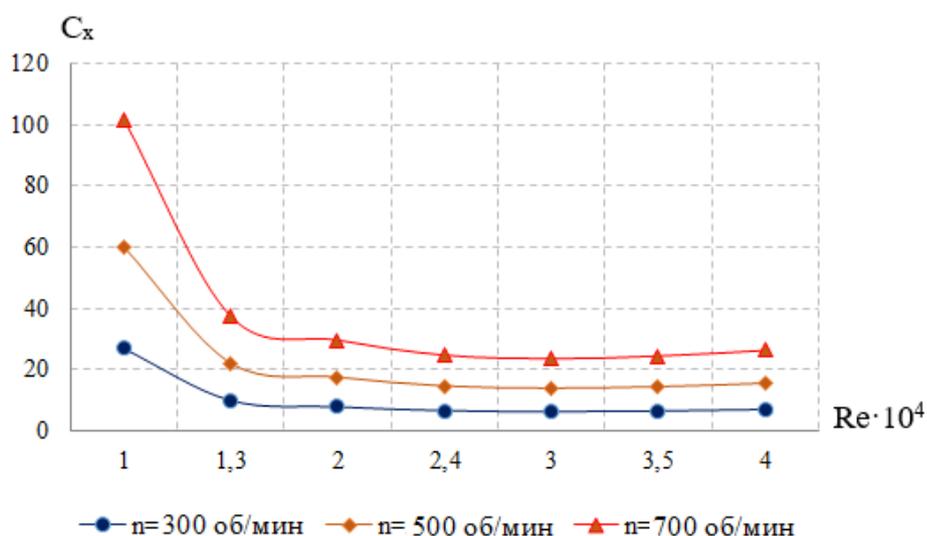


Рис. 2. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса

Из зависимости видно, что по мере увеличения числа Рейнольдса коэффициенты лобового сопротивления уменьшаются. Когда поток воздуха обтекает цилиндр, вихревой поток образуется за пределами цилиндров. Вихревые потоки создают лобовое сопротивление цилиндров. Величина вихревого потока зависит от скорости воздушного потока.

Таким образом, при меньшей скорости потока, т. е. при меньшем числе Рейнольдса ( $1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$ ), увеличение скорости потока интенсивно уменьшает объем вихревого потока в обратном потоке. Наблюдается быстрое снижение коэффициентов лобового сопротивления вращающихся цилиндров. Когда скорость потока большая, т. е. число Рейнольдса  $4 \cdot 10^4$  и выше, за цилиндрами образуется сплошная вихревая зона. На его размер не

влияет увеличение скорости потока. Таким образом, стабилизируется коэффициент лобового сопротивления.

### **Заключение**

При исследовании аэродинамических характеристик ветроэнергетической установки вращающихся цилиндров с вертикальной осью вращения, получены следующие результаты:

- зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса при числах оборотов вращающихся цилиндров 300 об/мин, 500 об/мин и 700 об/мин диаметром 4 см, вращающихся в вертикальном направлении. Результаты получены при изменении скорости потока от 3 до 15 м/с. Установлено, что с ростом числа оборотов вращающихся цилиндров, увеличивается скорость ветра и число Рейнольдса, но коэффициент лобового сопротивления уменьшается.

Это работа была поддержана проектом: ИРН АР14972704.

### **Источники**

[1] Rus L.F, Experimental study on the increase of the efficiency of vertical axis wind turbines by equipping them with wind concentrators. Journal of Sustainable Energy. – 2012. – Vol. 3, No. 1, – P.30-35.

[2] Rassoulinejad-Mousavi S.M., Jamil M., Layeghi M. Experimental Study of a Combined Three-Bucket H-Rotor with Savonius Wind Turbine // World Applied Sciences Journal. 2013. – 28 (2). P.205-211.

[3] Kimura Y., Ogawa Sh. Study on wingtip vortices of vertical axis type Magnus wind turbine // Grand Renewable Energy Proceedings. 2018. – Vol.1. – P.182-187.

[4] Tanasheva, N.K., Chirkova, L.V., Dyusembaeva, A.N., Sadenova, K.K. Aerodynamic Characteristics of a Rotating Cylinder in the Form of a Truncated Cone // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020.– 93(3).–P. 551–555.

[5] Tanasheva N.K., Nusupbekov B.R., Dyusembaeva A.N., Shuyushbayeva N.N. Analysis of aerodynamic characteristics of two parallel rotating cylinders // Technical Physics. 2019.– 64(7). – P. 947–949.

[6] Tanasheva N.K., Bakhtybekova A.R., Shaimerdenova G.S., Sakipova, S.E., Shuyushbaeva N. Modeling aerodynamic characteristics of a wind energy installation with rotating cylinder blades on the basis of the Ansys Suite // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022.– 95(2), –P. 457–463.

[7] L.V. Mikhnenko. Aerodynamic Magnus effect, as a basic principle of some aircraft and wind power devices, MGTUGA. 2008.

[8] N.M. Bychkov. Wind turbine with Magnus: 1. The results of modeling studies, Thermophysics and Aeromechanics, 11, 4, 583-596, 2004.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЗА СЧЕТ УНИФИКАЦИИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

А.Д.Таслимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан,  
<sup>1</sup>ataslimov@mail.ru

***Аннотация.** Рассматриваются и анализируются вопросы, связанные с определением экономически целесообразных значений комплекс параметров (количество и значений сечений кабелей, числа линий отходящие от источника питания) городских распределительных электрических сетей. Основное внимание уделено унификации параметров электрических сетей, что позволило снизить потери электроэнергии.*

***Ключевые слова:** оптимизация, унификация, оптимальный параметр, надёжность, энергоэффективность, плотность нагрузки*

## INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF CITY DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS DUE TO THE UNIFICATION OF THEIR PARAMETERS

A.D.Taslimov

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan,  
<sup>1</sup>ataslimov@mail.ru

***Annotation.** Issues related to the determination of economically feasible values of a set of parameters (the number and values of cable cross-sections, the number of lines extending from the power source) of urban distribution electrical networks are considered and analyzed. The main attention is paid to the unification of the parameters of electrical networks, which made it possible to reduce the loss of electricity.*

***Keywords:** optimization, unification, optimal parameter, reliability, energy efficiency, load density*

### **Введение**

Развитие электропотребления в городах и систем их электроснабжения объясняет необходимость повышенного внимания к принципам оптимального построения распределительных электрических сетей городов, влияние этих принципов на общий подход к построению систем электроснабжения городов [1]. При этом распределительные электрические сети (РЭС) в городах составляют существенную часть общей системы электроснабжения городов. Высокие темпы развития РЭС обусловлены ростом электрических нагрузок и появлением новых потребителей электроэнергии, определяют значительные затраты финансовых и материальных ресурсов на их строительство и эксплуатацию. При этом не менее 2/3 затрат по РЭС расходуется на РЭС

до 1000 В и среднего класса напряжения (6-10 кВ). Как показывают проектные разработки [11], эти затраты и в перспективе останутся весьма высокими и поэтому проблема экономически целесообразного построения этих сетей представляется весьма актуальной. В этих условиях особенно важным становится комплексный подход к планированию оптимального развития и проектированию РЭС, учитывающей, с одной стороны, требования комплексного и полного решения задач проектирования и выбора совокупности параметров РЭС, а с другой стороны возможность типизации и унификации сооружаемых линий. Такой подход к построению указанных сетей необходим еще потому, что современная система электроснабжения (в том числе, РЭС до 1000В и среднего напряжения 6-10 кВ) характеризуется разнообразными потребителями, большим числом взаимосвязанных элементов и большим количеством одновременно сооружаемых объектов.

Необходимость комплексной оптимизации параметров распределительных сетей (РЭС) определяется тем, что все параметры функционально и технико-экономически взаимосвязаны между собой режимами передачи и распределения электроэнергии и технико-экономическая модель должна отразить данные связи. Анализ только одного параметра РЭС является односторонним и может представлять интерес лишь в специальных случаях [2,3,4].

Отечественными научными, проектно-исследовательскими и другими организациями и отдельными авторами [11] выполнен ряд исследований по оптимизации и унификации параметров электрических сетей. Отметим, что в большей части исследований рассматривается оптимизация и унификация сечений проводов (совместно с унификацией опор или без последних) и кабелей. При этом в [11] наиболее полно сформулированы современные теоретические проблемы оптимизационных решений в электроэнергетики, что полностью применимо и к задачам оптимизации и унификации параметров электрических сетей

Проведена оптимизация и унификация сечений кабелей электросетей промышленных предприятий, а также применяемых мощностей трансформаторов 10(6)/0,38 кВ городских электрических сетей [2,3]. Осуществлен наиболее полный анализ оптимизации и унификации сечений проводов воздушных линий систем электроснабжения сельского хозяйства [5,6,7].

В публикациях [8-10] приводятся конкретные материалы о глубокой унификации параметров городских РЭС, применяемой за рубежом.

В практике проектирования и строительства электрических сетей 0,38-10(6) кВ в некоторых крупнейших отечественных городах и на промышленных предприятиях также применяются принципы оптимизации и унификации мощностей трансформаторной подстанций 10(6)/0,38 кВ и сечение кабельных линий 10 кВ. Представляется, что эти и аналогичные

практические решения приняты на основе большого опыта проектирования и эксплуатации или при варианте проектировании данных электросетей.

Вместе с тем отмечается отсутствие разработок и рекомендаций оптимизации и унификации комплекс параметров на основе научно-технической методики. Ниже излагается структура предлагаемой автором методики, и даются первые результаты полученных таким образом рекомендаций для городских электрических сетей 0,38-10 кВ.

### Основная часть

Оптимизация комплекс параметров РЭС и учет ограничений требует для решения поставленной задачи применения метода математического программирования. Таким методом является метод критериального анализа или программирования [11], позволяющий решить комплекс задач оптимизации. Здесь анализ параметров РЭС выполняется в виде оптимизации комплекс параметров, сходя из глобального минимума технико-экономической функции. Применение этого метода дает возможность выявить оптимальные параметры сети, не прибегая к вариантному расчету. Кроме того, данный метод позволяет осуществить многопараметрическую оптимизацию с учетом комплекса ограничений, для чего в работе используется программа оптимизации нелинейных функций с нелинейными ограничениями методом критериального программирования [11].

В тоже время, базируясь на определенных допущениях можно математически описать технико-экономическую модель сети, что дает возможность решения задачи в общем виде на основе идеализированных построений. При формировании технико-экономической модели используются топологическая модель участков сетей, питающихся от трансформаторной подстанций (ТП), и ряды сечений кабелей, построенные с постоянным шагом по принципу геометрической прогрессии. При формировании моделей принимались традиционные допущения о неизменной плотности электрической нагрузки по площади жилого района, одинаковых сечений головных участков линий, отходящих от ТП [12].

Учитывая вышеизложенное и с учетом технико-экономических моделей суммарных капитальных затрат, затрат на эксплуатацию и потерь электроэнергии получена комплексная технико-экономическая модель затрат на РЭС до 1000 В в пределах одной ТП [12]:

$$Z_H = Z'_{H(1)} \cdot \sigma^{-0,75} \cdot S_{TH(y)}^{0,75} \cdot M_H^{0,5} + Z'_{H(2)} \cdot \sigma^{-0,19} S_{TH(y)}^{0,19} \cdot M_H^{1,06} \cdot F_{2,H} + Z'_{H(3)} \sigma^{-1,38} S_{TH(y)}^{1,38} \cdot M_H^{-0,13} \cdot F_{2,H} \cdot N_{F,H}^{-1} + Z'_{H(3)} \sigma^{-1,38} S_{TH(y)}^{1,38} \cdot M_H^{-1,21} \cdot F_{2,H}^{-1} \cdot N_{F,H}^{0,3} \quad (1)$$

где  $S_{TH(y)}$  – установленная мощность ТП;  $\sigma$  – плотность электрической нагрузки;  $M_H$  – число линий отходящих от ТП;  $F_{2,H}$  – сечение головного участка линий до 1000В;  $N_{F,H}$  – количество

применяемых сечений кабелей до 1000В;  $Z'_{H(1)}$ ,  $Z'_{H(2)}$ ,  $Z'_{H(3)}$ ,  $Z'_{H(4)}$  – обобщенные коэффициенты, которые определяются по формулам:

$$\begin{aligned} Z'_{H(1)} &= a_H K_{H1} + I_{H1}; & Z'_{H(2)} &= a_H K_{H2} + I_{H2}; \\ Z'_{H(3)} &= a_H K_{H3} + I_{H3}; & Z'_{H(4)} &= C_{y0} \Delta \mathcal{E}_{H1}. \end{aligned}$$

здесь,  $a_n$  - нормативный коэффициент эффективности использования капитальных затрат;  $C_{y0}$  – удельные затраты на потери электроэнергии;  $K_{ni}$ ,  $I_{ni}$  и  $\Delta \mathcal{E}_{H1}$  – соответственно, составляющие суммарных капитальных затрат, затрат на эксплуатацию и потерь электроэнергии РЭС до 1000В, которые являются исходными данными в данной задаче.

Так как, полученная модель является канонической и матрица размерностей функции (1) имеет небольшой порядок, то решение основных задач технико-экономического анализа (в частности, оптимизации сечений кабелей) осуществляется с помощью классического аппарата метода критериального анализа [11].

С помощью метода критериального анализа произведена оптимизация модели (1) и получены формулы, позволяющие определять экономические значения оптимизируемых параметров и затрат для РЭС до 1000 В [12]:

$$\begin{aligned} N_{F,H}^{\mathcal{E}} &= \left(\frac{\pi_{1\mathcal{E}}}{Z'_{H(1)}}\right)^{-1,58} \left(\frac{\pi_{2\mathcal{E}}}{Z'_{H(2)}}\right)^{1,553} \left(\frac{\pi_{3\mathcal{E}}}{Z'_{H(3)}}\right)^{-0,763} \left(\frac{\pi_{4\mathcal{E}}}{Z'_{H(4)}}\right)^{0,79} \\ F_{2,H}^{\mathcal{E}} &= \left(\frac{\pi_{1\mathcal{E}}}{Z'_{H(1)}}\right)^{-1,743} \left(\frac{\pi_{2\mathcal{E}}}{Z'_{H(2)}}\right)^{1,261} \left(\frac{\pi_{3\mathcal{E}}}{Z'_{H(3)}}\right)^{0,112} \left(\frac{\pi_{4\mathcal{E}}}{Z'_{H(4)}}\right)^{0,372} \\ M_H^{\mathcal{E}} &= \left(\frac{\pi_{1\mathcal{E}}}{Z'_{H(1)}}\right)^{1,327} \left(\frac{\pi_{2\mathcal{E}}}{Z'_{H(2)}}\right)^{-0,455} \left(\frac{\pi_{3\mathcal{E}}}{Z'_{H(3)}}\right)^{0,2} \left(\frac{\pi_{4\mathcal{E}}}{Z'_{H(4)}}\right)^{-0,664} \\ Z_H^{\mathcal{E}} &= \left(\frac{\pi_{1\mathcal{E}}}{Z'_{H(1)}}\right)^{-0,336} \left(\frac{\pi_{2\mathcal{E}}}{Z'_{H(2)}}\right)^{-0,232} \left(\frac{\pi_{3\mathcal{E}}}{Z'_{H(3)}}\right)^{-0,1} \left(\frac{\pi_{4\mathcal{E}}}{Z'_{H(4)}}\right)^{-0,332} \end{aligned}$$

где  $\pi_{1\mathcal{E}}$ ,  $\pi_{2\mathcal{E}}$ ,  $\pi_{3\mathcal{E}}$ ,  $\pi_{4\mathcal{E}}$  – критерии подобия экономических вариантов. Для модели (1) значения критериев подобия составляют [11]:

$$\pi_{1\mathcal{E}} = 0,336; \quad \pi_{2\mathcal{E}} = 0,232; \quad \pi_{3\mathcal{E}} = 0,1; \quad \pi_{4\mathcal{E}} = 0,332.$$

С учетом полученных значений критериев подобия экономические значения оптимизируемых параметров и затрат для РЭС до 1000В после некоторого преобразования принимают вид:

$$N_{F,H}^{\mathcal{E}} = 1.405 \frac{3_{H(1)}^{1,58} \cdot 3_{H(2)}^{0,763}}{3_{H(3)}^{1,553} \cdot 3_{H(4)}^{0,79}} \sigma^{-1,58}, \quad (2)$$

$$F_{2,H}^{\mathcal{E}} = 0.544 \frac{3_{H(1)}^{1,743}}{3_{H(2)}^{1,261} \cdot 3_{H(3)}^{0,112} \cdot 3_{H(4)}^{0,372}} \sigma^{-0,741}, \quad (3)$$

$$M_H^{\mathcal{E}} = 1.529 \frac{3_{H(2)}^{0,465} \cdot 3_{H(3)}^{0,2} \cdot 3_{H(4)}^{0,664}}{3_{H(1)}^{1,327}} S_{ТП(V)} \sigma^{0,324}, \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_H^{\mathcal{E}} = 3,676 \cdot 3_{H(1)}^{0,336} \cdot 3_{H(2)}^{0,232} \cdot 3_{H(3)}^{0,1} \cdot 3_{H(4)}^{0,332} \cdot S_{ТП(V)} \cdot \sigma^{-0,587}, \quad (5)$$

Выражения (2)–(5) позволяют при известных исходных данных определять экономические значения основных параметров и затрат РЭС до 1000В.

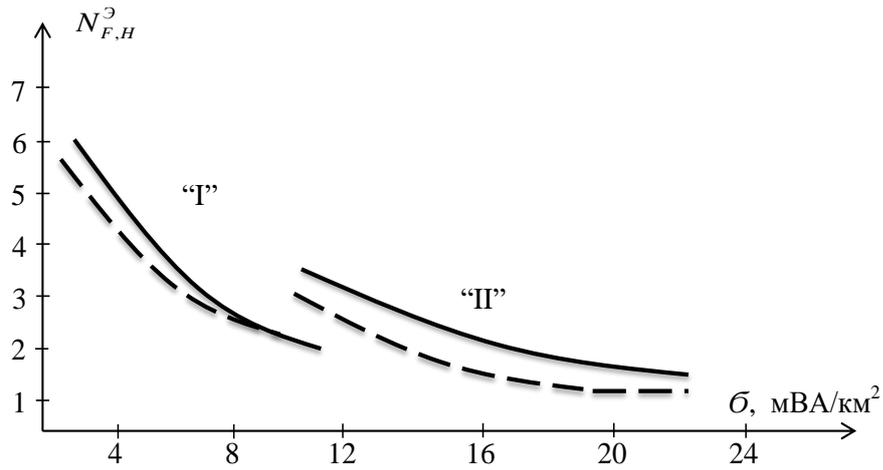
При принятых исходных данных [11] определенные по (2)–(4) экономические значения параметров  $N_{F,H}$ ,  $F_{2,H}$ ,  $M_H$  в зависимости от плотности электрической нагрузки показаны на рис. 1а,б,в, на которых зависимости: «I» – при петлевых схемах сетей с одно трансформаторными ТП (1х630 кВА), «II» – при двухлучевых схемах сетей с двух трансформаторными ТП (2х630 кВА).

Анализ полученных результатов приводит к выводу о том, что включение в состав оптимизируемых параметров количества применяемых сечений кабелей ( $N_{F,H}$ ) изменить выводы об экономической целесообразности построения распределительных сетей до 1000В с единым сечением кабелей при вариации плотности электрической нагрузки в весьма широком диапазоне.

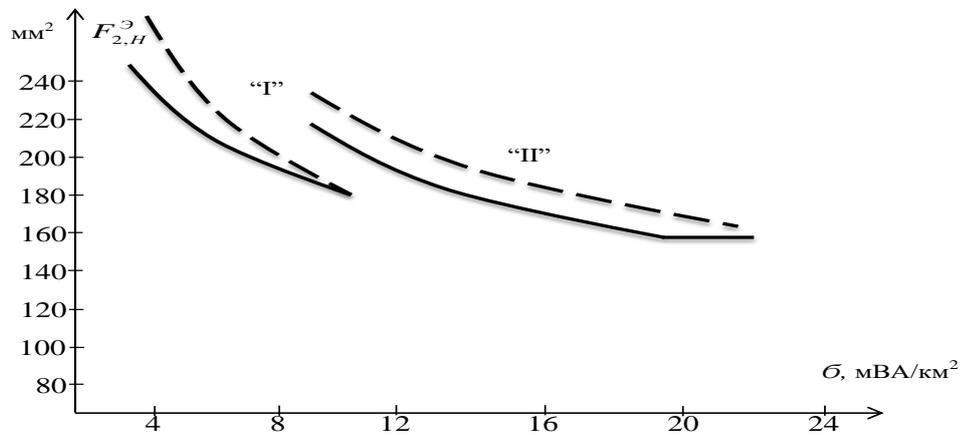
Оказывается, что построение распределительных сетей до 1000В, при больших плотностях электрической нагрузки ( $\sigma \geq 10$  мВА/км<sup>2</sup>) действительно экономически целесообразно с предельно-ограниченным количеством сечений кабелей, но при небольших плотностях нагрузки ( $\sigma < 10$  мВА/км<sup>2</sup>) целесообразно использовать 2–4 сечения кабелей. При этом РЭС до 1000В выполняются с различными значениями экономически целесообразного числа отходящих линий  $M_H$  (рис. 1в).

Полученные экономические параметры РЭС до 1000В могут не удовлетворять основным техническим ограничениям выполнения РЭС. Для РЭС до 1000В такими являются ограничения по нагреву и по допустимой потере напряжения.

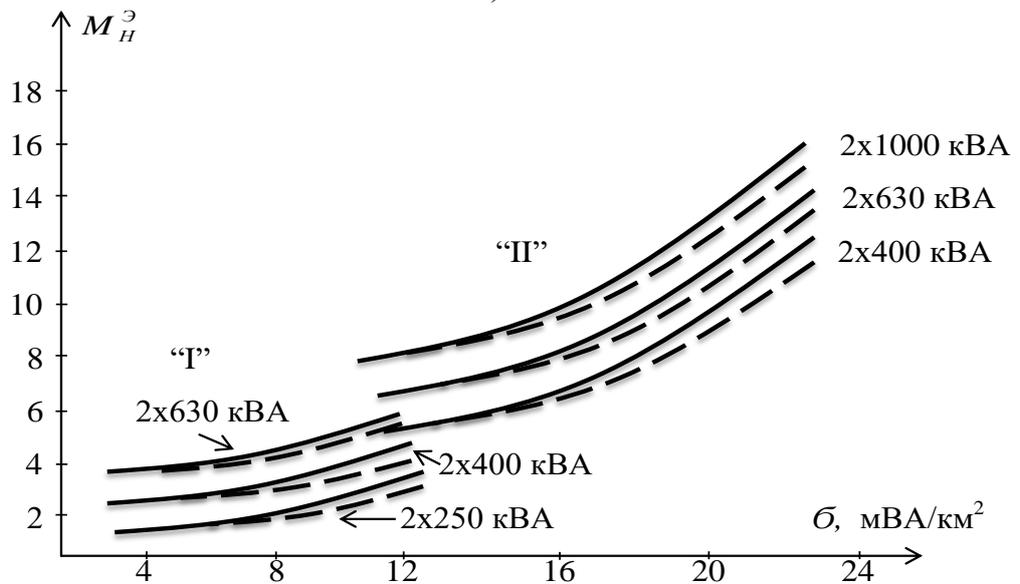
При больших плотностях электрической нагрузки ( $\sigma > 10$  мВА/км<sup>2</sup>) экономические значения количества применяемых сечений кабелей до 1000В могут оказаться меньше единицы, что не имеет смысла. Поэтому, кроме технических ограничений, дополнительно рассматривается ограничение  $N_{F,H} \geq 1$ .



а)



б)



в)

Рис. 1. Значения количества сечений(а), сечения головных участков(б) и числа отходящих от ТП линий(в) РЭС до 1000 В (--- без учета ограничений, — с учетом ограничений)

Для решения приведенных систем уравнений (1) с учетом ограничений использована специальная программа, разработанная для решения задач оптимизации нелинейной целевой функции с нелинейными ограничениями методом критериального программирования [5].

Влияние тех или иных активных ограничений на экономические значения параметров  $N_{F,H}$ ,  $F_{2,H}$  и  $M_H$  показаны на рис. 1а,б,в. Как видно из рис. 1а,б,в. в данной задаче ограничение по нагреву кабелей РЭС до 1000В практически во всех рассматриваемых случаях активно, а ограничение по допустимой потере напряжения в РЭС до 1000В активно при небольших плотностях электрической нагрузки ( $\sigma < 10$  мВА/км<sup>2</sup>). Для петлевых схем сетей, при небольших плотностях нагрузки, условие допустимости потери напряжения является более сильным, чем условие ограничения по нагреву кабелей. При этом экономические значения  $F_{2,H}$  близки к значениям, допустимым по нагреву кабелей. Дополнительное ограничение активно при больших плотностях нагрузки ( $\sigma > 12$  мВА/км<sup>2</sup>).

При этом, условия выполняются не за счет увеличения  $F_{2,H}$ , как это принято в практическом проектировании (увеличение сечения при недопустимости нагрева), а за счет увеличения числа отходящих от ТП линий ( $M_H$ ). При этом значение  $F_{2,H}$  несколько снижается по сравнению со значением, полученным без учета ограничения по нагреву. Это в свою очередь приводит к уменьшению значения  $N_{F,H}$ , особенно это заметно при небольших плотностях нагрузки  $\sigma < 10$  мВА/км<sup>2</sup> (рис. 1а,б,в.).

### **Заключение**

Построение РЭС при плотности электрической нагрузки  $\sigma \geq 10$  мВА/км<sup>2</sup> экономически целесообразно с единым (унифицированным) сечением кабелей. При этом рекомендуется применять в РЭС до 1000В сечение 120 мм<sup>2</sup>. А при плотностях нагрузки  $\sigma < 10$  мВА/км<sup>2</sup> оптимальным является применение 2–3 сечений кабелей. В этом случае, рекомендуется в зависимости от плотности электрической нагрузки применять сечение головного участка линий до 1000В - 185, 150 и 120 мм<sup>2</sup>, а сечения последующих участков – по шкале стандартных сечений с соотношением смежных сечений 1,8–2,0. Оптимизация параметров показывает, что построение РЭС до 1000В при больших плотностях нагрузки экономически целесообразно с ограниченным числом сечений, а при небольших плотностях нагрузки с менее жесткими ограничениями числа применяемых сечений.

Для проверки достоверности результатов теоретического изучения и полученных количественных рекомендаций были выполнены контрольные расчеты капиталовложений, затрат, потерь электроэнергии и расхода проводникового металла при унификации сечений кабелей электросетей 0,38 и 10 кВ двух реальных районов новой многоэтажной застройки (9, 12 этажей и более) столичного города. Указанные характеристики сопоставлялись с аналогичными на основе реального проекта электросетей 0,38–10 кВ данного района, выполненного авторитетным проектным

институтом (АО «Узэнергоинжиниринг»). Результаты сравнения показали, что сокращение количества применяемых сечений кабелей до одного-двух вместо выбранных в проекте шести-семи приводит к повышению затрат по линиям в пределах 2–4 %, а суммарных затрат по РЭС в целом – в пределах 1–2 %. Такая унификация сечений кабелей приводит к снижению потерь электроэнергии на 15–25% при одновременном увеличении расхода проводникового металла на 5–7%.

### Источники

[1] Катренко Г.Н. Новые подходы к построению распределительных электрических сетей 0,4-35кВ // «Электрические сети и системы», 2013, № 5, с. 25–29.

[2] Мирон Гринкруг, Гордин С. Оптимизация параметров городских электрических сетей. // «LAP Lambert Academic Publishing», 2012, 112 с.

[3] Ершов М.С., Макерова Ю.А. К вопросу о выборе оптимального сечения кабельных линий // Промышленная энергетика, 2012, № 9, с.24–28.

[4] Малкин П.А. Критерий экономической эффективности для выбора объектов основной электрической сети // Энергетик, 2003, №1, с. 14–16.

[5] Березнев Ю. И. Выбор сечений проводов линий 0,38 и 10кВ в условиях неопределённости и проблема унификации их шкалы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики: научно-технический и производственный журнал, 2009, № 9/10, с. 38–40.

[6] Лещинская Т.Б. Оптимизация параметров систем электроснабжения по многокритериальной модели / Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Всерос. научн. исслед. инс-т электрификации сельского хоз-ва. Москва. 2010, ч.1, с. 217–223.

[7] Романченко В.И. Экономическая эффективность унификации воздушных линий электропередачи. // «Светотехника и электротехника», 2008, №1, с. 62–64.

[8] Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (Применительно к задачам электроэнергетики). М.: Изд-во «Либроком», 2014, 440 с.

[9] Критериальный метод анализа технико-экономических задач в электрических сетях и системах: учебное пособие // Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина. Харьков: Факт, 2014, 88 с.

[10] Проблемы электроснабжения крупных городов и мегаполисов: [ruscable.ru/article/Problemy\\_](http://ruscable.ru/article/Problemy_). Прогноз потребления электроэнергии до 2030 года. [coolreferat.com/Прогноз](http://coolreferat.com/Прогноз)

[11] А. Д. Таслимов. Унификация параметров городских распределительных электрических сетей в условиях неопределенности: Монография. – Ташкент: ТашГТУ, 2019, 148 с.

[12] Таслимов А.Д., Товбаев А.Н., Хужанов Б.К. Комплексная технико-экономическая модель унификации сечений кабелей электрических сетей/«Горный вестник Узбекистана», 2013, №53, с.122–124

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЭП КАЗАХСТАНА

Трофимов Г. Г., Тохтибакиев К. К., Саухимов А.А., Гунин А.М.  
НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева»  
*depenergy@mail.ru, k.tokhtibakiev@aes.kz, a.saukhimov@aes.kz, a.gunin@aes.kz*

***Аннотация.** Установка продольной компенсации (УПК) способна существенно увеличить пропускную способность ЛЭП, заметно сокращает взаимный угол между напряжениями на шинах отправной и приемной частей системы, повышая уровень устойчивости. В статье проведен обзор и анализ существующих в настоящее время УПК.*

***Ключевые слова:** Режимная надежность, повышение пропускной способности, устройства продольной компенсации*

## APPLICATION OF SERIES COMPENSATION TO INCREASE THE TRANSMISSION CAPACITY OF KAZAKHSTAN POWER LINES

Trofimov G.G., Tokhtibakiev K.K., Saukhimov A.A., Gunin A.M.  
Non-profit JSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications  
named after Gumarbek Daukeev»  
*depenergy@mail.ru, k.tokhtibakiev@aes.kz, a.saukhimov@aes.kz, a.gunin@aes.kz*

***Abstract.** Series compensation unit can significantly increase the transmission capacity of power lines, noticeably reducing the mutual angle between the voltages on the buses of the sending and receiving parts of the system, increasing the level of stability. The article reviews and analyzes the currently existing series compensation units.*

***Key words:** regime reliability, increase of transmission capacity, series compensation devices.*

### **Введение**

В последние годы спрос на электроэнергию в мире значительно увеличился, в то время как возможность расширения производства и передачи электроэнергии стало сильно ограниченным из-за ограниченных ресурсов и экологических ограничений. Передача электроэнергии в сетях всегда может быть улучшена путем модернизации или добавления новых цепей передачи. Однако, ограничения на возможности передачи электроэнергии в сети не всегда могут быть устранены путем добавления новых мощностей по передаче и/или генерации. Это может оказаться практически невыполнимым или нежелательным в реальном случае, так как на практике этот путь оказывается слишком дорогостоящим и трудоемким ввиду труднодоступности или вообще невозможности реализации. Кроме того, аспекты воздействия ЛЭП на окружающую среду сегодня стали значительно более важнее, чем раньше, и их необходимо учитывать в процессе развития передачи электроэнергии. Кроме того,

финансовые затраты на строительство новой ЛЭП в этих условиях значительной степени сдерживают желания, а порой и вообще оказываются невозможными.

Подобная ситуация сложилась и в Казахстане. Так за 2021 г. в стране значительно выросло потребление электроэнергии. Рост превысил 6%, что в 3 раза больше показателей последних лет. Для сравнения, в 2020 году прирост потребления электроэнергии составлял 2%, в 2019 году – 1,9%.

### 1. Актуальность проблемы

В ОЭС ЦА в течении многих лет наблюдается значительный дефицит мощности. Северная и Южная зона связаны между собой трёхцепным транзитом 500 кВ протяжённостью 1500 км с недостаточной пропускной способностью. ЛЭП транзита уже полностью загружены, и они не в состоянии передать большую мощность, чтобы покрыть потребности южного региона. Применение устройств продольной компенсации (УПК) позволит увеличить предел передаваемой мощности по транзитным ЛЭП и решить проблему дефицита мощности на Юге Казахстана [1].

### 2. Повышение пропускной способности ЛЭП за счет УПК

Передаваемая мощность по ЛЭП для простейшей системы (Рисунок 1) определяется как

$$P_{np} = \frac{EU_c}{X_r + X_T + X_l} \sin \delta, \quad (1)$$

где  $E$  — ЭДС генераторов;

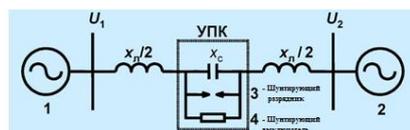
$U_c$  — напряжение на шинах системы;

$U_1, U_2$  — напряжение по концам линии;

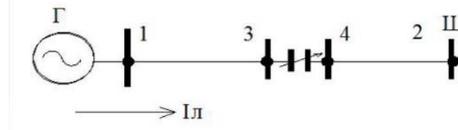
$\delta$  — угол сдвига между векторами  $E$  и  $U_c$  в начале и конце линии;

$X_r, X_T, X_l$  — соответственно сопротивления генератора, трансформаторов и линии.

Из выражения (1) видно, что увеличение передаваемой мощности по ЛЭП может быть достигнуто за счет уменьшения сопротивления. Этот способ может быть реализован за счет продольной компенсации (ПК) (Рисунок 1), путем установки конденсаторов в рассечку линии, что уменьшает сопротивление ЛЭП. ПК позволяют размещать компенсирующие устройства вначале, в середине или в конце ЛЭП.



а) нерегулируемая ПК



б) регулируемая ПК

Рис. 1. Схема подключения ПК к ЛЭП

В нормальном режиме пропускная способность ЛЭП без

использования УПК равна

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{\Sigma X_L} = \frac{U_1 \cdot U_2}{\omega L} \sin \delta, \quad (2)$$

где  $\delta$  - угол сдвига между  $U_1$  и  $U_2$ .

Из выражения (2), понятно, что суммарное реактивное сопротивление самой линии  $X_L$ , обусловленное ее индуктивностью, снижает пропускную способность ЛЭП. Это проблема исключительно важна для магистральных ЛЭП, так как индуктивное сопротивление линии всегда повышается с увеличением ее длины. А для магистральных ЛЭП, по которым электроэнергия передается на большое расстояние реактивное сопротивление значительно снижает предел передаваемой мощности. Кроме того, видно, что применения ПК наоборот приводит к увеличению предела передаваемой мощности по линии. УПК представляют собой батареи конденсаторов, включаемые последовательно в ЛЭПи для компенсации части продольного индуктивного сопротивления. Поэтому УПК иногда называют как устройство последовательной компенсации. В энергосистемах многих стран мира они уже давно является предпочтительным решением, когда необходимо оптимизировать обширные коридоры передачи электроэнергии. Причем, чем степень компенсации  $K$  будет выше, тем больше станет предел передаваемой мощности.

Максимальное значение передаваемой по линии мощности (предел передаваемой мощности по углу) имеет место при  $\delta = 90^\circ$ , т.е. когда  $\sin \delta = 1$ , тогда

$$P_{max} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что индуктивное сопротивление  $X_L$  уменьшает пропускную способность.

ЛЭП напряжением до 110 кВ обычно не слишком длинны и поэтому передаваемая по ним мощность не достигает предела передаваемой мощности. А для ЛЭП 220 кВ и выше передаваемая по ним мощность во многих случаях достигает предела пропускной способности. Поэтому для длинных ЛЭПи напряжением 220 кВ и выше, включенные ПК уменьшает реактивное сопротивление ЛЭП. Уменьшение реактивного сопротивления ЛЭП может быть достигнуто путем последовательного (в разрез) включения в линию статических конденсаторов.

При последовательном подключении конденсатора с емкостным сопротивлением  $X_C = 1/\omega C_{БК}$  в ЛЭП общее реактивное сопротивление линии изменится и станет равным  $X_L - X_C$ . Тогда передаваемая мощность равна

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L - X_C} = \frac{U_1 \cdot U_2}{\omega L - 1/\omega C_{БК}} \sin \delta. \quad (4)$$

Из выражения видно, что при включении в линию УПК реактивное сопротивление компенсированной линии уменьшится ( $X_L - X_C$ ) и за счет этого увеличится передаваемая мощность (предполагая, что величины напряжения и углы остаются постоянными). Вместе с тем, видно, что, изменяя величину емкостного сопротивления ПК, можно изменять предел передаваемой мощности. С целью реализации этого положения в энергетике началось развитие управляемых устройств ПК.

Если учесть, что коэффициент  $K$ , называемый коэффициентом компенсации или степенью компенсации, равен отношению емкостного сопротивления батарей конденсаторов  $X_C$  к индуктивному сопротивлению линии  $X_L$

$$K = X_C / X_L, \quad (5)$$

и полагая, что ( $U_1 \approx U_2 \approx U$ ), получим что мощность компенсированной линии с регулируемой степенью компенсации будет равна:

$$P_k = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L - X_C} \sin \delta \approx \frac{U^2}{X_L(1 - K)} \sin \delta. \quad (6)$$

С учетом степени компенсации равна  $K$ , предел передаваемой мощности по линии равен

$$P_{np} = \frac{U^2}{X_L(1 - K)} \sin \delta. \quad (7)$$

Реактивная мощность, вводимая конденсатором, зависит от  $K$  [2]:

$$Q = 2 \frac{U^2}{X_L} \frac{K}{(1 - K)^2} (1 - \cos \delta). \quad (8)$$

Можно считать, что за счет ПК сократилась длина ЛЭП. Поэтому для такой «новой» виртуальной ЛЭП компенсированной за счет последовательного включения в нее конденсаторов, степень компенсации, выраженная в долях единицы или в процентах, показывает насколько сократилась ее длина относительно длины некомпенсированной линии. Таким образом УПК за счет компенсации части индуктивного сопротивления ЛЭП сокращают электрическую длину линии, делая линию короче, что увеличивает пропускную способности ЛЭП. Это также говорит об увеличении угловой устойчивости передачи или повышении возможности передачи дополнительной мощности по этой линии. Этот эффективный способ снижения реактивного сопротивления не только повышает устойчивость энергетической системы, но и обеспечивает во

многих случаях возможность достижения предела пропускной способности по углу.

Следовательно, увеличение пропускной способности ЛЭП зависит от степени компенсации  $K$ . Для большинства компенсированных ЛЭП значение  $K$  находится в диапазоне от 0,4 до 0,7.

УПК обеспечивает компенсацию падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии, а выполнение этой функции наиболее эффективно в высокодобротных электрических сетях с отношением индуктивного сопротивления линии к активному сопротивлению более 15-20, т.е. в электрических сетях напряжением выше 220 кВ. Поэтому включение емкостного реактивного сопротивления последовательно с длиной (обычно более 200 км) ЛЭП уменьшает как угловое отклонение, так и падение напряжения. В результате повышается передаваемая мощность и устойчивость. Конденсаторные батареи, включенные последовательно в рассечку линий (см. Рис. 1) осуществляют емкостную компенсацию индуктивного сопротивления ЛЭП. При индуктивном характере цепи  $X_L > X_C$ , ток отстает от напряжения.

Введение емкостного реактивного сопротивления в линию за счет применения продольной компенсации можно добиться уменьшения угла сдвига  $\varphi$  напряжений начала и конца на ЛЭП без изменения передаваемой мощности по ЛЭП. Более низкое значение  $\varphi$  обеспечит лучшую стабильность системы, т. е. увеличит угловую устойчивость ЛЭП. Следовательно, при одинаковой величине передачи мощности компенсированная линия будет обеспечивать лучшую устойчивость ЛЭП по сравнению с некомпенсированной линией. Кроме того, активные потери, связанные с передачей электроэнергии, также могут быть уменьшены.

Изменение передаваемой мощности за счет компенсации относительно нормального режима составит

$$\frac{P_k}{P} = \frac{X_L}{X_L - X_C} = \frac{1}{1 - \frac{X_C}{X_L}} = \frac{1}{1-K}. \quad (10)$$

Предположим, что значение степени компенсации  $K$  равно 0,5. Тогда

$$\frac{P_k}{P} = \frac{1}{1-0,5} = 2. \quad (11)$$

Отсюда ясно, что передаваемая мощность по ЛЭП за счет установки конденсаторов ПК увеличилась в 2 раза, поэтому можно по той же ЛЭП передавать примерно на 50% больше мощности чем было возможно до их установки. В зависимости от числа подключенных статических конденсаторов и их емкости может быть компенсировано часть индуктивного сопротивления ЛЭП, что уменьшает длину ЛЭП. В [3] для простейшей схемы радиальной электропередачи с УПК был рассчитан

предел передаваемой мощности компенсированной линии ВЛ в которой емкость, включена в рассечку линии, а суммарное сопротивление линии  $X_r + X_r + X_c = X_L = 0,8 \text{ o.e.}$  Из результатов этого исследований, описанных в работе [3], видно, что увеличение степени компенсации  $K$  приводит к возрастанию предела передаваемой мощности по линии (Рис. 2), где приведены угловые характеристики  $P_{np} = f(\delta)$  электропередачи для трех степеней компенсации  $K$ : 1 – степень компенсации 75% ( $x_c = 0,6$ ); 2 – 50% ( $x_c = 0,4$ ); 3 – 25% ( $x_c = 0,2$ ).

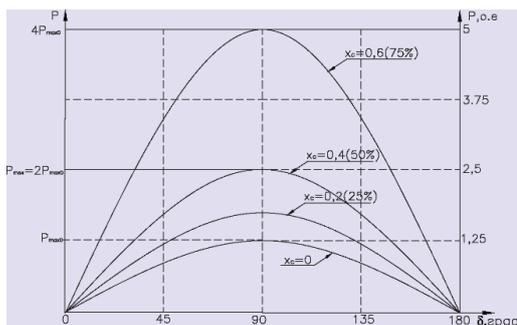


Рис. 2. Зависимость предела передаваемой мощности по ЛЭП от степени компенсации.

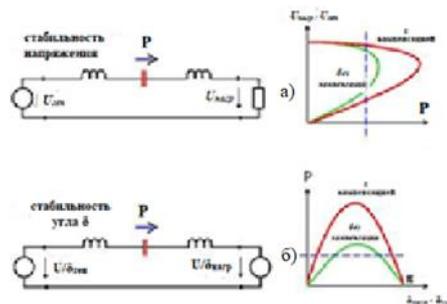


Рис.3. Влияние ПК ЛЭП на:

а) напряжение и б) угловую стабильность.

Этот рисунок наглядно демонстрирует, что «пассивный» элемент сети - УПК является очень эффективным средством повышения предела передаваемой мощности в высоковольтных дальних линиях электропередачи. Таким образом, за счет УПК большая мощность может передаваться по линии. Через конденсаторные батареи проходит полный ток линии.

Кроме того, УПК используются также и для того, чтобы повысить не только статическую, но и динамическую устойчивость за счет поддержания напряжения вовремя и после больших возмущений в энергосистеме. А также УПК оказываются способными повышать динамическую и статическую устойчивость и послеаварийного режима системы передачи, так как их включение в послеаварийном режиме уменьшает относительное эквивалентное реактивное сопротивление ЛЭП.

Влияние последовательной компенсации на передачу электроэнергии по ЛЭП можно проиллюстрировать, как показано на Рис. 3. [3].

Здесь же следует отметить влияние реактивной мощности, генерируемой конденсаторами за счет емкостного элемента, включенного последовательно с линией. Анализ показывает, что реактивная мощность, генерируемая конденсаторами, включенными последовательно с линией, улучшает реактивный баланс мощности в энергосистеме, что необходимо при работе ВИЭ в системе. Генерируемая конденсаторами УПК реактивная мощность мгновенно увеличивается при возрастании линейной нагрузки и наоборот также мгновенно уменьшается при снижении тока нагрузки. Следовательно, ток проходящий через ЛЭП сам, напрямую «управляет» отдаваемой реактивной мощностью продольно установленных

конденсаторов. Таким образом реактивная мощность УПК становится «саморегулирующейся», а эффект саморегулирования ЛЭП оказывает положительное действие на энергетическую систему, так как за счет него стабилизируется напряжение в сети. Этот простой принцип позволяет считать ПК чрезвычайно экономичным решением. Отметим, что потеря активной мощности в последовательно включенных конденсаторах очень малы (0,0025–0,005 кВт/квар). Стоимость устройств ёмкостной компенсации составляет порядка 10 % от стоимости новой ЛЭП, имеющей эквивалентную пропускную способность. Срок окупаемости составляет всего несколько лет, что так же подтверждает их эффективность.

Вместе с тем, конденсаторные батареи в составе УПК помимо того, что они обеспечивают саморегулирование реактивной мощности в сет, они также способствуют улучшению баланса реактивной мощности за счет возрастания генерации реактивной мощности при увеличении передаваемой мощности и наоборот уменьшению генерации при снижении нагрузки. Таким образом конденсаторная батарея в составе УПК улучшает регулирование и стабилизируют уровни напряжения в сети, что также приводит к снижают потерь мощности.

### **3. Типы УПК и примеры их применения в электрических сетях мира**

Вопросы применения УПК не являются новыми. Идея использования продольно-емкостной компенсация, теоретически была обоснованная в СССР еще в 30-х годах прошлого столетия. Крупнейший советский энергетик доктор тех. наук, проф. В. А. Веников, еще в 1954 в статье «Передача электроэнергии переменным током на большие расстояния» [4] с целью повышения пропускной способности электропередачи переменного тока Куйбышев (Самара)—Москва обосновал целесообразность применения устройств последовательной компенсации. А затем крупнейшая в мире установка продольной компенсации с последовательным включением в линию электропередачи статических конденсаторов, мощность которых составляла 500 000 Мвар, в 1956 года была включена в работу что позволило Московской энергосистеме получить 1150 МВт дополнительной мощности. За рубежом первая последовательно-компенсированная линия 400 кВ была введена в эксплуатацию в Швеции в также в 50-х годах.

В настоящее время устройства последовательной компенсации находят практическое применение во многих странах, особенно там, где удаленные ГЭС используются для питания центров нагрузки. Такие энергосистемы находятся, например, в Бразилии, Аргентине, США, Канаде, Южной Африке, Китае, Скандинавии, России и в других странах.

Принципиально УПК способны очень значительно увеличить пропускную способность ЛЭПи, так как за счет снижения полного продольного индуктивного сопротивления электропередачи, заметно сокращается взаимный угол между напряжениями на шинах отправной  $U_1$

и приемной частей системы  $U_2$ . За счет этого в длинных линиях электропередачи значительно возрастает устойчивость энергетической системы.

Отметим, однако, что на недостатки связанные с применением УПК указывал еще В.А. Веников [4], Он отмечал, что увеличение токов КЗ, разрывной мощности аппаратуры и перенапряжений на конденсаторах заставляет в настоящее время ограничивать компенсацию. Кроме того, недостатки применения УПК состоят в том, что при большом емкостным сопротивлением ( $X_c > 0,4X_l$ ), возможности повышения пропускной способности электропередачи ограничиваются перепадом напряжения на емкости. Вследствие этого высокая степень емкостной компенсации создает возможности появления резонансных перенапряжений как на элементах ЛЭП, так и на зажимах самой батареи. Поэтому из-за недопустимого превышения напряжения величина степени компенсации ограничивается. Очень долгое время считалось, что несмотря на то, что последовательная емкостная компенсация является очень экономичным метод повышения способности передачи мощности по длинным линиям электропередачи, однако степень компенсации не должна превосходит 30—40 % от индуктивного сопротивления линии  $X_l$ . В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них. Если степень компенсации не превышает 50%, считается, что наиболее целесообразно размещать УПК в середине линии, так как при этом несколько уменьшается их мощность и облегчаются условия работы [5]. При передаче больших мощностей не рекомендовалось ПК при одиночном (сосредоточенном) размещении УПК на линии при степени компенсации выше 50%.

ПК с тиристорным управлением предложила новую надежную альтернативу для увеличения передачи мощности как по существующим, так и по новым ЛЭП, за счет повышения динамической стабильности, демпфирования колебаний мощности, а также оптимизации потока нагрузки между параллельными цепями. Она помогает избавиться от существовавших ограничений по степени компенсации и, таким образом, обеспечивает новые возможности для передачи большей мощности с технической, экономической и экологической точек зрения.

Тиристорное управление последовательными конденсаторами может быть реализовано в двух вариантах:

- УПК с тиристорным переключением (TSSC), (дискретное регулирование);
- УПК с тиристорным управлением (TCSC), (непрерывное плавно регулирование).

Реализация любого из этих вариантов последовательной компенсации с тиристорным управлением возможно только в сочетании с современной высокомоощной силовой электроникой.

В 1975 г. Было создано первое в мире УПК с нелинейным сопротивлением в цепях защиты. В 1988 г. Nokia запустила крупнейшее в мире УПК мощностью 1056 МВАр. На протяжении последних 40 лет, в мире накоплен значительный опыт разработки и эксплуатации тиристорно управляемых устройств ПК. Благодаря большой эффективности и экономичности ПК широко используется и в распределительных сетях 3—35 кВ и в линиях электропередачи 110—750 кВ.

Установки продольной емкостной компенсации (УПК) имеют два основных назначения:

- ❖ повышение пропускной способности ЛЭПи переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения;
- ❖ перераспределение потоков активной мощности в параллельных связях высоковольтных сетей переменного тока.

Первое назначение мы уже разобрали. Остановимся на втором.

Изменение реактивного сопротивления ЛЭП за счет ПК также позволяет оптимизировать нагрузку между параллельные цепи, тем самым увеличить общую пропускную способность.

В энергосистеме возможны случаи передача энергии из одного региона в другой при параллельной работе двух ЛЭП электропередачи различных конструкций Рис. 4.

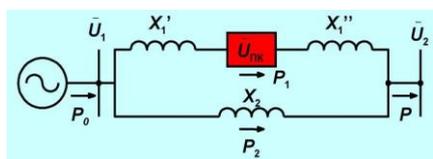


Рис. 4. Установка УПК при параллельной работе двух ЛЭП различных конструкций

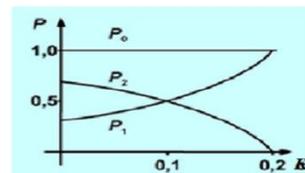


Рис. 5. Перераспределение потоков мощности между двух параллельно работающих ЛЭП различных конструкций за счет изменения величины степени компенсации  $K$ .

Обычно такие линии, выполненные различными проводами, имеют неодинаковые величины отношения реактивного и активного сопротивлений  $x/r$ . В этом случае нагрузка по ЛЭП распределяется не наивыгоднейшим образом, т.е. не обратно пропорционально активным сопротивлениям линий.

Для улучшения потока распределения в таких схемах сети в линию в которой отношением  $x/r$  больше включают УПК что обеспечит более выгодное распределение нагрузки и естественно позволяет снизить потери в электрической сети. Так, например, если  $x_1/r_1 > x_2/r_2$  то приравняв

$$(1 - K) \frac{x_1}{x_2} = x_2/r_2 \quad (12)$$

можно найти величину степени компенсации  $K$ , (Рис. 5) которая обеспечит равномерное распределение нагрузки между двумя параллельными линиями электропередачи и, следовательно, снизит потери в электрической сети

$$K = 1 - \frac{r_1 X_2}{r_2 X_1} \quad (13)$$

Мощность, протекаемая по первой линии равна:

$$P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1 + X_2 - K} \quad (14)$$

Режим работы конденсаторов емкостной компенсации в энергосистеме в значительной степени отличаются от режима работы шунтовых конденсаторов. Номинальное напряжение любой конденсаторной батареи зависит от номинального напряжения конденсаторов и схемы соединения конденсаторов в батарее. Номинальное напряжение шунтовых конденсаторов определяется напряжением сети. Для шунтовых конденсаторов изменения напряжения на них обычно происходит в довольно небольших пределах, определяемых допустимыми нормами ГОСТ на качество электроэнергии. В этом относительно постоянном режиме загрузки на уровне номинального напряжения сети  $U$  и практически постоянной мощности  $Q_{БК}$  осуществляется работа шунтовых конденсаторов практически в течении всего времени их эксплуатации.

Совсем иная картина происходит у конденсатора продольной емкостной компенсации. В процессе эксплуатации, протекающий через них ток  $I_L$ , равен полному току нагрузки. Он зависит от нагрузки и изменяется в широких пределах. Поэтому напряжение на конденсаторах продольной емкостной компенсации не остается постоянным во время их работы. Причем оно возрастает при сквозных токах КЗ пропорционально его кратности по отношению к номинальному току.

Поэтому напряжение конденсаторов продольной емкостной компенсации должно быть выбрано с учетом максимального тока, протекающего через них  $I_{Lmax}$

$$U_{ном пр} = I_{Lmax} \cdot X_{БК пр} = I_{Lmax} / \omega C \quad (15)$$

Большую часть времени этот ток значительно меньше по величине  $I_{Lmax}$  по которому выбиралось напряжение конденсатора. Поэтому и напряжение на конденсаторе продольной компенсации -  $U$  и фактическая мощность батареи конденсаторов  $Q$  оказываются меньше выбранного  $U_{ном пр}$  и  $Q_{БК пр}$ , и по мощности конденсаторы УПК оказываются недогруженными.

Тогда мощность батареи конденсаторов  $Q_{БК пр}$  можно вычислить по формуле:

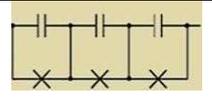
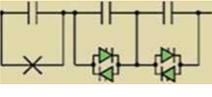
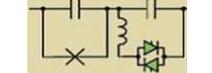
$$Q_{БК пр} = I_{max}^2 / \omega C \quad (16)$$

Шунтовые батареи конденсаторов, подключенные к шинам подстанции испытывают на себе как воздействие внутренних перенапряжений, возникающих на шинах, так и перенапряжений, возникающих при включениях или отключениях батареи, или части батареи. Обычно при этом кратность перенапряжений на батареях не превосходит 2—2,5 по отношению к амплитуде фазного рабочего напряжения конденсаторов. В отличие от них конденсаторы ПК должны выдерживать возможные перенапряжения при протекании через них чрезмерного тока нагрузки или тока КЗ, и разряд конденсаторов при шунтировании установки разрядником. Величина этой кратности может в 4 - 5 раз превосходить ток  $I_{лmax}$  по которому они были выбраны. Поэтому УПК для наружного исполнения обладают большой перегрузочной способностью и допускают кратковременные перенапряжения до 4-кратного номинального значения.

С целью обеспечения возможности повышения степени компенсации за счет ее регулирования, и были разработаны серийные компенсаторы с тиристорным управлением (TCSC), которые являлись первым поколением устройств последовательной компенсации FACTS. Эти устройства TCSC разработанные в рамках концепции FACTS, состоят из параллельного соединённого конденсатора и тиристорного реактора. На сегодняшний день в энергосистемах мира используются различные схемы регулируемых УПК: *ступенчатое регулирование* (путём шунтирования секций конденсаторной батареи механическими или тиристорными ключами); *непрерывное регулирование* (путём использования реакторов и управляемых тиристорных блоков).

Таблица 1

Схемы регулируемых УПК [2]

Ступенчатое регулирование	❖ установка УПК с механически подключаемыми и отключаемыми батареями конденсаторов - MSSC (Mechanically Switched Series Capacitor).	
Непрерывное регулирование	❖ установка УПК с тиристорно-коммутируемой батареей емкостей - TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).	
	❖ УПК с тиристорным управлением — TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).	

### Заключение

ЛЭП транзита Север – Юг Казахстана уже полностью загружены, и они не в состоянии передать большую мощность, чтобы покрыть потребности южного региона. Применение устройств продольной

компенсации (УПК) позволит увеличить предел передаваемой мощности по транзитным ЛЭП и решить проблему дефицита мощности на Юге Казахстана. В дальнейшем будут проведены исследования применения УПК на ЛЭП Казахстана по модели энергосистемы.

#### **Источники**

[1] Трофимов Г. Г. Направление развития электроэнергетики Казахстана, Журнал Энергетика, Вестник Союза инженеров энергетиков Республики Казахстан № 3(78)

[2] А. В. Антонов, В.К., Фокин, Е.В. Тузлукова. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России, 2016,

[3] R. Grünbaum, Jacques Pernot, Thyristor-controlled series compensation: a state of the art approach for optimization of transmission over power links.

[4] Веников В.А. Передача электроэнергии переменным током на большие расстояния, Журнал «Электричество», №5, 1954 г.

[5] Шакарян Ю.Г., Фокин В. К., Лихачев А.П., Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач, Электричество. 2013. № 12. С. 2–13.

**УДК 621.311**

### **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УРЗА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 110/35/10 КВ**

Д.Д. Борисов, О.В.Игнатов, А.А. Исламов, Г.Д.Мусапирова  
АО «ТАТЭК», служба релейной защиты и автоматики  
[g.musapirova@aes.kz](mailto:g.musapirova@aes.kz)

***Аннотация.** В статье приведен пример опыта модернизации действующих электроустановок по повышению надежности работы релейной защиты трансформатора 110/35/10 кВ, при максимально допустимой экономии средств и ресурсов.*

***Ключевые слова:** надежность, реле, трансформаторы, кабель, напряжение.*

### **RECOMMENNENDATIONS FOR IMPROVING RELIABILITY WORK OF URZA POWER TRANSFORMERS WITH VOLTAGE 110/35/10 KV**

D.D.Borisov<sup>1</sup>, O.V.Ignatov<sup>1</sup>, A.A. Islamov<sup>1</sup>, G.D.Musapirova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «TATEK», relay protection and automation servic

[g.musapirova@aes.kz](mailto:g.musapirova@aes.kz)

**Abstract.** The article gives an example of the experience of modernizing existing electrical installations to improve the reliability of the relay protection of a 110/35/10 kV transformer, with the maximum allowable savings of funds and resources.

**Key words:** reliability, relay, transformers, cable, voltage.

## Применяются общенаучные методы исследования

### Введение

Подстанция № 159 напряжением 110/35/10 кВ (схема 1) была введена в эксплуатацию в 1976 году для обеспечения электроэнергией Коксуйского и Ескельдинского административных районов Алматинской области (рис. 1).

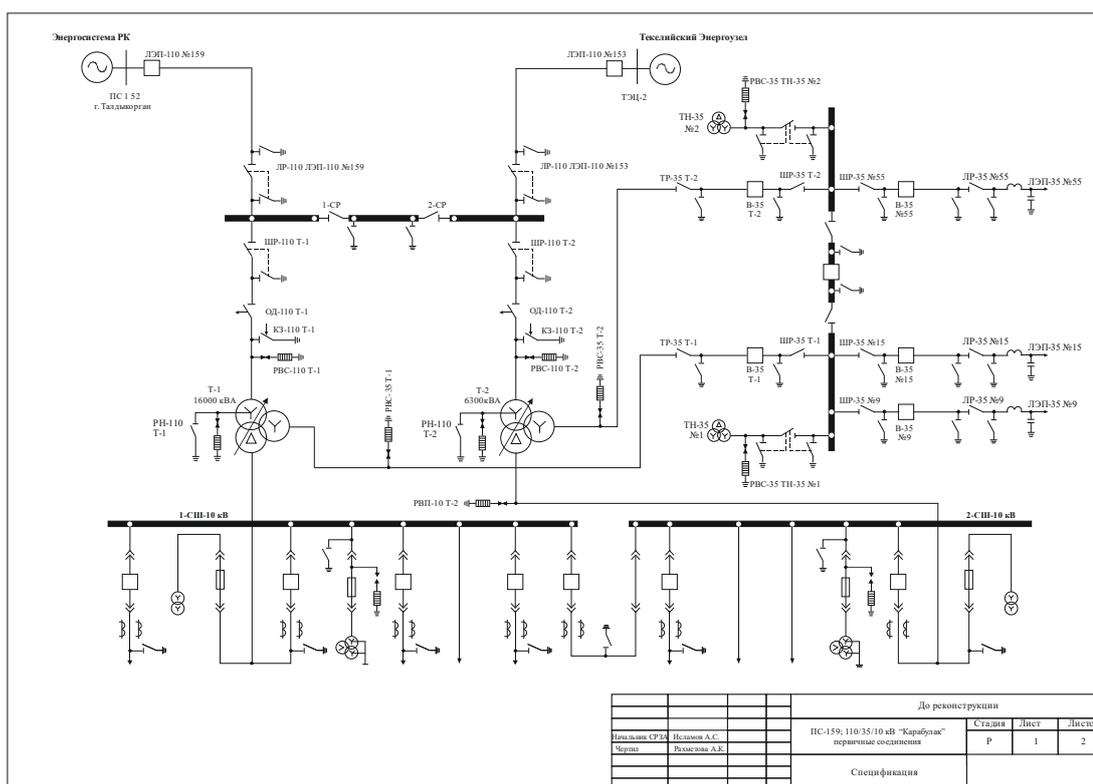


Рис. 1. Первичная схема подстанций 110/35/10 кВ № 159 до реконструкции

Физический и моральный износ основного оборудования устройств релейной защиты и автоматики (далее РЗА) нарушает режим бесперебойного электроснабжения объектов жизнедеятельности населенных пунктов.

На техническом совете было принято решение провести частичную замену оборудования в комплекте с устройствами РЗА в течение 2021-2022 годов, а именно замену коммутационных аппаратов и аппаратуры РЗА на стороне 110 кВ и 10 кВ. Замену оборудования со стороны 35 кВ запланировать на более поздние сроки.

### Основная часть

Краткая информация разработанного и внедренного технического решения направленного на повышение надежности работы устройств РЗА силовых трансформаторов.

До реконструкции объекта устройства РЗА силовых трансформаторов располагались в релейных шкафах внутренней установки по проекту завода-изготовителя в КРУН-10 кВ типа К-37.

Оперативные цепи запитаны от трансформаторов собственных нужд 10/0,23 кВ с устройством АВР. Объем релейной защиты типовой с использованием энергии предварительно заряженных конденсаторов и блока питания БПЗ-401 действующая на включение короткозамыкателя 110 кВ (далее КЗ-110 кВ), отключение выключателей вводов 35 кВ, 10 кВ и отключения отделителя 110 кВ (далее ОД-110 кВ) в бестоковую паузу.

Согласно плану реконструкции оборудования на стороне 110 кВ (схема 2) были произведены следующие объемы работ (Рисунок 2):

1. Замена ОД-110 кВ, КЗ-110 кВ на элегазовые выключатели типа LW36-126(W)/T1000-40.

2. Установка трансформаторов тока и напряжения JDCF-110 на первой и второй секции шин 110 кВ.

3. Установка блочно-модульного здания оперативного пункта управления (далее ОПУ) на территории открытого распределительного устройства 110 кВ (ОРУ-110 кВ). (Рисунок 3)

4. Прокладка и подключение силовых и контрольных кабелей вторичной коммутации по вновь установленным кабельным каналам.

5. Монтаж и наладка шкафов РЗА на микропроцессорной базе типа PRS-7000 производства КНР: (Рис. 4)

- трансформатор Т-1 S-16000 кВА (110/35/10 кВ);
- трансформатор Т-2 S-6300 кВА (110/35/10 кВ);
- шкаф собственных нужд 0,4 кВ с устройством АВР;
- шкаф оперативного постоянного тока с АКБ;
- шкаф центральной сигнализации;
- шкаф автоматической частотной разгрузки;
- шкаф трансформаторов напряжения 110 кВ;
- блоки питания БПНС-2 УЗ запитанные от трансформаторов напряжения 110 кВ и предназначенные для перезарядки оперативных цепей постоянного тока на случай неисправности или вывода в ремонт шкафа оперативного тока с АКБ.

- вышеперечисленные шкафы запитаны от шкафа оперативного тока с комплектом аккумуляторных батарей напряжением  $\pm 220$  Вольт.

В установленных шкафах отсутствовала аппаратура управления, автоматики и сигнализации устройством РПН трансформаторов, так как силовые трансформаторы производства СССР после капитального ремонта остались в эксплуатации, а завод-изготовитель КНР предоставляет блоки РЗА РПН в комплекте с трансформатором.

Поэтому было принято решение данного вопроса с одновременным внедрением мероприятий повышающих надежность работы устройств РЗА силовых трансформаторов (Рис. 5), а именно:

1. Произвели капитальный ремонт всей аппаратуры РЗА силовых трансформаторов демонтированных из релейных шкафов, установленных в КРУН-10 кВ К-37.

2. Из аварийного запаса службы РЗА были подготовлены четыре каркаса панелей предназначенных для монтажа аппаратуры прошедшей капитальный ремонт.

3. В нижнюю половину двух панелей установили блоки питания БПНС-2 УЗ.

4. Оставшиеся места на панелях были использованы для размещения комплектов РЗА:

- Дифференциальная защита трехмоточного трансформатора на реле типа ДЗТ-11;
- Максимальная токовая защита на реле РТ-40/20;
- Устройства управления РПН трансформатора;
- Блок питания БПЗ-401 и блоки конденсаторов БК-400 для отключения выключателей В-110 кВ, В-35 кВ, В-10 кВ;
- Оперативные накладки для ввода и вывода защиты;
- Щитовые электроизмерительные приборы;

5. Оперативные цепи вновь установленных устройств РЗА запитаны от блоков питания БПНС с устройством АВР от источников оперативного тока трансформаторов напряжения 110 кВ установленных на первой и второй секции шин.

Таблица 1

Информация по электромагнитам отключения коммутационных аппаратов со стороны 110, 35, 10 кВ

№ п/п	Наименование присоединения	Тип выключателя	Электромагнит отключения
1	Выключатель 110 кВ	LW36-126(W)/Т-1000-40 2020 год	Заводом предусмотрено две катушки DC-220
2	Выключатель 35 кВ	С-35М- 630 - 10 1975 год	Установили дополнительно катушки отключения DC-220
3	Выключатель 10 кВ	БМПП-10 1976 год	Установили дополнительно катушки отключения DC-220

Таблица 2

Информация по трансформаторам тока, к которым подключение вновь установленные устройства РЗА

№ п/п	Наименование присоединения	Информация по трансформаторам тока	Подключение
1	Сторона 110 кВ	ЛВ7-110 с четырьмя обмотками	ЛВ7-110
2	Сторона 35 кВ	ТВ-35 – 2 комплекта ТФЗМ-35 – 1 комплект	ТВ-35 кВ
3	Сторона 10 кВ	ТЛМ-10 кВ - 2 комплекта	ТЛМ-10 кВ

При производстве работ по монтажу и наладке устройств РЗА была дополнительно задействована бригада специалистов в составе мастера Ерешева М. А., инженера Сулейменова А. А., инженера Мусапировой Г.Д., электромонтера Муканова Н.М., электромонтера-водителя Ошаганова М.Т., которые успешно справились с поставленной задачей. Все работы были выполнены в соответствии с требованиями правил ПТБ, ПУЭ, ПТЭ, ППБ Республики Казахстан.

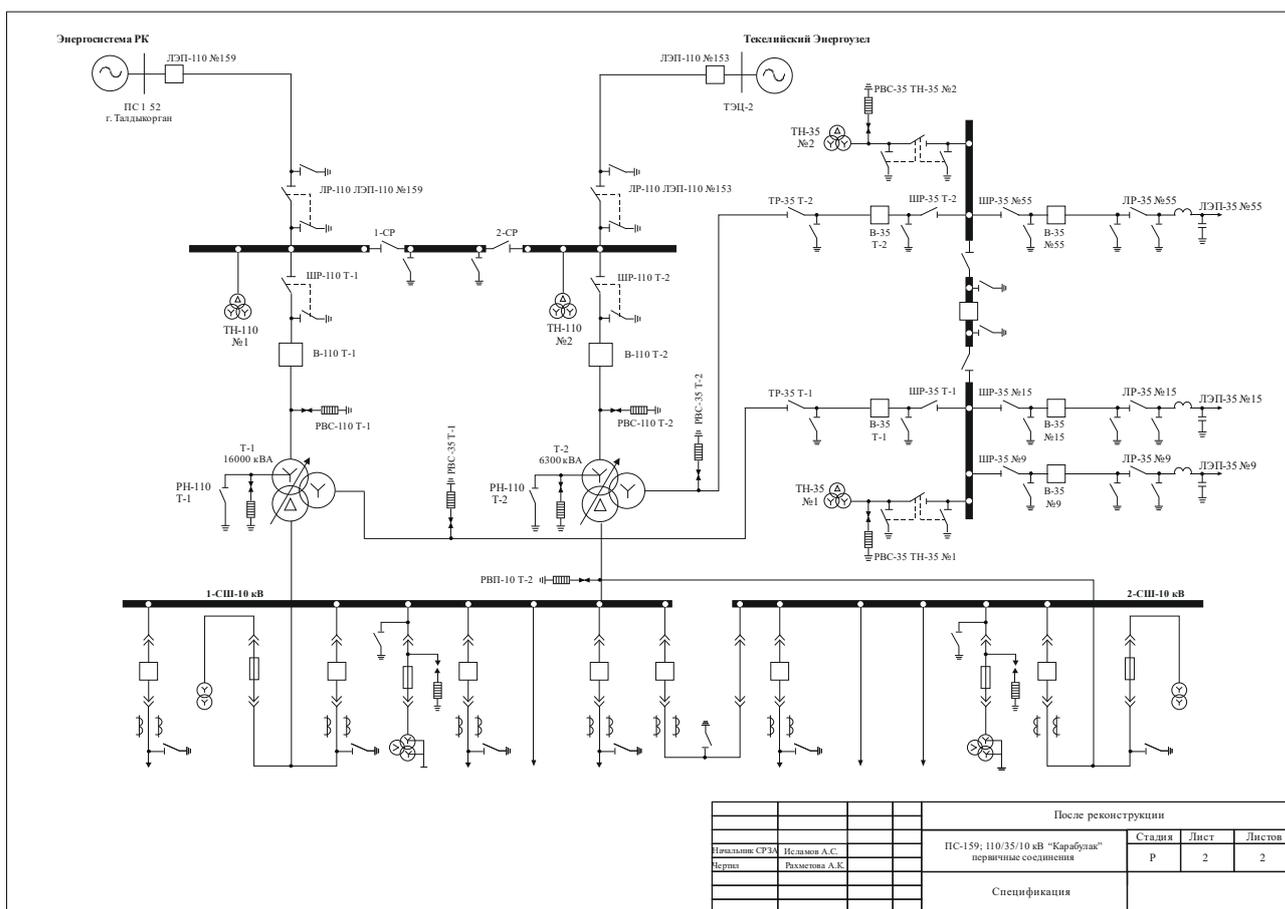


Рис. 2. Первичная схема подстанций 110/35/10 кВ № 159 после реконструкции

### Заключение

Реконструкция или модернизация действующих электроустановок – это очень сложный процесс, так как действующая электроустановка является объектом повышенной опасности. При модернизации ПС 159 в сжатые сроки, с максимально допустимой экономией средств и людских ресурсов, а также унификацией действующего исправного оборудования с новым, удалось добиться существенного повышения надежности энергоснабжения региона.

Если это сравнить со строительством обычного жилого дома. Гораздо легче построить Новый дом, согласно разработанного проекта, чем производить работы по перестройке существующего здания.

Защита релейных шкафов и панелей РЗА – это сложный процесс, так как вся аппаратура подстанции обвязана кабелями вторичной коммутации цепей управления, автоматики и сигнализации. Это как говорится не мебель в доме заменить.

В связи с большим количеством подстанции в РК требующих модернизации, надеемся, что наш опыт производства монтажных и пуско-наладочных работ пригодится коллегам – энергетикам.

### **Источники**

[1] Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок, утв. Приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 31 марта 2015 года №253 с изм. и доп. от 07 июля 2021 года.

[2] РД 34РК.20.501-02, Правила Технической Эксплуатации электрических станций и сетей РК., утв. Приказом Министерства энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан от 30 марта 2015 года №247 с изм. и доп. от 28 сентября 2020 года.

[3] Правила устройства электроустановок Республики Казахстан., Министерство Энергетики и Минеральных ресурсов РК., Астана, 2003 г. 592 с.

[4] Чернобровов Н.В. Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. м., «Энергия», 1974. – 680 с.: с ил.

[5] Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.: ил.

[6] Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: 4-е изд., испр. и доп. СПб.: ПЭИПК, 2010. 350 с.

[7] Александров А. М., доцент кафедры РЗА, Основы наладки и эксплуатационных проверок устройств РЗА и вторичной коммутации: учебное пособие – ФГАОУ ДПО Петербургский Энергетический институт повышения квалификации, 2010. – 64 с.

### **Приложения**

#### **Подстанция 110/35/10 кВ №159 г. Талдыкорган**



**Элегазовые выключатели,  
трансформаторы тока и напряжения 110 кВ после реконструкции**



**ОПУ-110 кВ**



**Шкаф защиты трансформатора**



**Резервный шкаф защиты трансформатора после реконструкции**

**ӘОЖ 621.311**

## **ҚОЛДАНЫСТАҒЫ КЕРНЕУІ 110/35/10 КВ ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯНЫҢ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫН КЕЗЕҢ-КЕЗЕҢІМЕН ЖАҢҒЫРТУ БОЙЫНША ТЕХНИКАЛЫҚ ШЕШІМ**

**С.С. Кенжебеков, С.А. Минин, Б.Б. Естібаев, Г.Д. Мусапирова**  
АО «ТАТЭК», служба релелік қорғаныс және автоматика қызметі,  
Г.Даукеев атындағы АЭЖБУ КЕАҚ  
*g.musapirova@aes.kz*

***Аңдатпа.** Бұл мақалада қосалқы станцияның қондырғыларын қайта жаңғырту кезінде релелік қорғаныс және автоматика құрылғыларын аз шығын жұмсай отырып жаңарту тәжірибесі жайлы жазылған.*

***Кілттік сөздер:** кернеу, қосалқы станция, реле, электр қондырғысы.*

## **TECHNICAL DECISION FOR STAGES UPGRADING THE FACILITIES OF THE CURRENT VOLTAGE 110/35/10 KV SUBSTATION**

**<sup>1</sup>S.S. Kenzhebekov, <sup>1</sup>C.A.Minin, <sup>2</sup>B.B. Estibaev, <sup>2</sup>G.D. Musapirova**  
*<sup>1</sup>JSC «TATEK», relay protection and automation servic*  
Non-profit JSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications  
named after Gumarbek Daukeev»  
*g.musapirova@aes.kz*

*Abstract.* This article describes the experience of cost-effective upgrading of relay protection and automation devices during the reconstruction of substation facilities.

*Key words:* voltage, substation, relay, electrical installation.

## **Кіріспе**

Кернеуі 110/35/10 кВ №159 қосалқы станциясы 1976 жылы Алматы облысының Көксу және Ескелді әкімшілік аудандарын электрэнергиясымен қамтамасыз ету үшін іске қосылған (1 сурет).



1 сурет –110/35/10 кВ-ты №159 қосалқы станциясы

Қосалқы станцияның негізгі жабдықтарының, сондай-ақ релелік қорғау және автоматика құрылғыларының физикалық және моральдық тозуы, елді мекендердің тіршілік ету объектілерін сенімді және үздіксіз электрэнергиясымен қамтамасыз ету шарттарына сәйкес келмейтін жағдайға келді.

Техникалық кеңесте 2021-2022 жылдар аралығында релелік қорғаныс және автоматика (бұдан әрі – РҚЖА) құрылғыларымен жинақталған қосалқы станция жабдықтарын ішінара ауыстыру, атап айтқанда, 110 кВ және 10 кВ жағында коммутациялық аппараттар мен РҚЖА құрылғыларын ауыстыру туралы шешім қабылданды. 35 кВ жағынан жабдықтарды ауыстыру неғұрлым кеш мерзімге жоспарланды.

2021 жыл ішінде 110 кВ жабдықтары мен РҚЖА құрылғыларын ауыстыру бойынша жұмыстар сәтті жүргізілді. 2022 жылы сыртқа қолданылатын жиынтықты тарату құрылғысында (бұдан әрі – КРУН-10кВ) орналасқан майлы ажыратқыштарымен және тікелей әрекет ететін РҚЖА құрылғыларын (РТВ, РТМ релесі) микропроцессорлық базадағы релелік құрылғыларымен жиынтықталған вакуумдық ажыратқыштарға ауыстыру жоспарлануда.

## **Негізгі бөлім**

**35 кВ жағында орнатылған жабдықтардың РҚЖА құрылғыларын ауыстыру, монтаждау және іске қосу бойынша әзірленген және енгізілген техникалық шешімнің қысқаша ақпараты**

Ашық тарату кондырғысындағы (бұдан әрі – АТҚ-35кВ) 35 кВ-тық барлық жабдықтарының РҚЖА құрылғылары, объектілерде Қайта жаңғырту жұмыстары жүргізілмей тұрып, дайындаушы зауыттың жобасына сәйкес К-37 типті КРУН-10 кВ-та ішкі орнату шкафтарында орналасқан болатын (2-сурет).

Басқару ток тізбектері үздіксіз жұмыс істеу үшін резервті автоматты қосу құрылғысы (АВР) қолданылған 10/0,23кВ-ты меншікті қажеттілік трансформаторларынан қоректендірілген. Релелік қорғаныс РТ-40, РП-341, РВМ-12 релелерін қолдана отырып, ажырату электромагниттерін дешунттау типтік сұлбасы бойынша жинақталған.

35 кВ РҚЖА құрылғыларынан КРУН-10кВ-ты босату және оны жаңадан бөлінген орынға ауыстыру үшін, мынадай іс-шаралар әзірленді және жүргізілді:

1. Мекеме басшылығына К-37 типті КРУН-10кВ-ті жаңғырту жұмыстары кезіндегі бұрын жұмыста болған материалдардан жедел басқару пунктін (ОПУ) дайындауға өтінім берілді.

2. Қосалқы станция қызметінің мамандары АТҚ-35 кВ аумағында жарық беру, жылыту және желдету жүйесі бар жедел басқару пунктін (ОПУ) корпусын жасап, орнатты (3-сурет).

3. РҚЖА қызметінің шеберханасы жағдайында релелік қорғаныс құрылғыларын орналастыруға арналған 7 панель қаңқасы дайындалды.

4. Бұдан әрі, панельдердің қаңқалары объектіге жеткізіліп, жедел басқару пунктінің ішіне келесі РҚЖА құрылғылары орналастырылды (1-3 екінші реттік басқару тізбек сұлбалары):

- айнымалы токтағы орталық жедел сигнал жүйесі;
- I және II секцияның 35кВ-тық кернеу трансформаторлары;
- Т-1 трансформаторын 35 кВ-тық енгізу ажыратқыш панелі (В-35 кВ);
- 35 кВ-ты секциялық ажыратқыш;
- Т-2 трансформаторын 35 кВ-тық енгізу ажыратқыш панелі (В-35 кВ);
- 35 кВ-ты электр тарату желісі (ЭТЖ-35 кВ) №15;
- ЭТЖ-35 кВ №55;
- ЭТЖ-35 кВ №9.

5. №1 панельде авариялық және ескерту сигнализациясы аппаратурасын монтаждау, сондай-ақ шиналардың I және II секцияларындағы қалқанды электр өлшеу аспаптары бар 35 кВ кернеу трансформаторларының аппаратурасы жүргізілді. Айнымалы токтағы

6. АТҚ-35 кВ-та орнатылған барлық коммутациялық аппараттардың РҚЖА құрылғыларын монтаждау үшін аппаратураны демонтаждау, монтаждау және іске қосу, жүргізу, екінші реттік басқару кабельдерін төсеу бойынша жұмыстарды кезең-кезеңмен жүргізу жұмыстарын, шамамен, бір қосылымға бес жұмыс күні кетеді деген жоспар қабылданды.

Панельдің жоғарғы бөлігінде бұрын пайдаланылған релелік шкафтың сигнал беру аппаратурасымен, оперативтік накладкамен, электрэнергиясын

санау құрылғысымен және амперметрмен тиісті жалғанымдары бар есік орнатылды.

Төменгі бөлігінде КЗ-37 релелік қорғау блогы және автоматты қайта қосу құрылғылары (АПВ) орналастырылды.

7. Жоғарыда аталған жұмыстарды жүргізу кезінде қосымша мамандар бригадасы жұмылдырылды, құрамында инженер Зейнел Д. Е., инженер Қожахметов Е. Б., инженер Рахметова А. К., электржөндеуші Кабылбеков М. Р., инженер Қалиев Д. С. болды, олар қойылған міндетті ойдағыдай орындап шықты.

Барлық жұмыстар Қазақстан Республикасының қауіпсіздік техникасы (ҚТЕ), электр қондырғыларын орнату (ЭОЕ), техникалық пайдалану (ТПЕ), өрт қауіпсіздігі (ӨҚЕ) ережелерінің талаптарына сәйкес орындалды.

### **Қорытынды**

ҚР және ТМД аумағындағы қосалқы станциялардың басым көпшілігі ХХ ғасырдың 70-80 жылдары пайдалануға берілді және жөндеу-пайдалану қызмет көрсетуінің сенімділігі мен қолайлылығы талаптарына жауап бермейді, ал оларды жұмыс жағдайында ұстауға жұмсалатын еңбек шығындары жылдан жылға артып келеді.

Сондықтан электр қондырғыларын пайдаланумен айналысатын кезекші жедел-жөндеу қызметкерлері тиісті техникалық құжаттаманы уақытылы рәсімдеуі тиіс. Осы ақпараттар негізінде электр энергетикасы объектілерін жаңғырту немесе реконструкциялау бағдарламасы бойынша жабдықты ауыстыру жайлы шешім жоспарланады.

Бұл өте күрделі процесс, өйткені қолданыстағы электр қондырғысы жоғары қауіпті объект болып табылады.

Егер мұны кәдімгі тұрғын үй салумен салыстыратын болсақ, қолданыстағы ғимаратты қайта құру, жөндеу жұмыстарын жүргізуден гөрі, жасалған жобаға сәйкес жаңа үй салу оңайырақ болатындығы түсінікті.

РҚЖА релелік шкафтары мен панельдерін ауыстырумен жоғары білікті мамандар айналысуы тиіс, өйткені қосалқы станциялардың барлық қондырғылары өзара басқару, автоматика және дабыл қағу тізбектерінің екінші реттік басқару кабельдерімен қосылған. Атап айтқандай, бұл үйдегі жиһазды ауыстыру емес.

Қосалқы станцияларды қайта жаңғырту және іске қосу-жүргізу жұмыстарын жүзеге асыру тәжірибесі ҚР және ТМД Энергетик – әріптестерімізге пайдалы болады деп үміттенеміз.

## **ӘДЕБИЕТТЕР**

[1] Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок, утв. Приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 31 марта 2015 года №253 с изм. и доп. от 07 июля 2021 года.

[2] РД 34РК.20.501-02, Правила Технической Эксплуатации электрических станций и сетей РК., утв. Приказом Министерства энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан от 30 марта 2015 года №247 с изм. и доп. от 28 сентября 2020 года.

[3] Правила устройства электроустановок Республики Казахстан., Министерство Энергетики и Минеральных ресурсов РК., Астана, 2003 г. – 592 с.

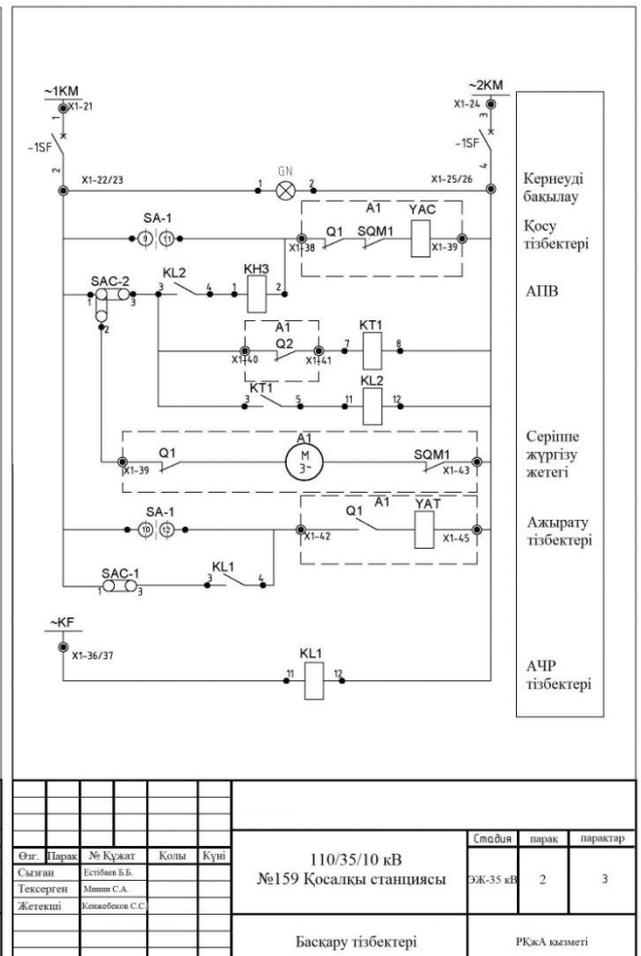
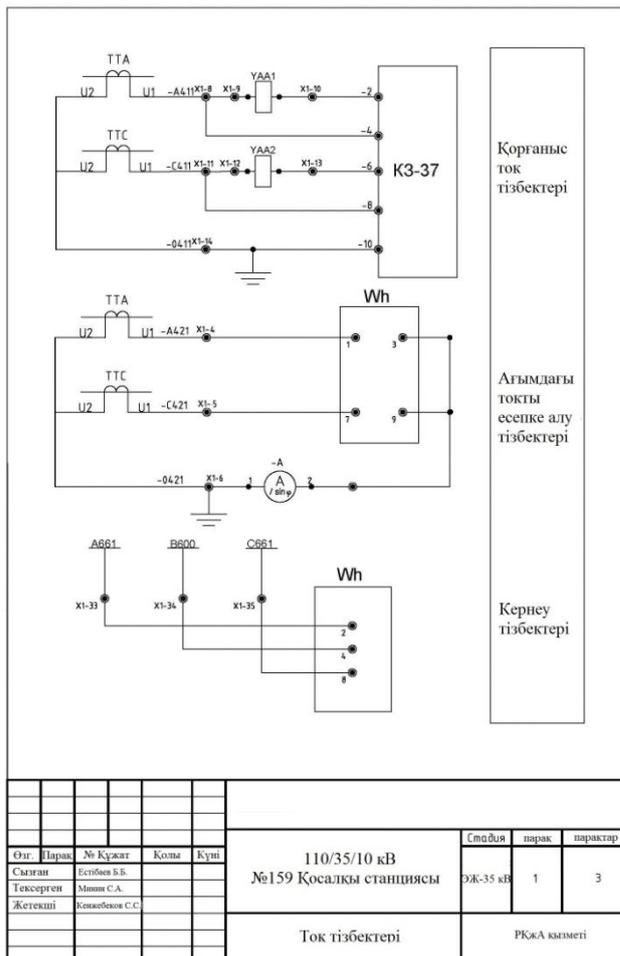
[4] Чернобровов Н.В. Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. м., «Энергия», 1974. – 680 с.: с ил.

[5] Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.: ил.

[6] Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: - 4-е изд., испр. И доп. – СПб.: ПЭИПК, 2010. – 350 с., ил.

[7] Александров А.М., доцент кафедры РЗА, Основы наладки и эксплуатационных проверок устройств РЗА и вторичной коммутации: учебное пособие – ФГАОУ ДПО Петербургский Энергетический институт повышения квалификации, 2010. – 64 с.

**Мақалаға қосымша ақпараттар**







2 сурет – Дайындаушы зауыттың жобасына сәйкес К-37 типті КРУН-10 кВ-тың ішінде 35 кВ-тық РҚЖА құрылғылары ішкі орнату шкафтарында орналасқан





3 сурет – Жаңадан қойылған 35 кВ-ты жедел басқару пункті

УДК 621.311

## НЕСТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА РЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

А. С. Исламов, А. Т. Сулейменов, Г.Д. Мусапирова, А. Рахметова  
АО «ТАТЭК», служба релейной защиты и автоматики  
[g.musapirova@aes.kz](mailto:g.musapirova@aes.kz)

*Аннотация* В статье приведен пример практики мероприятий по повышению надежности работы релейной защиты линий 10 кВ выполненных на реле прямого действия РТМ и РТВ встроенных в привод выключателя 10 кВ типа ПП-67.

*Ключевые слова:* надежность, реле, трансформаторы, напряжение.

### NON-STANDARD METHOD OF PRODUCTION RECONSTRUCTION FOR INCREASED RELIABILITY RELAY PROTECTION

<sup>1</sup>A.S. Islamov, <sup>1</sup>A.T. Suleimenov, <sup>1</sup>G.D. Musapirova, <sup>1</sup>A. Rakhmetova  
<sup>1</sup>JSC «TATEK», relay protection and automation service  
[g.musapirova@aes.kz](mailto:g.musapirova@aes.kz)

*Abstract.* The article gives an example of the experience of modernizing existing electrical installations to improve the reliability of the relay protection of a 110/35/10 kV transformer, with the maximum allowable savings of funds and resources.

*Key words: reliability, relay, transformers, cable, voltage.*

## **Применяются общенаучные методы исследования**

### **Введение**

Электроэнергия – это признак и продукт богатого общества. Без электроэнергии невозможно представить себе современного освещения, тепла, двигательной нагрузки. На применении электроэнергии базируется вся современная промышленность. Основой современных технологий средств связи, информатики, компьютерной техники также является электричество, которое наряду со всеми величайшими благами представляет большую опасность при неумелом его использовании. Поэтому уже более 100 лет существует и успешно развивается особая область электроэнергетики, где используются специальные устройства, предназначенные для защиты оборудования и людей от поражения электрическим током. Эта обширная область энергетики традиционно называется «релейная защита», потому что основными защитными устройствами являются реле.

Наибольшее количество реле используется в электроустановках среднего напряжения, в так называемых распределительных электрических сетях напряжением от 6 до 35 кВ, которые являются важным звеном в системе производства, передачи и потребления электрической энергии и где происходит основная масса нарушений электроснабжения.

### **Основная часть**

#### **Краткая информация по эксплуатации устройств релейной защиты линий напряжением 10 кВ**

Более 80% коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты на подстанциях 110/35/10 кВ находится в эксплуатации около 40 лет и не отвечают требованиям надежности и удобства ремонтно-эксплуатационного обслуживания, а трудозатраты на их содержание в рабочем состоянии ежегодно повышаются по причине физического и морального износа оборудования.

Темпы производства работ по модернизации и реконструкции подстанций очень низкие. Это связано, прежде всего, с недостатком финансовых средств.

Повышенный износ оборудования из-за длительного срока эксплуатации может привести к отказу или ложной работе устройств релейной защиты во время коротких замыканий и ненормальных режимов работы электрооборудования подстанций.

На основании вышеизложенного специалистам, занимающихся ремонтно-эксплуатационным обслуживанием релейной защиты приходится своевременно устранять появившиеся дефекты и неисправности, а так же разрабатывать и внедрять новые нестандартные методы производства реконструкции для повышения надежности работы оборудования с минимально возможными финансовыми затратами.

Таблица 1 - Описание одного из мероприятий по повышению надежности работы оборудования подстанции

Объект	Подстанция 110/10 кВ №157 «Кус фабрикасы» Талдыкорганский РЭС АО «ТАТЭК» (рисунок 1)
Оперативное обслуживание	Без местного дежурного персонала. Объект находится на расстоянии 22 км от диспетчерского пункта и обслуживается персоналом ОВБ
Присоединения	Ячейка КРН-IV отходящей линий 10 кВ №6 «Когер ЛТД» (рисунок 2)
Тип устройств релейной защиты	Релейная защита выполнены на реле прямого действия РТМ и РТВ встроенных в привод выключателя 10 кВ типа ПП-67
Проблемные вопросы	Обращения и недовольство потребителей электроэнергии на частые отключения связанные с бросками тока нагрузки
Результаты проверки устройств РЗА	Причиной неселективной работы релейной защиты является физический износ часового механизма реле РТВ. Нет возможности произвести регулировку времени срабатывания. Максимальная токовая защита срабатывает без выдержки времени, т.е. как токовая отсечка
Разработанные и внедренные мероприятия	Группа специалистов в составе ведущего инженера Сулейменова А.Т., мастера Игнатова О.В., электромонтера Кабылбекова М.Р. внесли предложение по реконструкции панели релейного отсека с установкой блока защиты КЗ-37. В течении одного рабочего дня они успешно произвели работы по монтажу и наладке устройств релейной защиты по схеме дешунтирования электромагнитов отключения, то есть самой надежной и проверенной временем схеме, в которой цепи оперативного тока используют энергию короткого замыкания полученную от трансформаторов тока защищаемой электроустановки (рисунок 3, 4)

### Заключение

Надеемся, что наш опыт эксплуатации устройств релейной защиты поможет коллегам в решении аналогичных проблемных вопросов, а студентам, обучающимся по нашей специальности необходимо учиться, учиться и ещё раз учиться, так как только специалисты – релейщики знают точное место в электрической установке, где должно работать конкретное реле, каковы там значения токов при нагрузках и коротких замыканиях, каковы «соседи сверху» и «соседи снизу» и как они «настроены». Только умелый выбор характеристик реле может гарантировать правильные действия Релейной Защиты!!!

### Источники

[1] Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок, утв. Приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 31 марта 2015 года №253 с изм. и доп. от 07 июля 2021 года.

[2] РД 34РК.20.501-02, Правила Технической Эксплуатации электрических станций и сетей РК., утв. Приказом Министерства энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан от 30 марта 2015 года №247 с изм. и доп. от 28 сентября 2020 года.

[3] Правила устройства электроустановок Республики Казахстан., Министерство Энергетики и Минеральных ресурсов РК., Астана, 2003 г. – 592 с.

[4] Чернобровов Н.В. Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. м., «Энергия», 1974. – 680 с.: с ил.

[5] Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.: ил.

[6] Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: - 4-е изд., испр. И доп. – СПб.: ПЭИПК, 2010. – 350 с., ил.

[7] Александров А. М., доцент кафедры РЗА, Основы наладки и эксплуатационных проверок устройств РЗА и вторичной коммутации: учебное пособие – ФГАОУ ДПО Петербургский Энергетический институт повышения квалификации, 2010. – 64 с.

### Приложения к статье



Рис. 1. Подстанция 110/10 кВ №157 «Кус фабрикасы»



Рис. 2. Ячейка КРН-IV отходящей линий 10 кВ

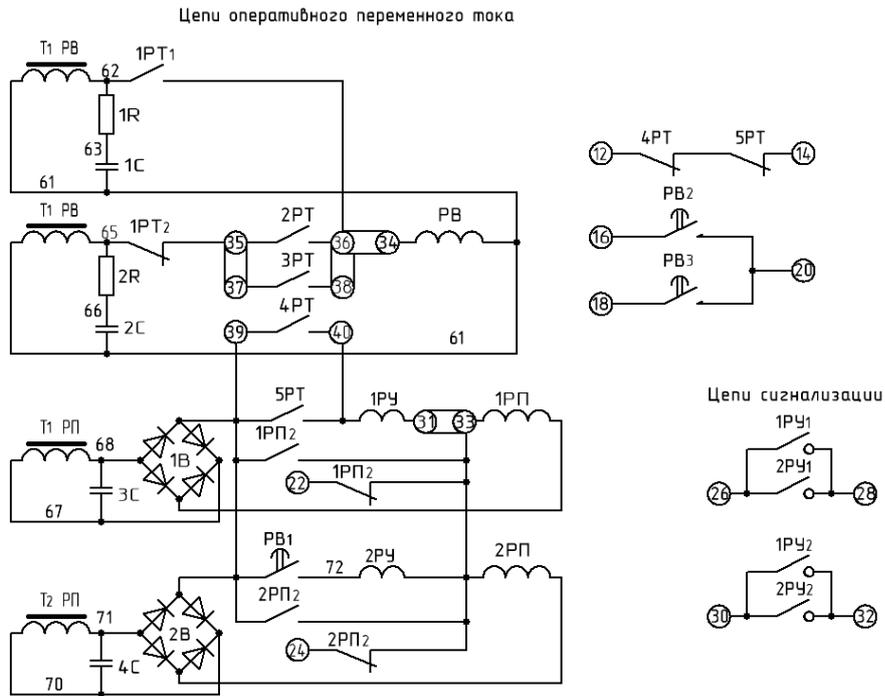
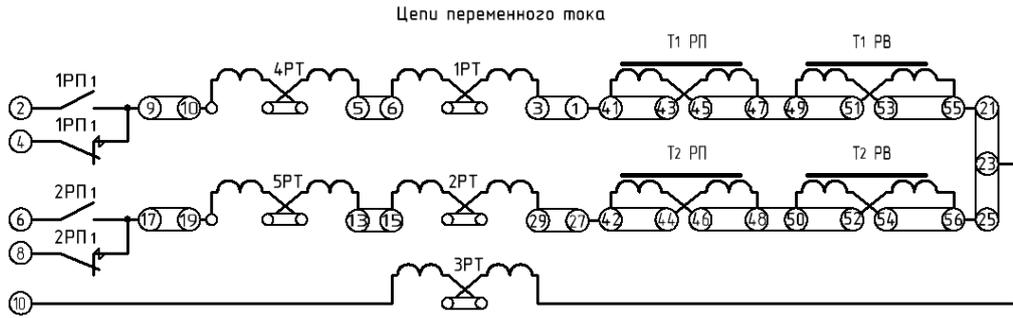


Рис. 3. Принципиальная схема КЗ-37





1 – до реконструкции; 2 – после реконструкции  
Рис. 4. Внедренная реконструкция ячейки 10 кВ

УДК 533.682

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА И ПРИМЕНЕНИЕ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

А.Н. Дюсембаева, Н.К.Танашева, Б.Р. Нусупбеков, А.С. Тусыпбаева  
НАО «Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова»,  
Караганда  
[aikabesoba88@mail.ru](mailto:aikabesoba88@mail.ru)

*Аннотация.* Авторами статьи проведена работа по определению аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра. Проведено моделирование картины обтекания исследованного цилиндра. При моделировании произведен расчет аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра в программном пакете *Ansys Fluent*. Сравнение экспериментальных результатов и численных решений для вращающегося цилиндра дали хорошее совпадение, погрешность не превышает 3-5%.

*Ключевые слова:* цилиндр, эффект Магнуса, лобовое сопротивление, подъемная сила

## SIMULATION OF THE FLOW AROUND A ROTATING CYLINDER IN THE AIR FLOW AND APPLICATION IN THE FIELD OF ENERGY

A.N. Dyusembaeva, N.K.Tanasheva, B.R. Nusupbekov, A.S. Tussybaeyva  
Karaganda Buketov University  
[aikabesoba88@mail.ru](mailto:aikabesoba88@mail.ru)

***Annotation.** The authors of the article carried out work to determine the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder. A simulation of the flow pattern of the investigated cylinder is carried out. During the simulation, the aerodynamic characteristics of the rotating cylinder were calculated in the Ansys Fluent software package. Comparison of experimental results and numerical solutions for a rotating cylinder gave a good match, the error does not exceed 3-5%.*

***Keywords:** cylinder, Magnus effect, drag, lifting force*

## **Введение**

Попытки использования вращающихся цилиндров в качестве силового элемента ветродвигателей известны с давних времен [1-2]. Однако в силу сложности аэродинамических картин обтекания системы вращающихся цилиндров в турбулентном потоке воздуха, требующего достаточно современной экспериментально-теоретической базы, работы по сей день продолжают [3]. В работах [4-5] показано, что силовой элемент ветродвигателя в виде вращающегося цилиндра может более эффективно работать, чем традиционно используемый крыловой профиль пропеллера, особенно при малых скоростях потока.

В связи с возрастающими требованиями к экономии топливно-энергетических ресурсов, снижению негативного влияния на окружающую среду, а также обеспечения электроэнергией регионов в настоящее время большое внимание уделяется ветроэнергетике.

Преобладающие в природе ветры низких скоростей, трудно улавливаемые существующими устройствами [6-7]. Требуются разработки более совершенных машин, основанных на новых принципах. Один из таких принципов является использование эффекта вращающихся цилиндров в турбулентном потоке воздуха. Поэтому разработка таких устройств является актуальной задачей.

Известные работы Бычкова Н. М. [8-9] относятся к определению аэродинамических параметров вращающихся одиночных цилиндров в потоке воздуха.

Работы, посвященные исследованию аэродинамики обтекания одиночного и системы вращающихся цилиндров, являющихся элементами разрабатываемого нами ветродвигателя, сопровождающихся турбулентным потоком, в настоящее время крайне мало.

## **Методика исследований**

Рассматривается обтекание вращающегося цилиндра горизонтальным турбулентным потоком воздуха. На верхней части цилиндра, где течение жидкости и вращение движущейся стенки направлены в одну и ту же сторону, отрыв пограничного слоя полностью отсутствует. В нижней части цилиндра скорости потока и вращающейся поверхности направлены противоположно, они вычитываются, происходит торможение и уменьшение скорости. Появление такой разницы скоростей приводит к появлению поперечной разницы давлений и возникновению

поперечной подъемной силы, названной эффектом Магнуса. Это явление мы использовали для создания ветротурбины.

Экспериментальные исследования проводились в аэродинамической трубе Т-1-М с открытой рабочей частью диаметром 500 мм. Скорость воздушного потока  $V \geq 2,5$  м/с. Начальная турбулентность составляла 3%. Диаметры исследуемых цилиндров изменялся в пределах 50÷150 мм, частота вращения 100÷1500 оборотов в минуту. Сила лобового сопротивления и подъемная сила измерялись трехкомпонентными аэродинамическими весами.

Для математического моделирования обтекания вращающегося цилиндра был произведен расчет в программном пакете Ansys Fluent, предназначенном для моделирования сложных течений в широком диапазоне изменения теплофизических свойств, посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью. Программный пакет позволяет вычислять внешние силы и моменты.

В нашем случае вычислялась аэродинамическая подъемная сила и сила лобового сопротивления.

При решении системы уравнений сохранения массы и сохранения импульсов учитывались как вязкие, так и турбулентные составляющие. Модель турбулентности основывалась на гипотезе Буссинеска, определяющей связь между тензором турбулентных напряжений и градиентами скоростей. Для определения турбулентной вязкости использовалась модель Лаундера-Сполдинга [10].

Задавались граничные условия на стенке, на входе и на выходе.

Граничные условия на стенке – условие прилипания и непротекания.

$$V = 0; \frac{\partial k}{\partial n} = 0; \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p}$$

Здесь  $k = 0.4187$  – постоянная Кармана; индекс  $P$  – относится к центру пристенной ячейки разностной сетки. Где  $V$  – скорость потока воздуха,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $n$  – вектор нормали,  $\varepsilon$  – скорость диссипации,  $C_\mu$  – универсальная постоянная модели Сполдинга (0,057),  $y_p$  – расстояние от центра контрольного объема до стенки.

Граничные условия на входе:

$$U = U_{in}; V = 0$$

Турбулентные параметры потока определяются через задание интенсивности турбулентных пульсаций  $I$  и гидравлического диаметра  $D_{hyd}$ :

$$k = \frac{3}{2}(I \cdot V_{intel})^2; \quad \varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$$

Здесь  $V_{intel}$  - вектор скорости на входе в расчетную область,  $l$  - масштаб турбулентности.

Граничные условия на выходной границе:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0.$$

Для моделирования были построены 2D геометрическая модель в пакете Gambit, обладающий мощными возможностями для создания двухмерных расчетных областей непосредственно внутри программы.

После построения сеточной модели, она экспортируется для дальнейшего моделирование в ANSYS FLUENT.

### **Обсуждение результатов исследований**

В ходе моделирование было получено графическое изображение обтекание вращающегося цилиндра (рис.1) при следующих значениях аэродинамических параметров: скорость потока  $V$  - 5м/с,  $Re = 3,3 \cdot 10^4$ , частота вращения 1000 об/мин, интенсивность турбулентности 10%.

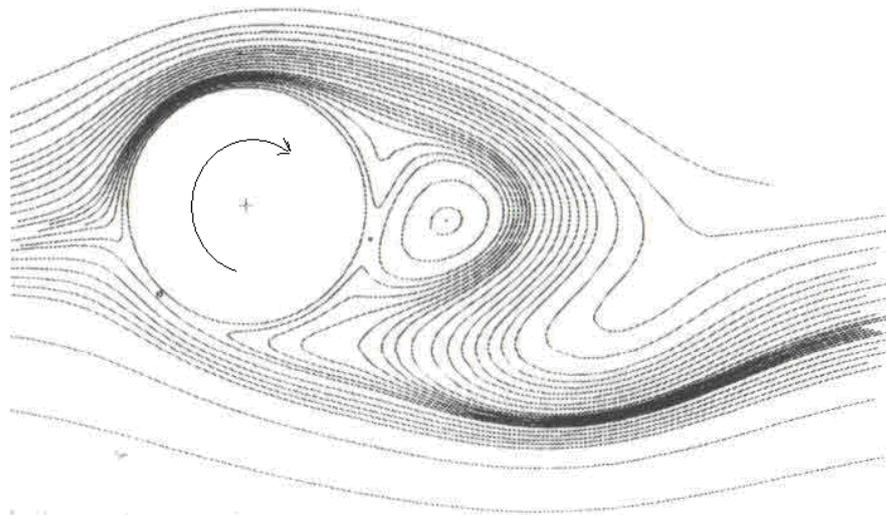


Рис. 1. Картина линий тока при обтекании вращающегося цилиндра

Анализ результатов численного решения задачи показывает, что вращение цилиндра приводит к захвату части прилегающей жидкости в сопутствующее вращательное движение.

Из картины хорошо видно нарушение симметрии потока, обусловленный вращательным движением. Четко прослеживается зона возвратных течений за цилиндром, отрывные явления, смещение зоны повышенных скоростей вверх по потоку в нижнюю область.

В результате моделирования построена также картина распределения давления в окрестности вращающегося цилиндра при обтекании турбулентным потоком воздуха (рис.2).

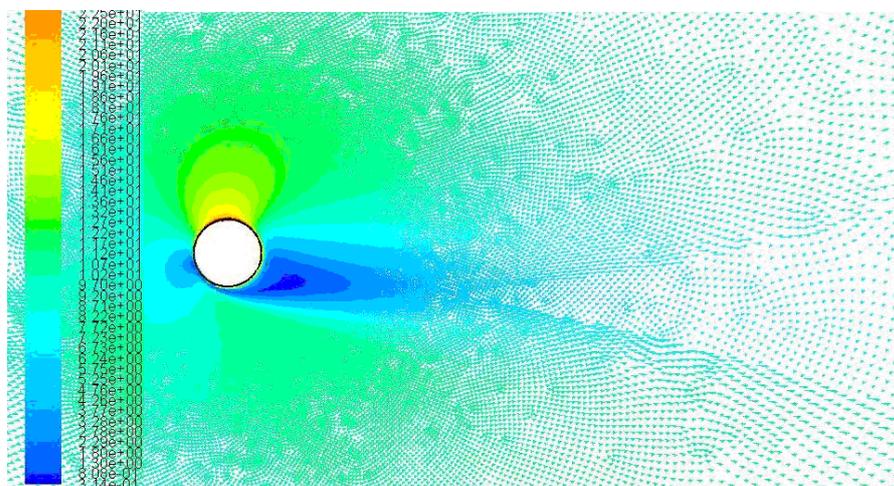


Рис. 2. Картина распределения давления при обтекании вращающегося цилиндра

Распределение областей повышенного и пониженного давлений вблизи поверхности цилиндра (рис.2) позволяет объяснить физическую природу появления сил лобового сопротивления и подъемной силы, а также вычислять их числовые значения. Значительный интерес представляет также распределение давления в турбулентном следе за цилиндром, где происходит появление циркуляционного вихря, а также возникает зона разряжения вниз по потоку.

На рисунках 3 и 4 приведены зависимости силы лобового сопротивления и подъемной силы вращающегося цилиндра от скорости потока, полученным экспериментальным путями с помощью численного моделирования данного процесса в программе FLUENT.

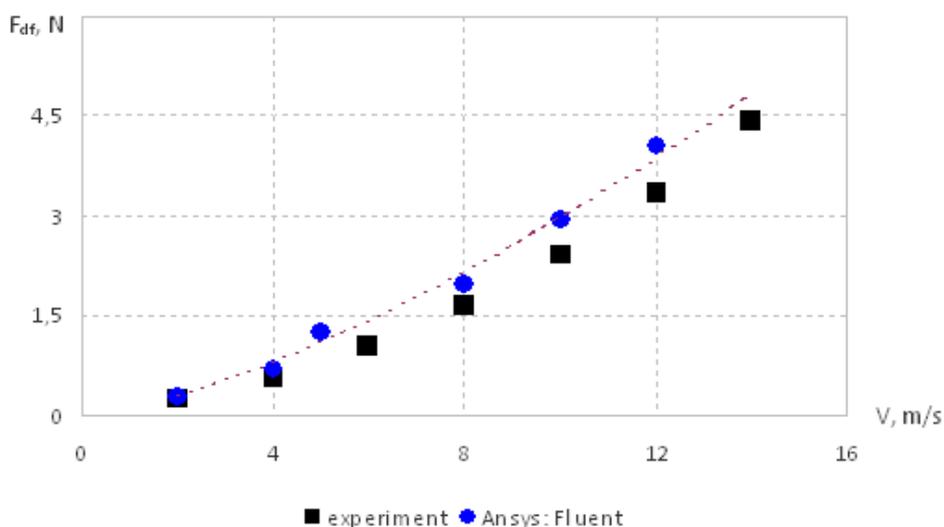


Рис. 3. Зависимость силы лобового сопротивления вращающегося цилиндра от скорости потока

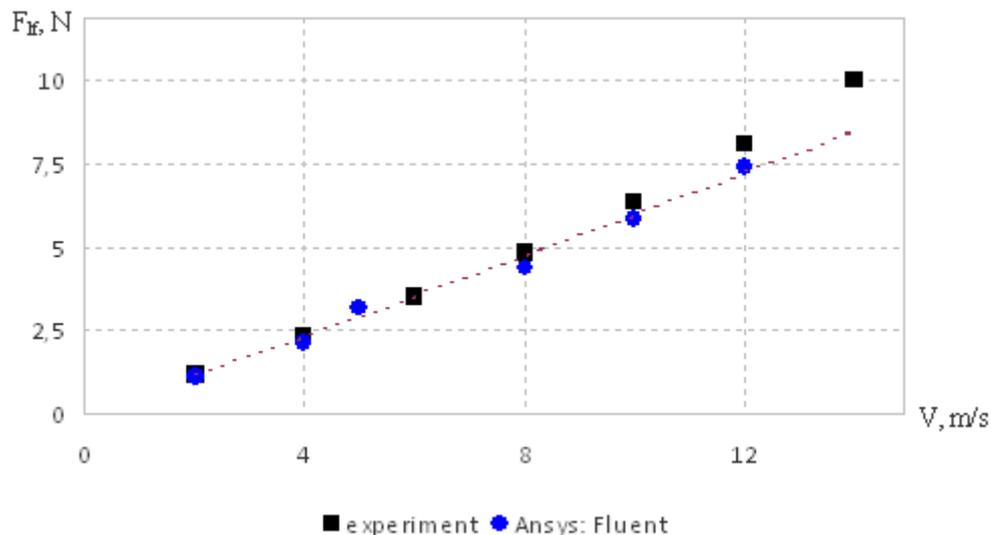


Рис. 4. Зависимость подъемной силы вращающегося цилиндра от скорости потока

Характер этих зависимостей показывает, что при увеличении скорости потока повышается сила лобового сопротивления и подъемная сила. Это связано с тем, что при обтекании цилиндра потоком воздуха на его поверхности появляются несимметричное распределение давления и поток завихряется. Как видно из рисунков экспериментальные и расчетные значения исследуемых параметров довольно близки.

Зависимость безразмерных коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы определяемых численным моделированием для двух значений интенсивности турбулентности представлены в графиках рис. 5-6. Здесь же приведены экспериментальные значения при начальной турбулентности потока 3%.

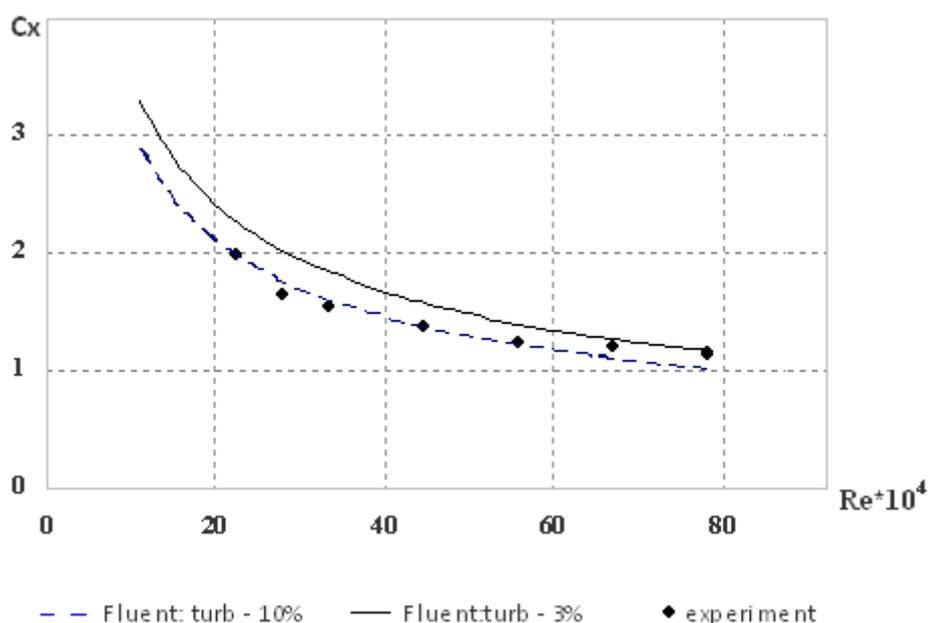


Рис.5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса

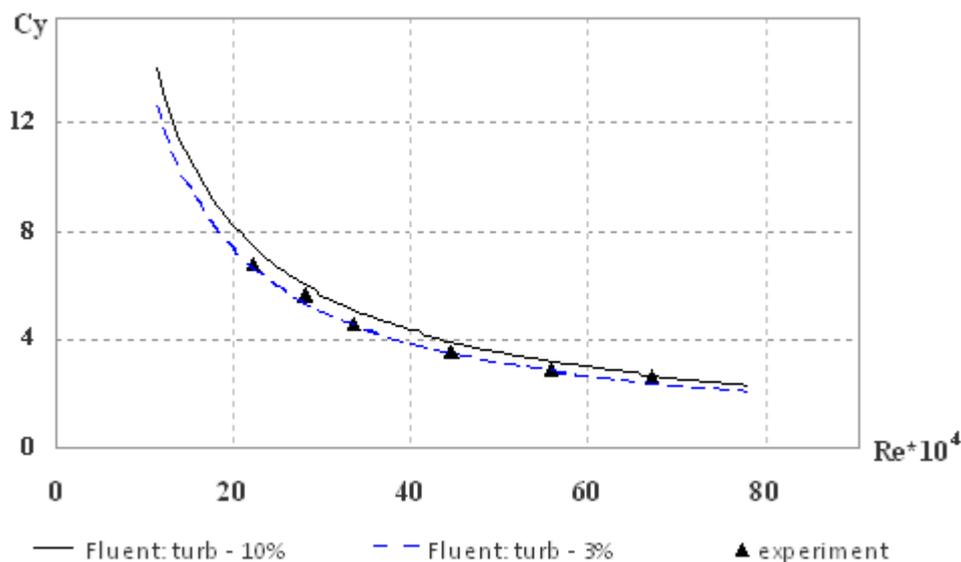


Рис. 6. Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса

Зависимости исследуемых параметров от числа Рейнольдса носит убывающий характер. Увеличение интенсивности турбулентности набегающего потока приводит к возрастанию изучаемых коэффициентов, что объясняется значительным нарушением симметрии потока и процессами интенсивного вихреобразования.

Видно, что экспериментальные данные и расчетные значения коэффициентов удовлетворительно согласуются.

### **Заключение**

В результате математического моделирования установлены закономерности обтекания вращающегося цилиндра в турбулентном потоке воздуха. Получены картина обтекания и поле давлений объясняющие физическую природу появления сил лобового сопротивления и подъемной силы. Полученные значения численного моделирования аэродинамических параметров удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

Результаты этих исследований показывают, что при малых значениях скорости потока, вращающийся цилиндр обладает относительно более высокими коэффициентами подъемной силы и эффект усиливается с возрастанием интенсивности турбулентности.

При оптимизации лобового сопротивления вращающихся цилиндров их можно эффективно использовать в качестве силового элемента ветроустановки.

### **Источники**

- [1] W.M. Swanson. The Magnus Effekt.-ASME. Engineering, 1961

[2] S.I. Isatayev, Zh.S. Akylbaev, A.Zh. Turmuhambetov. Aerohydrodynamics and Heat Exchange of Curvilinear Bodies. – Almaty: Gylym, 1996.

[3] K. Kussaiynov, N.K. Tanasheva, M.M.Turgunov, K.M. Shaimerdenova, A.R. Alibekova. The Effect of Porosity on the Aerodynamic Characteristics of a Rotating Cylinder. - *Modern Applied Science. - Canadian Center of Science and Education*, Vol. 9(2): 218-227, 2015.

[4] K. Kussaiynov, N.K. Tanasheva, M.M.Turgunov, A.R. Alibekova. The study of aerodynamic characteristics of rotating porous cylinder. *Technical Physics*, Vol.60 (5): 23-26, 2015.

[5] K.Kussaiynov, S.E. Sakipova, N.K.Tansykbaeva, A. Kussaiynova. Experimental research of aerodynamics of the system of the revolved cylinders in a turbulent stream: *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 7:577-580, 2012.

[6] L.V. Mikhnenko. Wind Turbine planetary type. *Bulletin of business life*, 23, 2004.

[7] L.V. Mikhnenko. Aerodynamic Magnus effect, as a basic principle of some aircraft and wind power devices, MGTUGA. 2008.

[8] N.M. Bychkov. Wind turbine with Magnus: 1. The results of modeling studies, *Thermophysics and Aeromechanics*, 11, 4, 583-596, 2004.

[9] N.M. Bychkov. Wind turbine with Magnus. 2. Features of the rotating cylinder. *Thermal physics and aerodynamics*, 12, 1, 2005.

[10] O.V. Baturin, N.V. Baturin, V.N. Matveev. Construction of computational models in the preprocessor Gambit universal software package Fluent: Tutorial: Publishing House of Samar. State. aerokosm. University, Samara, 172, 2009.

УДК 621.311

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-10КВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

<sup>1</sup>М. Е. Волгин, <sup>1</sup>Е. М. Волгина, <sup>1</sup>В.П. Марковский, <sup>1</sup>Н.А. Дубинец  
<sup>1</sup>НАО «Торайгыров университет», Республика Казахстан, г. Павлодар  
volgin\_m@mail.ru., volgina.em@mail.ru., wadim54@mail.ru

**Аннотация** В статье рассматривается вопрос повышения эффективности системы электроснабжения промышленного предприятия, которая определяется уровнем потерь электрической энергии в её элементах.

Одним из важнейших путей повышения эффективности систем электроснабжения и распределительных сетей, обеспечивающих передачу и распределение электроэнергии, является снижение расхода электрической энергии, который тратится на этот процесс. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях производят за счёт снижения реактивной составляющей

электрического тока, т.е. повышения  $\cos \varphi$ . ПУЭ рекомендует для этого в первую очередь использовать имеющиеся на предприятии синхронные двигатели, которые, как известно, могут вырабатывать и потреблять реактивную мощность в зависимости от величины тока возбуждения.

Решить поставленную задачу по минимизации потерь активной мощности в электрической сети целесообразно с использованием методов математического моделирования и математического программирования.

В статье приводятся основные черты метода критериального программирования для решения класса задач с положительной степенью трудности, который достаточно хорошо известен в электроэнергетике для решения оптимизационных задач. Особенностью данного метода является то, что кроме параметров режима, он позволяет найти критерии подобия целевой функции с последующим анализом полученных результатов оптимального решения.

Предлагается методика применения метода критериального программирования для решения задачи повышения эффективности электрической сети за счёт оптимального управления работой синхронных двигателей по режиму реактивной мощности.

**Ключевые слова:** электроснабжение, распределительная сеть, потери электроэнергии, реактивная мощность, критериальное программирование, целевая функция, матрица размерностей, минимизация функции, оптимальные параметры.

## MATHEMATICAL SOLUTIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF 6-10KV DISTRIBUTION NETWORKS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

M.E. Volgin, E.M. Volgina, V.P. Markovskiy, N.A. Dubinets  
"Toraigyrov University" NCJSC, Kazakhstan, Pavlodar  
volgin\_m@mail.ru., volgina.em@mail.ru., wadim54@mail.ru

**Annotation.** The article deals with the issue of increasing the efficiency of the power supply system of an industrial enterprise, which is determined by the level of electricity losses in its elements.

One of the most important ways to improve the efficiency of power supply systems and distribution networks that ensure the transmission and distribution of electricity is to reduce the consumption of electricity that is spent on this process. The reduction of electricity losses in electrical networks is carried out by reducing the reactive component of the current, i.e. increase  $\cos \varphi$ . The PUE recommends that, first of all, the synchronous motors available at the enterprise be used for this.

It is advisable to solve the problem of minimizing active power losses in the electrical network using the methods of mathematical modeling and mathematical programming.

The article presents the main features of the criterion programming method for solving a class of problems with a positive degree of difficulty, which is well known in the electric power industry for solving optimization problems.

A methodology for applying the method of criteria programming for solving the problem of increasing the efficiency of an electric network due to the optimal control of the operation of synchronous motors according to the reactive power mode is proposed.

**Key words:** power supply, distribution network, power losses, reactive power, criterion programming, objective function, dimension matrix, function minimization, optimal parameters.

## Введение

Эффективность системы электроснабжения определяется уровнем потерь электроэнергии в её элементах.

Одним из важнейших путей повышения эффективности систем электроснабжения и распределительных сетей, обеспечивающих передачу и распределение электроэнергии, является снижение расхода электроэнергии, который тратится на этот процесс. По мнению международных экспертов, относительные потери электроэнергии при ее передаче и распределении в электрических сетях большинства стран можно считать удовлетворительными, если они не превышают 4-5%. Потери на уровне 10% можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи по сетям электроэнергии.

Таким образом, одним из критериев при оценке эффективности электрических сетей и систем является уровень потерь энергии в них.

### **Основная часть**

#### **Потери электроэнергии в линиях**

На стадиях передачи и распределения электроэнергии потери в сетях РФ и РК в 1998 составили 16,2% от отпущенной электроэнергии. Для сравнения [1]: в сетях ФРГ эти потери составили 4,4%, Канады – 7,1% , а в сетях Японии на протяжении ряда последних лет не превышали 5,5%.

В таблице 1 приведена ориентировочная структура потерь по элементам электроэнергетической системы.

Таблица 1

Структура потерь электроэнергии по элементам электроэнергетической системы

Всего	В том числе			
	Линии электропередачи	Трансформаторы и автотрансформаторы	Реакторы, синхронные компенсаторы, СТК, силовые конденсаторы, счетчики, измерительные трансформаторы тока и напряжения	Собственные нужды подстанций
100%	65% из них 5% на корону	~30% из них половина - потери в стали	3%	2%

Передача значительного количества реактивной мощности по линиям и через трансформаторы сети электроснабжения невыгодна по следующим основным причинам:

а) возникают дополнительные потери активной мощности и энергии во всех элементах системы электроснабжения, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью;

б) возникают дополнительные потери напряжения.

в) загрузка реактивной мощностью линий электропередачи и трансформаторов сети электроснабжения уменьшает пропускную

способность сети, что в ряде случаев не позволяет использовать полную установленную мощность генераторов электрических станций.

Для устранения перечисленных причин, снижающих эффективность сетей электроснабжения, прибегают к увеличению коэффициента мощности. Его повышают без применения компенсирующих устройств и с применением компенсирующих устройств.

В первом случае выполняются следующие мероприятия:

а) упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования;

б) замена мало загруженных асинхронных двигателей двигателями меньшей мощности;

в) ограничение холостого хода двигателей;

г) применение синхронных двигателей вместо асинхронных той же мощности в случаях, когда это возможно по условиям технологического процесса;

д) повышение качества ремонта двигателей;

е) замена мало загруженных трансформаторов.

Во втором случае для повышения  $\cos \varphi$  в электрических сетях используют следующие технические средства – синхронные компенсаторы (СК), статическими компенсаторами (СТК), конденсаторными батареями (КБ), а также синхронные двигатели (СД), которые имеются на предприятии по технологическим требованиям. Как известно, СД могут как вырабатывать реактивную мощность, так и потреблять её. Эти режимы работы СД зависят от величины тока возбуждения.

В связи с вышеизложенным, важным вопросом при решении задачи эффективности электрической сети является оптимальное управление режимом реактивной мощности.

### **Использование методов математического программирования**

Поставленную задачу целесообразно решать с использованием методов математического программирования. Одним из методов является метод критериального программирования.

Основная задача данного метода формулируется следующим образом:

- найти минимальное значение функции

$$Y(X), X = (X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (1)$$

- при условии

$$X_1 > 0, X_2 > 0, \dots, X_m > 0,$$

- и ограничениях

$$g_1(X) \leq l, g_2(X) \leq l, \dots, g_p(X) \leq l.$$

При этом считается, что целевая функция  $Y(X)$  и ограничения  $g(X)$  выражаются положительными обобщенными полиномами вида

$$Y(X) = \sum_{i=1}^n A_i \prod_{j=1}^m X_j^{\alpha_{ij}}, \quad (2)$$

где  $A_i > 0$ ,  $\alpha_{ij}$  – произвольные вещественные числа;  $X_j$  – оптимизируемый параметр;  $n$  – число слагаемых целевой функции и ограничений;  $m$  – число оптимизируемых параметров;  $\alpha_{ij}$  – любое вещественное число.

Для определения минимума целевой функции в критериальном программировании (класс задач с ненулевой степенью трудности) применяется теория двойственности [5, 6], где прямая задача поиска оптимальных значений  $X_0$  заменяется определением компонент вектора критериев подобия  $\pi_0$  с последующим выявлением максимума такой мультипликативной функции  $D(\pi)$ , что:

$$D_{\max}(\pi_0) = Y_{\min}(X_0).$$

Функция  $D(\pi)$  при этом называется двойственной, а определение ее максимального значения и максимизирующего вектора  $\pi_0$  соответственно решением двойственной задачи.

Для целевой функции  $Y(X)$  и ограничений  $g(X)$  прямой задачи с положительной степенью трудности ( $d = n - m - 1 > 0$ ), что наиболее характерно для поставленных в энергетике технико-экономических задач оптимизации, общее решение двойственных ограничений будет иметь вид [4]:

$$\pi = b_0 + \sum_{j=1}^d c_j b_j, \quad (3)$$

где  $c_j$  –  $j$ -ая базисная переменная; имеет значение произвольного вещественного числа, удовлетворяющего условию неотрицательности:

$$b_{i0} + \sum_{j=1}^d c_j b_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

где  $b_0$  – вектор нормализации,  $b_{i0}$  – его  $i$ -ая компонента;  $b_j$  –  $j$ -ый вектор невязки,  $b_{ij}$  – его  $i$ -ая компонента.

При подстановке выражения (3) в решение двойственной задачи и после некоторых преобразований, получают выражение максимизирующего вектора  $\pi_0$  через обобщенные константы целевой функции и ограничений:

$$\prod_{i=1}^n \pi_i^{b_{ij}} = \prod_{i=1}^n A_i^{b_{ij}}. \quad (4)$$

При определении оптимальных значений переменных прямой задачи критериального программирования исходят из того, что

$$D(\pi_0)_{\max} = \prod_{i=1}^{n_1} \left( \frac{A_i}{\pi_i} \right)^{\pi_i} \cdot \prod_{k=1}^p (\lambda_k)^{\pi_k}, \quad (5)$$

$$Y_{\min}(X_0) = D_{\max}(\pi_0) = \sum_{i=1}^n A_i \prod_{j=1}^m X_{j0}^{a_{ji}}, \quad (6)$$

где  $X_0$  - искомый минимизирующий вектор основной задачи;  $n_1$  - число слагаемых целевой функции;  $p$  - число ограничений;  $\lambda_k$  -  $k$ -ое ограничение.

На основании определений критериев подобия  $\pi$  можно записать  $n$  уравнений вида

$$D_{\max}(\pi_0) \pi_{i0} = A_i \prod_{j=1}^m X_{j0}^{a_{ji}}, \quad (7)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Логарифмирование системы уравнений (7) определяет систему линейных уравнений относительно  $\ln X_{j0}$ :

$$\ln = \left( \frac{D_{\max}(\pi_0) \pi_{i0}}{A_i} \right) = \sum_{j=1}^m \alpha_{ji} \ln X_{j0}, \quad (8)$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ .

В этой системе уравнений  $(d + 1)$  уравнения являются линейно-зависимыми. Выделив из (8) систему  $m$  линейно независимых уравнений и решив ее, находят вектор решений относительно  $\ln X_{j0}$ :

$$B = \begin{vmatrix} \ln B_1 \\ \ln B_2 \\ \dots \\ \ln B_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \ln X_{10} \\ \ln X_{20} \\ \dots \\ \ln X_{m0} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Потенцирование полученного решения определяет координаты минимизирующей точки основной задачи оптимизации, т.е.  $X_{10}, X_{20}, X_{30}, \dots, X_{m0}$ .

### Алгоритм решения задачи

Теоретические положения критериального программирования достаточно полно изложены в [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], поэтому остановимся на алгоритме решения ниже поставленной задачи.

На рисунке 1 представлен магистральный участок распределительной сети 6-10 кВ. К магистрали подключены распределительные устройства №4, №5 и №6. К распределительным устройствам подключены синхронные двигатели, а также прочая нагрузка.

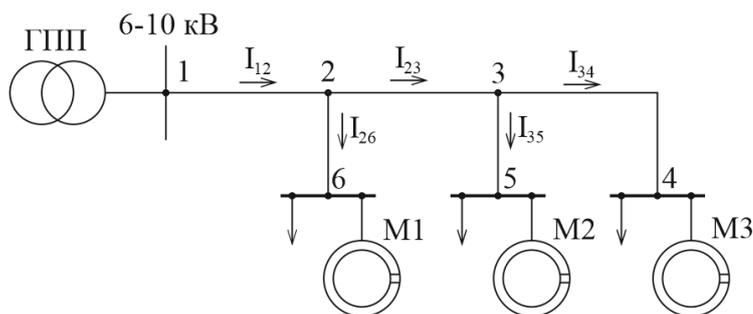


Рис.1. Схема участка распределительной сети

Задача формулируется следующим образом: оптимизировать режим электрической сети по реактивной мощности. Критерий оптимальности – минимум потерь активной мощности на участке распределительной сети.

Математическая модель электрической сети будет иметь вид:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n 3 \cdot r_i \cdot (I_{ia}^2 + I_{ip}^2),$$

при

$$I_{ia} \geq G_{ia}, \quad I_{ip} \geq G_{ip},$$

где  $r_i$  – активное сопротивление  $i$ -й ветви электрической сети;

$I_{ia}$ ,  $I_{ip}$  – соответственно активная и реактивная составляющие тока в  $i$ -й ветви;

$G_{ia}$ ,  $G_{ip}$  – соответственно активная и реактивная составляющие тока  $i$ -й ветви, определенные по расчетной схеме;

$n$  – число ветвей в электрической сети.

Как видно по математической модели, потери активной мощности в электрической сети состоят из двух составляющих: первая зависит от активной, а вторая – от реактивной мощности. Так как в рассматриваемой сети отсутствуют устройства, позволяющие регулировать потоки активной мощности в ветвях, которая зависит от производительности механизмов, то целесообразно исследовать только возможность уменьшения потерь за счет перераспределения потоков реактивной мощности. Таким образом,

задача минимизации потерь активной мощности свелась к определению оптимальных величин реактивной мощности, что можно осуществить за счёт синхронных двигателей.

### Результаты и обсуждения

Математическая модель для нашей задачи запишется в виде

$$\Delta P_p = 3 \cdot r_{12} \cdot I_{12p}^2 + 3 \cdot r_{23} \cdot I_{23p}^2 + 3 \cdot r_{34} \cdot I_{34p}^2 + 3 \cdot r_{35} \cdot I_{35p}^2 + 3 \cdot r_{26} \cdot I_{26p}^2,$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} I_{12p}^{-1} \cdot G_{12p} &\leq 1; & I_{23p}^{-1} \cdot G_{23p} &\leq 1; & I_{34p}^{-1} \cdot G_{34p} &\leq 1; \\ I_{35p}^{-1} \cdot G_{35p} &\leq 1; & I_{26p}^{-1} \cdot G_{26p} &\leq 1. \end{aligned}$$

Независимыми переменными в данной задаче являются токи в ветвях, их число равно пяти, всего членов, включая ограничения – 10. Степень трудности задачи  $d$  [4] будет равна:

$$d = 10 - 5 - 1 = 4.$$

Этой модели с ограничениями соответствует матрица размерностей (матрица показателей степеней при оптимизируемых параметрах) [3,4, 9]:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Преобразованная методом Гаусса-Жордана, она будет иметь вид

$$\alpha' = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Взяв с обратным знаком матрицу, лежащую справа от единичной и дописав снизу единичную матрицу размером  $[(d+1) \times (d+1)]$ , получим матрицу  $\beta$  запишется

$$\beta = \begin{vmatrix} 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (12)$$

Векторы нормализации  $b_0$  и невязки  $b_j$  определяются по известным соотношениям из матрицы  $\beta$ . Для получения вектора нормализации нужно взять любой вектор столбец матрицы и разделить его на сумму его первых компонент. Для получения  $j$  – го вектора невязки нужно взять оставшийся вектор-столбец матрицы  $\beta$  и вычесть из него произведение суммы его первых компонент на вектор нормализации. Получим:

$$b_0 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad b_1 = \begin{vmatrix} -1/2 \\ 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad b_2 = \begin{vmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad b_3 = \begin{vmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1/2 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad b_4 = \begin{vmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/2 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Согласно (3) вектор критериев подобия в общем случае запишется

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{1}{2}C_4 \\ \frac{1}{2}C_1 \\ \frac{1}{2}C_2 \\ \frac{1}{2}C_3 \\ \frac{1}{2}C_4 \\ 2 - C_1 - C_2 - C_3 - C_4 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Определим максимизирующий вектор  $\pi$ . Для этого согласно выражения (4) запишем систему уравнений

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{1}{2}C_4\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2}C_1\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 - C_1 - C_2 - C_3)^{-1} \cdot C_1 = \\ = (3r_{12})^{-\frac{1}{2}} \cdot (3r_{23})^{-\frac{1}{2}} \cdot G_{12}^{-1} \cdot G_{23}; \\ \left(1 - \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{1}{2}C_4\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2}C_2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 - C_1 - C_2 - C_3)^{-1} \cdot C_2 = \\ = (3r_{12})^{-\frac{1}{2}} \cdot (3r_{34})^{-\frac{1}{2}} \cdot G_{12}^{-1} \cdot G_{34}; \\ \left(1 - \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{1}{2}C_4\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2}C_3\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 - C_1 - C_2 - C_3)^{-1} \cdot C_3 = \\ = (3r_{12})^{-\frac{1}{2}} \cdot (3r_{35})^{-\frac{1}{2}} \cdot G_{12}^{-1} \cdot G_{35}; \\ \left(1 - \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{1}{2}C_4\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2}C_4\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 - C_1 - C_2 - C_3)^{-1} \cdot C_4 = \\ = (3r_{12})^{-\frac{1}{2}} \cdot (3r_{26})^{-\frac{1}{2}} \cdot G_{12}^{-1} \cdot G_{26}. \end{cases} \quad (15)$$

### Обсуждение

Задаваясь исходной информацией о ветвях электрической сети и решая систему (15) относительно переменных  $C$ , подставляя их значения в выражение для вектора критериев подобия (14), получают численные значения его компонент. Далее используя выражения (5), (6), (7) (8) и (8) в конечном итоге определяются оптимальные значения реактивных составляющих токов в ветвях распределительной сети. Таким образом, получено решение на поставленную задачу по минимизации потерь активной мощности в электрической сети с использованием методов математического моделирования и математического программирования.

### Заключение

С помощью метода критериального программирования разработан пример решения задачи повышения эффективности электрической сети за счёт оптимального управления работой синхронных двигателей по режиму реактивной мощности.

### Источники

[1] Белей, В. Ф. Научное обоснование методов повышения эффективности электротехнических комплексов и систем. // Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Калининград, 2004 . 372 с.

[2] Электротехнический справочник: справочник: в 3 т. / И.Н. Орлова и др.; ред. И.Н. Орлова, – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с. – 3 т. кн. 1.

[3] Критериальный метод анализа технико-экономических задач в электрических сетях и системах: учебное пособие / Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина. – Харьков: Факт, 2014. – 88 с

[4] Ю. Н., Лежнюк, П. Д., Овчинников, В. В **Астахов**. Решение оптимизационных задач в электроэнергетике критериальным анализом. Депон. 29 марта 1979, ИНФОРМЭНСРГО № Д/585. – 41 с.

[5] Даффен., Р., Питерсон., Э., Зеннер, К. Геометрическое программирование. М., Мир, 1972. – 312 с.

[6] Зеннер, К. Геометрическое программирование и техническое проектирование. М., «Мир», 1973, – 112 с.

[7] Астахов, Ю. Н., Веников, В. А. и др. Электрические системы. Кибернетика электрических систем. М., "Высшая школа", 1974. – 327 с

[8] Астахов, Ю. Н., Гордиевский, И. Г., Карасёв, Д. Д. и др. Критериальный анализ технико-экономических задач в энергетике. В кн. Кибернетику на службу коммунизму. Т 7, М., «Энергия», 1973, – 232 с.

[9] Утегулов, Б. Б., Волгин, М. Е. Методика критериального программирования оптимизации параметров систем электроснабжения угольных разрезов. Вестник ПГУ. Научный журнал. Павлодарского Государственного университета им. С. Торайгырова. № 2. Павлодар. 2001.

[10] Астахов, Ю. Н., Лежнюк, П. Д., Ярных, Л. В. Оптимизация режимов электрических сетей методом критериального программирования. Изв. АН СССР. «Энергетика и транспорт», 1979, №1.

[8] Astahov, Ju. N., Gordievskij, I. G., Karasjov, D. D. i dr. Kriterial'nyj analiz tehniko-jekonomicheskikh zadach v jenergetike. V kN. Kibernetiku na sluzhbu kommunizmu. T 7, M., «Jenergija», 1973, – 232 p.

[9] Utegulov, B. B., Volgin, M. E. Metodika kriterial'nogo programmirovanija optimizacii parametrov sistem jelektrosnabzhenija ugol'nyh razrezov. Vestnik PGU. Nauchnyj zhurnal. Pavlodarskogo Gosudarstvennogo universiteta im. S. Torajgyrova. № 2. Pavlodar. 2001.

[10] Astahov, Ju. N., Lezhnjuk, P. D., Jarnyh, L. V. Optimizacija rezhimov jelektricheskikh setej metodom kriterial'nogo programmirovaniya. Izv. AN SSSR. «Jenergetika i transport», 1979, №1.

УДК 621.31

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ГИБКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 КВ Г. АТЫРАУ

Кенесов Е.К., Михалкова Е.Г., Карибаев Т.Д.

НАО «Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева»  
yer.kenessov@aes.kz, e.mikhalkova@aes.kz, t.karibaev@aes.kz

***Аннотация.** Одним из основных вопросов, связанных с повышением коэффициента мощности в электрических сетях, является компенсация реактивной мощности (КРМ). В работе приведена структура системы, которая обеспечивает гибкую компенсацию реактивной мощности в распределительных сетях 0,4 кВ. Разработан алгоритм управления системой гибкой КРМ, реализован программно-технический комплекс (ПТК), состоящий из батареи статических конденсаторов, программируемого логического контроллера (ПЛК) и системы сбора и передачи информации на базе SCADA. Произведен экспериментальный ввод системы для участка распределительных сетей 0,4 кВ г. Атырау. Согласно историческим данным полученным с разработанной SCADA системы выполнена оценка эффективности установленной системы гибкой компенсации реактивной мощности.*

***Ключевые слова.** Реактивная мощность, распределительные сети, компенсация реактивной мощности, система гибкой компенсации реактивной мощности*

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR FLEXIBLE COMPENSATION OF REACTIVE POWER FOR 0.4 KV ELECTRIC NETWORKS OF ATYRAU CITY

Kenessov E.K., Mikhalkova E.G., Karibaev T. D.

Non-profit JSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications  
named after Gumarbek Daukeev»  
yer.kenessov@aes.kz, e.mikhalkova@aes.kz, t.karibaev@aes.kz

***Annotation.** One of the main issues related to increasing the power factor in electrical networks is reactive power compensation (RPC). The paper presents the structure of the system, which provides flexible reactive power compensation in 0.4 kV distribution networks. A control algorithm for a flexible CRM system has been developed, a software and hardware complex (STC), consisting of a battery of static capacitors, a programmable logic controller (PLC) and a SCADA-based information collection and transmission system has been implemented. An experimental commissioning of the system for the section of distribution networks 0.4 kV in Atyrau was made. According to the historical data obtained from the developed SCADA system, the effectiveness of the installed flexible reactive power compensation system was evaluated.*

*Key words. Reactive power, distribution networks, reactive power compensation, flexible reactive power compensation system*

## **Введение**

Реактивная мощность является непроизводительной составляющей мгновенной мощности и способствует повышенным уровням загрузки элементов сети ввиду протекания дополнительных токов, вследствие чего возникают дополнительные активные потери электроэнергии, результатом таких потерь становится уменьшение пропускной способности элементов сети и коэффициента мощности. В последние годы не проявлялось особого интереса к вопросу компенсации реактивной мощности в распределительных сетях 0,4 кВ, в связи с тем что характер нагрузки в таких сетях по большей части являлся активным. На сегодняшний день характер нагрузки в распределительных сетях значительно изменился вследствие распространения новых видов приемников электроэнергии (холодильные машины, кондиционеры, микроволновые печи, компьютеры, стиральные машины и т.п), потребляющих помимо активной также и немалое количество реактивной мощности. Согласно с [1] нормативное значение коэффициента мощности для электрических сетей 0,4 кВ должно превышать 0,93, при этом по различным экспертным оценкам коэффициент мощности в распределительных электрических сетях имеет значение примерно 0,8–0,85 ( $\text{tg } \varphi = 0,75\text{--}0,62$ ) [2]. Отсюда следует что для распределительных сетей целесообразно использование компенсации реактивной мощности в целях улучшения показателя коэффициента мощности в сети. На сегодняшний день существует 2 способа компенсации – динамическая и статическая. Динамическая компенсация реактивной мощности представляет собой простой метод, при котором батареи статических конденсаторов включаются в сеть или отключаются от нее посредством коммутации автоматических выключателей, реле, которые обладают медленным откликом и вместе с этим требуют частого обслуживания. Метод динамической компенсации реактивной мощности ограничивается «неточной» компенсацией связанной с изменением потребляемой нагрузки в сетях. Другим способом является использование статической компенсации состоящей из конденсаторов постоянной емкости для точной и плавной компенсации реактивной мощности. Недостатком статической компенсации является то, что при неправильном выборе мощности конденсаторов появляется риск недокомпенсации или перекомпенсации реактивной мощности, что приведет к невыполнению установленных значений  $\cos(\varphi)$  и дополнительным нагрузочным потерям электроэнергии в электрических сетях.

В данной статье рассматривается система «гибкой» КРМ, сочетающая в себе оба вышеописанных способов компенсации реактивной мощности. Реализация системы предлагается за счет использования интеллектуальных электрических систем, а именно технологии IoT.

## **Применение технологии IoT для реализации интеллектуальных систем**

Технологии IoT (Internet of Things) - концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Технология IoT широко распространена во многих областях, таких как отслеживание транспортных средств, дистанционное управление автоматизированными устройствами, машинами или системами. Методы передачи данных с использованием технологии IoT в основном используют компьютеры, мобильные телефоны, дополнительное аппаратное обеспечение, удаленный мониторинг и периодические измерения. (приложения для умного дома). Для различных отраслей с высокими уровнями риска (нефтегазовая, металлургическая, химическая) решения IoT обеспечивают практически полную видимость рабочих процессов и операции. Информация передаваемая в режиме реального времени позволит заранее выявлять неполадки и устранять их. Технологии IoT находят достаточно широкое применение и в сфере интеллектуальных электрических сетей, они предлагают возможности для мониторинга распределенной генерации в сетях с помощью средств удаленного считывания и отключения нагрузок в аварийных ситуациях [3]. Кроме того, в таких сетях выполняется прогноз спроса о производстве и потреблении энергии с использованием исторических данных, а баланс между поставкой энергии и спросом на нагрузку обеспечивается точным управлением генерирующих мощностей [4,5]. При эксплуатации таких систем широко распространено удаленное управление и чтение. Интеллектуальные измерения и управление данными наряду с двунаправленной связью обеспечивают ряд упрощений в производстве, передаче и распределении энергии [6,7]. Например, можно избежать перебоев в электроснабжении, применяя потребительский порог энергопотребления в случае отсутствия энергии, а также предотвратить длительные отключения абонентов за счет сокращения времени простоя, вызванного перегрузкой [8,9]. Помимо этого, накопление энергии является еще одной формой сетевого баланса путем регулирования подачи энергии и потребности в нагрузке в каждом иерархическом управлении частотой в микросетях [10].

### **Структура системы гибкой КРМ в распределительных сетях**

Потоки реактивной мощности в сетях сильно влияют на режим и напряжения в системе. Следовательно, потокораспределение реактивной мощности в системе может рассматриваться как задача оптимизации. Регулирование потоков реактивной мощности увеличивает стабильность и надежность электрических сетей. Главной задачей регулирования потоков реактивных мощностей в распределительных сетях является обеспечение эффективного энергоснабжения за счет современных технологии интеллектуальных систем управления. В связи с вышеуказанными

факторами для городской распределительной сети была разработана система гибкой компенсации реактивной мощности, которая заключается в использовании обоих способов компенсации реактивной мощности и их связью со SCADA системами. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных) - программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. На рисунке 1 показана блок-схема алгоритма системы гибкого управления компенсацией реактивной мощности.

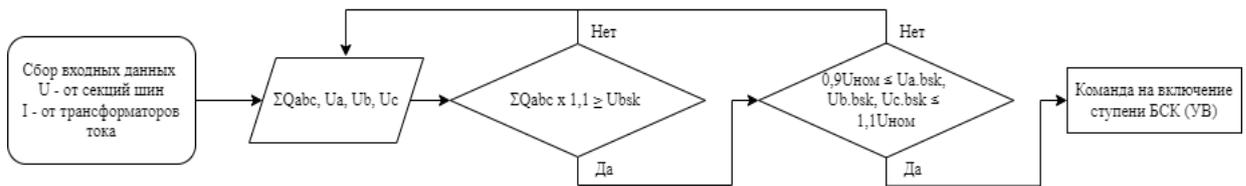


Рис. 1. Блок-схема алгоритма системы гибкого управления компенсацией реактивной мощности

Модуль измерения электрических параметров передает информацию о состоянии сети в ПЛК. В свою очередь ПЛК принимает решение о подключении (или отключении) БСК в сеть на местном уровне и отправляет данные в ПК оператора для верификации локального решения ПЛК.

Для реализации подсистемы связи с ТП использован GPRS-модем и сервер OPC, с которым связан ПК оператора состоящий из специализированного ПО на основе SCADA запрашивающего данные о текущих измерениях потребляемой активной мощности (P), реактивной мощности (Q), напряжения (U) и тока (I) в заданном интервале времени. OPC (Open Platform Communications) – семейство программных технологий, обеспечивающих единый интерфейс управления объектами автоматизации и технологическими процессами. Основной целью стандарта OPC, является обеспечение возможности совместной работы средств промышленной автоматизации, работающих на разных платформах, в разных сетях и выпускаемых разными компаниями. Система гибкой компенсации может функционировать как статическая, так и динамическая в зависимости от характера потребляемой нагрузки. Применение централизованного управления компенсации реактивной мощности дает возможность анализировать разные временных отрезки и со временем оптимизировать количество переключений БСК и компенсируемой реактивной мощности, в следствии чего ступени регулирования становятся плавными. Далее по результатам решения управляющие команды направляют на нижний уровень трансформаторной подстанции сигналы о работе конденсаторов. На нижнем уровне системы

гибкой компенсации реактивной мощности в трансформаторной подстанции находится шкаф управления конденсаторными батареями, который определяет управляющие воздействия для конденсаторов на основе работы локального алгоритма управления. Нижний уровень системы гибкой компенсации реактивной мощности представлен на рис. 2.

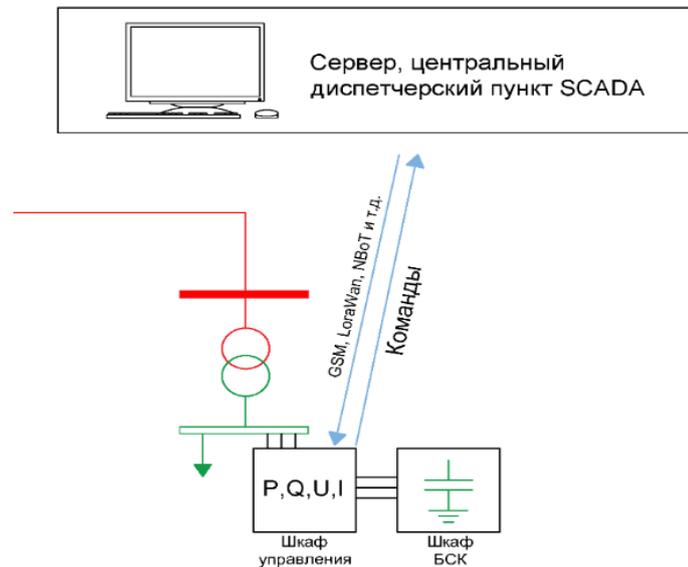


Рис. 2. Нижний уровень системы гибкой компенсации реактивной мощности

В системе дополнительно разработан локальный алгоритм управления для повышения безопасности работы электрических сетей на случай потери связи с центральным сервером. Алгоритм разработан в ПО CoDeSys – это интегрированная среда разработки (IDE) приложений для программируемых контроллеров. CoDeSys поддерживает все 5 языков программирования стандарта МЭК 61131-3 (LD, FBD, IL, ST, SFC) и включает дополнительный язык CFC. На сегодняшний день Алгоритм работает с помощью блока получения исходных данных измерения по сети, блока уставок и ограничений в сети, блока сравнения, блока гистерезиса, блока принятия решений для управления контакторами, блока анализа событий и блока распределения для каждого ТП. При согласовании отправленного на нижний уровень управляющего воздействия с работой локального алгоритма идет команда на включение конденсаторных батарей. Важным дополнением в алгоритм стала функция контроля влияния на качество электроэнергии, а именно контроль за уровнем напряжения после включения батарей статических конденсаторов. На рис. 3 приведен алгоритм локального (нижнего уровня) управления.

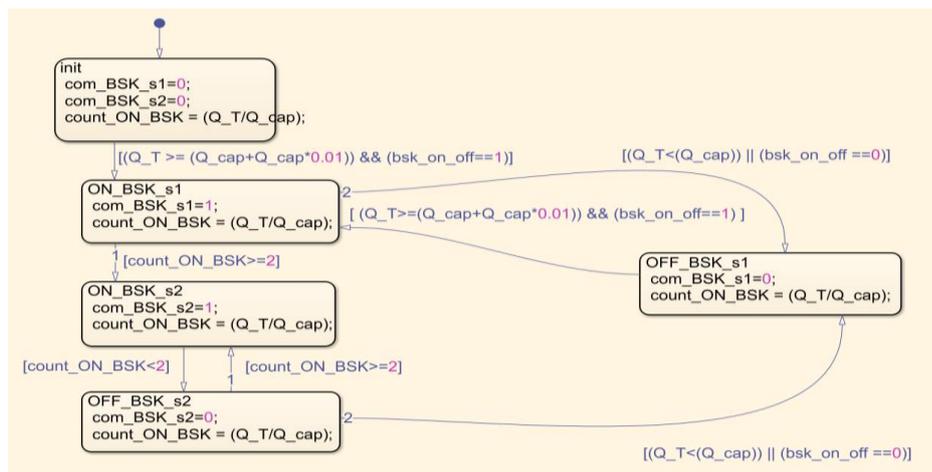


Рис. 3. Алгоритм нижнего уровня управления переключениями контакторов БСК

### Экспериментальное исследование эффективности разработанной системы гибкой компенсации реактивной мощности для электрических сетей 0,4 кВ г. Атырау

Экспериментальный ввод системы произведен для участка распределительных сетей 0,4 кВ г. Атырау. Участок распределительной сети получает питание с РП «ПС-7» и состоит из 4-х фидеров (ф-701, ф-702, ф-703 и ф-709) и 11 трансформаторных подстанции 6/0,4 кВ. Выбор оптимального размещения устройств компенсации реактивной мощности, способа их расстановки и номинальных мощностей БСК для участка электрических сетей 0,4 кВ приведен в [11]. На рис. 9 представлен участок электрических сетей 0,4 кВ для которого реализована система гибкой компенсации реактивной мощности в г. Атырау

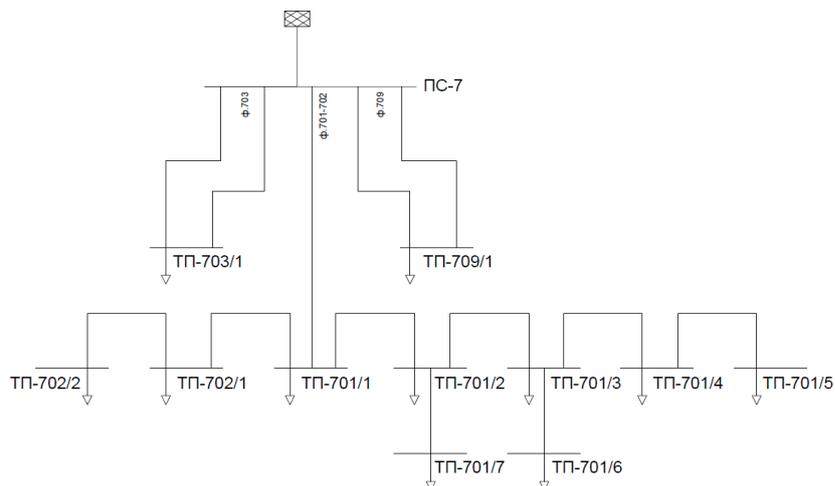


Рис. 2. Участок распределительной сети 6/0,4 кВ в г. Атырау

По результатам проведенных в [11] расчетов выбрана ТП с наименьшим показателем  $\cos(\phi)$  - ТП-701/5. Разработана система гибкой компенсации реактивной мощности, связанная с системой сбора и передачи информации на базе Rapid SCADA.

В период апробации и тестирования системы, произведена наладка связи GPRS модема с сервером OPC. Система гибкой компенсации также

включает в себя программно-технический комплекс (ПТК) состоящий из батареи статических конденсаторов, подключенных к шинам 0,4 кВ трансформаторной подстанции (ТП) через контакторы и автоматические выключатели. Контакторы отвечают за включение и отключение БСК в сеть с помощью сигнала от программируемого логического контроллера (ПЛК). Экспериментальная установка системы гибкой компенсации реактивной мощности на ТП-701/5 представлена на рис. 4.



Рис. 4. Экспериментальная установка системы гибкой компенсации реактивной мощности на ТП-701/5

Разработан интерфейс SCADA системы включающий в себя графическое представление осуществляющее сбор данных, которые отображаются на рабочей станции оператора для управления БСК. Мнемосхема состоит из текстовых и графических элементов, которые имеют множество свойств, определяющих их внешний вид и поведение. На рис. 5 показана разработанная функционирующая мнемосхема ТП, работающая в автоматическом режиме.

Состав нагрузки выбранных участков в основном коммунально-бытовой и двигательный. Нынешние электроприемники коммунально-бытовой и моторной нагрузки имеют порядочную долю потребления реактивной мощности, что является ключевым аспектом для установки систем компенсации реактивной мощности.

Главным вопросом исследования эффективности ввода системы гибкой КРМ является опытное подтверждение повышения коэффициента мощности и пропускной способности сети за счет снижения потребления реактивной мощности из внешней сети. На рис. 6 показано состояние работы одной из ступеней системы гибкой компенсации реактивной мощности, суточный график получен из разработанной SCADA системы.

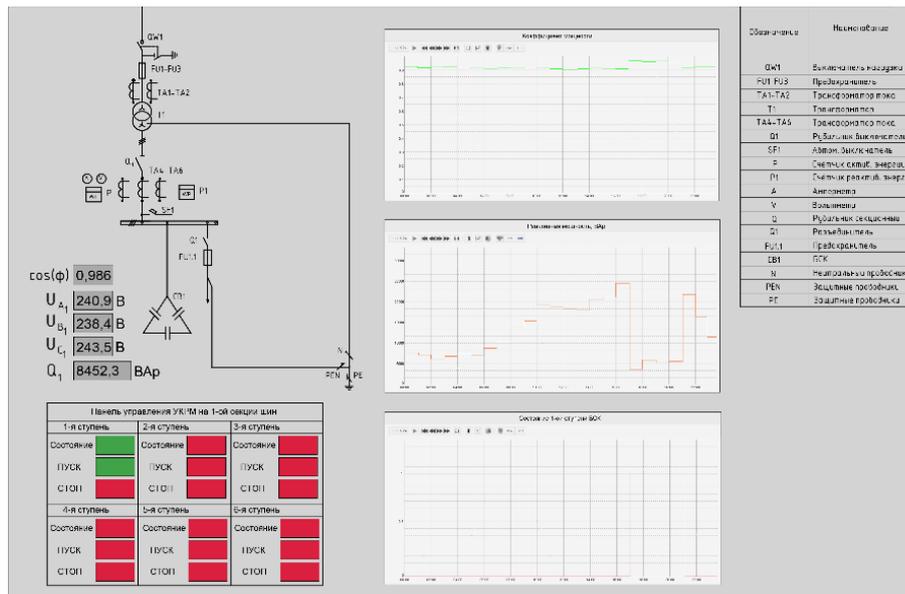


Рис. 5. Web представление мнемосхемы для системы гибкой КРМ

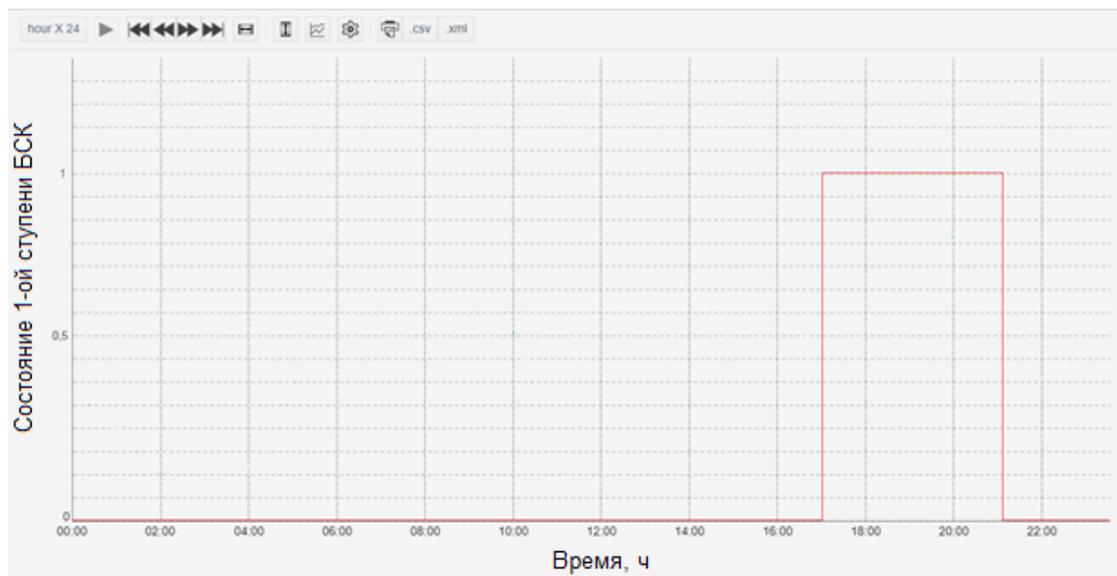


Рис. 6. Изменение состояния одной из ступеней БСК в системе гибкой КРМ (исторические данные с системы SCADA)

График исторических данных о состоянии ступени БСК полученного из SCADA системы формируется исходя из последнего принятого сигнала за каждый час, то есть система гибкой КРМ каждый час направляет на ПК оператора последний замер с шин ТП. Из рис. 6 видно что система была активна с 17:00 до 21:00. Ниже на рис. 7 представлен график изменения потребляемой реактивной мощности на ТП-701/5.

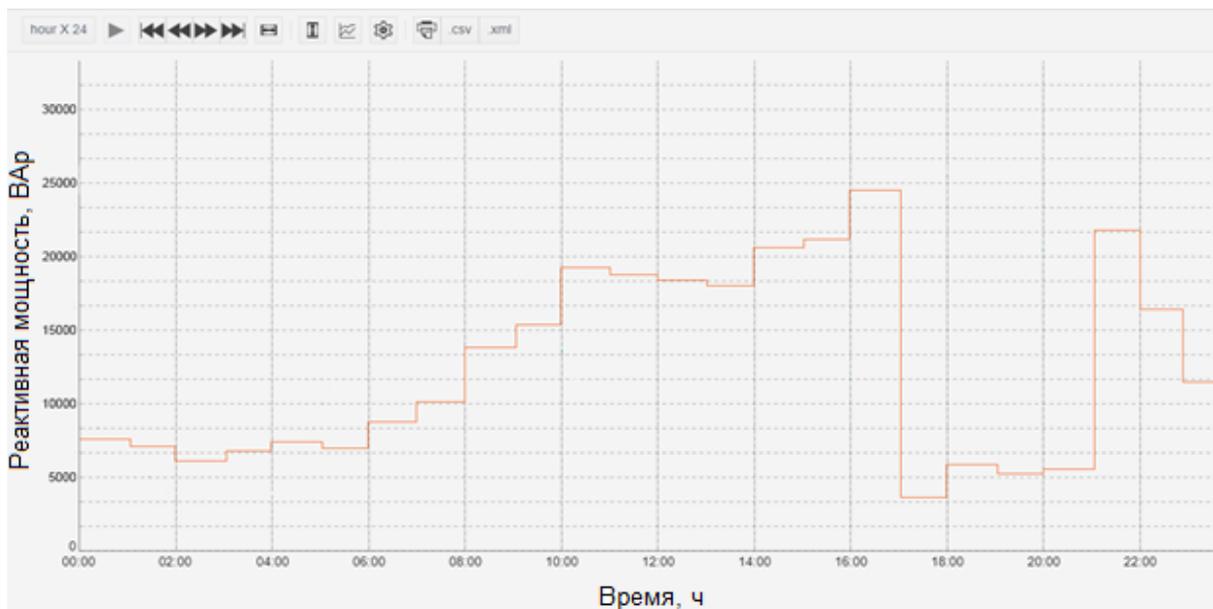


Рис. 7. График потребляемой реактивной мощности с шин ТП-701/5 (исторические данные с системы SCADA)

Из рис. 7 заметно резкое уменьшение потребления реактивной мощности с 17:00 до 21:00, следовательно в данный период была превышена заданная уставка по потреблению реактивной мощности, то есть потребление превысило номинальную мощность установленной ступени БСК что привело к срабатыванию установленной системы. На рис. 8 показаны исторические данные изменения коэффициента мощности на шинах ТП.

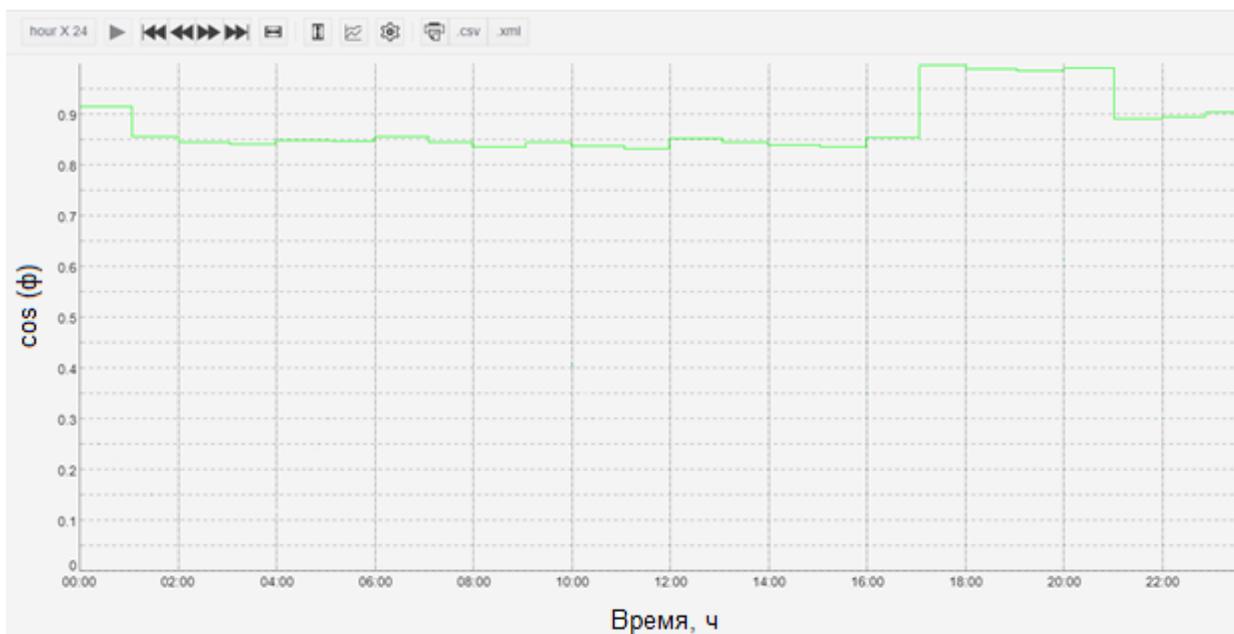


Рис.8. График изменения коэффициента мощности на шинах ТП-701/5 (исторические данные с системы SCADA)

На рис. 8 можно наблюдать повышение коэффициента мощности с 0,85 до 0,98 в момент работы системы гибкой компенсации.

## Заключение

В результате проведенной работы разработаны основные принципы и архитектура системы гибкой компенсации реактивной мощности, разработана система сбора и передачи информации с локальной передающей станцией, архитектура средств связи с диспетчерским пунктом. Создана система сбора и передачи информации на базе Rapid SCADA. Реализован программно-технический комплекс (ПТК).

Произведен экспериментальный ввод разработанной системы для распределительных сетей 0,4 кВ г. Атырау. Согласно историческим данным, полученным с системы SCADA, произведена оценка эффективности установленной системы гибкой компенсации реактивной мощности. Можно сделать вывод что в момент работы системы  $\cos(\varphi)$  в сети увеличился с 0,85 до 0,98.

## Источники

[1] Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 31 марта 2015 года № 393. / Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 21 мая 2015 года № 11108.

[2] Овсейчук, В., Трофимов, Г., Кац, А., Винер, И., Укасов, Р., & Шимко, А. (2008). Компенсация реактивной мощности // Новости электротехники, (4), 52.

[3] Ancillotti E, Bruno R, Conti M. The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges. *ComputCommun* 2013;36(17–18):1665–97.

[4] Workers M, Forum C, Ground C. a Road Map To Integration. no. june; 2014

[5] Khan MF, Jain A, Aranuchalam V, Paventhan A. Communication technologies for smart metering infrastructure. In: *Proceedings of the 2014 IEEE students' conf. electr. electron. comput. sci.*; 2014. p. 1–5

[6] Gharavi H, Ghafurian R. Smart grid: the electric energy system of the future. *Proc IEEE* 2011;99(6):917–21.

[7] Rietveld Gert, Braun Jean-Pierre, Martin Ricardo, Wright Paul, Heins Wiebke, Ell Nikola, Clarkson Paul, Zisky Norbert. Measurement infrastructure to support the reliable operation of smart electrical grids. *IEEE Trans InstrumMeas* 2015;64(6):1355–63.

[8] Jang BW, Shin YS, Kang ST, Choi JS. Design and implementation of building energy management system with quality of experience power scheduling model to prevent the blackout in smart grid network, 16th International Conference on Advanced Communication Technology, PhonixPark, Pyeong Chang, South Korea, February 16-19 2014.

[9] Bae Hyoungchel, Yoon Jongha, Lee Yunseong, Lee Juho, Kim Taejin, Yu Jeongseok, Cho Sungrae, Bae H, Yoon J, Lee Y, Lee J, Kim T, Yu J, Cho S.

Userfriendly demand side management for smart grid networks. In: Proceedings of int. conf. inf. netw.; 2014. p. 481–485.

[9] Jamnani J. G., Pandya M. Coordination of SVC and TCSC for management of power flow by particle swarm optimization //Energy Procedia. – 2019. – Т. 156. – С. 321-326.

[10] Palizban O, Kauhaniemi K, Guerrero JM. Microgrids in active network management – Part I: hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. Renew Sustain Energy Rev 2014; 36:428–39.

[11] Е. Г. Михалкова, Е.К. Кенесов, О.Д. Баймаханов. Определение эффективности расстановки компенсирующих устройств для оптимизации работы участка электрических сетей 6/0,4 кВ // Вестник Алматинского университета энергетики и связи № 1(56). 2022.

УДК 620.9

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Д.И. Семин, Р.Р. Гибадуллин, В.А. Гаврилов

Казанский государственный энергетический университет

*pilgrim.10@inbox.ru, gibadullin.rr90@mail.ru, 2s19gavr@gmail.com*

***Аннотация.** Вопрос цифровизации и автоматизации в настоящее время актуален в любых сферах жизнедеятельности человека. Вне всяких сомнений, эта тема актуальна и для энергетики. Подтверждение этому можно найти как в исследованиях международных компаний, так и в государственных документах. Например, в Энергетической стратегии РФ до 2035 года среди прочих задач явно обозначены и задачи по цифровизации и автоматизации. А согласно исследованиям IDC, международной исследовательской компании в сфере информационных технологий и телекоммуникаций, к 2023 году ожидается четырехкратный по сравнению с 2018 годом рост спроса на цифровую трансформацию промышленности. Это так же подтверждают и исследования НИУ ВШЭ.*

*Одним из главных трендов цифровизации в промышленности является технология цифрового двойника предприятия. Данная технология уже внедряется крупными компаниями. Так, например, «Газпромнефть» приступил к созданию цифровой интегрированной модели восточного участка Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, «Роснефть» так же запустила работы по цифровому месторождению в Башкирии с целью повышения количества дистанционно управляемых объектов на 60% и повышения на 5% энергоэффективности процессов добычи нефти.*

*Само понятие «цифровой двойник» многогранно и имеет множество вариаций. Некоторые российские и зарубежные авторы утверждают, что для чтобы программный продукт стал цифровым двойником, необходимо, чтобы он имел реальную связь со своим физическим объектом. Другая часть авторов считает, что под определение «Цифрового двойника» попадают и чисто виртуальные продукты, имитирующие реальный физический продукт. В статье приведен сравнительный анализ программных продуктов, позволяющих создавать имитационные модели производств и промышленных предприятия и приведен подход к созданию простой*

имитационной модели ветряной электростанции для ее технического обслуживания с помощью программного продукта «AnyLogic».

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, цифровой двойник, автоматизация, возобновляемые источники энергии, ветряные электростанции.

## **SIMULATION MODELLING IN THE WIND POWER PLANTS MAINTENANCE**

D.I. Semin, R.R. Gybadullin, V.A. Gavrilov

Kazan State Power Engineering University

*pilgrim.10@inbox.ru, gibadullin.rr90@mail.ru, 2s19gavr@gmail.com*

**Annotation.** *The issue of digitalization and automation is currently relevant in all spheres of human life. Without a doubt, this topic is also relevant for the energy sector. Confirmation of this can be found both in studies of international companies and in government documents. For example, in the Energy Strategy of the Russian Federation until 2035, among other tasks, the tasks of digitalization and automation are clearly indicated. And according to research by IDC, an international research company in the field of information technology and telecommunications, by 2023, demand for digital transformation of the industry is expected to quadruple compared to 2018. This is also confirmed by the studies of the National Research University Higher School of Economics.*

*One of the main digitalization trends in the industry is the technology of the digital twin of the enterprise. This technology is already being implemented by large companies. So, for example, Gazprom Neft started to create a digital integrated model of the eastern section of the Orenburg oil and gas condensate field, Rosneft also launched work on a digital field in Bashkiria in order to increase the number of remotely controlled facilities by 60% and increase the energy efficiency of oil production processes by 5%.*

*The very concept of "digital twin" is multifaceted and has many variations. Some Russian and foreign authors argue that in order for a software product to become a digital twin, it must have a real connection with its physical object. Another part of the authors believes that purely virtual products imitating a real physical product also fall under the definition of "Digital Twin". The article provides a comparative analysis of software products that allow creating simulation models of industries and industrial enterprises and provides an approach to creating a simple simulation model of a wind farm for its maintenance using the AnyLogic software product.*

**Key words:** *simulation, digital twin, automation, renewable energy sources, wind farms.*

### **Применяются общенаучные методы исследования**

#### **Введение**

В эксплуатации оборудования важен мониторинг его технического состояния. В настоящее время существует три стратегии технического обслуживания:

1. Обслуживание по событию. Этот вид обслуживания возможен и применяется только при условии низкой себестоимости ремонта, а так же при условии, что перерыв в работе оборудования не повлечет за собой существенного брака производимой продукции или простоя.

2. Планово-предупредительный ремонт, он же – обслуживание по регламенту. Сейчас это самый распространенный вид ТО.

3. Обслуживание по состоянию. Это самый передовой и перспективный вид обслуживания. Отказы оборудования и вытекающие из этого последствия предотвращаются до того, как они произойдут. Это достигается путем непрерывного или периодического контроля параметров оборудования с целью выявления предотказных состояний. Главным плюсом этого метода обслуживания является продление жизненного цикла оборудования, меньшие затраты на ремонт в сравнении с ремонтом уже отказавшего оборудования.

В техническом обслуживании оборудования большую роль играет прогнозирование состояния этого оборудования. Технология «Цифрового двойника» отлично справляется с этой задачей. При наибольшей своей интеграции в производство программный продукт соединен с реальным объектом посредством датчиков, что дает возможность не только мониторинга технического состояния в режиме реального времени, но и большие возможности для прогнозирования и управления реальным объектом [1].

Для реализации имитационной модели технического обслуживания ветряной электростанции можно остановиться и на самом нижнем уровне интеграции технологии – когда существует модель, не соединенная с реальным объектом. И даже этот выбор даст хороший результат в виде инструмента для прогнозирования технического состояния оборудования [2].

Для реализации цифровой модели производства не подходят аналитические методы моделирования, как, например, моделирование в Microsoft Excel, несмотря на большой функционал этого программного продукта, потому что в системе, использующей описание объекта только лишь формулами, любое изменение системы может привести к непригодности модели.

В то же время имеются динамические системы, которым свойственны неочевидные зависимости переменных, большое количество параметров и нелинейность поведения. Для решения таких задач применяется имитационное моделирование [3].

### **Основная часть**

Существует множество программных продуктов для имитационного моделирования. На основе исследований и сравнений, было выделено несколько таких программ и проведено их сравнение по функционалу.

Как видно из таблицы 1, удобных инструментов для создания имитационных моделей много. Здесь были перечислены лишь самые удобные и подходящие под нужды производства. Все эти программные продукты совместимы с MS Excel, с помощью которого можно контролировать параметры модели [4].

Таблица 1

Сравнение программных продуктов для имитационного моделирования по функционалу и сферам применения

Программный продукт	Функции	Сферы применения
AnyLogic	Многоподходное моделирование, дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование	- Каналы поставок; - управление складами; - железнодорожная логистика; - добыча нефти и газа; - дорожное движение; - пассажиропотоки; - производство и обработка материалов; - здравоохранение.
ARENA	Используется для имитации и анализа существующих и создающихся систем, а так же оперативного анализа	- Производство; - цепи поставок; - правительство; - здравоохранение; - логистика; - общественное питание; - горное дело; - колл-центры.
FLEXSIM	Моделирование любых процессов с целью анализа, понимания и оптимизации этих процессов	- Производство; - упаковка; - управление складами; - обработка материалов; - цепи поставок; - логистика; - здравоохранение; -аэрокосмическая промышленность.
PLANT SIMULATION	Моделирование дискретных событий, визуализация, анализ и оптимизация процессов	- Здравоохранение; - производство. - горное дело.

В ходе сравнения было выбрано программное обеспечение “AnyLogic”, потому что оно имеет ряд преимуществ перед остальными, такие как: наличие бесплатной версии для обучения, совместимость с основными ОС, понятность в освоении, наличие языка визуального программирования [5].

Кроме того, AnyLogic поддерживает все три метода имитационного моделирования:

- системная динамика;
- дискретно-событийное моделирование;
- агентное моделирование.

А так же комбинацию этих методов.

Для создания имитационной модели технического обслуживания ветряной электростанции был выбран метод агентного моделирования, потому что это позволяет легче сориентироваться на начальном этапе моделирования, когда не ясна четкая схема процессов, но известно, как должны действовать отдельные элементы системы. Создание модели

начинается с идентификации моделируемых объектов (агентов) и задания их поведения [6].

В разрабатываемой имитационной модели ветряная электростанция представлена десятью ветряными установками, расположенными в пространстве и одновременно работающими. Все они требуют техобслуживания, поэтому на начальном этапе было задано поведение ветряных турбин. На рисунке 1 показан интерфейс программы [7].

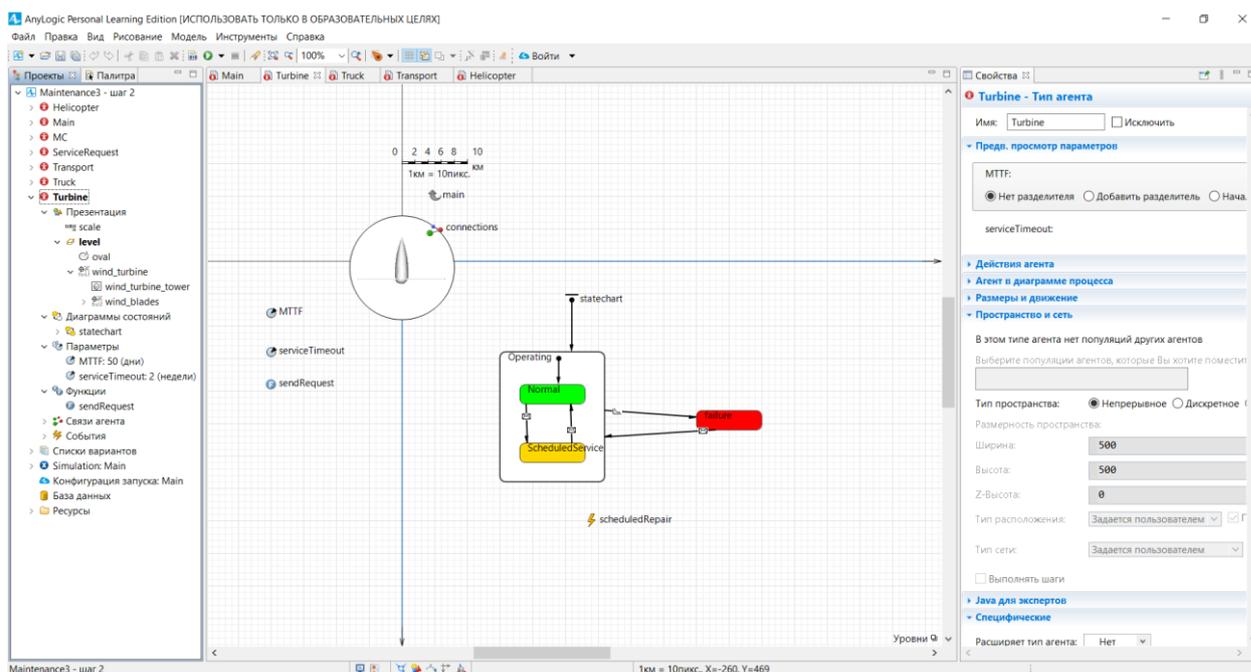


Рис. 1. Задание поведения ветряных турбин

В данной модели турбины имеют 3 состояния: нормальное, требующее планового техобслуживания, состояние поломки.

После задания поведения турбин, необходимо решить задачу проведения технического обслуживания. Учебное пособие по AnyLogic предлагает сделать это, создав сервисный центр, который будет принимать заявки от турбин при изменении их состояния, и решать, какой вид технического обслуживания осуществлять в данный момент. При поломке необходим срочный ремонт для обеспечения бесперебойного электроснабжения, поэтому предлагается создать агента, быстро реагирующего на поломку [8]. Для запланированного техобслуживания – агента, который будет направляться к турбине по истечению таймера. На рисунке 2 показан процесс задания поведения «транспорта», выполняющего роль технического обслуживания.

Поведение агентов, отвечающих за техническое обслуживание ветряных турбин задано с помощью диаграмм состояний. Это состояния, соединенные переходами. Переходы работают в результате заданных условий. Так, например, в создаваемой модели транспорт находится в сервисном центре на старте работы модели. Затем при получении

сообщения от турбины о запланированном ремонте или поломке к турбине отправляется агент, ответственный за техобслуживание [9]. По прибытии происходит «обслуживание» в течение заданного времени, после чего агент отправляется обратно в центр.

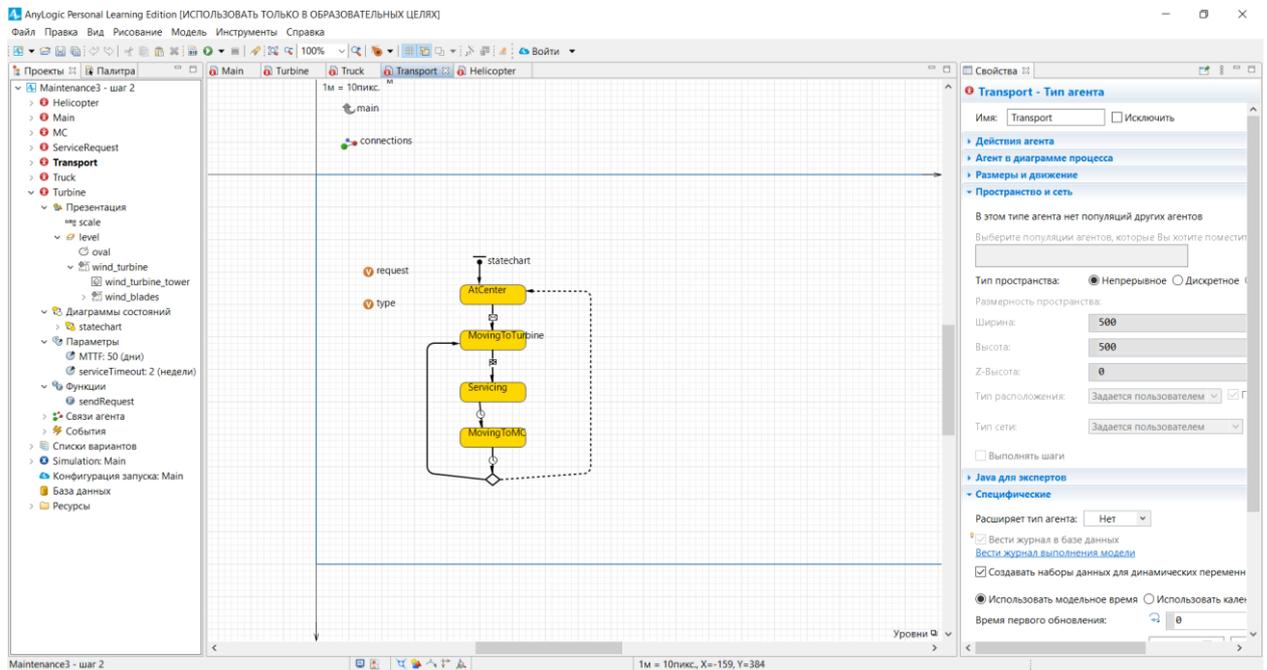


Рис. 2. Задание поведения транспорта

В итоге, в ходе работы была разработана простая имитационная модель технического обслуживания ветряной электростанции. Пока ее возможности не широки, однако в дальнейшем планируется развить их. На начальном этапе имеется десять ветряных турбин, работающих в нормальном режиме, они отмечены зеленым цветом. С течением времени их состояние может меняться на требующее планового техобслуживания или срочной починки – желтый и красный цвета (рис. 3) и (рис. 4) соответственно.

Как видно из рисунков, программа пока что регистрирует время работы системы и все события в отдельном окне справа. Можно так же проследить за состоянием любого из агента, нажав на него.

### Обсуждение

Помимо представленных возможностей, с помощью выбранного программного продукта возможно осуществить следующие задачи:

1. Задание больших вариаций технического обслуживания и условий для него;
2. создание для итоговой модели 3D анимацию;
3. задание независимых свойства и поведения для каждого типа агентов;
4. учет типа запчастей для ремонта турбин и их стоимость;

5. вывод получаемых данных не в окно программы, а в таблицы MS Excel для их удобной обработки и анализа;

6. прогнозирование состояния турбин.

При изменении уровня абстракции, можно добавить больше деталей и создавать не только модель всей электростанции, но и модель отдельной турбины [10]. AnyLogic позволяет пересматривать уровни абстракции в процессе разработки. Возможность комбинировать методы моделирования позволит взять необходимые возможности из разных методов. Есть возможность задавать свои данные для поведения модели из MS Excel.

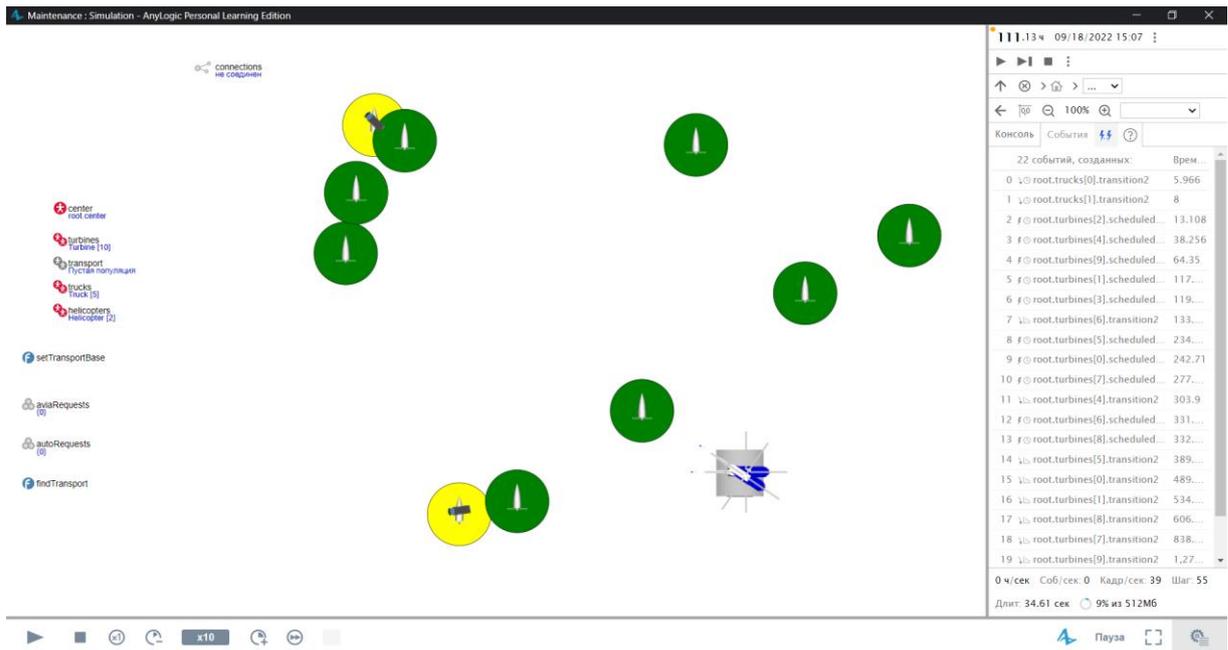


Рис. 3. Плановое техобслуживание ветряных турбин

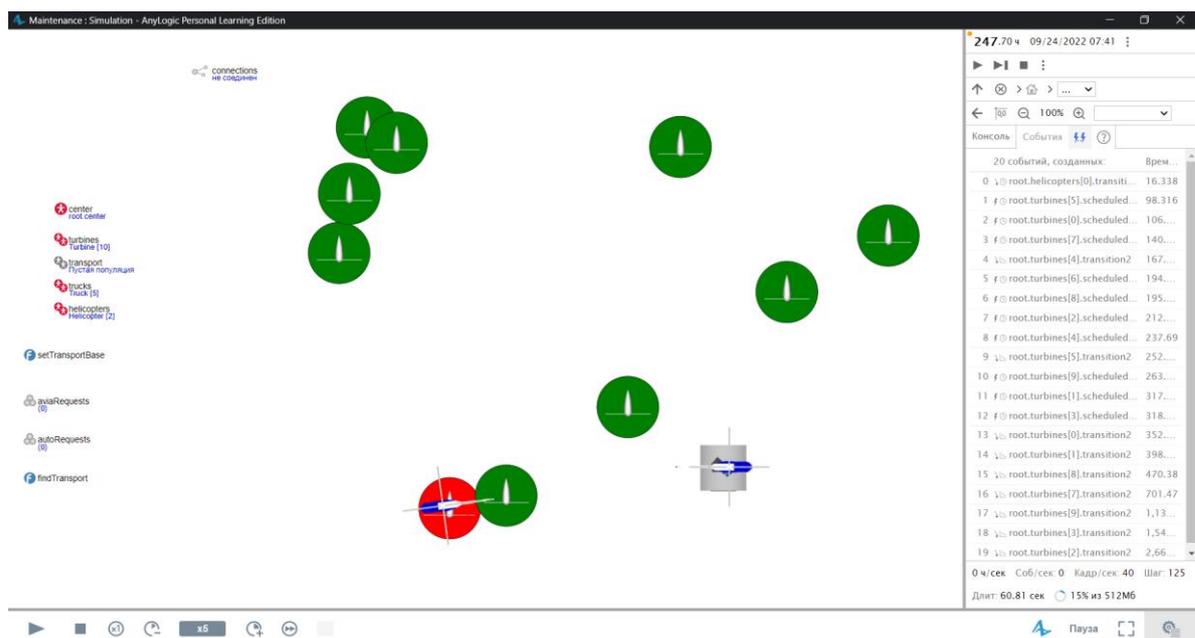


Рис. 4. Ремонт ветряной турбины, вышедшей из строя

## Заключение

Часто невозможно решить проблему с помощью натуральных экспериментов. Это может быть слишком дорого, опасно для сотрудников или невозможно. В таких случаях применяется модель реальной системы. Имея множество вариантов, как смоделировать тот или иной процесс, для моделирования технического обслуживания ветряных электростанций был выбран метод имитационного моделирования.

Несмотря на сложность овладения навыком такого моделирования, затраченные усилия дадут хороший результат в виде высококачественного анализа сложной детализированной динамической системы.

Имитационное моделирование не останавливается на этапе создания программного продукта – это часть технологии «Цифрового двойника» и, интегрировав модель в реальное производство можно решать задачи непрерывного мониторинга, анализа загрузки производственных мощностей прогнозирования и управления объектом.

## Источники

[1] Цехла С.Ю., Симченко Н.А. Цифровой двойник в системе управления промышленным объектом. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-v-sisteme-upravleniya-promyshlennym-obektom/viewer>.

[2] Кокорев, Д.С., Юрин, А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-ponyatie-tipy-i-preimuschestva-dlya-biznesa/viewer>.

[3] Бочаров, Е.П., Алексенцева, О.Н., Ермошин Д.В. Имитационная модель производственного процесса как элемент системы управления промышленным предприятием. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-proizvodstvennogo-protssessa-kak-element-sistemy-upravleniya-promyshlennym-predpriyatiem/viewer>.

[4] Osterrieder, P., Budde, L., Friedli, T. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527319302865>

[5] Liebenberg, M., Jarke, M. Information Systems Engineering with Digital Shadows: Concept and Case Studies: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49435-3\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49435-3_5).

[6] Dashdamirov, F. Development of a Methodology for Creating an Agent Based Model of Transport Hubs in Suburban Area: [https://www.researchgate.net/publication/358228713\\_Development\\_of\\_a\\_Methodology\\_for\\_Creating\\_an\\_Agent\\_Based\\_Model\\_of\\_Transport\\_Hubs\\_in\\_Suburban\\_Area](https://www.researchgate.net/publication/358228713_Development_of_a_Methodology_for_Creating_an_Agent_Based_Model_of_Transport_Hubs_in_Suburban_Area).

[7] Parpala, C. R., Iacob, R. Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment: [https://www.researchgate.net/publication/319014395\\_Application\\_of\\_IoT\\_concept\\_on\\_predictive\\_maintenance\\_of\\_industrial\\_equipment](https://www.researchgate.net/publication/319014395_Application_of_IoT_concept_on_predictive_maintenance_of_industrial_equipment).

[8] Григорьев, И. AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию: практическое пособие: <https://www.anylogic.ru/resources/books/free-simulation-book-and-modeling-tutorials>.

[9] Кораблев, А.В. Ключевые функциональность и преимущества использования цифровых двойников в промышленности: [http://digital-economy.ru/images/easyblog\\_articles/481/DE-2019-02-01.pdf](http://digital-economy.ru/images/easyblog_articles/481/DE-2019-02-01.pdf).

[10] Chan Victor., W., K, Foundations of Simulation Modeling: [https://www.researchgate.net/publication/319556799\\_Foundations\\_of\\_Simulation\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/319556799_Foundations_of_Simulation_Modeling).

[11]. Шерязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М., Кайдар А.Б. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 24-33.

[12] Султанов М.М. Модель оценки технико-экономических показателей оффшорных ветроэлектростанций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 46-55.

[13] Давыдов Д.Ю., Обухов С.Г. Модель оценки технико-экономических показателей оффшорных ветроэлектростанций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С.115-130.

[14] Червоненко А.П., Котин Д.А., Рожко А.В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 160-171.

**УДК 620.91**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Н.Н.Туйтанова,Ф.Ф.Ахметзянова, В.А. Гаврилов  
ФГБОУ«Казанский государственный энергетический университет»  
t\_nargiz\_98@mail.ru, faridaakhmetzyanova@mail.ru

*Аннотация.* Интеллектуальные системы возобновляемой энергетики разработаны как альтернатива традиционным методам производства электроэнергии, использующим природные ресурсы. Развитие автоматизации и

связанных с ней технологий в последние годы улучшило производительность и функционирование интеллектуальных энергетических систем. В этой статье было изучено понятие автоматизированного планирования управления (ACS) для балансирования выработки электроэнергии и дефицита в системах возобновляемой энергетики. Это планирование управления поддерживается глубоким Q-обучением для определения состояния работы и нехватки энергосистем. Процесс выработки электроэнергии зависит от условий окружающей среды, чтобы получить максимально выгодную мощность при эксплуатационных расходах энергосистем. Система выработки энергии анализирует условия окружающей среды, подходящие для достижения максимальной прибыли и распределения электроэнергии.

**Ключевые слова:** автоматизация, возобновляемые источники электроэнергии, интеллектуальные системы, планирование.

## **AUTOMATED CONTROL SCHEDULING TO IMPROVE THE OPERATIVE PERFORMANCE OF SMARTRENEWABLEENERGYSYSTEMS**

N. N. Tuitanova, F. F. Akhmetzyanova, V.A. Gavrilov  
Kazan State Power Engineering University  
t\_nargiz\_98@mail.ru, faridaakhmetzyanova@mail.ru

**Annotation.** Smart renewable energy systems are designed as an alternative to conventional power generation methods that utilize natural resources. The development of automation and its allied technologies has improved the performance and operations of smart energy systems in recent years. In this article, automated control scheduling (ACS) for balancing power generation and deficiency in renewable energy systems is introduced. This scheduling control is supported by deep Q-learning to define the operation and shortage state of energy systems. Based on the definitive control schedule, the functions of the systems can be modeled without requiring additional time for power generation and dissemination. In addition, the power generation process relies on environmental conditions to gain maximum profitable power for the operating cost of the power systems. The energy generation system analyzes the environmental conditions suitable for achieving maximum profit, and power dissemination is also modeled. The performance of the proposed system was analyzed using the following metrics: operational profit, imbalance factor, successful prediction of operations, and time lag.

**Key words:** automation, Control scheduling, Q-Learning, Renewable energy resources.

### **Введение**

Интеллектуальная система возобновляемых источников энергии - это новая разработка для получения энергии из окружающей среды в режиме реального времени. Возобновляемая энергия получается из ветровых и солнечных источников и поддерживается в интеллектуальной сети. Производительность работы измеряется с помощью датчиков и распределяется по конкретным программам [2]. Возобновляемые источники энергии обычно используются в трех различных областях: интеллектуальные электрические, тепловые и газовые сети. Интеллектуальная электросеть используется для подключения различных возобновляемых источников энергии и электромобилей, в то время как

интеллектуальные тепловые сети используются для централизованного охлаждения и обогрева [3]. Интеллектуальная газовая сеть используется для соединения различных отраслей применения, которые полагаются на энергетические ресурсы биогаза. Энергия полученная из этих источников преобразуется в определенный формат, который включает в себя электроэнергию, такую как тепло, водород, синтетические газы и биотопливо. Только необходимая энергия распределяется между другими источниками для поддержания баланса [4]. Возобновляемая энергия получается из ресурсов, которые являются регенеративными по своей природе. Возобновляемая энергия также известна как альтернативная энергия, в отличие от энергии, получаемой из ископаемых видов топлива, таких как нефть и уголь.

### **Основная часть**

Системы энергоменеджмента (EMS) предназначены для управления электрическими сетями с целью наблюдения, организации и оптимизации представления энергии на основе состояния передачи. EMS используется на этапе энергопотребления, поскольку снижается затраты для конкретной организации. Улучшенный EMS вводит три метода: обработка нагрузки, распределение мощности и время использования [7]. EMS может использоваться для экономии энергии в коммерческих, жилых и государственных учреждениях.

Сбор энергии в основном зависит от солнечных, тепловых, радиочастотных и пьезоэлектрических источников энергии, а фотовольтаика (PV) используется для преобразования световой энергии в электрическую [11]. Они обладают самой высокой плотностью и выходной мощностью среди различных устройств сбора энергии. При использовании сбора энергии нет необходимости использовать батареи в конечных приложениях из таких источников, как возобновляемые и невозобновляемые источники энергии [7]. Существует четыре типа энергетических наблюдений, которые могут быть сделаны основанные на ископаемом топливе, возобновляемых источниках энергии, а также гидроэлектроэнергии и атомной энергетике. Обычно сбор осуществляется путем получения энергии из источника для хранения и использования в носимых устройствах и беспроводных сенсорных сетях. Хранение может быть достигнуто на конденсаторе, который использует микропроцессор для передачи энергии. Предлагаемая АСУ направлена на достижение максимальной прибыли за счет использования автоматизированного планирования управления. В процессе работы наблюдается Q-обучение, а дефицит используется для улучшения успешного предсказания энергии для последовательных машин. Это учитывает операционную прибыль, фактор дисбаланса и временную задержку производительности.

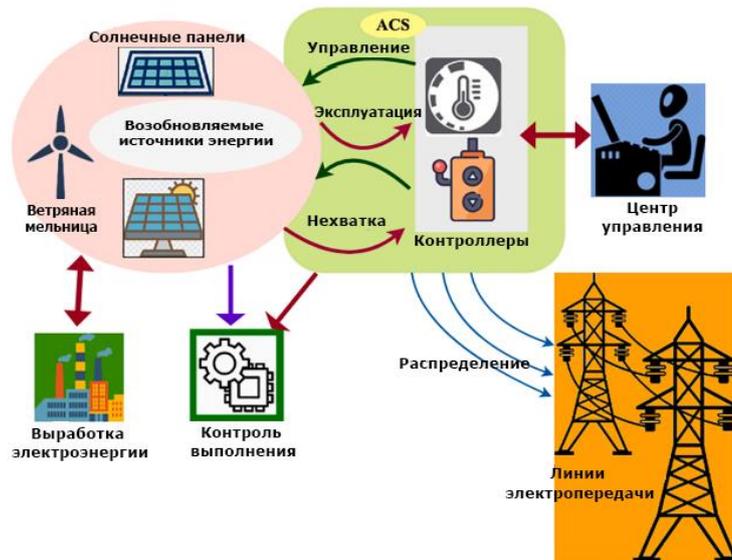


Рис. 1. Процесс планирования распределения энергии

Если для запуска машины требуется больше энергии, то выполняется обнаружение  $\theta(e_0)$  и выполняется методом, основанным на прогнозировании. Производство энергии осуществляется путем наблюдения за окружающей средой. При этом работа машины выполняется с использованием методов, основанных на планировании; если для машины выделена требуемая энергетическая мощность, производственный уровень перестает получать энергию.

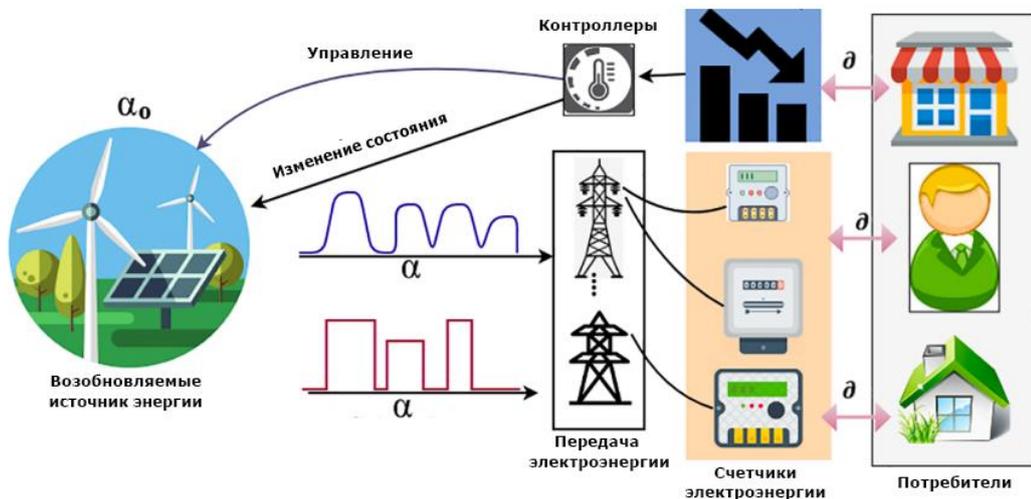


Рис. 2. График распределения энергии

### Q-Обучение для ACS

После прогнозирования выполняется Q-обучение для улучшения текущего состояния энергии из интеллектуальной сети в этой предлагаемой операции, а дефицит используется для определения состояния энергии. В Q-обучении обозначаются два состояния: рабочее и

недостаточное. Для рабочего состояния распределение энергии - это действие, а выработка энергии - это действие при нехватке. Основываясь на них, Q-обучение используется для определения оптимальной политики для достижения максимальной прибыли.

Преимущества Q - обучение включают в себя три аспекта: политика, взаимодействие, и расчеты выгоды. Политика используется для рекомендации наилучшего взаимодействия с условиями окружающей среды для максимизации выгоды.

Взаимодействие - это действие, выполняемое с окружающей средой, а награда – это состояние завершения, которое может появиться в данный момент времени или в конце процесса.

Начальное состояние процесса Q-обучение показано на рис. 3(а). Первый указывает на то, что если машина достигает максимальной производительности, распределение мощности обрабатывается. На рис. 3(б) представлен переход состояния из рабочего в состояние дефицита. Аналогично, рис. 3(с) иллюстрирует переход к рабочему состоянию процесса.

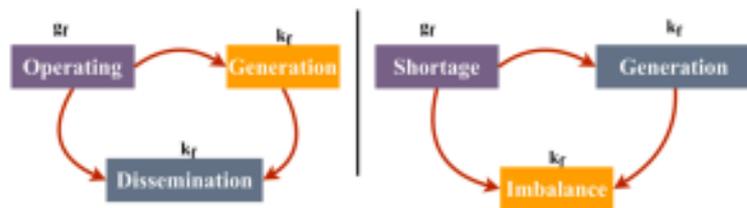


Рис.3а. Представление начального состояния и действия

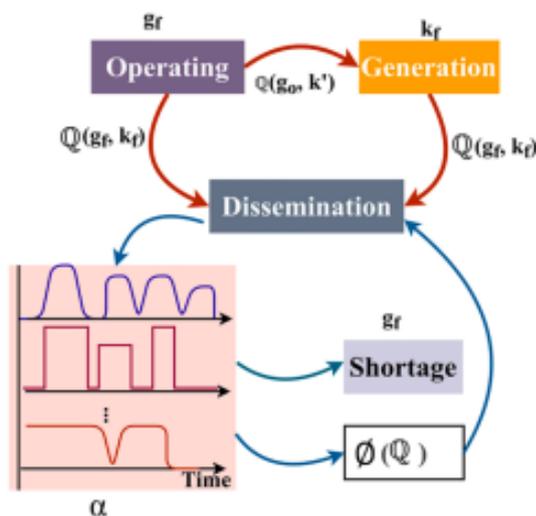


Рис. 3б. Работа в состоянии дефицита

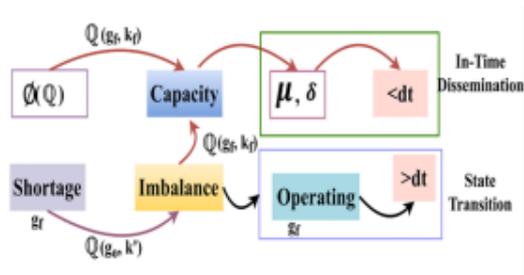


Рис. 3с. Возврат к рабочему состоянию

Эта система основана на процессе планирования. Второе ограничение заключается в том, что если он не достигает максимальной мощности, возникает дефицит энергии, чтобы избежать обработки этого распределения энергии.

Наконец, если в это время в машине нет энергии, она прекращает передачу и создает резервную копию машины на основе процесса прогнозирования. Все три аспекта энергии оцениваются с помощью Q-обучения.

Следовательно, начальным шагом является резервное копирование энергии на основе процесса прогнозирования. Это достигается путем получения энергии из окружающей среды на основе расчетов состояния.

Таким образом, цель предлагаемой АСУ удовлетворяется во втором условии и получает максимальную выгоду. Он показывает оптимальный выбор действия из двух состояний и получает максимальную прибыль для каждого состояния и действия.

### Заключение

В этой статье представлен метод автоматизированного планирования управления для повышения производительности систем возобновляемой энергетики в умных городах. Этот метод планирования был разработан для уменьшения дисбаланса в производстве и распространении электроэнергии, чтобы восполнить дефицит требования потребителей. Выявляется дефицит, и состояние системы возобновляемых источников энергии изменяется в зависимости от прогнозируемой потребности в энергии. Для этого процесса используется Q-обучение, помогающее периодически проверять потребность в энергии, ее выработку и нехватку для изменения состояний системы с целью уменьшения временной задержки. Условия окружающей среды также учитываются с целью повышения эффективности распределения электроэнергии и операционной прибыли.

Автоматизированное планирование состояния системы с помощью обучения повышает скорость успешное прогнозирование потребностей в электроэнергии.

### Источники

- [1] Юмаев, Н. Р. Экологические аспекты применения возобновляемых источников энергии / Н. Р. Юмаев. Текст : непосредственный // Современные тенденции технических наук : материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2018 г.). Казань : Молодой ученый, 2018. С. 16-21. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/300/14145/> (дата обращения: 26.09.2022)
- [2] Al-Janabi S, Alkaim AF, Adel Z. An Innovative synthesis of deep learning techniques (DCapsNet & DCOM) for generation electrical renewable energy from wind energy. *Soft Comput* 2020;24(14):10943–62
- [3] Kafazi IE, Bannari R. Multiobjective scheduling-based energy management system considering renewable energy and energy storage systems: A case study and experimental result. *J Control Autom Electr Syst* 2019;30(6):1030–40.
- [4] Li T, Dong M. Real-time residential-side joint energy storage management and load scheduling with renewable integration. *IEEE Trans Smart Grid* 2018;9(1):283–98.
- [5] Гречухина Ирина Александровна, Кудрявцева Ольга Владимировна, Яковлева Екатерина Юрьевна Эффективность развития рынка возобновляемых источников энергии в России // Экономика региона. 2016. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-razvitiya-rynka-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-rossii> (дата обращения: 22.09.2022).
- [6] Фирсова, М. А. Возобновляемые источники энергии в России / М. А. Фирсова // Вызовы и решения для бизнеса: энергия регионов : Сборник материалов II Международного внешнеэкономического научно-практического форума , Москва, 14 октября 2021 года. – Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2021. – С. 441-443. – EDNIFIPDY.
- [7] Liu Y, Li Y, Gooi HB. Distributed robust energy management of a multi-microgrid system in the real-time energy market. 2019 IEEE Power Energy Soc Gen Meet (PESGM) 2019.
- [8] Tarhuni BA, Naji A, Brodrick PG, Hallinan KP, Brecha RJ, Yao Z. Large scale residential energy efficiency prioritization enabled by machine learning. *Energ Effi* 2019;12(8):2055–78.
- [9] Бык Ф. Л. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем / Ф. Л. Бык, Л. С. Мышкина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 3-15.
- [10] А.В. Паздерин, В.О. Самойленко, Н. Д. Мухлынин, П. А. Крючков. Ценовые характеристики источников электроэнергии мини и микрогрид // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 122-139.
- [11] Оморов Т. Т. Методика идентификации параметров магистральной линии распределительной сети по данным АСКУЭ / Т. Т. Оморов, Р. Ч. Осмонова, Б. К. Такырбашев, Ж. С. Иманакунуова // Вестник

УДК 621.311

## РАЗВИТИЕ SMART GRID ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГОСФЕРЕ

А.С. Хайруллин, В.А. Гаврилов  
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»  
hsarturs99@gmail.com, 2s19gavr@gmail.com

*Аннотация.* С развитием технологий резко увеличился спрос на электроэнергию, что стало проблемой не только для ее производства, но и для ее распределения. Данный спрос увеличивает требования к надежности, эффективности, безопасности и проблемам экологической и энергетической устойчивости. В связи с этим была разработана концепция Smart Grid, которая включает в себя ряд интеллектуальных функций для улучшения работы энергетической сферы. Затрагиваются такие вопросы как особенности их функционирования, включая надежность, безопасность. Кроме того, рассмотрены современные разработки и решения в данной сфере.

*Ключевые слова:* Smart Grid, управление, энергия, энергетика, технологии, электрические сети.

## DEVELOPMENT OF SMART GRID TECHNOLOGIES IN THE ENERGY SPHERE

A.S. Khairullin, V.A. Gavrilov  
Kazan State Power Engineering University  
hsarturs99@gmail.com, 2s19gavr@gmail.com

*Annotation.* With the development of technology, the demand for electricity has increased dramatically, which has become a problem not only for its production, but also for its distribution. This demand increases the requirements for reliability, efficiency, safety and environmental and energy sustainability issues. In this regard, the Smart Grid concept was developed, which includes a number of intelligent functions to improve the performance of the energy sector. Issues such as the features of their functioning, including reliability, safety, are touched upon. In addition, modern developments and solutions in this area are considered.

*Key words:* Smart Grid, management, energy, energy, technology, electrical networks

### Введение

Урбанизация, деятельность человека и развитие технологий увеличили потребность в энергии. Это привело к тому, что потребление электроэнергии выросло до уровня, который невозможно контролировать, если не следить за этим должным образом. Это ситуация опасна не только для устойчивой энергетике, но и для сохранения окружающей среды во всем мире. Почти 75-80% всей энергии потребляется в городах, на долю которых приходится 80% выбросов парниковых газов. Традиционная

централизованная система распределения электроэнергии используется уже давно. С момента использования электричества электрические сети по всему миру имеют схожую структуру, динамику и принципы, даже с развитием технологий. Эти традиционные электрические сети сосредоточены только на некоторых основных функциях, таких как производство, распределение и контроль электроэнергии. Электросеть в ее нынешнем виде ненадежна, имеет высокие потери при передаче, плохое качество электроэнергии, склонна к отключениям электроэнергии и коротким замыканиям, а также к недостаточной мощности, что затрудняет интеграцию децентрализованных источников энергии. Традиционным неинтеллектуальным системам не хватает мониторинга и контроля в реальном времени, что затрудняет работу интеллектуальных сетей в качестве решения в реальном времени. Для решения этих задач требуется полное преобразование структуры энергоснабжения. Электрические преимущества являются не только стимулом для реализации концепции интеллектуальной сети, но и экологическими аспектами. Эффективное использование энергии и зависимость от возобновляемых ресурсов также помогут уменьшить углеродный след человека.

### **Основная часть**

В конце девятнадцатого века системы постоянного тока снабжали фабрики и небольшие центральные районы, но не охватывали 95% населения. Электрическое освещение считалось роскошью только в отелях и других предприятиях, а также в особняках известных людей. Первая электросеть переменного тока была установлена в 1886 году в Массачусетсе. В течение 20-го века локальные сети со временем росли и медленно соединялись между собой, в первую очередь из соображений экономии и надежности. В 1960-х годах промышленно развитые страны характеризовались наличием крупных, технологически зрелых и сильно взаимосвязанных энергетических систем, состоящих из многочисленных центральных электростанций. Технологии интеллектуальных сетей появились в 1980-х годах с более ранними попытками использовать электронное управление, измерение и мониторинг. В 2000 году в Италии был запущен первый проект по подключению 27 миллионов домов к умным счетчикам, подключенным через низкоскоростную линию электропередачи [4].

За последние два года было создано 90% данных в мире, и каждый день создается 2,5 квинтиллиона байт данных. Это произошло благодаря цифровым технологиям, которые также расширили отраслевые концептуальные границы, особенно для архетипа интеллектуальных сетей, где конечные пользователи и дополнительные сектора, такие как транспорт, как правило, тесно связаны. Это также связано с достижениями в области вычислительной мощности и эффективности, которые позволили использовать более мощную и сложную аналитику, такую как

искусственный интеллект и автоматизация. Согласно заявлению Международного энергетического агентства цифровые технологии могут помочь сделать энергетическую систему более интеллектуальной, надежной и устойчивой, в то время как они также повышают риски безопасности и конфиденциальности, изменяя рынок.

Технология Smart Grid дает решение для наиболее оптимального производства электроэнергии и эффективный способ передачи и распределения. Благодаря своей универсальности, она легко устанавливается и требует меньше места по сравнению с привычными сетками. Концепция проектирования Smart Grid направлена на обеспечение видимости сети, управление активами, повышение производительности и безопасности энергосистемы и, что наиболее важно, экономичность эксплуатации, обслуживания и планирования. Считается, что технология интеллектуальных сетей может и будет использоваться на уровне микросетей, которые в итоге соединяются со всеми другими микросетями, образуя большую сеть интеллектуальных сетей. Эти «умные» сети обладают огромным потенциалом и могут стать решением проблемы надежности передачи и распределения электроэнергии в развивающихся странах, где отсутствует инфраструктура [1]. В США только 20% всего углекислого газа выбрасывается транспортом, в то время как на производство электроэнергии приходится 40% выбросов углекислого газа. Это связано с высоким спросом на электроэнергию. Интеллектуальные сети подразумеваются как ключ к решению этой проблемы, эффективно распределяя электроэнергию и в конечном итоге сокращая выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ, таких как  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ . Это также может помочь клиенту высчитать свой спрос и наиболее экономичное использование энергии.

Концепция Smart Grid развивается с появлением системы распределения электроэнергии. К тому времени были необходимы другие критерии, такие как контроль, мониторинг, цены и услуги по передаче и распределению энергии. Обычно внедрение Smart Grid связывают с установкой интеллектуального счетчика. В 1970-х и 80-х годах они применялись для отправки информации о потребителях обратно в сеть. Но самая необходимая и главная потребность, которая все еще находится в стадии рассмотрения даже с учетом последних достижений, - это надежность и эффективность передачи и распределения энергии по электрической сети [3]. Но последние передовые исследования дают понять, что сети и энергосистемы не должны ограничиваться передачей и распределением, но также должны играть жизненно важную роль в производстве чистой и устойчивой энергии для сокращения выбросов парниковых газов и углеродного следа.

Технически интеллектуальная сеть представляет собой концепцию элементарных сетей с некоторыми новейшими и автоматизированными функциями, которые делают их более надежными и устойчивыми.

Обычные сети использовались только для передачи и распределения электроэнергии, но современная концепция интеллектуальных сетей предполагает передачу, хранение и принятие решений в зависимости от ситуации. Согласно документу по развертыванию электрических сетей в Европе будущего, «умная» сеть – это интеллектуальная электрическая сеть, которая объединяет действия всех заинтересованных сторон, т.е. производителей и потребителей для эффективного, устойчивого, экономичного и надежного обеспечения электроэнергией. Ниже в таблице 1 представлены основные отличия «умной сети» от традиционной.

Таблица 1

Различия между «умной» сетью и традиционной сетью

<b>«Умная» сеть</b>	<b>Традиционная сеть</b>
Двусторонняя связь в режиме реального времени	Односторонняя связь
Распределенная система выработки электроэнергии	Централизованная выработка электроэнергии
Взаимосвязанная сеть	Радиальная сеть
Задействовано большое количество датчиков	Используется небольшое количество основных датчиков
Цифровое управление	Механическое управление
Автоматическое управление и контроль	Ручное управление и контроль
Широкий диапазон контроля	Ограниченный контроль
Вопросы безопасности и конфиденциальности	Нет проблем с безопасностью или конфиденциальностью

Исходя из данной таблицы можно сделать вывод о том, что «умные сети» являются наиболее гибкими и их применение и функционал может варьироваться с зависимости от целей использования, а также они являются наиболее подходящим решением для современного общества.

Успех сети зависит от потребностей пользователей, которые измеряются надежностью. Это дает безотказную и безошибочную систему с непрерывной подачей электроэнергии. Smart Grid может обнаруживать любую неисправность и обеспечивать самовосстановление системы. У традиционных сетей есть проблемы, связанные с взаимодействием возобновляемых ресурсов, микросетей и реагированием на спрос. С увеличением размера и сложности этих сетей со спросом становится все труднее анализировать их надежность. Но эти проблемы очень хорошо решаются Smart Grids. Для этого интеллектуальные сети имеют возможность отслеживать и хранить все данные и оценивать надежность своих услуг. Также возможно удаленно контролировать гибридную генерацию и управление сетью, что повышает ее надежность [2]. Такие технологии, как Dynamic Stochastic Optimal Power Flow (DSOPF),

помогают в оценке и оптимизации потока энергии в Smart Grid. Следовательно, интеллектуальные сети могут иметь большую надежность с развитием системы связи.

Безопасность- из сложных вопросов для эволюции Smart Grid. С ростом автоматизации удаленный мониторинг и управление сетью делают сеть более ненадежной для кибератак. По данным Исследовательского института электроэнергетики, кибербезопасность системы является одной из самых больших трудностей Smart Grid. Для оценки безопасности Smart Grid необходимо исследование ее методологии. Существуют различные агентства и организации, такие как IEEE Power & Energy Society (PES), IEC по стандартизации интеллектуальных сетей, Национальный институт стандартов и технологий (НИСиТ), которые участвуют и помогают в стандартизации и регулировании интеллектуальных сетей. Некоторые из многообещающих исследований в различных областях обеспечивающих безопасности для интеллектуальных сетей включают: интеллектуальные измерения с сохранением анонимности с несколькими потребителями данных, механизм конфиденциальности ортокода в интеллектуальных сетях с использованием архитектуры кольцевой связи и модели угроз безопасности. Поскольку безопасность считается одним из самых больших препятствий для внедрения технологии Smart Grid, продолжающиеся исследования обещают устранить этот барьер [5].

В настоящее время проводится ряд исследований для развития интеллектуальной сети, чтобы сделать ее более надежной и устойчивой для современных нужд. Эти исследования сосредоточены на различных технологиях.

В настоящее время разные страны мира сделали шаг вперед в эпоху интеллектуальных сетей и приняли ее реальность. Многие из них работают над пилотным проектом интеллектуальной сети или выдвигают инициативы этой концепции для тестирования и исследования, чтобы проверить осуществимость перед выполнением полномасштабной разработки и изменения. Правительства разных стран, таких как Австралия, США, Китай, Великобритания, Южная Корея и Япония, уже рассматривают такие варианты, как интеллектуальная сеть для сокращения выбросов углерода и обеспечения энергетической безопасности. Некоторые инициативы, связанные с интеллектуальными сетями разных стран, следующие:

1. Правительство Австралии интересовалось Smart Grid с 2009 года, когда был объявлен конкурс предложений по Smart Grid. Победителем конкурса была выбрана компания Energy Australia совместно с IBM, GE Energy и Grid Net. Идея заключалась в том, чтобы построить интеллектуальную сеть на основе WIMAX, которая имеет возможности автоматической подстанции, способной принимать электромобили, а также поддерживать подключение 50 000 интеллектуальных счетчиков. Также, был запущен проект для тестирования обнаружения неисправностей сети,

изоляции и восстановления, мониторинга качества электроэнергии и автоматического распределения электроэнергии через систему управления распределением. Австралийское правительство также предоставляет стимулы для поощрения и инвестирования в интеллектуальные сети. Управление спросом, энергетическая безопасность и энергоэффективность являются главными приоритетами правительства Австралии.

2. Правительство Канады сделало обязательной установку интеллектуальных счетчиков для предприятий и домашних хозяйств в Онтарио к 2010 году на основании Закона об ответственности за энергосбережение 2006 года. В том же году правительство также инвестировало 32 миллиона долларов в проект интеллектуальной сети на четыре года для исследования проблем, связанных с управлением возобновляемой энергией. Федеральное правительство также выступило с различными инициативами, такими как фонд экологически чистой энергии и инициатива по инновациям в области экоэнергетики. В настоящее время осуществляются различные пилотные проекты в провинциях Квебек и Онтарио. Для кампании по продвижению и повышению осведомленности о Smart Grid была создана ассоциация под названием Smart Grid Canada, в которую входят научные круги и все заинтересованные стороны. Они отвечали за проведение исследований и формирование различных политик, связанных с интеллектуальными сетями. Существуют различные организации, такие как Natural Resource Canada, Национальный совет по энергетике и Национальная целевая группа по технологиям и стандартам Smart Grid, которые поддерживаются правительством. Национальная целевая группа по технологиям и стандартам Smart Grid была сформирована для разработки всех аспектов, связанных с Smart Grid, а также для координации и привлечения правительств провинций к поддержке и развитию Smart Grid.

3. Великобритания является одним из крупнейших производителей фотоэлектрической энергии. Лондонское учреждение Low Carbon объединило ряд технологий, таких как фотоэлектрические элементы, интеллектуальные счетчики, электромобили и тепловой насос, с системой распределения для сокращения выбросов углерода. Первое в мире криогенное решение для хранения энергии было реализовано в качестве пилотного проекта в Рединге, Великобритания. Точно так же в Ирландии Комиссия по регулированию энергетики завершила успешный запуск 9000 интеллектуальных счетчиков для домов и предприятий.

В настоящее время проводится множество исследований по разработке интеллектуальных сетей. По-прежнему имеется большой потенциал для будущих исследований по различным аспектам в различных областях интеллектуальных сетей. Это включает в себя прогнозирование, оптимизацию потока энергии, связь, интеграцию микросетей, систему управления спросом и энергопотреблением, соответствие стандартам функциональной совместимости, масштабируемость, экономические

факторы, шифрование данных и, что наиболее важно, автоматизацию генерации, передачи и распределения.

### **Заключение**

Предприятие электроэнергетической системы стало свидетелем многих недавних событий, которые не только возродили интерес к исследованиям и разработкам, но и привели к значительным социально-экономическим и другим нематериальным выгодам для общества в целом. Повышение осведомленности о воздействии на окружающую среду и углеродном следе всех источников энергии, включая производство электроэнергии, дало импульс росту и внедрению возобновляемых и альтернативных источников энергии. Рост интеллектуальных сетей является благом не только для общества в целом, но и для всех, кто участвует в электроэнергетической отрасли, ее клиентов и многих заинтересованных сторон.

Совершенствование технологий и устройств может изменить использование энергии экономичным и экологически безопасным способом. Эволюция концепции Smart Grid может удовлетворить все будущие потребности в использовании энергии наилучшим образом за счет сокращения выбросов углерода и интеграции с большим количеством возобновляемых источников энергии. Это может привести к значительным изменениям в традиционной сети и поведении потребителей в отношении использования энергии за счет повышения надежности, эффективности и качества поставки электроэнергии. Государственная политика необходима для облегчения внедрения интеллектуальных сетей.

### **Источники**

[1] Врублевских А. А., Горемыкин Е. В. Технология SMART GRID и альтернативная энергетика // StudNet. 2021. Т. 4. №1.

[2] Гаврилович, Е. В. «Умные сети» Smart Grid – перспективное будущее энергетической отрасли России / Е. В. Гаврилович, Д. И. Данилов, Д. Ю. Шевченко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 28.2 (132.2). – С. 55-59.

[3] Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

[4] Ледин С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики // Автоматизация и IT в энергетике. – 2010. – №10. – С. 39-43.

[5] Михальченко, И. Концепция Smart Grid: возможности и перспективы инновационного развития энергетики / И. Михальченко // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2014. – № 5(26). – С. 48-51.

[6] А.В. Паздерин, В.О. Самойленко, Н. Д. Мухлынин, П. А. Крючков. Ценовые характеристики источников электроэнергии мини и

микросеть // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 122-139.

[7] Коршунов Е. А. Автоматизация процессов обслуживания энергетического оборудования с помощью специализированных программных решений / Е. А. Коршунов, А. А. Капанский, К. Е. Коршунов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 65-75.

УДК 681.11.031.1

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

И.А.Шкарупа, В.А.Гаврилов  
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия  
e-mail: shkarupa.ivan16@gmail.com, 2s19gavr@gmail.com

***Аннотация.** В предлагаемой статье предложен метод выравнивания суточного графика нагрузок и уменьшения потерь мощности в сети имитационной модели промышленного предприятия при помощи накопителя модели СНПФ с литий-ионными аккумуляторами. Представлены результаты расчета потерь мощности без использования накопителя и с накопителем.*

***Ключевые слова:** накопитель энергии, потери мощности, предприятие, суточный график.*

## **THE USE OF ENERGY STORAGE DEVICES IN ORDER TO REDUCE POWER LOSSES IN THE ENTERPRISE NETWORK**

I.A.Shkarupa, V.A.Gavrilov  
KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: shkarupa.ivan16@gmail.com, 2s19gavr@gmail.com

***Annotation.** The article proposes the idea of leveling the daily load schedule and reducing power losses in the network of an industrial enterprise simulation model using a storage device of the SNPF model with lithium-ion batteries. The results of calculating power losses without using a storage device and with a storage device are presented.*

***Key words:** energy storage, power loss, enterprise, daily schedule.*

### **Введение**

Потери мощности являются одной из важнейших характеристик расхода электроэнергии, которые определяют эффективность работы промышленных предприятий.

Процесс использования электроэнергии на предприятии является непостоянным во времени, поскольку зависит от желаний и потребностей абонентов. Мощность нагрузки меняется в зависимости от технологических процессов, расписания работы предприятий, времени суток и просто желаний людей воспользоваться электроприборами.

Неравномерный суточный график приводит к увеличению потерь мощности, что значительно влияет на срок службы электрооборудования, проводников и трансформаторов. Также происходит снижение энергоэффективности производства, возникает потребность в установке дорогостоящего оборудования с завышенными характеристиками, которое работает на своих номинальных значениях лишь незначительный промежуток времени.

Данная проблема актуальна в сетях промышленных предприятий и ее решение может дать значительный эффект, так как приведет к снижению потерь в часы максимума нагрузок. Однако это требует не только значительных капитальных вложений, но и постоянного внимания персонала, его высокой квалификации и заинтересованного участия в эффективном решении данной задачи.

Одним из путей решения данной проблемы является использование накопителей энергии, что позволяет снизить потери электроэнергии в питающих объект линиях электропередач и трансформаторах. В период минимальных нагрузок накопитель заряжается, в момент пиковых нагрузок отдает накопленную энергию. Эффект от использования накопителя проявляется, если потребитель имеет собственную распределительную сеть, понижающие подстанции и накопители устанавливаются в непосредственной близости от энергоемкого оборудования.

Максимальным эффект будет тогда, когда уровень мощности станет постоянным во времени. При таком режиме потери, определяемые среднеквадратичным значением передаваемой мощности, могут снизиться в пределе до половины [2].

### **Основная часть**

В качестве объекта исследования потерь мощности, рассмотрим систему электроснабжения завода коммутационных аппаратов, имеющего на своей территории различных потребителей электроэнергии. Генеральный план предприятия представлен на рис. 1.

Проанализируем три различных случая. В первом случае цех питается от одной ТП и имеет плавный суточный график нагрузок. Во втором случае цех питается от одной ТП и имеет явно выраженные максимумы и минимумы потребления мощности. В третьем случае два цеха питаются от одной ТП [1].

В первом случае рассмотрим цех котельной и бойлерной, который питается от ТП-10. Суточный график нагрузок для данного цеха представлен на рис. 2.

Можно заметить, что график имеет плавный вид и максимальные нагрузки достигаются в промежутке с 11:00 до 13:00 и с 14:00 до 17:00 часов.

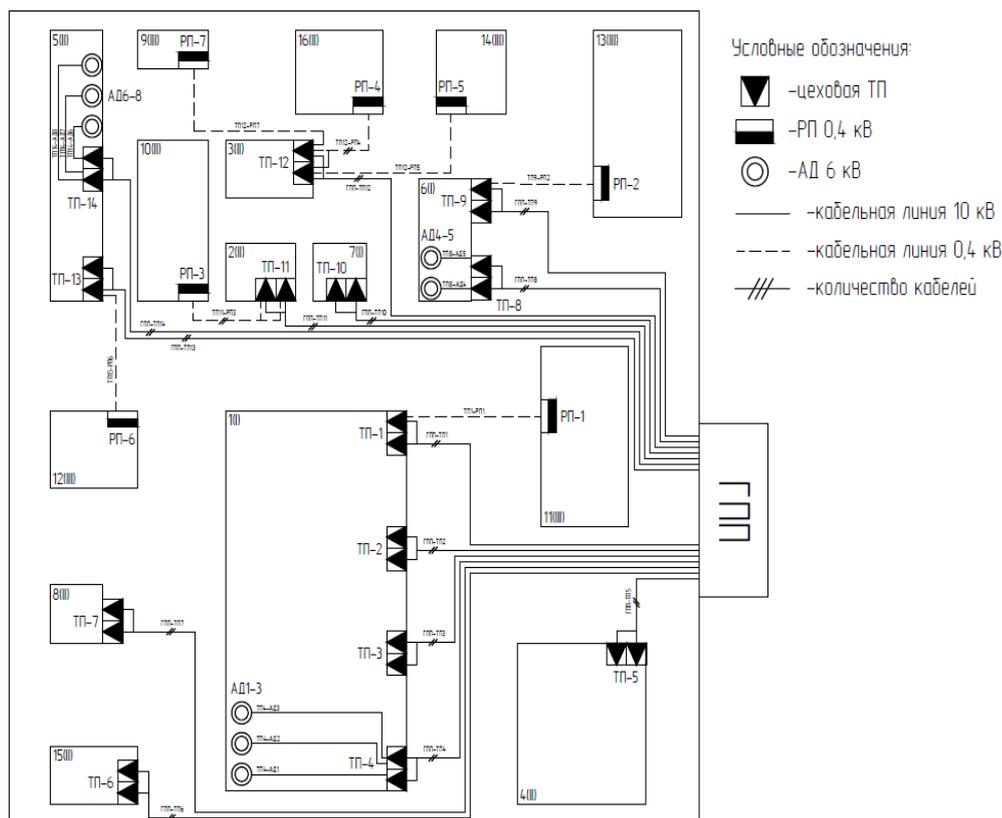


Рис. 1 – Генеральный план завода коммутационных аппаратов



Рис. 2. Суточный график нагрузок котельной и бойлерной

Приведём пример расчета потерь мощности в линии ГПП-ТП10 для цеха котельной и бойлерной в промежуток времени с 00:00 до 1:00:

$$\Delta P = \frac{P^2 \cdot r}{U^2} \cdot l = \frac{371^2 \cdot 1,94}{10^2} \cdot 0,186 = 496,7 \text{ Вт}$$

где P – потребляемая цехом мощность, кВт; r – сопротивление кабеля, Ом/км (для кабеля ААШв 3x16x10 – r = 1,94 Ом/км) [5]; "l" – длина кабеля, км; U – передаваемое напряжение, кВ.

Расчет для остального времени суток приводится в таблице 1.

Таблица 1

Расчет потерь мощности на линии ГПП-ТП10

Время, ч	Потребление мощности, кВт	Потери мощности, Вт
00:00-1:00	371	496,7
1:00-2:00	364	478,1
2:00-3:00	375	507,4
3:00-4:00	382	526,6
4:00-5:00	370	494
5:00-6:00	413	615,5
6:00-7:00	439	695,4
7:00-8:00	468	790,3
8:00-9:00	512	945,9
9:00-10:00	505	920,2
10:00-11:00	520	975,7
11:00-12:00	563	1143,8
12:00-13:00	568	1164,2
13:00-14:00	543	1063,9
14:00-15:00	551	1095,5
15:00-16:00	566	1156
16:00-17:00	534	1029
17:00-18:00	487	855,8
18:00-19:00	468	790,3
19:00-20:00	443	708,1
20:00-21:00	401	580,2
21:00-22:00	394	560,2
22:00-23:00	369	491,3
23:00-24:00	357	459,9

Для двух остальных случаях расчет проводится аналогичным образом.

Исходя из проведенных расчетов для трех случаев, построим сравнительную диаграмму потерь мощности за сутки, рис. 3.

Можно сделать вывод, что наибольшие потери мощности за сутки были в третьем случае, где два цеха питаются от одной ТП. Также мы видим, что в первом и втором случаях потери мощности были практически одинаковы.



Рис. 3. Сравнительная диаграмма потерь мощности за сутки

По расчетам видно, что наибольшие потери происходили в период максимальных нагрузок. Поэтому, для того, чтобы снизить потери, нужно регулировать графики нагрузок в целях доведения их до равномерных.

Для решения проблемы пикового потребления будем использовать накопитель энергии. Рассмотрев несколько разновидностей накопителей и сравнив их достоинства и недостатки, пришли к выводу, что наиболее востребованы на сегодняшний день накопители с электрохимическими аккумуляторами [6,7]. Мы будем использовать накопитель модели СНПФ с литий-ионными аккумуляторами мощностью 50 кВт и энергоемкостью 200 кВт\*ч.

Характеристика данного накопителя:

1. Страна производителя: Россия;
2. Мощность: 50 кВт;
3. Выходной коэффициент мощности: 0,95;
4. Время автономной работы: 4 часа;
5. Тип электрохимической системы: Литий-ионная.

Было принято, что накопители заряжаются ночью, в период минимальных нагрузок, а используются в часы пиковой нагрузки [3,4].

После установки накопителей энергии, был проведен расчет потерь мощности в сети предприятия, аналогично тому, что проводился выше. Исходя из проведенных расчетов для трех случаев, получили сравнительную диаграмму потерь мощности за сутки до установки накопителей и после установки, которая представлена на рис. 4.

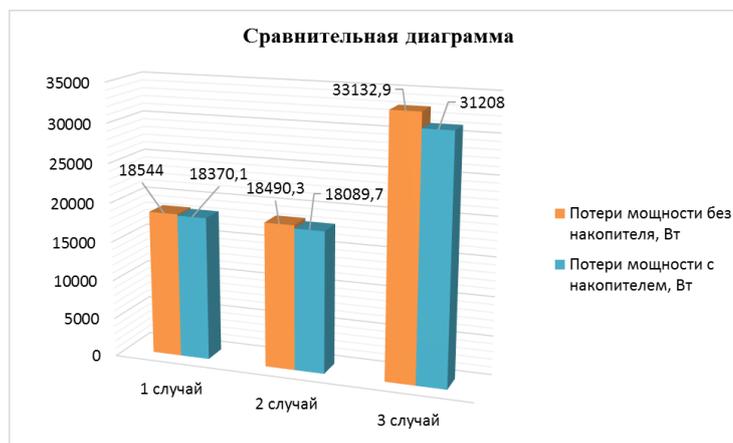


Рис. 4. Сравнительная диаграмма потерь мощности без использования накопителя и с накопителем

После проведенных исследований потерь мощности для трех различных случаев, рассчитаем разницу потерь без накопителя и с накопителем.

$$\text{Для 1-го случая: } \Delta = \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{н}}}{\Delta P_{\text{бн}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{18370,1}{18544}\right) \cdot 100\% = 0,94\%$$

Для 2-го случая:  $\Delta = (1 - \frac{\Delta P_{\text{н}}}{\Delta P_{\text{бн}}}) \cdot 100\% = (1 - \frac{18089,7}{18490,3}) \cdot 100\% = 2,2 \%$

Для 3-го случая:  $\Delta = (1 - \frac{\Delta P_{\text{н}}}{\Delta P_{\text{бн}}}) \cdot 100\% = (1 - \frac{31208}{33132,9}) \cdot 100\% = 5,8 \%$

### **Заключение**

Установка накопителей энергии дала результат во всех трех случаях. В третьем случае после использования накопителей, потери мощности уменьшились на 5,8 % и это наилучший результат среди всех рассмотренных случаев.

Проведя анализ соотношения мощности используемого накопителя и размаха на суточных графиках нагрузки, можем сказать, что подбор мощности накопителя зависит от размаха на графике и использование накопителя мощностью, меньше чем размах, может дать несущественный результат от его применения.

Также заметим, что использование накопителей дало более существенный результат в линиях меньшей протяженностью. Так использование накопителя на РП-3, позволило в значительной мере снизить нагрузку на ТП-11, а вследствие, уменьшить потери мощности в период максимальных нагрузок.

Таким образом, применение накопителей энергии в трех различных случаях, позволило снизить потребляемую мощность в период максимальных нагрузок, а также снизить потери мощности.

Результаты данных исследований могут быть использованы при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий.

### **ИСТОЧНИКИ**

[1] Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: диссертация ... кандидата технических наук; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой университет "Горный"] - Санкт-Петербург, 2013.- 130 с

[2] Добрынин Е.В., Крылов А.Н., Батищев А.М. Оценка эффективности использования накопителей энергии // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 110–113.

[3] Н. В. Савина, Л. Н. Лисогурская, И. А. Лисогурский \ Накопители электрической энергии как средство повышения надежности и экономичности функционирования электрической сети // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 2 (92) Часть 1. С. 63—70

[4] Как накопить и сохранить энергию из возобновляемых источников [Электронный ресурс]/Режим доступа: <https://altenergiya.ru/accumulator/kak-nakopit-i-soxranit-energiyu.html>.

[5] Кабели силовые с бумажной изоляцией (1, 6, 10, 20, 35кВ) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-bumajnoi-izolyaciei>

[6] ГОСТ Р МЭК 62620-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие некислотные электролиты. Аккумуляторы и батареи литиевые для промышленных применений [Электронный ресурс]/Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200140416>.

[7] ПНСТ 405-2020 (МЭК 63056:2020). Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие некислотные электролиты. Требования безопасности для литий-ионных аккумуляторов и батарей для использования в система накопления электрической энергии. [Электронный ресурс] /Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720380.pdf>

[8] Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 3-13.

[9] Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Шандрыгин Д.А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 6. С. 42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

[10] Геркусов А. А. Влияние несимметричной нагрузки на потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4-20 кВ / А. А. Геркусов, Е. И. Грачева, О. А. Шумихина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 15-28.

УДК 620.9

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ КАК СРЕДСТВО КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

И.И. Цицонь, В.А.Гаврилов  
ФГБОУ ВО “КГЭУ”, г.Казань, Республика Татарстан  
e-mail:honey.roditel@mail.ru, 2s19gavr@gmail.ru

*Аннотация:* В работе представлен микропроцессорный блок управления возбуждением для тиристорного возбудителя высоковольтного синхронного электропривода компрессора, который является средством регулирования коэффициента мощности в цеху. Данный контроллер позволит удерживать в заданных пределах и регулировать параметр косинуса фи, тем самым компенсируя реактивную мощность и снижая потери напряжения в сети.

*Ключевые слова:* Микропроцессорный блок возбудителя, тиристорный возбудитель, компенсация реактивной мощности.

# MICROPROCESSOR – BASED EXCITATION CONTROL UNIT AS A MEANS OF REACTIVE POWER COMPENSATION

I.I.Tsitson, V.A.Gavrilov  
FGBOU VO "KGEU", Kazan, Republic of Tatarstan  
e-mail:honey.roditel@mail.ru, 2s19gavr@gmail.ru

***Abstract:** The paper presents a microprocessor excitation control unit for a thyristor exciter of a high-voltage synchronous compressor electric drive, which is a means of controlling the power factor in the shop. This controller will allow you to keep within the specified limits and adjust the cosine parameter  $\phi$ , thereby compensating for reactive power and reducing voltage losses in the network.*

***Key words:** Microprocessor unit exciter, thyristor exciter, reactive power compensation.*

## **Введение**

В настоящее время, проблемы, связанные с экономией электроэнергии, актуальны и по сей день. К показателю экономичности электрической энергии относится не только правильное и рациональное ее потребление, но и отслеживание потребляемой полной мощности, которая состоит из двух составляющих: активной и реактивной. Первая из них предназначена для питания электропотребителей, у которых нагрузка представлена активными сопротивлениями.

Опыт многих промышленных предприятий показал, что конкурентоспособность их продукции во многом зависит от внедрения программ энергосбережения. На каждом из них проводятся определенные мероприятия, которые позволяют снизить реактивную мощность с целью повышения коэффициента мощности и снижения потерь напряжения. Если минимизировать потери такого рода, то и потребление полной мощности будет снижено, следовательно, эффективность такого предприятия будет выше.

Для достижения данной цели существует несколько способов, которые можно классифицировать по нескольким признакам. В первую очередь, данную проблему стараются решить без применения специальных, дополнительных устройств. Если внутрицеховые мероприятия не позволяют снизить реактивную мощность до необходимой величины, заданной на предприятии, появляется необходимость использования компенсаторных установок, например УКРМ. Данные устройства не всегда выгодно устанавливать, так как такие установки нельзя отнести к дешевому оборудованию. В данной статье будет предложено использование контроллера микропроцессорного блока управления возбуждением, который позволит регулировать значение тока возбуждения, подаваемого на обмотку, и, тем самым, изменять и удерживать коэффициент мощности в определенном диапазоне, исходя из желаний заказчика или руководителя предприятия.

## **Основная часть**