Форма «Т». Титульный лист заявки в Российский научный фонд
Конкурс 2022 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»

<table>
<tr><td rowspan="4">Название проекта
Теплоперенос трубчатых теплообменных аппаратов в условиях несимметричных и симметричных возвратно поступательных пульсаций</td><td>Номер проекта</td><td>23-29-00845</td></tr>
<tr><td colspan="2">Отрасль знания: 09</td></tr>
<tr><td colspan="2">Основной код классификатора: 09-201
Дополнительные коды классификатора:
09-404 09-406</td></tr>
<tr><td colspan="2">Код ГРНТИ 44.31.35</td></tr>
<tr><td>Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта:
Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна</td><td colspan="2">Контактные телефон и e-mail руководителя проекта:
+79172224787, haybullina.87@mail.ru</td></tr>
<tr><td colspan="3">Полное и сокращенное наименование организации, через которую должно осуществляться финансирование проекта:
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет"
ФГБОУ ВО "КГЭУ"</td></tr>
<tr><td>Объем финансирования проекта в 2023 г.:
1500 тыс. руб.</td><td>Год начала проекта:
2023</td><td>Год окончания проекта:
2024</td></tr>
<tr><td colspan="3">Гарантирую, что при подготовке заявки не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в Фонд материалов и их использование Фондом для проведения экспертизы и для обнародования (в виде аннотаций заявок).</td></tr>
<tr><td colspan="2">Подпись руководителя проекта

_____ /А.И. Хайбуллина/

Подпись руководителя организации*
*Либо уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа. В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. - руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации. Непредставление копии распорядительного документа или доверенности в случае подписания формы уполномоченным представителем организации, а также отсутствие расшифровки подписи, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

_____/_____/

Печать (при наличии) организации</td><td>Дата регистрации заявки
15.06.2022 г.</td></tr>
</table>

Форма 1. Сведения о проекте

1.1. Название проекта

на русском языке

Теплоперенос трубчатых теплообменных аппаратов в условиях несимметричных и симметричных возвратно поступательных пульсаций

на английском языке

Heat transfer of tubular heat exchangers under conditions of asymmetric and symmetrical reciprocating pulsations

1.2. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, критическая технология

Указывается согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899) в случае, если тематика проекта может быть отнесена к одному из приоритетных направлений, а также может внести вклад в развитие критических технологий Российской Федерации.

8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.

Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») *(при возможности отнесения)*

Н2 Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии

1.3. Ключевые слова *(приводится не более 15 терминов)*

на русском языке

Энергосберегающие технологии, интенсификация теплообмена, эффективные теплообменные аппараты, пульсационные технологии, нестационарный конвективный теплообмен, математическое моделирование, теплогидравлическая эффективность.

на английском языке

Energy-saving technologies, enhancement of heat transfer, efficient heat exchangers, pulsation technologies, unsteady convective heat transfer, mathematical modeling, thermo-hydraulic efficiency.

1.4. Аннотация проекта *(объемом не более 2 стр.; в том числе кратко – актуальность решения указанной выше научной проблемы и научная новизна)*

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

на русском языке

На сегодняшний день недостаток информации по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в пучках труб при вынужденных пульсациях потока ограничивает применение пульсационных методов интенсификации теплообмена для повышения эффективности трубчатых теплообменных аппаратов. Несмотря на существующую информацию, в основном в зарубежной литературе, данная информация остается на начальном этапе развития. Имеющаяся в литературе информация, безусловно, является основой для понимания процессов интенсификации теплообмена в пучках труб по данной теме. Однако данной информации не достаточно для ее систематизации и глубокого понимания процессов теплообмена в пучках труб в условиях искусственной нестационарности потока, тем более для ее широкого практического применения. Практически все работы носят чисто фундаментальный характер, целью которых априори является выяснение возможности интенсификации теплообмена при пульсирующих течениях. В целях упрощения, исследования проводятся, без привязки к реальным технологическим процессам, режимам работы теплообменных аппаратов и их конструктивных особенностей. Исследованные режимы течения зачастую соответствуют ламинарному режиму течения, такие течения проще моделируются численными методами. При этом в качестве рабочей среды принимается воздух, что также существенно упрощает исследования. В промышленности в основном применяются турбулентные режимы течения (за исключение высоковязких жидкостей, мазут, масло, нефть и т.д.). Исследования проводятся при единичных значениях числа Рейнольдса, и числа Прандтля. Для упрощения численного моделирования применяются пульсации синусоидального характера, хотя на практике форма пульсаций может быть несимметрична. В литературе превалируют работы, в которых исследуется подстройка вынужденных частот пульсаций с собственными частотами вихреобразований, возникающими при стационарном течении в следе трубок пучка или одиночного цилиндра, с целью интенсификации теплообмена. При этом интенсификация наблюдается только для отдельных рядов

пучка и не значима для всего пучка труб. На сегодняшний день в научной литературе отсутствуют работы, в которой экспериментальным методом исследуется теплообмен, при пульсирующем потоке воды в пучке труб, в условиях протока теплоносителя (кроме работ авторов проекта). При численном исследовании имеются несколько публикаций с отдельными режимами пульсаций. Имеющихся данных, численных исследований, не достаточно для уверенного прогнозирования теплоотдачи в трубчатых теплообменниках, даже при указанных в этих же работах режимах, поскольку количество рядов в пучке ограничено тремя, шестью рядами. В литературе полностью отсутствуют экспериментальные данные о влиянии несимметричных пульсаций на теплообмен, даже для одиночного цилиндра, тем более нет данных по пучкам труб. Отсутствуют верифицированные модели турбулентности для условий рассматриваемых в проекте. Нет информации по расчету пульсационного оборудования в пучках труб при несимметричных пульсациях. Ограниченность информации в этой области объясняется сложностью проведения как экспериментальных, так и численных исследований. Разнообразие геометрических компоновок и режимных параметров усложняет получение универсальных зависимостей для прогнозирования теплоотдачи. Трубчатые теплообменные аппараты работают в условиях интенсивного теплообмена. Для достижения интенсификации необходимо применение высоко амплитудных пульсаций с возвратно поступательным движением теплоносителя. Сложности при практической реализации также уменьшают количество возможных исследований в этой области. На сегодняшнем этапе развития инженерных наук практически не осталось простых решений. Поэтому для реализации целей проекта необходимо проведение многомасштабных исследований, основанных на взаимодополняемом физико-математическом моделировании.

на английском языке

To date, the lack of information on heat transfer and hydraulic resistance in tube bundles under forced flow pulsations limits the use of pulsation methods of heat transfer intensification to improve the efficiency of tubular heat exchangers. Despite the existing information, mainly in foreign literature, this information remains at the initial stage of development. The information available in the literature, of course, is the basis for understanding the processes of heat transfer intensification in tube bundles on this topic. However, this information is not sufficient for its systematization and deep understanding of heat transfer processes in tube bundles under conditions of artificial flow unsteadiness, especially for its wide practical application. Almost all works are of a purely fundamental nature, the purpose of which is a priori to elucidate the possibility of intensifying heat transfer in pulsating flows. In order to simplify, research is carried out without reference to real technological processes, operating modes of heat exchangers and their design features. The studied flow regimes often correspond to the laminar flow regime; such flows are easier to model by numerical methods. In this case, air is taken as the working medium, which also greatly simplifies the research. In industry, turbulent flow regimes are mainly used (with the exception of high-viscosity liquids, fuel oil, oil, oil, etc.). Research is carried out at single values ⊠⊠of the Reynolds number and the Prandtl number. To simplify the numerical simulation, pulsations of a sinusoidal nature are used, although in practice the shape of the pulsations may be asymmetric. The literature is dominated by works that study the adjustment of forced pulsation frequencies with the natural frequencies of vortex formation that occur during stationary flow in the wake of beam tubes or a single cylinder, in order to intensify heat transfer. In this case, intensification is observed only for individual rows of the bundle and is not significant for the entire tube bundle. To date, there are no works in the scientific literature in which heat transfer is studied by an experimental method, with a pulsating water flow in a tube bundle, under conditions of a coolant flow (except for the works of the authors of the project). In the numerical study, there are several publications with separate pulsation regimes. The available data, numerical studies, are not sufficient for confident prediction of heat transfer in tubular heat exchangers, even under the modes indicated in the same works, since the number of rows in a bundle is limited to three or six rows. The literature completely lacks experimental data on the effect of asymmetric pulsations on heat transfer, even for a single cylinder, and moreover, there are no data on tube bundles. There are no verified turbulence models for the conditions considered in the project. There is no information on the calculation of pulsation equipment in tube bundles with asymmetric pulsations. The limited information in this area is explained by the complexity of both experimental and numerical studies. A variety of geometric arrangements and regime parameters complicates the obtaining of universal dependencies for predicting heat transfer. Tubular heat exchangers operate under conditions of intense heat transfer. To achieve intensification, it is necessary to use high-amplitude pulsations with a reciprocating movement of the coolant. Difficulties in practical implementation also reduce the number of possible studies in this area. At the current stage of development of engineering sciences, there are practically no simple solutions left. Therefore, to achieve the goals of the project, it is necessary to conduct multi-scale studies based on complementary physical and mathematical modeling.

1.5. Ожидаемые результаты и их значимость ***(указываются результаты, их значимость для развития новой научной тематики)***

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

на русском языке

В рамках проекта планируется создать научно-технический задел для управления процессами переноса импульса и тепла в трубчатых теплообменных аппаратах, оснащенных пульсационными устройствами, за счет комплексных взаимодополняемых друг друга экспериментальных и численных исследований. При получении закономерностей теплообмена и гидродинамики будет применяться теории подобия. Работоспособность критериев подобия и геометрических симплексов, использованных для обобщения результатов, пульсирующего течения будет проверяться отдельно. Таким образом, полученные в ходе проекта результаты можно будет масштабировать на трубчатые аппараты, с реальными технологическими параметрами для исследованных в рамках проекта условий.

В рамках экспериментальных исследований на физической модели трубчатого теплообменника будут получены характеристики теплообмена при пульсирующих потоках капельной жидкости (вода). Получены результаты многофакторного исследования теплообмена и гидродинамики в пучке труб. Установлено влияние безразмерной амплитуды пульсаций на теплоотдачу, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка. Установлены закономерности теплообмена для числа Фурье от 0,003 до 0,009, что соответствует частоте пульсаций 0,18-0,48 Гц. Определено влияние несимметричности пульсаций на теплоотдачу пучка при скважности пульсаций 0,2-0,5. Определено влияние числа Рейнольдса (в диапазоне от 1200 до 2400) на теплоотдачу при пульсирующем течении. Влияние режимных параметров будет определено независимо друг от друга. Для исследованного диапазона будет получена обобщающая зависимость, позволяющая прогнозировать теплоотдачу пучка. На основе скоростных датчиков давления с достаточным временным разрешением будут определены временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки. Существенное внимание уделяется раскрытию физических механизмов процессов переноса тепла в условиях вынужденной нестационарности потока капельной жидкости. На основе верифицированных, по экспериментальным данным, вихреразрешающих LES подходов будет выявлена связь пространственно-временной структуры течения, в том числе статистических характеристик потока с характеристиками теплообмена в пучках труб при различных параметрах несимметричности пульсационного течения и геометрии пучков труб. Применение LES подходов при достаточном временном и пространственном разрешении позволяют получить адекватную информацию о статистических характеристиках потока, распределении и динамики кинетической энергии турбулентности. В том числе будет получена динамика мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур. Будут получены результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи. Получена информация о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб. Определены мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб. Будет установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты, амплитуды, числа Рейнольдса, скважности пульсаций и геометрических симплексов пучка. Полученная комплексная информация позволит не просто зафиксировать сам факт изменения характеристик теплообмена, а выявить эффекты и механизмы, приводящие к усилению теплообмена.

На основе физического эксперимента и полученных данных при применении LES подхода будут верифицированы URANS модели турбулентности, для определения интегральных характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления, в условиях наложенных пульсаций потока. При необходимости будут уточнены параметры URANS моделей, для повышения их прогнозных свойств. На уточненных URANS моделях, за счет проведения многопараметрических численных исследований интегральных характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления в пучках труб при пульсациях потоков воды, будут получены следующие результаты:

- определено влияние числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
- определено влияние амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
- определено влияние частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
- определено влияние скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
- определено влияние числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
- определено влияние числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях

вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние относительного продольного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;

˜ определено влияние относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;

˜ определено влияние относительного продольного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;

˜ определено влияние относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;

˜ определено влияние интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ определено влияние интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

˜ установлена связь геометрических и режимных параметров пульсаций с теплогидравлической эффективностью пучков труб при одинаковых числах Рейнольдса и мощностях требуемых на прокачку теплоносителя для всего исследованного диапазона;

˜ полученные обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб в зависимости от таких критериев подобия, как число Рейнольдса, число Прандтля, число Фурье, безразмерная амплитуда пульсаций и геометрических симплексов пучков труб, в том числе в зависимости от числа рядов в пучке;

˜ установленные критерии подобия, оказывающих основное влияние на интенсификацию теплообмена на основе анализа обобщающих зависимостей.

˜ предложены безразмерные комплексы, из сгруппированных нескольких критериев подобия, для упрощенной оценки характеристик теплообмена в пульсирующем течении.

В завершающей стадии проекта будут получены характеристики теплообмена натурных испытаний в трубчатом теплообменнике малой производительности в зависимости частоты, амплитуды и скважности пульсаций при разном числе Рейнольдсе. Методики и рекомендаций для расчета трубчатых теплообменных аппаратов оснащенных пульсационными устройствами. В том числе рекомендации по расчету требуемой мощности пульсационных устройств его размеров и режимов работы.

Пульсирующие течения вызывают значительный интерес в РФ (МЭИ, КазНЦ РАН) и за рубежом (Китай, США). На тему заявленного проекта имеется большое количество статей в журналах с высоким импакт фактором. Количество статей на данную тему пополняется каждый год. Однако работы, в которых пульсирующие течения рассматриваются применительно к пучкам труб, имеют единичный характер. В работах КазНЦ РАН экспериментальным методом определены характеристики потока и теплоотдача коридорных и шахматных пучков труб с симметричными пульсациями потока воздуха, без разворота потока, при ограниченных режимных параметрах (число Рейнольдса 2800, число Струхаля <0,418). В научной литературе нет экспериментальных данных по теплообмену, при пульсирующем потоке воды в пучке труб, в условиях протока теплоносителя (кроме работ авторов проекта). Характеристики потока в пучках труб при симметричных пульсациях, без разворота потока изучены Konstantinidis E, при этом теплообмен

отсутствовал. Полученные в ходе проекта результаты отличаются от работ конкурентов, поскольку в работе исследуется целый класс неисследованных пульсирующих течений применительно к пучкам труб с капельной жидкостью (вода). Авторы проекта являются первооткрывателями в области исследований несимметричных возвратно поступательных пульсаций. Систематизированная информация, полученная в результате комплексных взаимодополняемых, экспериментально теоретических исследований, позволит занять лидирующие позиции на мировом уровне, заложив научные основы для проектирования пульсационных теплообменников. Полученные решения создадут предпосылки для повышения эффективности работы теплообменного оборудования, что, в свою очередь, приведет к снижению потребления сырьевых ресурсов и поспособствует повышению экономической эффективности широкого круга технологических процессов используемых в различных инженерных приложениях. Результаты проекта можно будет применить для повышения эффективности теплообменников в системах теплоснабжения промышленных предприятий (в водо-водяных подогревателях), в системах охлаждения (в маслоохладителях) маслоснабжения насосных установок, турбин, станков, прессов и т.д. В составе предприятий при производстве и преобразовании энергии на органическом топливе, в системах транспортировки, распределения и использования энергии, на предприятиях машиностроения, тепловых электрических станциях и т.д.

на английском языке

Within the framework of the project, it is planned to create a scientific and technical reserve for controlling the processes of momentum and heat transfer in tubular heat exchangers equipped with pulsation devices, through complex complementary experimental and numerical studies. When obtaining the laws of heat transfer and hydrodynamics, the theory of similarity will be applied. The performance of the similarity criteria and geometric simplices used to generalize the results of a pulsating flow will be tested separately. Thus, the results obtained during the project can be scaled to tubular devices, with real technological parameters for the conditions studied within the framework of the project.

In the framework of experimental studies on the physical model of a tubular heat exchanger, heat transfer characteristics will be obtained with pulsating flows of a dropping liquid (water). The results of a multifactorial study of heat transfer and hydrodynamics in a tube bundle are obtained. The effect of the dimensionless pulsation amplitude on heat transfer is established at amplitudes of 4-16 beam tube diameters. The regularities of heat transfer were established for the Fourier number from 0.003 to 0.009, which corresponds to a pulsation frequency of 0.18-0.48 Hz. The effect of pulsation asymmetry on the heat transfer of the beam is determined at a duty cycle of pulsations of 0.2-0.5. The effect of the Reynolds number (in the range from 1200 to 2400) on heat transfer in a pulsating flow is determined. The influence of regime parameters will be determined independently of each other. For the studied range, a generalizing dependence will be obtained, which makes it possible to predict the heat transfer of the beam. On the basis of high-speed pressure sensors with sufficient temporal resolution, the temporal characteristics of pressure in the tube bundle will be determined for all regime parameters. The temporal characteristics of the average velocity in the tube bundle were determined by the method of high-speed shooting. Considerable attention is paid to revealing the physical mechanisms of heat transfer processes under conditions of forced unsteady flow of a dropping liquid. Based on experimentally verified eddy-resolving LES approaches, we will reveal the relationship between the space-time structure of the flow, including the statistical characteristics of the flow and the characteristics of heat transfer in tube bundles for various parameters of asymmetry of the pulsating flow and the geometry of tube bundles. The use of LES approaches with sufficient temporal and spatial resolution makes it possible to obtain adequate information on the statistical characteristics of the flow, distribution and dynamics of the kinetic energy of turbulence. Including the dynamics of instantaneous temperature and vector flow fields in three-dimensional space, with the identification of the formation of vortex structures, will be obtained. The results of a numerical study of the dynamics of the local and integral heat transfer coefficients will be obtained. Information about the distribution and dynamics of the kinetic energy of turbulence and Reynolds stresses in the annulus of tube bundles has been obtained. The profiles of the statistical characteristics of the flow in different sections of the tube bundle are determined instantaneously and averaged over the period of pulsations. A relationship will be established between the spatio-temporal characteristics of the flow and heat transfer in the tube bundle, depending on the frequency, amplitude, Reynolds number, duty cycle of the pulsations and geometric simplices of the bundle. The obtained complex information will allow not only to record the very fact of changes in the characteristics of heat transfer, but to identify the effects and mechanisms leading to an increase in heat transfer. Based on the physical experiment and the data obtained using the LES approach, URANS turbulence models will be verified to determine the integral characteristics of heat transfer and hydraulic resistance under conditions of superimposed flow pulsations. If necessary, the parameters of URANS models will be refined to improve their predictive properties. On the refined URANS models, by conducting multi-parameter numerical studies of the integral characteristics of heat transfer and hydraulic resistance in tube bundles with pulsating water flows, the following results will be obtained:

˜ the influence of the Reynolds number (from 1000 to 10000) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of the in-line tube bundle, with relative tube spacings of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;

˜ the influence of the pulsation amplitude (from 4 to 30 bundle tube diameters) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of the in-line bundle of tubes, with relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the influence of the pulsation frequency (from 0.15 to 1 Hz) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of the in-line tube bundle, with relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the effect of the duty cycle (asymmetry) of pulsations (from 0.2 to 0.75) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of the in-line tube bundle, with relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the influence of the Prandtl number (from 2 to 10) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of the in-line tube bundle, with relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the influence of the Reynolds number (from 1000 to 10000) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the influence of the pulsation amplitude (from 4 to 30 bundle tube diameters) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1 ,four;
˜ the influence of the pulsation frequency (from 0.15 to 1 Hz) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1 ,four;
˜ the influence of the duty cycle (asymmetry) of pulsations (from 0.2 to 0.75) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1 .3 and 1.4;
˜ the influence of the Prandtl number (from 2 to 10) on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the influence of the relative longitudinal pitch (from 1.5 to 2) of the in-line bundle on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity was determined for two fixed relative transverse pitches of 1.2, 1.4;
˜ the influence of the relative transverse pitch (from 1.5 to 2) of the in-line bundle on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced unsteadiness was determined for two fixed relative longitudinal pitches of 1.2, 1.4;
˜ the influence of the relative longitudinal pitch (from 1.5 to 2) of the staggered beam on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity was determined for two fixed relative transverse pitches of 1.2, 1.4;
˜ the influence of the relative transverse pitch (from 1.5 to 2) of the staggered beam on heat transfer and hydraulic resistance under conditions of forced non-stationarity was determined for two fixed relative longitudinal pitches of 1.2, 1.4;
˜ the effect of tube interference (for the number of tubes along the fluid flow from 3 to 20) on heat transfer under conditions of forced non-stationarity of the in-line tube bundle, with relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1.4, was determined;
˜ the effect of tube interference (for the number of tubes along the fluid flow from 3 to 20) on heat transfer under conditions of forced non-stationarity of staggered tube bundles, with tube angles of 30, 45, 65 degrees and relative tube pitches of 1.2, 1.3 and 1 ,four;
˜ connection between geometrical and operating parameters of pulsations and thermal-hydraulic efficiency of tube bundles was established at the same Reynolds numbers and powers required for pumping the coolant for the entire range under study;
˜ obtained generalizing dependencies for predicting heat transfer and hydraulic resistance of tube bundles depending on such similarity criteria as Reynolds number, Prandtl number, Fourier number, dimensionless amplitude of pulsations and geometric simplices of tube bundles, including depending on the number of rows in the bundle;
˜ established similarity criteria that have a major impact on the intensification of heat transfer based on the analysis of generalizing dependencies.
˜ dimensionless complexes are proposed, from grouped several similarity criteria, for a simplified assessment of the characteristics of heat transfer in a pulsating flow.

At the final stage of the project, the heat transfer characteristics of full-scale tests in a tubular heat exchanger of low productivity will be obtained depending on the frequency, amplitude and duty cycle of pulsations at different Reynolds numbers. Methods and recommendations for the calculation of tubular heat exchangers equipped with pulsation devices. Including recommendations for calculating the required power of pulsating devices of its size and operating modes.

Pulsating currents are of considerable interest in the Russian Federation (MPEI, KazSC RAS) and abroad (China, USA). There are a large number of articles in journals with a high impact factor on the topic of the declared project. The number of articles on this topic is updated every year. However, works in which pulsating flows are considered in relation to tube bundles are

isolated. In the works of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, the flow characteristics and heat transfer of in-line and staggered tube bundles with symmetrical pulsations of the air flow, without flow reversal, with limited regime parameters (Reynolds number 2800, Strouhal number <0.418) are determined by an experimental method. In the scientific literature there are no experimental data on heat transfer, with a pulsating water flow in a tube bundle, under conditions of a coolant flow (except for the works of the authors of the project). The flow characteristics in tube bundles with symmetrical pulsations, without flow reversal, were studied by Konstantinidis E, with no heat transfer. The results obtained in the course of the project differ from the works of competitors, since the work investigates a whole class of unexplored pulsating flows in relation to tube bundles with a dropping liquid (water). The authors of the project are pioneers in the field of research of asymmetric reciprocating pulsations. Systematized information obtained as a result of complex mutually complementary, experimental and theoretical studies will allow us to take a leading position at the world level, laying the scientific foundations for the design of pulsation heat exchangers. The solutions obtained will create the prerequisites for improving the efficiency of heat exchange equipment, which, in turn, will lead to a decrease in the consumption of raw materials and will contribute to an increase in the economic efficiency of a wide range of technological processes used in various engineering applications. The results of the project can be applied to improve the efficiency of heat exchangers in heat supply systems of industrial enterprises (in water-to-water heaters), in cooling systems (in oil coolers) for oil supply of pumping units, turbines, machine tools, presses, etc. As part of enterprises in the production and conversion of energy on fossil fuels, in systems for the transportation, distribution and use of energy, at engineering enterprises, thermal power plants, etc.

1.6. В состав научного коллектива будут входить (указывается планируемое количество исполнителей (с учетом руководителя проекта) <u>в течение всего срока</u> реализации проекта):

Несоответствие состава научного коллектива (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 12 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

2 исполнителей проекта (включая руководителя),

В соответствии с требованиями пункта 12 конкурсной документации от 2 до 4 человек, вне зависимости от того, в трудовых или гражданско-правовых отношениях исполнители состоят с организацией.

в том числе:

2 исполнителей в возрасте до 39 лет включительно;

1 аспирантов (адъюнктов) очной формы обучения;

0 студентов очной формы обучения.

1.7. Планируемый состав научного коллектива с указанием фамилий, имен, отчеств (при наличии) членов коллектива, их возраста на момент подачи заявки, ученых степеней, должностей и основных мест работы, формы отношений с организацией (трудовой договор, гражданско-правовой договор) в период реализации проекта

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна, руководитель проекта, 34 года, к.т.н., доцент кафедры Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений Института теплоэнергетики Казанского государственного энергетического университета, форма отношений с организацией в период реализации проекта - трудовой договор.

Хайруллин Айдар Рафаэлевич, ответственный исполнитель проекта, 34 года, аспирант, инженер кафедры Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений Института теплоэнергетики Казанского государственного энергетического университета, форма отношений с организацией в период реализации проекта - трудовой договор.

Соответствие профессионального уровня членов научного коллектива задачам проекта

У коллектива имеется опыт работы в области экспериментального и теоретического исследования гидродинамики, тепломассообменных процессов и оптимизации технологических процессов промышленных предприятий в целом.

1. Грант РНФ по проекту №18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2018-2021 гг.) (исполнитель Хайбуллина А.И.);
2. Грант РНФ по проекту 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса», срок реализации (2021-2023 гг.) (исполнитель Хайбуллина А.И.);
3. Грант РНФ по проекту 21-79-10406 «Разработка новых моделей пористых теплообменников с повышенной энергоэффективностью на основе численного моделирования и экспериментальных исследований», срок реализации (2021-2024 гг) (ответственный исполнитель Хайбуллина А.И., исполнитель Хайруллин А.Р.);

4. Разработаны устройства для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах позволяющие повысить их эффективность (Патенты РФ № 146381, 146722, 147387) (Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р.)
5. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Расчет тепло-гидравлической эффективности каналов с насадочными элементами 2021615157, 05.04.2021. Заявка № 2021614227 от 29.03.2021. (Хайбуллина А.И.)
6. НИР (договор №1-И/2017) с ООО «Инжетех» на тему «Проведение исследований по оценке пульсационного воздействия на улучшение эксплуатационных характеристик нефтяных скважин» (2017 г.) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
7. НИР (договор № 2-И/2017) с ООО НП ТК «ЭдНано» на тему «Проведение исследований растительного сырья и разработка решений по реализации технологии непрерывного экстрагирования» (2017 г.) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
8. НИР (договор № 3-И/2017) с ООО «Таткабель» на тему «Определение теплопроводности электроизоляционного материала» (2017 г.) (руководитель Хайруллин А.Р.)
9. НИР (договор №403/144Б-18) с ООО ИЦ «Энергопрогресс» на тему «Лабораторные исследования образцов теплоизоляционных материалов по определению коэффициентов теплопроводности» (2018 г.) (руководитель Хайруллин А.Р., исполнитель Хайбуллина А.И.)
10. НИР (договор № 1-ЭО/2018 г.) с ООО "Тепличный комбинат "Майский" на тему «Проведение исследований эффективности использования энергетических ресурсов и разработка энергетического паспорта ООО «Тепличный комбинат «Майский» (2018 г.) (исполнитель Хайбуллина А.И.)
11. НИР (договор № 0920-22) с ООО ИВЦ «Инжехим» на тему «Исследование степени извлечения белка из растительного сырья при заданных условиях экстрагирования» (2020 г) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
12. НИР (договор № 959/1445-21) с ООО ИЦ «Энергопрогресс» на тему "Исследование энергоэффективности теплоизоляционного цилиндра, лабораторные исследования физико-химических свойств прошивных минераловатных матов" (2021 г) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
13. Стипендиат Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам на тему "Численное и экспериментальное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в пучках труб теплообменного оборудования", 2021 год (руководитель Хайбуллина А.И.)

Коллективом получены существенные результаты по исследованию тепловых и гидродинамических процессов в теплообменном оборудовании.
1. Экспериментальным путем был исследован теплообмен в семи рядном обогреваемом коридорном пучке при наложении на поток воды межтрубного пространства противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций. Относительный продольный и поперечный шаг соответствовал 1,3, частоты пульсаций находились в диапазоне от 0,125 до 0,5 Гц, безразмерная амплитуда от 1,25 до 4,5, осредненное по расходу число Рейнольдса от 100 до 500, число Прандтля соответствовало 5,5. Во всем исследуемом диапазоне исследования зафиксировано увеличение теплоотдачи в нестационарном течении по сравнению со стационарным. Максимальная интенсификация теплоотдачи составила 1,9. Влияние скважности пульсаций на теплообмен не исследовалось. Численным методом, для тех же режимных параметров, исследовано распределение локальной теплоотдачи для центрального цилиндра в пучке труб. Установлено, что интенсификация теплообмена в основном происходит в застойной зоне трубки пучка. (Хайбуллина, Хайруллин)
2. Разработана математическая модель гидравлической системы пульсатор–теплообменник генераций противоточных низкочастотных пульсаций, позволяющая моделировать реалистичные формы пульсаций скорости потока. Проведены численные расчеты с использованием модели. Расхождение полученных форм пульсаций в пучке труб от экспериментальных данных не более 11 %. Проведено численное моделирование теплообмена в канале с пучком труб, при наложении низкочастотных пульсаций, с использованием в качестве граничных условий форм пульсаций полученных посредством модели гидравлической системы пульсатор–теплообменник результаты которого показали удовлетворительное согласование с экспериментальными данными 15 %, что позволяет применять разработанный подход моделирования теплообмена в дальнейшем для подобных задач. Численным методом исследован теплообмен центрального цилиндра в пучках труб при противоточных низкочастотных пульсациях потока масла в диапазоне частот от 0,2 до 0,5 Гц, безразмерной амплитуды от 15 до 35, скважностей пульсаций от 0,25 до 0,5, осредненному по расходу числу Рейнольдса от 100 до 1000, числа Прандтля от 215 до 363. Зафиксировано увеличение теплоотдачи до 3 раз в пульсирующем течении по сравнению со стационарным. По данным численных экспериментов получена обобщающая зависимость для расчета теплоотдачи в исследованном диапазоне. Проведено численное исследование влияния вынужденных несимметричных пульсаций на теплообмен при поперечном обтекании коридорного пучка труб. При проведении численного эксперимента число Рейнольдса находилось в диапазоне от 1000 до 2000, относительная амплитуда пульсаций от 1 до 2, число Струхаля от 0,77 до 1,51, число Прандтля и скважность пульсаций имели фиксированные значения 7,2 и 0,25. Установлено, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне режимных параметров. (Хайбуллина, Хайруллин)

3. Рассмотрена влияние относительного шага трубки в пучке для различных компоновок пучков на интенсификацию теплообмена в условиях пульсирующих потоков масла при числе Рейнольдса Re<1000. Относительный шаг отнесенный к диаметру цилиндра пучка труб находился в диапазоне от 1.25 до 1.75. Рассмотрено влияние пульсаций в пучках труб на теплогидравлическую эффективность при одинаковых числах Рейнольдса и теплогидравлическую эффективность при одинаковых мощностях требуемых на прокачку теплоносителя в стационарном и пульсационном течении. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых числах Рейнольдса наблюдалось для коридорного пучка с шагом 1.25. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых мощностях для коридорного пучка при относительном шаге 1.75. (Хайбуллина, Хайруллин)
4. Проведен численный анализ теплообмена в шахматном пучке труб со стационарным и несимметричным пульсирующим потоком. Отношение поперечного и продольного расстояния к диаметру трубки пучка составляло 1,3. Число Рейнольдса Re равнялось 1100. Рассмотрено влияние числа рядов в пучке труб на интенсификацию теплообмена в пульсирующем потоке. Показано, что интенсификация теплообмена первых рядов существенней, по сравнению с последующими рядами. (Хайбуллина, Хайруллин)
5. Проведено численное исследование, методом дискретных элементов, влияния вынужденных пульсаций масла на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. Установлено, что наложение пульсаций усиливает касательное напряжение сдвига и скорость эрозии в лобовой и кормовой частях труб пучка, которые наиболее подвержены отложениям. Проведенный анализ подтверждает существенное влияние несимметричных пульсаций на очищающие факторы и перспективность их применения для интенсификации очистки пучков труб. (Хайбуллина)
6. Предложена модернизированная схема систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов, оснащенная пульсационной установкой, при этом достигнут экономический эффект за счет уменьшения расхода охлаждающей воды в маслоохладители кожухотрубного типа марки МБ-63-90. По критерию Кирпичева рассчитана эффективность пульсаций для маслоохладителя марки МБ-63-90, показано, что несимметричные пульсации обладают большей энергетической эффективность по сравнению с симметричными пульсациями. (Хайбуллина, Хайруллин)
7. Исследована возможность применения различных RANS моделей турбулентности для прогнозирования теплообмена стационарного течения при поперечном обтекании пучков труб. Наилучшее согласование с экспериментальными данными получено для модели переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST). (Хайбуллина, Хайруллин)
8. Методом LES исследовался теплообмен при поперечном обтекании коридорного десяти рядного пучка труб. При моделировании рассматривались различные подсеточные модели турбулентности. Число Рейнольдса Re было 2400. Локальные характеристики теплообмена восьмого ряда сравнены с экспериментальными данными Жукаускаса. Лучшее совпадение с данными эксперимента получено при использовании локальной модели вихревой вязкости, адаптированной для пристеночных течений (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, WALE). (Хайбуллина, Хайруллин)
9. На основе математического моделирования исследован теплообмен в пористой среде при пульсирующем течении. Пористая среда была представлена в виде двухмерного канала с квадратными трубами. Принятое упрощение позволило провести многопараметрическое исследование, включающее 1458 вариантов расчета, что позволило установить взаимосвязи между геометрическими параметрами пористой среды и критериями подобия для стационарного и пульсационного течения. В результате численного эксперимента получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи в пористой среде в условиях пульсирующих потоков воздуха и воды. Полученные критериальные уравнения справедливы для диапазонов числа Рейнольдса Re от 10 до 100, числа Прандтля Pr от 0,7 до 7,01, безразмерной относительной амплитуде пульсаций A/d от 1 до 3, частоте пульсаций f 0,25 до 0,75, порозности от 0,75 до 0,938. Скважность пульсаций не была включена в обобщающие зависимости. Критериальные уравнения были получены для прогнозирования интенсивности и степени интенсификации теплообмена в пульсирующем течении, отдельно для симметричных и несимметричных пульсаций. Интенсивность теплообмена пористой среды при пульсирующем течении существенно зависит от режимных и геометрических параметров пористой среды. С увеличением числа Рейнольдса интенсивность теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке увеличивается, при этом степень интенсификации теплообмена снижается. С увеличением кинематической вязкости среды теплообмен в пульсационном течении уменьшается по сравнению со стационарным течением. Поэтому интенсификация теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке воздуха меньше. При теплообмене в пористой среде при пульсирующем потоке воды степень интенсификации уменьшается с увеличением числа Прандтля. С увеличением порозности интенсивность теплообмена в пульсирующем течении снижается. Степень интенсификации теплообмена в основном увеличивается с повышением порозности, при этом интенсификация может и понижаться в зависимости от интенсивности пульсаций. (Хайбуллина, Хайруллин)
10. Применение трех RANS моделей турбулентности для предсказания теплообмена стационарного течения в пучке труб исследовано численным методом. Численное моделирование проводилось в диапазоне числа Рейнольдса от 1000

до 10200 с шагом 400. Полученное значение числа Нуссельта сравнивались с известными экспериментальными данными. Лучшее совпадение с экспериментальными данными получено при использовании модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией. Отклонение значений Nu с экспериментальными данными в среднем составило около 6,3%. Максимальное отклонение17,3% зафиксировано для числа Рейнольдса 1400. Для модели переноса сдвиговых напряжений SST Ментера среднее отклонение составило 12,4%, максимальное 79,2% при числе Рейнольдсе 1000. Для модели SST решение было не стабильно при числе Re меньше 3400. С увеличением числа Рейнольдса SST модель лучше предсказывает теплообмен, при Рейнольдсе 10200 отклонение с экспериментальными данными 3,2%. При использовании модели SST k-омега среднее отклонение составило 19,1%, максимальное 55,9% при Рейнольдсе 1000. Распределение теплообмена по глубине пучка различно, в зависимости от числа Рейнольдса и модели турбулентности. Для модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией теплоотдача второго ряда была всегда выше первого ряда. С дальнейшем, увеличением рядов теплоотдача практически не меняется. Теплоотдача седьмого ряда выше остальных рядов, что проявляется существенней с увеличением числа Рейнольдса. Рост теплоотдачи второго ряда связан с повышением турбулентности потока в пучке труб. Увеличение теплоотдачи седьмого ряда можно объяснить возникновением вихриобразования в кормовой части последнего ряда. Для моделей SST и SST k-омега похожие результаты получены только при максимальных числах Рейнольдса. (Хайбуллина, Хайруллин)

11. Проведены экспериментальные исследование влияния пульсаций потока на теплообмен в пучке труб. Экспериментальным путем получены закономерности теплообмена в пучке труб при пульсационном режиме течения потока. Возвратно-поступательное течение в пучке труб генерировалось при помощи пульсационной системы на основе поршневого пульсатора и пневмоцилиндра. Теплообмен при стационарном течении был сравнен с известным критериальным уравнением других авторов для коридорного пучка при числе Рейнольдса меньше 1000. Различия с критериальным уравнением составило 3%. Как правило, при теплообмене с принудительными колебаниями потока увеличение амплитуды пульсаций пропорциоанально увеличению интенсивности теплообмена. Увеличение числа Струхаля приводит к росту степени интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне. Максимальная интенсификация теплообмена составила 3,23 раза. (Хайбуллина, Хайруллин)

12. Численным методом исследовался теплообмен в трубе при пульсирующем потоке масла. Числа Рейнольдса соответствовали 280, 350, 420. Диаметр D трубы составлял 0,014 м. Длина трубы соответствовала 100 диаметрам. Пульсации потока имели несимметричный характер. Задача решалась в двухмерной постановке. Результаты показывают, что увеличение теплоотдачи в пульсирующем течение пропорционально увеличению интенсивности пульсаций. Максимальная интенсификации теплообмена составила 10,5%. На основании данных, полученных в результате численного эксперимента, была проведена оценка уменьшения площади теплообмена маслоохладителя при пульсациях потока. Оценки снижения теплообменной поверхности маслоохладителя при пульсациях потока проводилась на кожухотрубном теплообменнике с шахматным расположением пучка трубок. Теплоноситель внутри трубок было масло, снаружи трубок вода. Необходимая площадь теплообмена для поддержания теплопроизводительности с увеличением амплитуды пульсаций и повышается с увеличением числа Рейнольдса. Уменьшение площади теплообмена с увеличением числа Рейнольдса связано с уменьшением числа Струхаля. Коэффициент теплопередачи существенно зависит от теплоотдачи масла, что связано с его ламинарным течением. Поэтому процент уменьшение площади теплообмена при пульсирующем течении согласуется с процентом интенсификации теплообмена, но не равен ему. Уменьшение площади теплообмена маслоохладителя в зависимости от режима пульсации составило от 2,57% до 8,63%. (Хайбуллина, Хайруллин)

13. Разработан алгоритм для построения, высокопористых металлических и других, пен на языке VusialBasic.Net, основанный на методе трехмерной диаграммы Вороного. Разработанный алгоритм реализован в виде оригинального дополнительного модуля в Ansys Spaceclaime. Данный модуль позволяет генерировать пористые структуры с заданными характеристиками, диаметр фибр, порозность, диаметр ячеек, количество пор на дюйм. Для целей численного исследования выполнено построения двадцати пористых структур. Порозность сгенерированных пен находилась в диапазоне от 0,743 до 0,954, количество пор на дюйм (PPI) от 10 до 80. Для изменения порозности диаметр фибр варьировался от 0,0625 мм до 1,3 мм. Диаметр ячеек пористой среды варьировался от 0,635 мм до 5,8 мм. Полученные результаты по интенсивности теплообмена металлических пен для стационарного течения при порозности 0,954 верифицировались с чужими экспериментальными данными. Отклонения для числа Нуссельта в диапазоне числа Рейнольдса от 20 до 80, числе Прандтля 0,7 составили не более 7%. В результате численного исследования получено, что с увеличением порозности пористой среды происходит уменьшение интенсивности теплообмена. Данная динамика наблюдается при всех PPI. Гидравлическое сопротивление пористой среды увеличивается с повышением порозности независимо от числа Рейнольдса и PPI. Рост гидравлического сопротивления связан с ростом скорости при увеличении порозности. При повышении порозности диаметр фибр уменьшается, соответственно для выдерживания постоянного числа Рейнольдса скорость увеличивается. Изменение PPI не

оказывает влияния на теплоотдачу пористой среды не зависимо от порозности и числа Рейнольдса. При этом с увеличением PPI происходит существенный рост гидравлических потерь. С увеличением числа Рейнольдса происходит рост, как гидравлических потерь, так и интенсивности теплообмена. Максимальной теплоотдачей (Нуссельта 5,18) во всем исследованном диапазоне обладает пористая среда с порозностью 0,743 и числом Рейнольдса 80. Минимальными гидравлическими потерями обладает пористая среда с PPI 10, порозностью 0,743 и числом Re 10. (Хайруллин, Хайбуллина)

14. Численным методом исследована эффективная теплопроводность пористых изоляционных материалов. Предложена методика конструирования изоляционного материала с заданными геометрическими характеристиками, позволяющая с достаточной точностью прогнозировать теплопроводность пористой изоляции. Конструирование вспененных пористых теплоизоляционных материалов основывалось на методе диаграммы Вороного в разработанном дополнительном модуле в Ansys Spaceclaime. Эффективная теплопроводность пористых сред определена для двадцати структур с различными геометрическими характеристиками (порозность, диаметр фибр, диаметр узла). Теплофизические свойства материала соответствовали меламину. Между собой сравнивалась одна регулярная структура и три нерегулярных структуры, с разными диаметрами узлов. Отношение диаметра узла к диаметру фибр нерегулярной структуры соответствовал 1, 2 и 3. Все четыре типа структур сравнивались при одинаковых порозностях. При этом порозность каждой структуры находилась в диапазоне от 0,722 до 0,987. Необходимое значение порозности подбиралось изменением диаметра фибр. Во всем исследованном диапазоне исследованных структур диаметр фибр находился в диапазоне от 0,0489 мм до 0,1259 мм. Диаметр ячейки пористой структуры составлял 0,635 мм, количество пор на дюйм соответствовало 80. Ширина, высота и глубина расчетной области соответствовала двум диаметром ячейки пористой среды. Для верификации численного решения эффективная теплопроводность вспененного меламина с порозностью 0,987 определялась экспериментально. Эффективная теплопроводность вспененного меламина согласно ГОСТ 7076-99. Результат численного моделирования показал удовлетворительное совпадение с экспериментальным значением эффективной теплопроводности. Отличие в значениях теплопроводности с нерегулярными структурами при порозности 0,987 составило 8,7%, 8,5%, 9,1% для структур с отношением диаметра узла к диаметру фибр нерегулярной структуры 1, 2, 3 соответственно. На основе закона сохранения энергии (уравнении Фурье) получено уравнение для прогнозирования эффективной теплопроводности пористых изоляционных материалов. Полученное уравнение позволяет прогнозировать эффективную теплопроводность с учетом конструктивных особенностей структур (длина теплопроводящих фибр, относительный объем фибр не участвующих в теплообмене и порозность). Эффективная теплопроводность рассчитанная по предложенному уравнению лучше всего согласуется с данными, численного моделирования, полученных для регулярных структур. Максимальное отличие теоретического решения с данными численного моделирования для регулярных структур составляет не более 8,1 %. (Хайруллин, Хайбуллина)

15. Проведены экспериментальные исследования влияния увлажнения на тепловые потери волокнистой изоляции в двухмерном тепловом потоке. Для определения тепловых потерь изоляционного материала, в условиях увлажнения, использовалась нагреваемая труба, с охранными зонами согласна ГОСТ 32025-2012. Увлажнение изоляционного материала проводилось по методу инъекции. Содержание влаги по массе составляло 2%, 4% и 6%, температура нагреваемой трубы 45, 65 и 90 градусов. С увеличением степени увлажнения и температуры тепловые потери через базальтовую вату увеличиваются. При более высоких температурах влияние повышения степени увлажнения на изменение тепловых потерь в основном меньше. При температуре 45 градусов тепловые потери увеличиваются от 1,3 до 1,9 раза при изменении содержания влаги от 2% до 6%. При температуре 90 градусов тепловые потери увеличились от 1,6 до 1,7 раза при изменении содержания влаги от 2% до 6%. (Хайруллин, Хайбуллина)

16. Эффективная теплопроводность волокнистой теплоизоляции, с плотностью 80 и 105 кг на метр кубический, из одного и того же рулона была определена в условиях одномерного и двухмерного теплового потока экспериментальным методом. Теплопроводность, полученная в условиях одномерного и двухмерного потока для сухих образцов, сравнена с экспериментальными данными других авторов. Результаты, полученные в данной работе, совпадают с данными других авторов. Значения теплопроводности изоляции полученной двумя методами лучше совпадает между собой, по сравнению с данными других авторов. Лучшее совпадение значений теплопроводности можно объяснить, тем что образцы подготавливались из одного и того же рулона базальтовой ваты. Таким образом, были исключены возможные различия в производственном процессе при изготовлении изоляции (использование различных связующих и т.д.). Отличие в значениях теплопроводности между двумя методами для плотности 80 и 105 кг на метр кубический составило 3 и 9% соответственно. Теплопроводность изоляции при содержании влаги 5% по массе увеличивается независимо от метода измерений. Теплопроводность выше для изоляции с большей плотностью. Теплопроводность изоляции, с плотностью 105 кг на метр кубический, увеличилась на 94% при измерениях в одномерном тепловом потоке и на 88% при измерениях в двухмерном теологом потоке. Как и для сухой изоляции, теплопроводность увлажненной изоляции, полученная двумя методами, хорошо совпадает между собой. Различия между значениями теплопроводности составили не более 8%. (Хайруллин, Хайбуллина)

17. Экспериментальным методом было рассмотрено влияние содержания влаги на теплопроводность базальтовой ваты тепловых сетей изготавливаемыми разными производителями. При проведении экспериментальных исследований применялся стандартный метод горячей нагреваемой пластины. Для всех рассмотренных образцов с повышением содержания влаги наблюдается увеличение теплопроводности. При увеличении содержании влаги на 13.6% теплопроводность рассмотренных изоляционных образцов увеличивалась на 81.3–312.8% по сравнению с сухим материалом. (Хайруллин)

1.8. Планируемый объем финансирования проекта Фондом по годам (указывается в тыс. рублей):

в 2023 г. - 1500 тыс. рублей,

в 2024 г. - 1500 тыс. рублей.

Несоответствие планируемого объема финансирования проекта (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 10 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

1.9. Научный коллектив по результатам выполнения проекта в ходе его реализации предполагает опубликовать в ведущих рецензируемых*** российских и зарубежных научных изданиях**** не менее**

** Приводятся данные за весь период выполнения проекта. Уменьшение количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) по сравнению с порогом, установленным в пункте 16.2 конкурсной документации, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

*** Издания, индексируемые в библиографических зарубежных базах данных публикаций и/или Russian Science Citation Index (RSCI).

**** Фонд вправе устанавливать (изменять) перечень международных баз данных, в которых индексируются научные издания, и/или научных изданий, публикации в которых будут учитываться с повышающим коэффициентом.

В случаях принятия органами власти Российской Федерации или органами управления Фондом соответствующего решения Фонд вправе не менее чем за 8 месяцев до наступления отчетного периода в одностороннем порядке установить или изменить перечень международных баз данных, в которых индексируются научные издания, и/или научных изданий путем направления победителям конкурса соответствующего письменного уведомления.

8 публикаций,

из них

3 в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus);

5 в изданиях, индексируемых в Russian Science Citation Index;

0 в изданиях, индексируемых в иных библиографических базах данных.

Информация о научных изданиях, в которых предполагается опубликовать результаты проекта, в том числе следует указать в каких базах индексируются данные издания - «Сеть науки» (Web of Science Core Collection), «Скопус» (Scopus), RSCI, РИНЦ, иные базы, а также указать тип публикации - статья, обзор, монография, иной тип

Applied Thermal Engineering (Q1) (WoS, Scopus) – результаты экспериментальных исследований пульсирующих течений в пучках труб.

International Journal of Heat and Mass Transfer (Q1) (WoS, Scopus) – 2 статьи: результаты, численных исследований физических механизмов процессов переноса тепла, полученные вихреразрешающими методами LES; часть результатов полученных, при многопараметрических численных исследованиях, на URANS методах.

Научно-технический вестник Поволжья (ВАК) – часть результатов полученных в ходе численных исследованиях, на URANS методах;

Научный журнал «Труды Академэнерго» (ВАК) – результаты по исследованию теплообмена в трубчатом теплообменнике;

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (ВАК) – предложения по методикам и рекомендациям для расчета трубчатых теплообменных аппаратов оснащенных пульсационными устройствами.

Участие на всероссийской конференции с международным участием «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» 2023 г. Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ).

Участие на всероссийской конференции с международным участием «XL Сибирский теплофизический семинар» 2024 г. Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ).

Иные способы обнародования результатов выполнения проекта

1.10. Число публикаций членов научного коллектива, опубликованных в период с 1 января 2017 года до даты подачи заявки,

55, из них

23 – опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или в Scopus,

53 – опубликованы в изданиях, индексируемых Russian Science Citation Index,
2 – опубликованы в изданиях, индексируемых в иных библиографических базах данных.

1.11. Планируемое участие научного коллектива в международных коллаборациях (проектах) (при наличии)

1.12. Информация о возможности использовании результатов выполнения проекта в осуществлении хозяйственной деятельности предприятий Российской Федерации, в том числе о способе использования, о намерениях по внедрению на основании прогнозируемых результатов проекта новой или усовершенствованию производимой продукции (товаров, работ, услуг), новых или усовершенствованных применяемых технологий; о формировании по итогам реализации проекта научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации (с приложением подтверждающих документов, при наличии)
Систематизированная информация, полученная в результате комплексных взаимодополняемых, экспериментально теоретических исследований, позволит занять лидирующие позиции на мировом уровне, заложив научные основы для проектирования пульсационных теплообменников. Полученные решения создадут предпосылки для повышения эффективности работы теплообменного оборудования, что, в свою очередь, приведет к снижению потребления сырьевых ресурсов и поспособствует повышению экономической эффективности широкого круга технологических процессов используемых в различных инженерных приложениях. Результаты проекта можно будет применить для повышения эффективности теплообменников в системах теплоснабжения промышленных предприятий (в водо-водяных подогревателях), в системах охлаждения (в маслоохладителях) маслоснабжения насосных установок, турбин, станков, прессов и т.д. В составе предприятий при производстве и преобразовании энергии на органическом топливе, в системах транспортировки, распределения и использования энергии, на предприятиях машиностроения, тепловых электрических станциях и т.д.

Руководитель проекта подтверждает, что

- все члены научного коллектива (в том числе руководитель проекта) удовлетворяют пунктам 4, 6, 7, 13 конкурсной документации;
- на весь период реализации проекта руководитель проекта будет состоять в трудовых отношениях с организацией, при этом трудовой договор с организацией не будет дистанционным, а также не будет предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации;
- при обнародовании результатов любой научной работы, выполненной в рамках поддержанного Фондом проекта, руководитель проекта и научный коллектив будут указывать на получение финансовой поддержки от Фонда и организацию, а также согласны с опубликованием Фондом аннотации и ожидаемых результатов проекта, соответствующих отчетов о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», а также с предоставлением указанных материалов органам власти Российской Федерации, институтам развития;
- помимо гранта Фонда проект не будет иметь других источников финансирования в течение всего периода практической реализации проекта с использованием гранта Фонда;
- проект не является аналогичным по содержанию проекту, одновременно поданному на конкурсы научных фондов и иных организаций;
- проект не содержит сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа;
- доля членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно в общей численности членов научного коллектива будет составлять не менее 50 процентов в течение всего периода практической реализации проекта;
- в установленные сроки будут представляться в Фонд ежегодные отчеты о выполнении проекта и о целевом использовании средств гранта.

Подпись руководителя проекта _____ /А.И. Хайбуллина/

Форма 2. Сведения о руководителе

2.1. Фамилия, имя, *отчество (при наличии)*

на русском языке

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна

на английском языке фамилия и инициалы

Khaibullina A.I.

WoS ResearcherID *(при наличии)*

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.ResearcherID.com.

https://publons.com/researcher/F-5555-2018/

Scopus AuthorID *(при наличии)*

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197707535

ORCID *(при наличии)*

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org.

https://orcid.org/0000-0001-6927-8949

SPIN-код *(при наличии)*

SPIN-код указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных РИНЦ в результатах поиска нажать на фамилию автора.

7901-6572

РИНЦ AuthorID *(при наличии)*

РИНЦ AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных РИНЦ в результатах поиска нажать на фамилию автора.

https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=691297

2.2. Дата рождения *(указывается цифрами – число, месяц, год)*

06.11.1987

2.3. Гражданство

РОССИЯ

2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат технических наук, 2017

2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии), участие в оргкомитетах или программных комитетах известных международных конференций, иной опыт организации международных мероприятий

Почетная грамота КГЭУ, 2014,
Почетная грамота ОАО «Сетевая компания», 2015,
Почетная грамота РООР «Союз коммунальных предприятий Республики Татарстан», 2019.
Благодарственное письмо Министерства образования и науки Республики Татарстан за весомый вклад в систему образования и воспитания подрастающего поколения и многолетний добросовестный труд, Казань, 2021.

2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

Руководитель проекта может на момент подачи заявки не являться работником организации, но, в случае победы в конкурсе, должен заключить с ней трудовой договор. В случае, если руководитель проекта не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ", Республика Татарстан (Татарстан))

2.7. Область научных интересов – ключевые слова *(приводится не более 15 ключевых слов)*
Интенсификация теплообмена, теплообменное оборудование, низкочастотные несимметричные пульсации, пучки труб, гидродинамика, математическое моделирование.

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда
09-201

2.9. Перечень публикаций руководителя проекта (с указанием при наличии базы данных, в которой индексируется издание, например, RSCI, Web of Science Core Collection, Scopus, и т.п.), опубликованных в период с 1 января 2017 года до даты подачи заявки, подтверждающий выполнение условия пункта 9 конкурсной документации

Для лиц, находившихся в указанный в настоящем пункте период в отпусках по беременности и родам, отпусках по уходу за ребенком, а также отпусках работникам, усыновившим ребенка, допускается наличие соответствующих публикаций также в период, предшествующий 1 января 2017 года, и равный продолжительности таких отпусков. Соответствующая информация указывается справочно в настоящем пункте.

Достаточно привести ссылки на публикации в количестве, равном установленному в конкурсной документации порогу. Несоответствие количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы), приводимое в перечне и/или численно в строке ниже, требованиям пункта 9 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу в соответствии с подпунктом «г» пункта 20 конкурсной документации.

на языке оригинала

1. Ilyin V.K., Sabitov L.S., Haibullina A.I., Hayrullin A.R. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 240, 2017, 012025, P.1-8. https://doi.org/10.1088/1757-899X/240/1/012025.
2. Ilyin V.K., Sabitov L.S., HaibullinaA.I., Hayrullin A.R. Factors influencing on the thermal flow with the cross-section of the corridor tube bundle in low-frequency non-symmetric pulsations // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 240, 2017, 012026, P. 1-10. https://doi.org/10.1088/1757-899X/240/1/012026.
3. Ilyin V.K., Sabitov L.S., HaibullinaA.I., Hayrullin A.R. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 240, 2017, 012027, P. 1-10. https://doi.org/10.1088 /1757-899X/240/1/012027.
4. Haibullina A., Ilin V., Schulze M., Zinnatullin N., Hairullin A. Improvement of the heat exchange of tube bundle heat exchangers [Verbesserung des wärmeaustausches von Rohrbündelwärmetauschern] // Prozesswarme 2018(2), 89-95 p. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38640283.
5. Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., Zinnatullin N.H. Empirical heat transfer correlations of tube bundles under pulsating flows // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. 412 (1), 012025 p. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012025.
6. Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., Ilyin V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. 412 (1), 012026 p. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012026.
7. Haibullina A.I., Ilyin V.K., Sabitov L.S., Zinnatullin N.H., Hayrullin A.R., Dolgova A.N. Thermal and hydraulic efficiency of the staggered tube bundle in pulsating flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. 412 (1), 012027 p. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012027.
8. Khaibullina A.I., Chirukhin K.V., Kim V.A. Numerical Simulation of a Heat Transfer Process in a 2D in-Line Tube Bundle by means of RANS Turbulence Meodels // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, 8933945. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933945.
9. Haibullina A.I., Chirukhin K.V., Sabitov L.S., Hayrullin, A.R. RANS simulation for the prediction of heat transfer for staggered tube bundle in cross-flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. 570 (1), 012030 p. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012030.
10. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р. Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // Вестник «ИГЭУ». Вып. 4, 2019 г. с.12-21 перевод Khaibullina A.I., Khairullin A.R. A numerical study of heat transfer in the in-line tube bundle under pulsating fluid flow conditions // Journal «Vestnik IGEU», №4, 2019. P. 12-21.
11. Липагина А.Д. Хайбуллина А.И., Синявин А.А., Ильин В.К. Эффективность очистки пучка труб низкочастотным пульсационным потоком с твердыми включениями // Вестник «ИГЭУ» Вып. 5 2020 г. с. 14-25 перевод Lipagina A.D., Haybullina A.I., Sinyavin A.A., Ilyin V.K. Efficiency of tube bundle cleaning by low-frequency flow pulsations with solid particles // Journal «Vestnik IGEU», №5, 2020. P. 14-25.
12. Хайбуллина А.И., Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Т. 22.

№ 1. С. 49-57 перевод Haibullina AI, Zinnatullin NX, Ilyin VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning. Power engineering: research, equipment, technology. 2020; 22(1):49-57. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-49-57.
13. Haibullina, A.I., Ilyin, V.K., Yarullina, A.A., Hayrullin, A.R. Enhancement of heat transfer of heat exchangers using in transport by pulsating flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918 (2020), 012163, DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012163.
14. Haibullina, A.I., Hayrullin, A.R., Ilyin, V.K., Savelyeva, A.D.Improving the thermal efficiency in heat exchangers of transport vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918 (2020), 012162, DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012162.
15. Haibullina, A.I., Savelyeva, A.D, Hayrullin, A.R. Numerical analysis of heat transfer in tubular type heat exchangers of transport vehicles with pulsating flow // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012164, doi:10.1088/1757-899X/918/1/012164.
16. Hayrullin A.R., Haibullina A.I., Ilyin V.K. Large-eddy simulations of heat transfer in the tube bundle // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). 720 (2021) 012037 doi:10.1088/1755-1315/720/1/012037.
17. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К., Синявин А.А., Бальзамов Д.С. Выбор модели турбулентности для моделирования теплообмена в пучках труб // Научно-технический вестник Поволжья №11 2021, с. 91-94 перевод Khaibullina A.I., Khairullin A.R., Ilyin V.K., Sinyavin A.A., Balzamov D.S. Selection of a turbulence model for modeling heat transfer in tube bundle // Scientific and Technical Volga region Bulletin №11 2021, p. 91-94.
18. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Сафиуллина Н.И., Латыпова Д.М., Трошина Е.Д. Экспериментальное исследование теплообмена в пучке труб при пульсациях потока // Инженерный вестник Дона, № 11 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7304, с. 125-131 перевод Khaibullina A.I., Khairullin A.R., Safiullina N.I., Latypova D.M., Troshina E.D. Experimental study of heat transfer in bundle of pipes under flow pulsations // Inzhenernyj vestnik Dona, № 11 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7304, p. 125-131.
19. Hayrullin A.R., Haibullina A.I., Ilyin V.K. RANS numerical simulation in in-line tube bundle: prediction of heat transfer // EESTE-2021, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 979 (2022) 012157 doi:10.1088/1755-1315/979/1/012157.
20. Hayrullin A.R., Habibullina I.F., Haibullina A.I., Ilyin V.K. Experimental study pipe insulation heat losses with moisture ingress // EESTE-2021, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 979 (2022) 012125 doi:10.1088/1755-1315/979/1/012125.
21. Haibullina A.I., Hayrullin A.R. Heat Transfer in Pulsating Laminar Flow in a Pipe: Evaluation of the Reduction in the Heat Exchange Area of Oil Cooler // ISTC-EARTHSCI IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 988 (2022) 042038 doi:10.1088/1755-1315/988/4/042038.
22. Хайруллин А.Р., Синявин А.А., Хайбуллина А.И., Ильин В.К. Конструирование вспененных пористых теплоизоляционных материалов методом диаграммы Вороного // Инженерный вестник Дона, №4 (2022) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7600, с. 487-499 перевод Khairullin A.R., Sinyavin A.A., Khaibullina A.I., Ilyin V.K. Design of foamed porous heat-insulating materials using the 3D Voronoi tessellation // Inzhenernyj vestnik Dona, №4 (2022) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7600, p. 487-499.
23. Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И., Синявин А.А. Теплогидравлическая эффективность пористых сред в потоке воздуха и воды при симметричных и несимметричных пульсациях // Инженерный вестник Дона, №4 (2022) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561, с. 539-554 перевод Khaibullina A.I., Khairullin A.R., Sinyavin A.A. Thermal-hydraulic efficiency of porous media in air and water flow with symmetric and asymmetric pulsations // Inzhenernyj vestnik Dona, №4 (2022) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561, p. 539-554.
24. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К., Синявин А.А. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пористых сред сгенерированных методом диаграммы Вороного // Научно-технический вестник Поволжья №5 2022, с. 61-64 перевод Khaibullina A.I., Khairullin A.R., Ilyin V.K., Sinyavin A.A. Heat transfer and hydraulic resistance of porous media generated by the Voronoi diagram method // Scientific and Technical Volga region Bulletin №5 2022, p. 61-64.

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе *(например, добавляйте слово «перевод»)*.

Перечень содержит 24 публикации в изданиях, индексируемых в Russian Science Citation Index.

Перечень содержит 16 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection, Scopus.

Перечень содержит 0 публикаций в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR *(принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных*

http://www.scimagojr.com/).

Перечень содержит 0 публикаций в изданиях, индексируемых в иных библиографических базах данных.

2.10. Основные научные результаты руководителя проекта за период с 1 января 2017 года ***(результаты должны подтверждаться сведениями из заявки, например - публикациями)***

Численным методом исследован теплообмен центрального цилиндра в пучках труб при противоточных низкочастотных пульсациях потока масла в диапазоне частот от 0,2 до 0,5 Гц, безразмерной амплитуды от 15 до 35, скважностей пульсаций от 0,25 до 0,5, осредненному по расходу числу Рейнольдса от 100 до 1000, числа Прандтля от 215 до 363. Зафиксировано увеличение теплоотдачи до 3 раз в пульсирующем течении по сравнению со стационарным. По данным численных экспериментов получена обобщающая зависимость для расчета теплоотдачи в исследованном диапазоне.

(Ilyin V.K, Sabitov L.S, Haibullina A.I. and Hayrullin A.R. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. 240. 012027 p.; Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., Zinnatullin N.H. Empirical heat transfer correlations of tube bundles under pulsating flows // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. 412 (1), 012025 p.)

Проведено численное исследование влияния вынужденных несимметричных пульсаций на теплообмен при поперечном обтекании коридорного пучка труб. При проведении численного эксперимента число Рейнольдса находилось в диапазоне от 1000 до 2000, относительная амплитуда пульсаций от 1 до 2, число Струхаля от 0,77 до 1,51, число Прандтля и скважность пульсаций имели фиксированные значения 7,2и 0,25. Установлено, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне режимных параметров.

(Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р. Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 4. С. 12-21)

Предложены методики оценки факторов влияющих на теплоперенос в пучках труб при пульсирующих течениях. Предложены методики для оценки теплогидравлической эффективности пучков труб при пульсирующих течениях.

(Ilyin V.K, Sabitov L.S, Haibullina A.I. and Hayrullin A.R. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. 240. 012025 p), (Ilyin V.K, Sabitov L.S, Haibullina A.I. and Hayrullin A.R. Factors influencing on the thermal flow with the cross-section of the corridor tube bundle in low-frequency non symmetric pulsations // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. 240. 012026 p.).

Рассмотрена влияние относительного шага трубки в пучке для различных компоновок пучков на интенсификацию теплообмена в условиях пульсирующих потоков масла при числе Рейнольдса Re<1000. Относительный шаг отнесенный к диаметру цилиндра пучка труб находился в диапазоне от 1.25 до 1.75. Рассмотрено влияние пульсаций в пучках труб на теплогидравлическую эффективность при одинаковых числах Рейнольдса и теплогидравлическую эффективность при одинаковых мощностях требуемых на прокачку теплоносителя в стационарном и пульсационном течении. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых числах Рейнольдса наблюдалось для коридорного пучка с шагом 1.25. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых мощностях для коридорного пучка при относительном шаге 1.75.

(Haibullina, A.I., Hayrullin, A.R., Ilyin, V.K., Savelyeva, A.D.Improving the thermal efficiency in heat exchangers of transport vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918 (2020), 012162, DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012162)

Проведен численный анализ теплообмена в шахматном пучке труб со стационарным и несимметричным пульсирующим потоком. Отношение поперечного и продольного расстояния к диаметру трубки пучка составляло 1,3. Число Рейнольдса Re равнялось 1100. Рассмотрено влияние числа рядов в пучке труб на интенсификацию теплообмена в пульсирующем потоке. Показано, что интенсификация теплообмена первых рядов существенней, по сравнению с последующими рядами.

(Haibullina, A.I., Savelyeva, A.D, Hayrullin, A.R. Numerical analysis of heat transfer in tubular type heat exchangers of transport vehicles with pulsating flow // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012164, doi:10.1088/1757-899X/918/1/012164)

Проведено численное исследование, методом дискретных элементов, влияния вынужденных пульсаций масла на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. Установлено, что наложение пульсаций усиливает касательное напряжение сдвига и скорость эрозии в лобовой и кормовой частях труб пучка, которые наиболее

подвержены отложениям. Проведенный анализ подтверждает существенное влияние несимметричных пульсаций на очищающие факторы и перспективность их применения для интенсификации очистки пучков труб.
(Хайбуллина А.И., Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки Известия высших учебных заведений // Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 49-57.), Липагина А.Д., Хайбуллина А.И., Синявин А.А., Ильин В.К. Эффективность очистки пучка труб низкочастотным пульсационным потоком с твердыми включениями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 5. С. 14-25.
Предложена модернизированная схема систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов, оснащенная пульсационной установкой, при этом достигнут экономический эффект за счет уменьшения расхода охлаждающей воды в маслоохладители кожухотрубного типа марки МБ-63-90. По критерию Кирпичева рассчитана эффективность пульсаций для маслоохладителя марки МБ-63-90, показано, что несимметричные пульсации обладают большей энергетической эффективность по сравнению с симметричными.
(Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., Ilyin V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. 412 (1), 012026 p. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012026; Хайбуллина А.И., Ильин В.К. Повышение эффективности теплообмена в системах смазки насосно-силовых агрегатов Вестник КГЭУ, № 3, 2016, 103-114 с.).
Исследована возможность применения различных RANS моделей турбулентности для прогнозирования теплообмена стационарного течения при поперечном обтекании пучков труб. Наилучшее согласование с экспериментальными данными получено для модели переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST).
(Khaibullina A.I., Chirukhin K.V., Kim V.A. Numerical Simulation of a Heat Transfer Process in a 2D in-Line Tube Bundle by means of RANS Turbulence Meodels // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, 8933945. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933945; Haibullina A.I., Chirukhin K.V., Sabitov L.S., Hayrullin, A.R. RANS simulation for the prediction of heat transfer for staggered tube bundle in cross-flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. 570 (1), 012030 p.).
Методом LES исследовался теплообмен при поперечном обтекании коридорного десяти рядного пучка труб. При моделировании рассматривались различные подсеточные модели турбулентности. Число Рейнольдса Re было 2400. Локальные характеристики теплообмена восьмого ряда сравнены с экспериментальными данными Жукаускаса. Лучшее совпадение с данными эксперимента получено при использовании локальной модели вихревой вязкости, адаптированной для пристеночных течений (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, WALE).
(Hayrullin A.R., Haibullina A.I., Ilyin V.K. Large-eddy simulations of heat transfer in the tube bundle // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES).
На основе математического моделирования исследован теплообмен в пористой среде при пульсирующем течении. Пористая среда была представлена в виде двухмерного канала с квадратными трубами. Принятое упрощение позволило провести многопараметрическое исследование, включающее 1458 вариантов расчета, что позволило установить взаимосвязи между геометрическими параметрами пористой среды и критериями подобия для стационарного и пульсационного течения. В результате численного эксперимента получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи в пористой среде в условиях пульсирующих потоков воздуха и воды. Полученные критериальные уравнения справедливы для диапазонов числа Рейнольдса Re от 10 до 100, числа Прандтля Pr от 0,7 до 7,01, безразмерной относительной амплитуде пульсаций A/d от 1 до 3, частоте пульсаций f 0,25 до 0,75, порозности от 0,75 до 0,938. Скважность пульсаций не была включена в обобщающие зависимости. Критериальные уравнения были получены для прогнозирования интенсивности и степени интенсификации теплообмена в пульсирующем течении, отдельно для симметричных и несимметричных пульсаций. Интенсивность теплообмена пористой среды при пульсирующем течении существенно зависит от режимных и геометрических параметров пористой среды. С увеличением числа Рейнольдса интенсивность теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке увеличивается, при этом степень интенсификации теплообмена снижается. С увеличением кинематической вязкости среды теплообмен в пульсационном течении уменьшается по сравнению со стационарным течением. Поэтому интенсификация теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке воздуха меньше. При теплообмене в пористой среде при пульсирующем потоке воды степень интенсификации уменьшается с увеличением числа Прандтля. С увеличением порозности интенсивность теплообмена в пульсирующем течении снижается. Степень интенсификации теплообмена в основном увеличивается с повышением порозности, при этом интенсификация может и понижаться в зависимости от интенсивности пульсаций.
(Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Синявин А.А.. Теплогидравлическая эффективность пористых сред в потоке воздуха и воды при симметричных и несимметричных пульсациях // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4 (88). С. 539-554.)
Применение трех RANS моделей турбулентности для предсказания теплообмена стационарного течения в пучке труб

исследовано численным методом. Численное моделирование проводилось в диапазоне числа Рейнольдса от 1000 до 10200 с шагом 400. Полученное значение числа Нуссельта сравнивались с известными экспериментальными данными. Лучшее совпадение с экспериментальными данными получено при использовании модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией. Отклонение значений Nu с экспериментальными данными в среднем составило около 6,3%. Максимальное отклонение17,3% зафиксировано для числа Рейнольдса 1400. Для модели переноса сдвиговых напряжений SST Ментера среднее отклонение составило 12,4%, максимальное 79,2% при числе Рейнольдсе 1000. Для модели SST решение было не стабильно при числе Re меньше 3400. С увеличением числа Рейнольдса SST модель лучше предсказывает теплообмен, при Рейнольдсе 10200 отклонение с экспериментальными данными 3,2%. При использовании модели SST k-омега среднее отклонение составило 19,1%, максимальное 55,9% при Рейнольдсе 1000. Распределение теплообмена по глубине пучка различно, в зависимости от числа Рейнольдса и модели турбулентности. Для модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией теплоотдача второго ряда была всегда выше первого ряда. С дальнейшем, увеличением рядов теплоотдача практически не меняется. Теплоотдача седьмого ряда выше остальных рядов, что проявляется существенней с увеличением числа Рейнольдса. Рост теплоотдачи второго ряда связан с повышением турбулентности потока в пучке труб. Увеличение теплоотдачи седьмого ряда можно объяснить возникновением вихриобразования в кормовой части последнего ряда. Для моделей SST и SST k-омега похожие результаты получены только при максимальных числах Рейнольдса.
(Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К., Синявин А.А., Бальзамов Д.С. Выбор модели турбулентности для моделирования теплообмена в пучках труб // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 11. С. 91-94.)
Проведены экспериментальные исследование влияния пульсаций потока на теплообмен в пучке труб. Экспериментальным путем получены закономерности теплообмена в пучке труб при пульсационном режиме течения потока. Возвратно-поступательное течение в пучке труб генерировалось при помощи пульсационной системы на основе поршневого пульсатора и пневмоцилиндра. Теплообмен при стационарном течении был сравнен с известным критериальным уравнением других авторов для коридорного пучка при числе Рейнольдса меньше 1000. Различия с критериальным уравнением составило 3%. Как правило, при теплообмене с принудительными колебаниями потока увеличение амплитуды пульсаций пропорциоанально увеличению интенсивности теплообмена. Увеличение числа Струхаля приводит к росту степени интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне. Максимальная интенсификация теплообмена составила 3,23 раза.
(А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, Н.И.Сафиуллина, Д.М. Латыпова, Е.Д. Трошина Экспериментальное исследование теплообмена в пучке труб при пульсациях потока // Инженерный вестник Дона, №11 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7304)
Численным методом исследовался теплообмен в трубе при пульсирующем потоке масла. Числа Рейнольдса соответствовали 280, 350, 420. Диаметр D трубы составлял 0,014 м. Длина трубы соответствовала 100 диаметрам. Пульсации потока имели несимметричный характер. Задача решалась в двухмерной постановке. Результаты показывают, что увеличение теплоотдачи в пульсирующем течение пропорционально увеличению интенсивности пульсаций. Максимальная интенсификации теплообмена составила 10,5%. На основании данных, полученных в результате численного эксперимента, была проведена оценка уменьшения площади теплообмена маслоохладителя при пульсациях потока. Оценки снижения теплообменной поверхности маслоохладителя при пульсациях потока проводилась на кожухотрубном теплообменнике с шахматным расположением пучка трубок. Теплоноситель внутри трубок было масло, снаружи трубок вода. Необходимая площадь теплообмена для поддержания теплопроизводительности с увеличением амплитуды пульсаций и повышается с увеличением числа Рейнольдса. Уменьшение площади теплообмена с увеличением числа Рейнольдса связано с уменьшением числа Струхаля. Коэффициент теплопередачи существенно зависит от теплоотдачи масла, что связано с его ламинарным течением. Поэтому процент уменьшение площади теплообмена при пульсирующем течении согласуется с процентом интенсификации теплообмена, но не равен ему. Уменьшение площади теплообмена маслоохладителя в зависимости от режима пульсации составило от 2,57% до 8,63%.
(Haibullina A.I., Hayrullin A.R. Heat transfer in pulsating laminar flow in a pipe: evaluation of the reduction in the heat exchange area of oil cooler В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 3." 2022. С. 042038.)

2.11. Общее число публикаций в ведущих рецензируемых*** российских и зарубежных научных изданиях за период с 1 января 2017 года,**

******* Издания, индексируемые в библиографических зарубежных базах данных публикаций и/или Russian Science Citation Index (RSCI).**

53, из них:

53 - опубликовано в изданиях, индексируемых Russian Science Citation Index;

21 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus,

Указание количества публикаций, опубликованных в перечисленных базах данных, не является обязательным.

в том числе 0 в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR;

1 - опубликовано в изданиях, индексируемых в иных библиографических базах данных.

2.12. Дополнительный список из 5 наиболее значимых публикаций руководителя проекта *(монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях (в т.ч. публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus). Приводится не более 5 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))*

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях руководителя проекта, за исключением публикаций, указанных в п. 2.9 настоящей формы.

на языке оригинала

2.13. Опыт выполнения научных проектов *(указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия (руководитель или исполнитель), номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)*

В том числе проектов, финансируемых РНФ (при наличии):

Являюсь исполнителем проекта № 21-79-10406, 2021-2023 гг.

2.14. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2023 году

Общее количество – 2, из них:
руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 1,
а именно:
Исполнитель гранта РНФ по проекту 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса», срок реализации (2021-2023 гг.)
(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

2.15. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на руководство данным проектом в случае победы в конкурсе Фонда -

50 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

2.16. Предполагаемая форма трудовых отношений**** с организацией, через которую будет осуществляться финансирование:**

****** В соответствии с пунктом 8 конкурсной документации трудовой договор с руководителем проекта не может быть дистанционным и/или предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации.

В соответствии со статьями 91, 100 ТК РФ исчисление продолжительности рабочего времени осуществляется исходя из еженедельного графика работы (за исключением (ст. 104 ТК РФ) работников, занятых на круглосуточных непрерывных работах, а также на других видах работ, где по условиям производства (работы) не может быть соблюдена установленная ежедневная или еженедельная продолжительность рабочего времени).

Работа в режиме гибкого рабочего времени (ст. 102 ТК РФ) должна обеспечивать отработку работником суммарного количества рабочих часов в течение рабочего дня или недели.

Руководитель проекта может на момент подачи заявки не являться работником организации, но, в случае победы в конкурсе, должен заключить с ней трудовой договор. В случае, если руководитель проекта не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

Организация будет являться основным местом работы (характер работы – не дистанционный): **да***;*

Трудовой договор по совместительству (характер работы – не дистанционный): **нет**.

2.17. Опыт образовательной деятельности за последние 5 лет *(указывается информация о руководстве аспирантами,*

адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)

Проведение лекционных, практических, лабораторных занятий по курсам:
- Гидравлика в теплотехнологиях по направлению 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника профиль подготовки бакалавров "Энергообеспечение предприятий"
- Тепломассообменное оборудование предприятий по направлению 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника профиль подготовки бакалавров "Энергообеспечение предприятий"
- Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях по направлению 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника.
- Система теплоснабжения по направлению 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника профиль подготовки бакалавров "Энергообеспечение предприятий"

2.18. Почтовый адрес
420100, г. Казань, ул. Сахарова 5, кв. 19

2.19. Контактный телефон
+79172224787

2.20. Электронный адрес *(E-mail)*
haybullina.87@mail.ru

2.21. Участие в проекте:
Руководитель проекта

2.22. Файл с дополнительной информацией *(резюме, другая дополнительная информация, которая, по мнению руководителя проекта, может быть полезна при проведении экспертизы данного проекта)*
Один файл в формате pdf, до 3 Мб.

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 6 и 7 конкурсной документации) ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна
Данные документа, удостоверяющего личность******* *(серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)*	_____ _____ _____ Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!
Адрес проживания	420100, г. Казань, ул. Сахарова 5, кв. 19
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие******** на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.
Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

******* Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

******** Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись руководителя проекта _____ **/А.И. Хайбуллина/**

Дата подписания «____» _____ 2022 г.

Форма 3. Сведения об организации

собираются автоматически на основе регистрационных данных организации, через которую будет осуществляться финансирование ("Форма Т")

3.1. Полное наименование *(приводится в соответствии с регистрационными документами)*
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет"

3.2. Сокращенное наименование
ФГБОУ ВО "КГЭУ"

3.3. Наименование на английском языке
Federal state budgetary educational institution of higher education "KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY"

3.4. Организационно-правовая форма *(указывается по ОКОПФ)*
Федеральные государственные бюджетные учреждения

3.5. Форма собственности *(указывается по ОКФС)*
Федеральная собственность

3.6. Ведомственная принадлежность
Министерство науки и высшего образования РФ

3.7. ИНН, КПП, ОГРН, ОКТМО
1656019286, 165601001, 1021603065637, 92701000

3.8. Адрес
420066 г.Казань ул.Красносельская, 51

3.9. Фактический адрес
420066 г.Казань ул.Красносельская, 51

3.10. Субъект Российской Федерации
Республика Татарстан (Татарстан)

3.11. Должность, фамилия, имя, *отчество (при наличии)* руководителя организации
Ректор, Абдуллазянов Эдвард Юнусович

3.12. Контактный телефон
+78435194202

3.13. Электронный адрес *(E-mail)*
kgeu@kgeu.ru

Руководитель организации подтверждает, что:

- ознакомлен с условиями конкурса Фонда и согласен на финансирование проекта, в случае его поддержки, через организацию;
- согласен с пунктами 8, 14, 32, 24 и 35 конкурсной документации, иными условиями конкурса;
- подтверждает сведения о руководителе проекта, изложенные в данной заявке;
- организация исполняет обязательства по уплате страховых взносов и налогов (при наличии), платежеспособна, не находится в процессе ликвидации, не признана несостоятельной (банкротом), на ее имущество не наложен арест и ее экономическая деятельность не приостановлена;
- в случае признания заявки победителем организация берет на себя следующие обязательства:
    - заключить с членами научного коллектива гражданско-правовые или трудовые (срочные трудовые) договоры (Трудовые договоры с руководителем проекта и членами научного коллектива не могут предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации. Трудовой договор с руководителем проекта не может быть дистанционным трудовым договором.);

      Если таковые не заключены ранее. В случае, если член научного коллектива не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных

граждан.

- по поручению руководителя проекта выплачивать членам научного коллектива вознаграждение за выполнение работ по проекту;
- ежегодно в установленные сроки представлять отчет о целевом использовании гранта Российского научного фонда.

Руководитель организации гарантирует, что:

- вознаграждение за выполнение работ по реализации проекта будет ежегодно получать каждый член научного коллектива;

  Лица, не являющиеся налоговыми резидентами Российской Федерации, могут осуществлять работы по проекту на безвозмездной основе (за исключением руководителя проекта).
- общий размер ежегодного вознаграждения членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно не будет меньше 35 процентов от суммы ежегодного вознаграждения всех членов научного коллектива;
- общее число членов научного коллектива (вместе с руководителем проекта) будет составлять от 2 до 4 человек, при этом членом научного коллектива не будет являться работник организации, в непосредственном административном подчинении которого находится руководитель проекта;
- научному коллективу будет предоставлено помещение и обеспечен доступ к имеющейся экспериментальной базе для осуществления научного исследования.

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации**.

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

_____/_____/

М.П.

4.1. Научная проблема, на решение которой направлен проект

Общеизвестно, что теплообменные аппараты влияют на технико-экономические показатели теплоэнергетических, нефтеперерабатывающих, холодильных и т.д. установок. Зачастую масса теплообменного оборудования в составе промышленных установок составляет львиную долю от массы установок в целом. С развитием промышленности растет и масса теплообменных аппаратов в составе установок. Весьма важно и актуально техническое совершенствование теплообменного оборудования, которое в первую очередь заключается в уменьшении массогабаритных параметров (сокращение размеров, металлоемкости), в снижении эксплуатационных затрат. Поэтому для улучшения технико-экономических показателей промышленных установок перспективно совершенствование теплообменного оборудования, которое можно достичь путем использования эффективных методов интенсификации теплообмена. Вопросам повышения эффективности теплообменного оборудования занимались и продолжают заниматься многие исследователи [Назмеева Ю.Г., Гортышовым Ю.Ф., Лаптев А.Г., Тарасевич С.Э. Дрейцера Г.А., Антуфьева В.М., Щукина В.К.,. Берглса А.Е, Щелчков А.В., Мигай В.К., Уебба Р. Тоума Дж.Р.] Литература, посвященная проблеме интенсификации теплообмена, включает тысячи ссылок и продолжает расти. Выбор того или иного метода интенсификации не всегда обоснован и поэтому зачастую носит случайный характер, а полученные результаты противоречивы. В связи с этим, а также ввиду растущих требований по энергоресурсоэффективности процессов и аппаратов необходимо продолжение исследований по изучению методов интенсификации теплообмена.

Теплообменные аппараты, основными элементами которых являются пучки труб, широко используются во многих инженерных приложениях. С целью повышения эффективности трубчатых теплообменных аппаратов используются как пассивные, так и активные методы интенсификации теплообмена. К пассивным методам можно отнести применение витых пучков труб (список использованной литературы приведен в дополнительном файле 2) [Li X. et al. (Heat Transfer Engineering, 2019)], пучки с искусственной шероховатостью [Khalatov A.A. et. al., (J. Eng. Phys. Therm., 2018)], оребренные пучки труб [Pongsoi P. et. al., (Int. J. Heat and Mass Trans., 2012)], пучки с трубами разного диаметра [Mavridou S.G. et. al., (Int. J. Heat and Mass Trans., 2015] и т.д. При использовании активных методов необходим дополнительный подвод энергии.

Одним из активных методов является пульсация потока, созданная преднамеренно с целью интенсификации теплообмена. К преимуществам данного метода можно отнести то, что пульсационный метод интенсификации позволяет восстановить или повысить теплопроизводительность существующего теплообменного оборудования без его замены, в отличие, например, от пассивных методов интенсификации, которые требуют изменения поверхности теплообмена. Пульсацию в тепло- и массообменных процессах ранее всего стали применять в США для экстракции на основании патента Ван-Дейка в 1936 г.], а одними из первых эффект от пульсаций в круглой трубе 1929 г. обнаружили Ричардсон и Тайлер. С тех пор создание пульсирующего потока теплоносителя, с целью интенсификации теплообмена в различных теплообменных устройствах исследовалось многими авторами. Имеется большое количество работ, в которых исследуются теплообмен и гидродинамика при пульсирующих течениях в трубах круглого сечения, в каналах с углублениями, при обтекании одиночной квадратной трубы, полу цилиндра, тандема цилиндров, течения за выступом, канала с углублениями, блоков и других препятствий. Однако среди этих работ, имеются лишь единичные, в которых исследуется пульсирующие потоки в пучках труб, исследования чаще посвящены одиночному цилиндру. Исследования пучков труб усложняются большим количеством их конфигураций встречающимся на практике. Большое количество работ, при обтекании одиночного цилиндра в условиях пульсирующих течений, за частую посвящены только вопросом гидродинамики без теплообмена.

При применении вынужденных пульсаций потока, с целью повышения эффективности теплообменного оборудования, необходимо знать закономерности гидродинамики и теплообмена теплоносителя циркулирующего в межтрубном пространстве пучков труб теплообменного оборудования. Указанные закономерности зависят от таких параметров как частота, амплитуда, характер пульсаций (пульсации могут носить как гармонический характер, так и иметь несимметричный характер, когда время периодов ускорения и торможения потока разное), геометрических параметров пучка, режима течения потока. Взаимное влияние всех этих параметров при вынужденных пульсациях потока жидкости требуют детального изучения для лучшего понимания механизмов интенсификации теплопереноса в пучках труб теплообменного оборудования и возможности применения этих знаний для повышения эффективности работы теплообменного оборудования.

4.2. Научная значимость и актуальность решения обозначенной проблемы

На сегодняшний день недостаток информации (в том числе ее полное отсутствие для целого класса течений) по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в пучках труб при вынужденных пульсациях потока ограничивает

применение пульсационных методов интенсификации теплообмена для повышения эффективности трубчатых теплообменных аппаратов. Несмотря на относительно большое количество данных о гидродинамике и теплообмене при поперечном обтекании пучков труб в стационарном потоке аналогичных исследований при пульсирующих потоках крайне мало, в основном работы посвящены одиночному цилиндру. Имеющиеся результаты, даже при обтекании одиночного цилиндра, охватывают ограниченный диапазон режимных параметров. Хотя, полученная информация при обтекании одиночного цилиндра имеет важное значение, являющееся основой для понимания процессов интенсификации теплообмена в пучках труб, она трудно применима для интенсификации трубчатых теплообменников. При этом с практической точки зрения, больший интерес представляют данные о пульсирующих течениях в пучках труб. Несмотря на существующую информацию, в основном в зарубежной литературе, данная информация остается на начальном этапе развития. Практически все работы носят чисто фундаментальный характер, целью которых априори является выяснение возможности интенсификации теплообмена при пульсирующих течениях. В целях упрощения, исследования проводятся, без привязки к реальным технологическим процессам, режимам работы теплообменных аппаратов и их конструктивных особенностей. Исследованные режимы течения зачастую соответствуют ламинарному режиму течения, такие течения проще моделируются численными методами. При этом в качестве рабочей среды принимается воздух, что также существенно упрощает исследования. В промышленности в основном применяются турбулентные режимы течения (за исключение высоковязких жидкостей, мазут, масло, нефть и т.д.). Исследования проводятся при единичных значениях числа Рейнольдса, и числа Прандтля. Для упрощения численного моделирования применяются пульсации синусоидального характера, хотя на практике форма пульсаций может быть несимметрична. При пульсирующих течениях к критериям подобия, используемых при стационарном течении добавляются, как минимум, еще два критерия подобия: безразмерное число Струхаля и относительная амплитуда пульсаций, а для пучков труб, проблема еще более усложняется огромным количеством их конфигураций, встречающихся на практике. Характер (форма) внешних пульсаций также усложняет обобщение результатов. При численном моделировании для упрощения моделирования применяются пульсации синусоидального характера. На практике форма пульсаций может быть несимметрична, что характерней для капельных жидкостей [Федоткин И.М. и др. (Москва: Пищевая промышленность, 1972)]. Форма пульсаций также зависит от применяемого оборудования для генерации пульсаций. Во всех выше упомянутых работах пульсации в основном имеют симметричный синусоидальный характер или близки к гармоническим, пульсации потока создаются периодическим изменением проходного сечения на входе или выходе в исследуемый участок (в случае экспериментального исследования), таким образом происходит прерывание потока. Амплитуда пульсаций зависит от скорости основного потока и степени перекрытия, при полном закрытии сечения скорость потока уменьшается до нуля. При этом научный и практический интерес представляют пульсации с относительно большими значениями амплитуд, при таких пульсациях жидкость совершает возвратно поступательное движение (т.е. жидкость периодически меняет свое направление) и пульсации имеющие несимметричный характер (под такими пульсациями понимаются пульсации имеющие разное время периодов ускорения и торможения потоков). Из научной литературы видно, что интенсификация теплообмена пропорциональна амплитуде пульсаций, что не всегда равнозначно для частоты пульсаций. В работах, в которых пульсации создаются периодическим изменением проходного сечения на входе или выходе в исследуемый участок имеют существенные ограничения по амплитуде пульсаций, поэтому для повышения степени интенсификации теплообмена приходится увеличивать частоту пульсаций. В свою очередь, высокая частота порядка 100-200 Гц может привести к гидроудару (в случае капельной жидкости и расстояния рабочего участка порядка 10 метров).

Другой способ увеличения степени интенсификации, которому уделяется много внимания в литературе, это подстройка вынужденных частот пульсаций с собственными частотами вихреобразований, возникающими при стационарном течении в следе трубок пучка. Данный эффект известен как эффект резонанса или феномен резонанса вихрей. Возникновение вихреобразования, нестационарности в следе трубок пучка в стационарном течении (без вынужденных пульсаций потока), зависит от геометрии пучка труб и режимов течения [Weaver D.S. et. al. (Journal of Pressure Vessel Technology, 1987)], [Weaver D.S. et. al. (Journal of Fluids and Structures, 1993)]. Обычно данный режим характеризуется существенным увеличением теплоотдачи и гидравлического сопротивления. При этом судя по единичным работам интенсификация всего пучка не происходит. Поскольку возникновение вихреобразования может наблюдаться в следе только отдельных рядов в пучке, может иметь различную интенсивность и частоту в зависимости от ряда. Увеличение теплоотдачи также наблюдается только для единичных трубок пучка. При этом, по утверждению самих авторов [Konstantinidis E. et. al. (Transactions of IChemE, Chemical Engineering Research and Design, 2003)] использующих данные методы применять резонансные частоты необходимо с осторожностью из-за опасности повреждения теплообменной поверхности. Возникновение вихреобразования, нестационарности в следе трубок пучка в стационарном течении в основном происходит в разряженных пучках. Поэтому, в такого рода работах исследуются пучки с относительными шагами два четыре диаметра, что нерационально в практических целях, особенно в случае капельной жидкости.

С интенсификацией теплообмена при применении вынужденных пульсаций, также увеличивается гидравлическое сопротивление. Поэтому любая интенсификация за счет пульсаций должна сопоставляться с ростом мощностей требуемых на прокачу теплоносителей через теплообменное оборудование. Поэтому необходимо нахождение оптимальных режимов пульсаций с максимальной эффективностью, которая зависит не только от режимов пульсаций, но и от геометрии теплообмена. Поскольку исследование процессов интенсификации теплообмена в условиях вынужденных пульсаций в пучках труб находится в начальной стадии, вопрос теплогидравлической эффективности не отражен в научной литературе. Также в научной литературе, крайне мало информации о распределении теплоотдачи по глубине пучка. Например, в работах [Molochnikov V.M. 2018, Аслаев А.К., 2018 Molochnikov V.M. 2019] теплоотдача всего пучка оценивается по центральной трубки в пучке. Поскольку теплоотдача первых рядов по ходу жидкости меньше теплоотдачи глубинных рядов, то средняя теплоотдача всего пучка может измениться, в зависимости от общего количество рядов по ходу жидкости в пучке.
На сегодняшний день в научной литературе отсутствуют работы, в которой экспериментальным методом исследуется теплообмен, при пульсирующем потоке воды в пучке труб, в условиях протока теплоносителя (кроме работ авторов проекта). При численном исследовании имеются несколько публикаций с отдельными режимами пульсаций. Имеющихся данных, численных исследований, не достаточно для уверенного прогнозирования теплоотдачи в трубчатых теплообменниках, даже при указанных в этих же работах режимах, поскольку количество рядов в пучке ограничено тремя, шестью рядами. В литературе полностью отсутствуют экспериментальные данные о влиянии несимметричных пульсаций на теплообмен, даже для одиночного цилиндра, тем более нет данных по пучкам труб. Отсутствуют верифицированные модели турбулентности для условий рассматриваемых в проекте и в целом для пульсирующий течений в пучках труб. Нет информации по расчету пульсационной техники в пучках труб при несимметричных пульсациях. Ограниченность информации в этой области объясняется сложностью проведения как экспериментальных, так и численных исследований. Разнообразие геометрических компоновок и режимных параметров усложняет получение универсальных зависимостей для прогнозирования теплоотдачи. Трубчатые теплообменные аппараты работают в условиях интенсивного теплообмена. Для достижения интенсификации необходимо применение высоко амплитудных пульсаций с возвратно поступательным движением теплоносителя. Сложности при практической реализации также уменьшают количество возможных исследований в этой области. На сегодняшнем этапе развития инженерных наук практически не осталось простых решений. Поэтому для реализации целей проекта необходимо проведение многомасштабных исследований, основанных на взаимодополняемом физико-математическом моделировании.
Решение обозначенной проблемы создаст предпосылки для повышения эффективности работы существующих типов трубчатых теплообменных аппаратов, за счет применения вынужденных пульсаций потока. Создаст условия для повышения экономической эффективности широкого круга технологических процессов используемых в различных инженерных приложениях. Результаты проекта можно будет применить для повышения эффективности теплообменников в системах теплоснабжения промышленных предприятий (в водо-водяных подогревателях), в системах охлаждения (в маслоохладителях) маслоснабжения насосных установок, турбин, станков, прессов и т.д. В составе предприятий при производстве и преобразовании энергии на органическом топливе, в системах транспортировки, распределения и использования энергии, на предприятиях машиностроения, тепловых электрических станциях и т.д.

4.3. Конкретная задача (задачи) в рамках проблемы, на решение которой направлен проект, ее масштаб и комплексность

Получить фундаментальные знания в пучках труб, для целого класса не изученных ранее течений, с возвратно поступательным движением теплоносителя и различной степенью несимметрии пульсаций. Получить данные для прогназирования теплоотдачи и гидросопротивления в пучках труб при пульсирующих течениях. За счет полученной информации осуществить масштабный переход от физических и численных моделей к трубчатым аппаратам, оснащенными пульсационными устройствами, с реальными технологическими режимами для повышения их эффективности.

4.4. Научная новизна исследований, обоснование того, что проект направлен на развитие новой для научного коллектива тематики*******, обоснование достижимости решения поставленной задачи (задач) и возможности получения предполагаемых результатов**

*********В том числе, на определение объекта и предмета исследования, составление плана исследования, выбор методов исследования.

В рамках проекта впервые будут получены экспериментальные и теоретические закономерности теплообмена и гидродинамики в условиях, несимметричных и симметричных, возвратно поступательных пульсаций потоков воды в пучках труб. Впервые будут получены результаты не только для отдельных режимов, а для целого класса режимов учитывающих реальные технологические условия работы и конструктивные особенности трубчатых теплообменных

аппаратов. Режимы пульсаций будут исследоваться с учетом возможности практической реализации исследуемых пульсаций в теплообменном аппарате и оборудования для генерации пульсаций. Кроме того будут получены фундаментальные знания в области механизмов переноса тепла для рассматриваемых в проекте условий. Таким образом, в проекте решается комплексная задача, учитывающая дальнейшую техническую возможность применения пульсирующего оборудования. Все же проект ограничивается реально достижимыми рамками в ходе выполнения проекта. Очевидно, что полученная, впервые систематическая информация по данной теме позволит опередить мировой уровень исследований и заложить научные основы для проектирования и конструирования высоко эффективных трубчатых теплообменных аппаратов, оснащенных пульсационными устройствами в потоках капельной жидкости (преимущественно для воды). Полученные в ходе проекта результаты отличаются от работ конкурентов, поскольку в работе исследуется целый класс неисследованных пульсирующих течений применительно к пучкам труб с капельной жидкостью (вода). Авторы проекта являются первооткрывателями в области исследований несимметричных возвратно поступательных пульсаций.

В рамках экспериментальных исследований на физической модели трубчатого теплообменника будут получены характеристики теплообмена при пульсирующих потоках капельной жидкости (вода). Получены результаты многофакторного исследования теплообмена и гидродинамики в пучке труб для 192 отдельных опытов. Установлено влияние безразмерной амплитуды пульсаций на теплоотдачу, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка. Установлены закономерности теплообмена для числа Фурье от 0,003 до 0,009, что соответствует частоте пульсаций 0,18-0,48 Гц. Определено влияние несимметричности пульсаций на теплоотдачу пучка при скважности пульсаций 0,2-0,5. Определено влияние числа Рейнольдса (в диапазоне от 1200 до 2400) на теплоотдачу при пульсирующем течении. Получена обобщающая зависимость, позволяющая прогнозировать теплоотдачу пучка. На основе скоростных датчиков давления с достаточным временным разрешением определены временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки.

На основе верифицированных, по экспериментальным данным, вихреразрешающих LES подходов будет выявлена связь пространственно-временной структуры течения, в том числе статистических характеристик потока с характеристиками теплообмена в пучках труб при различных параметрах несимметричности пульсационного течения и геометрии пучков труб. В том числе получена динамика мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур. Получены результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи. Установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты, амплитуды, числа Рейнольдса, скважности пульсаций и геометрических симплексов пучка.

Верифицированы URANS модели турбулентности для моделирования течения в пучках труб в условиях вынужденной нестационарности для определения интегральных характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления. Уточненные параметры URANS моделей, для повышения их прогнозных свойств. В том числе на с использованием URANS моделей получены следующие научные результаты:

– установлены закономерности числа Рейнольдса (от 1000 до 10000), частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц), числа Прандтля (от 2 до 10), амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление, в условиях вынужденной нестационарности, коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

– установлены закономерности числа Рейнольдса (от 1000 до 10000), частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц), числа Прандтля (от 2 до 10), амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление, в условиях вынужденной нестационарности, шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;

– определено влияние скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорных и шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов (для шахматных труб и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4.

– определено влияние относительного и поперечного продольного шага (от 1,5 до 2) коридорного и шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности.

˜ определено влияние интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности для коридорного и шахматного пучка;

˜ установлена связь геометрических и режимных параметров пульсаций с теплогидравлической эффективностью пучков труб при одинаковых числах Рейнольдса и мощностях требуемых на прокачку теплоносителя для всего исследованного диапазона;

˜ полученные обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб в зависимости от таких критериев подобия, как число Рейнольдса, число Прандтля, число Фурье, безразмерная

амплитуда пульсаций и геометрических симплексов пучков труб, в том числе в зависимости от числа рядов в пучке;
˜ установленные критерии подобия, оказывающих основное влияние на интенсификацию теплообмена на основе анализа обобщающих зависимостей.
˜ предложены безразмерные комплексы, из сгруппированных нескольких критериев подобия, для упрощенной оценки характеристик теплообмена в пульсирующем течении.
В завершающей стадии проекта будут получены характеристики теплообмена натурных испытаний в трубчатом теплообменнике малой производительности в зависимости частоты, амплитуды и скважности пульсаций при разном числе Рейнольдсе. Методики и рекомендаций для расчета трубчатых теплообменных аппаратов оснащенных пульсационными устройствами. В том числе рекомендации по расчету требуемой мощности пульсационных устройств его размеров и режимов работы.
Достижимость решения поставленной задачи подтверждается следующим:
- использованием стандартных методик и измерительных приборов с соответствующей точностью для определения тепловых и гидродинамических параметров потока, оценкой погрешности измерений, согласованием ряда тестовых экспериментальных данных с данными других авторов;
- использованием проверенного современного программного обеспечения для определения тепловых и гидродинамических параметров потока;
- использованием современных средств обработки и анализа данных;
- соответствием ожидаемых результатов физическим процессам теплопереноса при пульсирующих течениях в пучках труб.

4.5. Современное состояние исследований по данной проблеме, основные направления исследований в мировой науке и научные конкуренты

На сегодняшний день стационарное течение как при обтекании одиночного цилиндра (список использованной литературы приведен в дополнительном файле 2) [Zdravkovich M.M. et. al., (Oxford University Press, 1997)], [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1979)] (список использованной литературы приведен в дополнительном файле 2), так и пучка труб [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968)], [Chidanand K., et. al., (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019)] хорошо изучено. Однако течение в условиях пульсаций потока остается мало изученным, особенно теплообмен в пучках труб при пульсационном течении.
Создание пульсирующего потока теплоносителя, с целью интенсификации теплообмена в различных теплообменных устройствах исследовалось многими авторами. Имеется большое количество работ, в которых исследуются теплообмен и гидродинамика при пульсирующих течениях в трубах круглого сечения [Alam T. et. al., (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018)], [Habib M. et. al., (Heat and Mass Transfer, 2002)], [Wang X. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2005)], [(Guo Z. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 1997)], [Said S.A.M. et. al., (International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2003)], [(Yu C. et. al., (Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, 2006)], [(Elsayed A.M. et. al., (International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008)], [(Patro P et. al., (Procedia Engineering, 2015,)], [Siddhanath V. et. al., (International Research Journal of Engineering and Technolog, 2015)], [Mengmei S. et. al., (IOP Conf. Ser., 2018)], [Faghri M. et. al., (Letters in Heat and Mass Transfer, 1979)], [Федоткин И.М. и др. (Москва: Пищевая промышленность, 1972)].
В каналах с углублениями, [Jin D et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2008)].
В каналах с переменным радиусом [Akdag U., et. al., (Thermal Science, 2019)], [Kozlov V., et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2021)].
В каналах с ребрами различной формы [Shyy W.C., et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2021)].
При обтекании одиночной квадратной трубы [Ji T.H. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2008)], [Fu Y. et. al., (Journal of Hydrodynamics, 2017)], [Martin E. et. al., Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2018)].
При обтекании полуцилиндра [Bhalla N. et. al., (Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017)].
При обтекании тандема цилиндров [Mahír N. et. al. (International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008)], [Liu J. et. al., (Applied Thermal Engineering, 2017)], [Mulcahey T.I. et. al., (International Journal of Thermal Sciences, 2013)].
При пульсациях струи в Т-образном канале [Ping L. et. al., (Applied Thermal Engineering, 2019)].
При течении за выступом или уступом [Tong F.. et. al. (Journal of Fluid Mechanics, 2015)], [(Khalil K. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2008)], [Chamkha A.J. et. al., (Energies, 2018)], [Fatih S. et. al., (International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013)], [Davletshin I.A. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2020)].
При обтекании сферы [Mishra G. et. al., (Applied Mathematical Modelling, 2021)].
При обтекании блоков [Moon J.W. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2005)] и др. [Mohammad H.E. et. al., (International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021)].

Пульсации потока могут возникать самопроизвольно или создаваться искусственно. Самопроизвольные пульсации потока могут возникать как при обтекании одиночного цилиндра, так и пучка труб [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1984)]. Возникающие самопроизвольные пульсации потока могут приводить к разрушениям оборудования, особенно при синхронизации частот пульсаций потока с частотами колебаний обтекаемых тел [Dorogi D. et. al., (Ocean Engineering, 2018)]. Поэтому в литературе исследуются феномен резонансных частот [Ying-nan F. et. al., (Journal of Hydrodynamics, 2017)], [(Gnatowska R. et. al., (Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 2014)] и различные способы управления возникающими пульсациями [Палкин Е.В. и др., (Известия Томского политехнического университета, 2016)]. С другой стороны, искусственно созданные пульсации потока можно использовать для интенсификации теплообмена, например, в трубчатых теплообменных аппаратах. С этой целью исследуется теплообмен при поперечном обтекании как одиночного цилиндра, так и пучка труб в условиях вынужденных пульсаций потока.

В работе [Andraka C.E. et. al., (Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985)] экспериментальным методом исследовали теплообмен одиночного цилиндра в пульсирующем потоке воздуха. Число Re = 50000, амплитуда пульсаций скорости потока находилась в диапазоне от 0 до 0,25 , число Sh от 0,0063 до 0,24. В работе получена максимальная локальная интенсификация около 30%. Авторы [Gundappa M. et. al. (J. Heat Transfer., 1991)] также экспериментальным методом исследовали теплообмен одиночного цилиндра в пульсирующем потоке воздуха при близких условиях. Число Re соответствовало 50000, амплитуда пульсаций скорости потока находилась в диапазоне от 4,0 до 15,5 %, число Sh от 0,016 до 0,218. Максимальная интенсификация теплообмена в 45 % наблюдалась в передней части цилиндра, минимальная в 6 % в кормовой части.

В работе [Cheng C.H. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 1997)] экспериментальным методом исследовалось влияние симметричных возвратно поступательных колебаний цилиндра на его теплообмен в потоке воздуха. Число Re находилось в диапазоне от 0 до 4000, безразмерная амплитуда колебаний цилиндра отнесенная к его диаметру A/D от 0 до 0,628, числа Sh от 0 до 0,65. Результаты показывают, что колебания цилиндра могут значительно увеличить коэффициент теплоотдачи во всем исследованном диапазоне параметров, максимальная интенсификация составила 34 %. В работе [Park H.G. et. al. (Journal of Heat Transfer, 2001)] экспериментальным методом исследовался теплообмен при симметричных колебаниях цилиндра в потоке воды. Число Re лежало в диапазоне от 550 до 3500, число Sh от 0 до 1, амплитуда пульсаций A/D соответствовала значениям 0,1 и 0,2. В работе показано, что с увеличением A/D наблюдается рост коэффициента теплоотдачи. С увеличением Sh интенсивность теплообмена может как увеличиться, так и уменьшиться. При A/D = 0,1 наблюдалось два пика с максимальной интенсификацией теплообмена соответствующие значениям Sh = 0,21 и 0,58, при A/D = 0,2 три пика соответствующие Sh = 0,21, 0,37, 0,51. В работе [Ji T.H. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2008)] при экспериментальном исследовании теплообмена квадратной трубы в условиях пульсационного потока воздуха достигнута интенсификация около 12 %. Пульсации потока имели симметричный характер с частотой от 0 до 60 Гц, число Re соответствовало 350 и 540, безразмерная амплитуда пульсаций скорости была постоянной Avel=0,05. В работе [Мусаева Д.А. и др., (Проблемы энергетики, 2012)] численным методом изучалось влияние как симметричных, так и несимметричных пульсаций на теплообмен одиночного цилиндра в потоке воды. Число Re изменялось в диапазоне от 7 до 100, частота пульсаций f от 0 до 0,8 Гц, при этом зафиксирована интенсификация теплообмена до 12 %. Также результаты показывают, что наибольшим эффектом с точки зрения энергоэффективности обладают несимметричные пульсации с частотой 0,05 Гц. Авторами [Bhalla N. et. al., (Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017)] численным методом исследовано влияние симметричных пульсаций на теплообмен полуцилиндра, при числе Re от 10 до 100, Sh от 0 до 2, Avel от 0 до 0,6. Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи на 10 % наблюдалось при Sh = 1 и Avel = 0,6 во всем исследованном диапазоне величин числа Re. В работе [Gupta S. et. al., (International Journal of Thermal Sciences, 2020)] численным методом было исследовано влияния пульсаций на теплообмен одиночного цилиндра для неньютоновской жидкости. Число Re находилось в диапазоне от 0,1 до 40, Pr от 0,7 до 100, Sh от 0 д 3,14, амплитуда от 0 до 0,8. Авторами обнаружено, что в зависимости от амплитуды и числа Sh происходит перестройка структуры потока вблизи поверхности цилиндра, которая приводит к интенсификации теплообмена.

В работе [Hiroshi I. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2014)] численно и экспериментально исследовался теплообмен одиночного цилиндра в пульсирующем потоке, показано что увеличение частоты и амплитуды пульсаций приводят к интенсификации теплообмена. Увеличение теплоотдачи происходит в передней и задней части цилиндра. Максимальные значения мгновенного числа Нуссельта, наблюдаются при фазах пульсаций, соответствующих максимальным скоростям потока. В работах [Wu-Shung F. et. al. (Int. J. Heat Mass Transf., 2002)], [(Zheng Y. et. al. (Heat and Mass Transf. 2017] численно исследовался теплообмен одиночного цилиндра в пульсирующем потоке. В работе [Wu-Shung F. et. al. (Int. J. Heat Mass Transf., 2002)] замечено, что теплоотдача повышается при синхронизации вынужденных частот пульсаций с собственными частотами колебаний вихрей (феномен резонанса вихрей). Интенсификация теплоотдачи в основном наблюдается в задней части цилиндра. В работе же [(Zheng Y. et. al. (Heat and Mass Transf.

2017] в передней части цилиндра. Теплоотдача растет с увеличением частоты пульсаций. Когда вынужденные частоты пульсаций совпадают со значениями, в два раза превышающих собственные частоты колебаний вихрей, интенсификация теплообмена имеет максимальное значение. Дальнейшее увеличение частоты пульсаций приводит к снижению интенсификации теплообмена. В обоих работах [Wu-Shung F. et. al. (Int. J. Heat Mass Transf., 2002)], [(Zheng Y. et. al. (Heat and Mass Transf. 2017] также, как и в работе [Hiroshi I. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2014)] замечено, что максимальные мгновенные значения числа Нуссельта наблюдаются при фазах пульсаций, соответствующих максимальным скоростям потока. В работах [Mikheev N.I. et. al. (Int. J. Heat Mass Transf., 2017)], [Molochnikov V.M. et. al. (Therm. and Aeromechanics, 2017)] проанализирована динамика образования вихревых структур в следе одиночного цилиндра в пульсирующем потоке воздуха и установлена их связь с теплообменом. Показано, что максимальная интенсификация теплообмена наблюдается в задней части цилиндра, что соответствует режиму течения с образованием двух симметричных вихрей в следе цилиндра. Авторы связывают увеличение теплоотдачи с перестройкой структуры течения в задней части цилиндра. В основном, положительные результаты при интенсификации теплообмена в условиях пульсирующих течений при обтекании одиночного цилиндра также сообщаются в работах [Witte A. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2017)], [Dawood A. et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 1981)], [Izadpanah E. et. al. (International Journal of Thermal Sciences, 2018)], [Selimefendigil F. et. al. (Computers & Fluids, 2012)], [Gau C. et. al. (Journal of Heat Transfer, 1999)], [Al-Sumaily et. al. (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2013)], [Guoneng L. et. al. (Heat Transfer Engineering, 2016), [(Papadakis G. et. al. (Proc Inst Mech Eng., 2001)], [Li G. et. al. (Heat Transfer Engineering, 2015)], [Ohmi M. et. al., (Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982)], [Borell G.J. et. al. (Unsteady Turbulent Boundary Layers and Friction, ASME, 1984)], [Sung H.J. et. al. (Int. J. Heat Mass Tran., 1994)], [Karanth K. et. al., (Int. J. Heat Mass Tran., 1994)], [Ebrahimi E. et. al., (Physics of Fluids, 2020)], [Badr H.M., et. al., (Int. J. Heat Mass Tran., 1997)], [Qamar A., et. al., (Phys. Fluids, 2011)], [Qamar A. et. al., (Phys. Fluids, 2012)]

Несмотря на относительно большое количество работ, посвященных обтеканию одиночного цилиндра, работ, посвященных обтеканию пучков труб, существенно меньше.

В работе [Ghazanfarian J. et. al. (Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2018)] численным методом был исследован теплообмен трех рядного осциллирующего коридорного пучка труб, что является ограничением данного исследования. Результаты, полученные в многорядном пучке, могут быть отличны от представленных в работе. Число Рейнольдса соответствовало 100, амплитуда пульсаций A/D находилась в диапазоне от 0,2 до 0,8, число Струхаля в диапазоне от 0,08 до 0,2. Относительный продольный и поперечный шаг находился в диапазоне от 1,5 до 3,5. Пульсации имели симметричный характер. Показано, что интенсификация теплоотдачи различна по глубине пучка. Максимальная интенсификация в 25% наблюдалась для первого ряда, что связано с синхронизацией вынужденных частот пульсаций с собственными частотами колебаний.

В работах [Liang C. et. al., (Engineering Turbulence Modelling and Experiments, 2004)], [Liang C., (PhD Thesis, 2005)] численным способом с использованием LES метода (моделирования крупных вихрей) исследованы пульсирующие течения синусоидального характера в коридорном и шахматном пучке труб. Для шахматного пучка числа Рейнольдса Re=8600, частота пульсаций f=27,4 Гц, относительный продольный шаг был 1,6, поперечный 3,6, количество рядов 6, амплитуда пульсаций скорости Avel=0,1. Интенсификация теплообмена при наложении пульсаций не наблюдалась. Для коридорного пучка Re=8600, f=10, 15,5 Гц, Avel=0,1 относительный продольный шаг был 2,1, поперечный 3,6, количество рядов 6. Получено увеличение теплоотдачи цилиндра первого и второго ряда, связанного с феноменом резонанса вихрей. Авторами также показано хорошее совпадение статистических характеристик потока с экспериментальными данными [Konstantinidis E. et. al., (Chemical Engineering Research and Design, 2000)] при использовании LES.

Характеристики потока при пульсирующих потоках воды в пучках труб были изучены экспериментальным методом в серии работ [Konstantinidis E. et. al. (Chemical Engineering Research and Design, 2000)], [Konstantinidis E. (PhD Thesis, 2001)], [Konstantinidis E. et. al. (ASME J. of Fluids Engineering, 2002)], [Konstantinidis E. et. al. (Transactions of IChemE, Chemical Engineering Research and Design, 2003)], [Konstantinidis E. et. al. (ASME Journal of Fluids Engineering, 2004)]. Исследования проводились для коридорных, шахматных и асимметричных пучков труб, с относительными поперечными и продольными шагами 2,1 и 3,6. Число Рейнольдса Re=2800, 3500 число Струхаля Sh<0,143, амплитуда пульсаций скорости Avel<0,2. Основное внимание уделяется поиску режимов пульсаций, в которых происходит подстройки процесса вихреобразования под частоту вынужденных пульсаций потока с целью интенсификации теплообмена. В цикле данных работ для измерения статистических характеристик потока применялась лазерная-допплеровская велосиметрия. Работы данного автора являются единственным источником, в которых представлены экспериментальные данные по турбулентности, кинетической энергии и структуре потоков воды в условиях вынужденных пульсаций, однако исследований теплообмена в этих работах не проводилось, соответственно нет данных по взаимосвязи характеристик течения с характеристиками теплообмена.

В выше указанных работах авторов Ghazanfarian J., Liang C., Konstantinidis E. исследования проводились при

относительных шагах S1,2/D>1,5, при этом в промышленности (особенно в случае капельной жидкости) широко распространены трубчатые теплообменники при S1,2/D<1,5. Теплообменники с тесными пучками труб более компактны и обладают большей теплогидравлической эффективностью по сравнению с разряженными пучками. Другой причиной использования пучков труб с S1,2/D>1,5 указанными выше авторами, является то, что в них исследуется процессы подстройки вихреобразования в следе трубок под частоту вынужденных пульсаций потока. Известно, что возникновение произвольной нестационарности в следе трубок пучка происходит в основном в разряженных пучках [Weaver D.S. et. al. (Journal of Pressure Vessel Technology, 1987)], [Weaver D.S. et. al. (Journal of Fluids and Structures, 1993)]. Режимные параметры в работах авторов Ghazanfarian, J, Liang C, Konstantinidis E. имеют ограниченный характер, особенно для числа Re и числа Pr, в основном исследуется влияние частоты f. Амплитуда пульсаций также ограничена значениями A/D<0,8.

В работах [Molochnikov V.M. et. al. (J. Phys.: Conf. Ser., 2018)], [Аслаев А.К., и др. (Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену, 2018)], [Molochnikov V.M. et. al. (Therm. and Aeromechanics, 2019)] экспериментальным методом определены характеристики потока и теплоотдача коридорных и шахматных пучков труб с симметричными пульсациями потока. Показано, что вынужденные пульсации приводят к увеличению теплоотдачи. Теплоотдача пучка оценивалась по центральному цилиндру в пучке. Количество рядов в пучке по направлению потока было 5. Опять же результаты, полученные в многорядном пучке, могут быть отличны от представленный в работах авторов Molochnikov V.M, Аслаев А.К. Число Re=2800, число Струхаля Sh<0,418 относительные шаги S1/D и S2/D были одинаковыми и принимали значения 1,2 и 1,8. В серии данных работ режимные параметры также имеют ограниченный характер, рабочей средой являлся воздух. В настоящем проекте планируются исследование теплопереноса и гидродинамики в пучках труб в условиях пульсирующих потоков воды.

В работе [Chen S. et. al. (Cryogenics, 2018)] численным методом исследован теплообмен при симметричных пульсациях в шахматном пучке труб с S1/D=2,12 и S2/D=1,74. Количество рядов по потоку было 18. Число Re<390, частота f<120 Гц, рабочей средой являлся воздух. Показано, что интенсификация зависит от параметров пульсаций и ряда трубки в пучке.

В работе [Mulcahey T.I. et. al., (International Journal of Thermal Sciences, 2013)] с использованием математического моделирования исследовался теплообмен десяти рядного тандема квадратных труб при вынужденных пульсациях потока. Число Re<200, частота f<80 Гц, продольный шаг принимал значения 1,66; 2; 2,5, поперечный шаг составлял 2. Показано, что интенсификация зависит от геометрических и режимных параметров. В работах Chen S., и Mulcahey T.I. получены обобщающие зависимости при исследованных режимных параметрах. Однако применимость зависимостей ограничена режимными параметрами. В промышленных трубчатых аппаратах, реализуется турбулентные режимы, что существенней больше числа Re=390 указанного в работах Chen S. и Mulcahey T.I.

В работе [Zhenjing W. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2020)] исследовался внешний теплообмен шахматного пучка труб погруженного в воду. В эксперименте использовались два пучка с относительными шагами S1,2/D=1,5 и S1,2/D=3,5. Количество рядов в пучке по направлению потока составляло 10, по высоте 4. Теплообмен оценивался по всем трубкам пучка. В данном исследовании моделировалась ситуация теплообменника погруженного в морскую воду. Полагается, что отвод тепла происходит межтрубным пространством пучка, внутри трубок циркулирует охлаждаемый теплоноситель. Колебательное течение создавалось искусственно в специальном бассейне. Высота волны (амплитуда отнесенная к диаметру трубки пучка) A/D находилась в диапазоне A/D от 6,25 до 18,75, частота волны от 0,25 до 0,5 Гц. Получена интенсификация теплообмена до 2-3 раз в колебательном режиме, по сравнению со стоячей водой. Обнаружено, что увеличение амплитуды практически пропорционально увеличению теплоотдачи пучка. Изменение частоты волны практически не влияет на степень интенсификации теплоотдачи. Степень интенсификации выше для тесного пучка труб S1,2/D=1,5. В другой статье те же авторы [Zhenjing Wu. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2020)] исследовали теплообмен двух шахматных пучков труб погруженных в воду с искусственно созданными волнами, при тех же режимах пульсаций. Первый пучок труб имел равные относительные шаги S1,2/D=3,5, во втором пучке трубки были расположены не равномерно, относительные шаги составляли S1,2/D=1,5, 2,5 и 3,5. В результате исследований выявлено, что пучок с неравномерными шагами более выгоден для передачи тепла в данных в условиях. В данных работах исследовалась возможность использования тепла морей и океанов в системах с тепловыми насосами. Результаты, полученные в этих работах, трудно применимы для теплообменников, работающих в стандартных условиях.

Несмотря на относительно большое количество данных о гидродинамике и теплообмене при поперечном обтекании пучков труб в стационарном потоке аналогичных исследований при пульсирующих потоках крайне мало, в основном работы посвящены одиночному цилиндру. Имеющиеся результаты, даже при обтекании одиночного цилиндра, охватывают ограниченный диапазон режимных параметров. Хотя, полученная информация при обтекании одиночного цилиндра имеет важное значение, являющееся основой для понимания процессов интенсификации теплообмена в пучках труб, она трудно применима для интенсификации трубчатых теплообменников. При этом с практической точки зрения, больший интерес представляют данные о пульсирующих течениях в пучках труб.

При пульсирующих течениях к критериям подобия, используемых при стационарном течении добавляются, как минимум, еще два критерия подобия: безразмерное число Струхаля и относительная амплитуда пульсаций, а для пучков труб, проблема еще более усложняется огромным количеством их конфигураций, встречающихся на практике.
Характер (форма) внешних пульсаций также усложняет обобщение результатов, при численном моделировании для упрощения моделирования применяются пульсации синусоидального характера, хотя на практике форма пульсаций может быть несимметрична, что характерней для капельных жидкостей [Федоткин И.М. и др. (Москва: Пищевая промышленность, 1972)]. Форма пульсаций также зависит от применяемого оборудования для генерации пульсаций. Во всех выше упомянутых работах пульсации в основном имеют симметричный синусоидальный характер или близки к гармоническим, пульсации потока создаются периодическим изменением проходного сечения на входе или выходе в исследуемый участок (в случае экспериментального исследования), таким образом происходит прерывание потока. Амплитуда пульсаций зависит от скорости основного потока и степени перекрытия, при полном закрытии сечения скорость потока уменьшается до нуля. При этом научный и практический интерес представляют пульсации с относительно большими значениями амплитуд, при таких пульсациях жидкость совершает возвратно поступательное движение (т.е. жидкость периодически меняет свое направление) и пульсации имеющие несимметричный характер (под такими пульсациями понимаются пульсации имеющие разное время периодов ускорения и торможения потоков).
Из научной литературы видно, что интенсификация теплообмена пропорциональна амплитуде пульсаций, что не всегда равнозначно для частоты пульсаций. В работах, в которых пульсации создаются периодическим изменением проходного сечения на входе или выходе в исследуемый участок имеют существенные ограничения по амплитуде пульсаций, поэтому для повышения степени интенсификации теплообмена приходится увеличивать частоту пульсаций. В свою очередь, высокая частота порядка 100-200 Гц может привести к гидроудару (в случае капельной жидкости и расстояния рабочего участка порядка 10 метров). Даже при высоких частотах пульсаций 100-200 Гц и соответственно числе Струхаля Sh, достигнутая интенсификация по приведенным в обзоре работам составляет порядка 10-30%. При этом за счет увеличения относительной амплитуды пульсаций A/D 5-20 возможно добиться существенного увеличения теплоотдачи до 3 раз [Zhenjing Wu. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2020)].
Другой способ увеличения степени интенсификации, которому уделяется много внимания в литературе, это подстройка вынужденных частот пульсаций с собственными частотами вихреобразований, возникающими при стационарном течении в следе трубок пучка. Данный эффект известен как эффект резонанса или феномен резонанса вихрей. Возникновение вихреобразования, нестационарности в следе трубок пучка в стационарном течении (без вынужденных пульсаций потока), как уже было подмечено выше зависит от геометрии пучка труб и режимов течения [Weaver D.S. et. al. (Journal of Pressure Vessel Technology, 1987)], [Weaver D.S. et. al. (Journal of Fluids and Structures, 1993)]. Обычно данный режим характеризуется существенным увеличением теплоотдачи и гидравлического сопротивления. При этом судя по единичным работам интенсификация всего пучка не происходит. Поскольку возникновение вихреобразования может наблюдаться в следе только отдельных рядов в пучке, может иметь различную интенсивность и частоту в зависимости от ряда. Увеличение теплоотдачи также наблюдается только для единичных трубок пучка. При этом, по утверждению самих авторов [Konstantinidis E. et. al. (Transactions of IChemE, Chemical Engineering Research and Design, 2003)] использующих данные методы применять резонансные частоты необходимо с осторожностью из-за опасности повреждения теплообменной поверхности.
С интенсификацией теплообмена при применении вынужденных пульсаций, также увеличивается гидравлическое сопротивление. Поэтому любая интенсификация за счет пульсаций должна сопоставляться с ростом мощностей требуемых на прокачу теплоносителей через теплообменное оборудование. Поэтому необходимо нахождение оптимальных режимов пульсаций с максимальной эффективностью, которая зависит не только от режимов пульсаций, но и от геометрии теплообмена. Поскольку исследование процессов интенсификации теплообмена в условиях вынужденных пульсаций в пучках труб находится в начальной стадии, вопрос теплогидравлической эффективности практически не отражен в научной литературе. Также в научной литературе, крайне мало информации о распределении теплоотдачи по глубине пучка. Например, в работах [Molochnikov V.M. 2018, Аслаев А.К., 2018 Molochnikov V.M. 2019] теплоотдача всего пучка оценивается по центральной трубки в пучке. Поскольку теплоотдача первых рядов по ходу жидкости меньше теплоотдачи глубинных рядов, то средняя теплоотдача всего пучка может измениться, в зависимости от общего количество рядов по ходу жидкости в пучке.
Одной из частых критик использования пульсаций расхода для интенсификации теплообмена в межтрубном пространстве является то, что пульсации могут создавать дополнительную нагрузку на насосы, в том числе усиливать механические колебания труб в пучке, провоцируя их разрушение. Хотя, как известно, механические колебания труб в пучке могут присутствовать и при стационарном режиме работы теплообменников [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1984)], а нагрузка на насосы теплообменного оборудования также может нести переменный характер в следствии меняющейся тепловой нагрузки. Поэтому применение пульсаций для интенсификации теплообмена практически реализуема при должном учете перечисленных факторов. К тому же известны прецеденты практического

использования такого метода интенсификации. В работе [Федоткин И.М. и др. (Москва: Пищевая промышленность, 1972)] трубчатый подогреватель сахарного завода был оснащен пульсационным устройством. Пульсации были наложены на теплоноситель циркулирующий внутри трубок теплообменника. Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи составило 85%. В другой работе [Кудашев С.Ф., дисс. к.т.н., 2014] пульсации применялись в греющем контуре пластинчатого теплообменника индивидуального теплового пункта учебного корпуса Ковылкинского филиала ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева». Показано возрастание коэффициента теплопередачи на 26%. Получен суммарный экономический эффект в размере 103879 руб/год по состоянию на 2013 г.

Заключение

В результате обзора можно выделить трех авторов [Konstantinidis E., Liang C., Molochnikov V.M.], результаты которых ближе всего к предлагаемым в данном проекте. Результаты, полученные данными авторами будут сопоставляться с данными полученными в данном проекте. В частности экспериментальные данные полученные авторами Konstantinidis E., Molochnikov V.M. будут использованы для верификации численных исследований. Исследования, проводимые в рамках данного проекта, в том числе интерпретация результатов в целом будет основана на роботах авторов из ведущих профильных журналов, все это позволит данному проекту соответствовать мировому уровню. Соответствие мировому уровню также подтверждается большим количеством статей на данную тему в журналах с высоким импакт фактором. Количество статей на данную тему пополняется каждый год. При этом российский вклад в данную тему носит единичный характер.

Несмотря на существующую информацию, в основном в зарубежной литературе, данная информация остается на начальном этапе развития. Имеющаяся в литературе информация, безусловно, является основой для понимания процессов интенсификации теплообмена в пучках труб по данной теме. Однако данной информации не достаточно для ее систематизации и глубокого понимания процессов теплообмена в пучках труб в условиях искусственной нестационарности потока, тем более для ее широкого практического применения. Практически все работы носят чисто фундаментальный характер, целью которых априори является выяснение возможности интенсификации теплообмена при пульсирующих течениях. В целях упрощения, исследования проводятся, без привязки к реальным технологическим процессам, режимам работы теплообменных аппаратов и их конструктивным особенностям. Исследованные режимы течения зачастую соответствуют ламинарному режиму течения, такие течения проще моделируются численными методами. При этом в качестве рабочей среды принимается воздух, что также существенно упрощает исследования. В промышленности в основном применяются турбулентные режимы течения (за исключение высоковязких жидкостей, мазут, масло, нефть и т.д.). Исследования проводятся при единичных значениях числа Рейнольдса, и числа Прандтля. Для упрощения численного моделирования применяются пульсации синусоидального характера, хотя на практике форма пульсаций может быть несимметрична. В литературе превалируют работы, в которых исследуется подстройка вынужденных частот пульсаций с собственными частотами вихреобразований, возникающими при стационарном течении в следе трубок пучка или одиночного цилиндра, с целью интенсификации теплообмена. Интенсификация наблюдается только для отдельных рядов пучка и не значима для всего пучка труб. Возникновение вихреобразования, нестационарности в следе трубок пучка в стационарном течении в основном происходит в разряженных пучках. Поэтому в такого рода работах исследуются пучки с относительными шагами два четыре диаметра, что нерационально в практических целях, особенно в случае капельной жидкости, при этом количество рядов в пучке ограничено тремя шестью рядами. На данный момент в мировой науке нет систематически последовательных работ, в которых разрабатываются пульсационные методы интенсификации теплообмена трубчатых теплообменных аппаратов с реальными технологическими режимами.

Получение систематической информации по данной теме безусловно позволит опередить мировой уровень исследований по данной теме, и заложить научные основы для проектирования и конструирования высоко эффективных трубчатых теплообменных аппаратов, оснащенных пульсационными устройствами.

Ниже обозначены те проблемы и конкретные задачи, которые остались малоизученными в рамках данной темы и будут решаться в рамках данного проекта:

1. Полученные данные по теплообмену в пучках труб при вынужденных пульсациях потока имеют единичный характер с ограниченными режимными и геометрическими параметрами.

1.1. Практически отсутствуют данные о влиянии компоновки пучка на теплообмен, относительные продольные и поперечные шаги в основном находятся в диапазоне $S1,2/D>1,5$, при этом в промышленности (особенно в случае капельной жидкости) широко распространены трубчатые теплообменники при $S1,2/D<1,5$.

1.2. Данные по теплообмену получены при единичных числах Рейнольдса и Прандтля Pr, соответственно отсутствуют зависимости влияния Re и Pr на теплообмен (в данном проекте число Рейнольдса будет находиться в диапазоне $Re<10000$, число Прандтля $Pr<10$).

1.3. Частота пульсаций $f>1$ Гц (в данном проекте частота пульсаций будет находиться в диапазоне $f<1$ Гц).

1.4. Поскольку пульсации потока создаются периодическим изменением проходного сечения на входе или выходе в исследуемый участок, амплитуда пульсаций в основном находятся в диапазоне Avel<1 (в данном проекте амплитуда пульсаций будет находиться в диапазоне A/D<20, т.е. иметь возвратно-поступательный характер)
1.5. Не рассмотрено взаимное влияние режимных и геометрических параметров.
2. Отсутствуют данные по теплообмену в условиях несимметричных пульсаций потока (в исследованиях пульсации имеют гармонический характер).
3. Отсутствуют данные по гидравлическому сопротивлению и теплогидравлической эффективности.
4. Ограничены данные по картине течения, статистическим характеристикам в пучках труб и их взаимосвязи с теплообменом.
5. Отсутствуют данные по локальной динамике теплообмена в пучке труб при планируемых в данном проекте режимных и геометрических параметрах.
6. Нет данных по влиянию количества рядов по ходу жидкости в пучке труб на теплообмен всего пучка.
7. Нет достоверной информации по возможности применимости URANS моделей турбулентности.
8. Отсутствуют обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи, необходимые для практического применения пульсаций в потоках капельной жидкости.
9. Полученные результаты других авторов невозможно применить к теплообменным аппаратам с реальными технологическими процессами.
10. Нет методик и алгоритмов для расчета трубчатых аппаратов оснащенных пульсационными устройствами.

4.6. Предлагаемые методы и подходы, общий план работы на весь срок выполнения проекта и ожидаемые результаты
(объемом не менее 2 стр.; в том числе указываются ожидаемые конкретные результаты по годам; общий план дается с разбивкой по годам)
Методы и подходы

Исследование процессов теплопереноса и гидродинамики при вынужденных пульсациях теплоносителя в пучках труб будут проводиться экспериментально и теоретически. На сегодняшний день нет достоверных моделей турбулентности для прогнозирования характеристик течения в пульсационных течениях при поперечном обтекании пучков труб. Поэтому для проведения математического моделирования необходимо получение достоверных экспериментальных данных, которые в дальнейшем можно будет использовать для верификации математический моделей.
Экспериментальные исследования будут проводиться на специально собранном для этих целей стенде (функциональная схема стенда приведена файле 1). Основные экспериментальные исследования пульсирующих течений в пучке труб будут проводиться в испытательном теплообменнике (ТО1 см. файл1). Испытательный теплообменник представляет собой прямоугольный канал. По центру канала перпендикулярно набегаемому потоку воды расположен пучок труб. Внутри трубок также циркулирует вода. Количество рядов труб в пучке по ходу жидкости и в поперечном направлении восемь. Диаметр трубок 10 мм, относительный продольный и поперечный шаг 1,3. На входе в трубно и межтрубное пространство расположены выравниватели потока.
Интегральные характеристики внешней теплоотдачи всего пучка труб при стационарных и нестационарных условиях будут оцениваться по тепловому балансу и уравнению теплопередачи. Тепловой баланс будет определяться по измеренным расходом теплоносителей и их температурам на входе и выходе из межтрубного и трубного пространства пучка труб. Теплоотдача внутри труб, в уравнении теплопередачи будет оцениваться по известным критериальным уравнениям, для соответствующих гидродинамических режимов течения. Данный метод определения внешний теплоотдачи пучков труб распространен в научной литературе, как при стационарном, так и при пульсационном режиме течения [Mavridou S.G. et. al., (Int. J. Heat and Mass Trans., 2015)], [Zhenjing W. et. al., (Int. J. Heat and Mass Transfer., 2020)].
Также будут проведены исследования характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления для отдельных режимов пульсаций в кожухотрубном теплообменнике (ТО3).
Температура потока жидкости измеряется на входе и выходе в испытательный участок. Расход жидкости измеряется с помощью электромагнитных расходомеров. Циркуляцию жидкости через трубное и межтрубное пространство обеспечивают циркуляционные насосы и консольный центробежный насос. Для плавного регулирования расхода через межтрубное пространство, консольный центробежный насос оснащен преобразователем частоты. Нагрев воды осуществляется электронагревательным котлом. Съем тепла вторичного контура осуществляется воздушным теплообменником (ТО6). Все измеряемые величины регистрируются на компьютере. Стабилизация измеряемых величин, при проведении одного опыта происходит в течение нескольких часов. Значения измеряемых величин осредняются за последние полчаса. Температура воды на выходе из котла задается на компьютере. Постоянное значение температуры воды на выходе из котла поддерживается с помощью ШИМ регулятора. Гидравлическое сопротивление пучка в стационарных и нестационарных условиях определятся с помощью пьезорезистивных

преобразователей давления с максимальной частотой измерения 2кГц, сигнал которого фиксируется внешним модулем АЦП/ЦАП. Датчики давления установлены непосредственно на входе и выходе из пучка труб испытательного теплообменника.
Для создания низкочастотный несимметричный пульсаций с возвратно-поступательным движением жидкости используется пульсатор (устройство для передачи колебаний от системы генерации пульсаций к теплоносителю в испытательном теплообменнике). Пульсатор представляет собой обечайку с расположенным в нем поршнем. Пульсатор соединен общим штоком с пневмоцилиндром, который также имеет поршень. Движение поршня пульсатора с заданной амплитудой, частотой и скважностью осуществляется попеременной подачей сжатого воздуха в поршневую и штоковую полость пневмоцилиндра за счет контрольно-регулирующей пневмоаппаратуры (пневмоклапаны, пневмодроссели, реле давления). Управления контрольно-регулирующей аппаратурой осуществляется с компьютера. Для подачи сжатого воздуха используется поршневой компрессор. Пульсации в данном исследовании имеют возвратно поступательный характер. Амплитуда пульсаций (A) это обратный ход (расстояние) жидкости в пучке труб. В относительных величинах A/D, где D диаметр трубки пучка. Для определения амплитуды пульсаций на входе в межтрубное пространство установлен амплитудамер. Амплитудамер установлен вертикально и представляет собой прозрачную трубу с установленным внутри обратным клапаном. Клапан пропускает поток в прямом направлении и не пропускает в обратном. Амплитуда фиксируются по смещению обратного клапана вверх по трубе, что характеризует разворот жидкости в пучке. Смещение обратного клапана вверх по трубе, соответствует первому полупериоду пульсаций. Далее следует второй полупериод пульсаций, здесь поток вновь разворачивается и движется в прямом направлении.
При пульсационном режиме работы стенда возникают проблемы определения расхода жидкости. Поэтому над питательном баке (БК1), установлен питательный бак (БК2) (см. дополнительный файл 1). Питательный бак (БК2) служит для стабилизации расхода жидкости при работе пульсатора. Вода из воздушно-отопительного агрегата сначала сливается в (БК1), затем через электромагнитный расходомер поступает в бак (БК1), откуда насосом Н4 подается в испытательный теплообменник.
На лабораторном стенде также имеется второй способ создания пульсаций. Для этих целей стенд оснащен управляемыми электромагнитными клапанами, пульсационной камерой и гидроаккумулятором. При создании пульсаций электромагнитный клапан (КУ2) открывается на заданный период времени, в результате чего в (ПК1) подается пневматический импульс из ресивера (Р1), созданное избыточное давление в (ПК1) воздействует на теплоноситель второго контура выбранного теплообменника. Теплоноситель, в случае достаточного давления, меняет свое направление и начинает заполнять гидроаккумулятор (ГА1). Далее следует период времени, когда электромагнитный клапан (КУ2) закрывается и открывается (КУ3), в результате происходит сброс давления из (ПК1). В ПК и ГА между воздухом и жидкостью имеется разделяющая мембрана. Контроль и регулирование давления в (Р1, ПК1, ГА1) осуществляется при помощи датчиков давления (РТ). Времена открывания электромагнитных клапанов и задание необходимых давлений осуществляется с компьютера.
Теоретические исследования будут проводиться на основе уравнений гидродинамики (уравнения Навье-Стокса и неразрывности), конвективного теплообмена (уравнения Фурье-Кирхгофа). Уравнения Навье-Стокса будут разрешатся с помощью LES (Large Eddy Simulation, моделирования крупных вихрей). Дискретизация уравнений в частных производных будет выполняться методом конечных объемов. Применение LES при достаточном временном и пространственном разрешении позволяют получить адекватную информацию о статистических характеристиках потока, распределении и динамики кинетической энергии турбулентности. В том числе динамику мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур. Однако применение LES затруднительно при многопараметрическом исследовании и увеличении чисел Рейнольдса. Поэтому данный подход будет использоваться только при отдельных режимах пульсаций. Верификация в стационарном режиме будет производиться по данным [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1984)]. В пульсационном режиме по данным [Liang C., (PhD Thesis, 2005)], [Konstantinidis E. (PhD Thesis, 2001)]. Отличие данной работы от работ авторов Liang C., Konstantinidis E. показано в разделе 4.5 данной заявки.
Для использования полученных результатов в практических целях особо важно получение обобщающих зависимостей, позволяющие рассчитывать теплообменные аппараты оснащенные пульсационными устройствами. Для получения обобщающих зависимостей, при большом количестве переменных (число Рейнольдса, число Прандтля, частота, амплитуда и скважность пульсаций, продольный и поперечных шаг трубок в пучке), необходимо проведение многопараметрического исследования. Общее количество вариантов расчета необходимых для получения обобщающих зависимостей может достигать нескольких тысяч или десятков тысяч (при условии полнофакторного численного эксперимента). Поэтому получение обобщающих зависимостей экспериментальным или численным методами (в случае LES подхода) затруднительно. С другой стороны интегральные характеристики теплообмена и гидравлического сопротивления с достаточной точностью можно получить на экономичных, с точки зрения вычислительных ресурсов URANS, моделях турбулентности. Поэтому обобщающие зависимости будут получены в

результате многопараметрического численного исследования с использованием URANS (Unsteady Reynolds averaged Navier–Stokes, нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса). Использование URANS моделей для прогнозирования течений в пучках труб при вынужденных пульсациях потока требует их предварительной верификации с уточнением их параметров, для чего будут использованы результаты физического эксперимента и данные полученные при применении LES подхода.
В задачи проекта не входит разработка собственных математических моделей с оригинальными кодами, что является избыточным и существенно усложняет достижение заявленных результатов. Для выполнения поставленных задач проекта рациональней использование коммерческого CFD кода. Поэтому проведения математического моделирования будет проводиться на основе коммерческого пакета AnsysFluent. Выбор оптимальных моделей турбулентности будет осуществляться из доступных в AnsysFluent, при необходимости будут подбираться коэффициенты замыкающих уравнений моделей турбулентности. В частности будут рассмотрены модели Спаларта-Алмараса Spalart–Allmaras (SA), модель переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST), k-epsilon (k-e), k-omega (k-w), k-kl-omega (k-kl-w) модели и модель Рейнольдсовых напряжений Reynolds Stress Model (RSM). Модели k-e, k-w и RSM будут рассмотрены с различными пристеночными функциями. Для получения обобщающих зависимостей, в исследуемом диапазоне, требуется проведение численного расчета десятка тысяч отдельных вариантов. Данная задача не выполнима без автоматической параметризации расчетов, и обработки результатов. Для обобщения результатов нестационарного решения необходимо интегрирование величин по пространству и временни. В AnsysFluent нет стандартных функций для параметризации расчетов и интегрирования величин по пространству и времени применительно к задачам данного проекта. Однако в AnsysFluent есть возможность костомизации под необходимые задачи. Параметризация AnsysFluent будет выполняться с помощью авторских скриптов на языке Scheme. Результаты вычислений будут, автоматически сводится в файлы Excel. Последующая пост обработка результатов будет также автоматизирована с помощью авторского кода на VBA Excel.
При проведении теоретических и экспериментальных исследований числа Рейнольдса в основном будут соответствовать Re<10000. Числа Прандтля Pr<10 (вода). Пульсации будут иметь низкочастотный характер (f<1Гц, число Струхал Sh<0,02, число Фурье Fo<0,009) несимметричный и симметричный характер. Безразмерная амплитуда пульсаций, отнесенная к диаметру трубки пучка, будет соответствовать A/D<20. Исследования пульсирующих течений в основном будут проводится в тесных пучках с относительными продольными и поперечными шагами s/d<1,5, поскольку такие компоновки пучков труб широко распространены в промышленности. Планируемое общее количество конфигураций пучков труб не менее 12.
Теоретические и экспериментальные методы, подходы и интерпретация результатов полученных в результате выполнения проекта будет в основном основана на работах [Liang C., (PhD Thesis, 2005)], [Konstantinidis E. (PhD Thesis, 2001)], [Molochnikov V.M. et. al. (Therm. and Aeromechanics, 2019)], [Mikheev N.I. et. al. (Int. J. Heat Mass Transf., 2017)], [Жукаускас А. и др., (Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968)], что соответствует мировому уровню.

План работ на первый год

1. Проведение экспериментальных исследований на физической модели трубчатого теплообменника для получения характеристики теплообмена при пульсирующих потоках капельной жидкости (вода Pr = 5):
– верификация экспериментальных данных для стационарного течения по известным литературным данным;
– определить влияние безразмерной амплитуды пульсаций на теплоотдачу, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка, при поочередном фиксировании других режимных параметров;
– установить закономерности теплообмена для числа Фурье от 0,003 до 0,009, что соответствует частоте пульсаций 0,18-0,48 Гц, при поочередном фиксировании других режимных параметров;
– определить влияние несимметричности пульсаций на теплоотдачу пучка при скважности пульсаций 0,2-0,5, при поочередном фиксировании других режимных параметров;
– определить влияние числа Рейнольдса (в диапазоне от 1200 до 2400) на теплоотдачу при пульсирующем течении, при поочередном фиксировании других режимных параметров;
– получение обобщающей зависимости, позволяющей прогнозировать теплоотдачу пучка;
–определить временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки.
2. Проведение математического моделирования в стационарном и пульсирующем течении в пучках труб на основе моделирования крупных вихрей LES.
2.1. Определение временных и пространственных масштабов модели. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для стационарного течения. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными других авторов. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для пульсирующих течений. Сравнение полученных

результатов с экспериментальными данными, полученными в пункте 1.
2.2 Раскрытие физических механизмов процессов переноса тепла в условиях вынужденной нестационарности потока капельной жидкости на основе вихреразрешающих LES подходов:
– проанализировать динамику мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур;
– получить информацию о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб;
– получить результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи;
– определить мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб;
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты пульсаций;
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от амплитуды пульсаций;
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от скважности пульсаций;
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от геометрических симплексов пучков.

Конкретные ожидаемые результаты к концу первого года

1. На основе экспериментальных данных, впервые полученные закономерности о взаимодействии режимных параметров на теплообмен в пучке труб при пульсирующих потоках для заданных режимных параметров. Полученная информация в основном будет представлена в виде графиков с текстовыми пояснениями к ним. Будут получены результаты как минимум для 192 отдельных опытов. В частности будут представлены графические зависимости:
– числа Нуссельта от числа Рейнольдса для стационарного течения;
– числа Нуссельта от безразмерной амплитуды пульсаций, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка, для различных режимных параметров;
– числа Нуссельта от частоты пульсаций 0,18-0,48 Гц, для различных режимных параметров;
– числа Нуссельта от числа Рейнольдса 1200-2400, для различных режимных параметров;
– числа Нуссельта от скважности пульсаций 0,2-0,5, для различных режимных параметров;
–определенные временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки.
2. На основе вихреразрешающих LES подходов получены следующие результаты:
– проанализирована динамика мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур;
– получена информация о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб;
– получены результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи;
– определены мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от амплитуды пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от скважности пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от геометрических симплексов пучков.

План работ на второй год

1. Верифицирование URANS моделей турбулентности, для определения интегральных характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления, в условиях наложенных пульсаций потока:
– построение геометрических моделей пучков труб;

– определение временных и пространственных масштабов модели;
– проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для стационарного течения. Сравнение полученных результатов стационарного течения с экспериментальными данными других авторов для стационарного течения;
– проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для пульсирующих течений на различных URANS моделях. В частности модели Спаларта-Алмараса Spalart–Allmaras (SA), модели переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST), k-epsilon (k-e), k-omega (k-w), k-kl-omega (k-kl-w) модели и модели Рейнольдсовых напряжений Reynolds Stress Model (RSM). Модели k-e, k-w и RSM будут рассмотрены с различными пристеночными функциями. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и LES, полученными за первый год выполнения проекта;
– уточнение параметров URANS моделей, для повышения их прогнозных свойств.
1.1 Проведения многопараметрических численных исследований интегральных характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления в пучках труб при пульсациях потоков воды, на верифицированных URANS моделях:
– разработка скриптов на языке Scheme для выполнения параметрических расчетов в AnsysFluent;
– разработка кода на VBA для автоматизации пост обработки результатов в Excel (в частности пространственное и временное интегрирование результатов);
˜ определение влияния числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния относительного продольного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;
˜ определение влияния относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;
˜ определение влияния относительного продольного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;
˜ определение влияния относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;
˜ определение влияния интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в

условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определение влияния интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ установление связи геометрических и режимных параметров пульсаций с теплогидравлической эффективностью пучков труб при одинаковых числах Рейнольдса и мощностях требуемых на прокачку теплоносителя для всего исследованного диапазона;
˜ получение обобщающих зависимости для прогнозирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб в зависимости от таких критериев подобия, как число Рейнольдса, число Прандтля, число Фурье, безразмерная амплитуда пульсаций и геометрических симплексов пучков труб, в том числе в зависимости от числа рядов в пучке;
˜ установление критериев подобия, оказывающих основное влияние на интенсификацию теплообмена на основе анализа обобщающих зависимостей.
2. Получение характеристик теплообмена натурных испытаний в трубчатом теплообменнике малой производительности в зависимости от частоты, амплитуды и скважности пульсаций при разном числе Рейнольдсе.
3. Разработка методик и рекомендаций для расчета трубчатых теплообменных аппаратов оснащенных пульсационными устройствами. В том числе рекомендаций по расчету требуемой мощности пульсационных устройств его размеров и режимов работы.

Конкретные результаты к концу второго года

1. Верифицированные URANS модели турбулентности, позволяющие адекватно предсказывать интегральные характеристики теплообмена и гидравлического сопротивления.
1.1. Результаты многопараметрических численных расчетов на верифицированной URANS модели турбулентности в широком диапазоне параметров пульсаций и конструктивных конфигураций пучков труб:
˜ определено влияние числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние числа Рейнольдса (от 1000 до 10000) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние амплитуды пульсаций (от 4 до 30 диаметров трубки пучка) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние частоты пульсаций (от 0,15 до 1 Гц) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние скважности (несимметричности) пульсаций (от 0,2 до 0,75) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние числа Прандтля (от 2 до 10) на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние относительного продольного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;
˜ определено влияние относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) коридорного пучка на теплообмен и

гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;
˜ определено влияние относительного продольного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных поперечных шагов 1,2, 1,4;
˜ определено влияние относительного поперечного шага (от 1,5 до 2) шахматного пучка на теплообмен и гидравлическое сопротивление в условиях вынужденной нестационарности, для двух фиксированных относительных продольных шагов 1,2, 1,4;
˜ определено влияние интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности коридорного пучка труб, с относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ определено влияние интерференции трубок (для количества трубок по ходу жидкости от 3 до 20) на теплообмен в условиях вынужденной нестационарности шахматных пучков труб, с расположенными углами труб 30, 45, 65 градусов и относительными шагами трубок 1,2, 1,3 и 1,4;
˜ установлена связь геометрических и режимных параметров пульсаций с теплогидравлической эффективностью пучков труб при одинаковых числах Рейнольдса и мощностях требуемых на прокачку теплоносителя для всего исследованного диапазона;
˜ полученные обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб в зависимости от таких критериев подобия, как число Рейнольдса, число Прандтля, число Фурье, безразмерная амплитуда пульсаций и геометрических симплексов пучков труб, в том числе в зависимости от числа рядов в пучке;
˜ установленные критерии подобия, оказывающих основное влияние на интенсификацию теплообмена на основе анализа обобщающих зависимостей.
˜ предложены безразмерные комплексы, из сгруппированных нескольких критериев подобия, для упрощенной оценки характеристик теплообмена в пульсирующем течении.
2. Получены характеристики теплообмена натурных испытаний в трубчатом теплообменнике малой производительности в зависимости от частоты, амплитуды и скважности пульсаций при разном числе Рейнольдсе.
3. Разработаны методики и рекомендации для расчета трубчатых теплообменных аппаратов оснащенных пульсационными устройствами. В том числе рекомендаций по расчету требуемой мощности пульсационных устройств его размеров и режимов работы.

4.7. Имеющийся у научного коллектива научный задел по проекту, наличие опыта совместной реализации проектов
(указываются полученные ранее результаты, разработанные программы и методы)
У коллектива имеется опыт работы в области экспериментального и теоретического исследования гидродинамики, тепломассообменных процессов и оптимизации технологических процессов промышленных предприятий в целом.

1. Грант РНФ по проекту №18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2018-2021 гг.) (исполнитель Хайбуллина А.И.);
2. Грант РНФ по проекту 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса», срок реализации (2021-2023 гг.) (исполнитель Хайбуллина А.И.);
3. Грант РНФ по проекту 21-79-10406 «Разработка новых моделей пористых теплообменников с повышенной энергоэффективностью на основе численного моделирования и экспериментальных исследований», срок реализации (2021-2024 гг) (ответственный исполнитель Хайбуллина А.И., исполнитель Хайруллин А.Р.);
4. Разработаны устройства для создания пульсаций теплоносителей в теплообменных аппаратах позволяющие повысить их эффективность (Патенты РФ № 146381, 146722, 147387) (Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р.)
5. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Расчет тепло-гидравлической эффективности каналов с насадочными элементами 2021615157, 05.04.2021. Заявка № 2021614227 от 29.03.2021. (Хайбуллина А.И.)
6. НИР (договор №1-И/2017) с ООО «Инжетех» на тему «Проведение исследований по оценке пульсационного воздействия на улучшение эксплуатационных характеристик нефтяных скважин» (2017 г.) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
7. НИР (договор № 2-И/2017) с ООО НП ТК «ЭдНано» на тему «Проведение исследований растительного сырья и разработка решений по реализации технологии непрерывного экстрагирования» (2017 г.) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
8. НИР (договор № 3-И/2017) с ООО «Таткабель» на тему «Определение теплопроводности электроизоляционного материала» (2017 г.) (руководитель Хайруллин А.Р.)
9. НИР (договор №403/144Б-18) с ООО ИЦ «Энергопрогресс» на тему «Лабораторные исследования образцов теплоизоляционных материалов по определению коэффициентов теплопроводности» (2018 г.) (руководитель

Хайруллин А.Р., исполнитель Хайбуллина А.И.)
10. НИР (договор № 1-ЭО/2018 г.) с ООО "Тепличный комбинат "Майский" на тему «Проведение исследований эффективности использования энергетических ресурсов и разработка энергетического паспорта ООО «Тепличный комбинат «Майский» (2018 г.) (исполнитель Хайбуллина А.И.)
11. НИР (договор № 0920-22) с ООО ИВЦ «Инжехим» на тему «Исследование степени извлечения белка из растительного сырья при заданных условиях экстрагирования» (2020 г) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
12. НИР (договор № 959/1445-21) с ООО ИЦ «Энергопрогресс» на тему "Исследование энергоэффективности теплоизоляционного цилиндра, лабораторные исследования физико-химических свойств прошивных минераловатных матов" (2021 г) (исполнитель Хайруллин А.Р.)
13. Стипендиат Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам на тему "Численное и экспериментальное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в пучках труб теплообменного оборудования", 2021 год (руководитель Хайбуллина А.И.)

Коллективом получены существенные результаты по исследованию тепловых и гидродинамических процессов в теплообменном оборудовании.
1. Экспериментальным путем был исследован теплообмен в семи рядном обогреваемом коридорном пучке при наложении на поток воды межтрубного пространства противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций. Относительный продольный и поперечный шаг соответствовал 1,3, частоты пульсаций находились в диапазоне от 0,125 до 0,5 Гц, безразмерная амплитуда от 1,25 до 4,5, осредненное по расходу число Рейнольдса от 100 до 500, число Прандтля соответствовало 5,5. Во всем исследуемом диапазоне исследования зафиксировано увеличение теплоотдачи в нестационарном течении по сравнению со стационарным. Максимальная интенсификация теплоотдачи составила 1,9. Влияние скважности пульсаций на теплообмен не исследовалось. Численным методом, для тех же режимных параметров, исследовано распределение локальной теплоотдачи для центрального цилиндра в пучке труб. Установлено, что интенсификация теплообмена в основном происходит в застойной зоне трубки пучка. (Хайбуллина, Хайруллин)
2. Разработана математическая модель гидравлической системы пульсатор–теплообменник генераций противоточных низкочастотных пульсаций, позволяющая моделировать реалистичные формы пульсаций скорости потока. Проведены численные расчеты с использованием модели. Расхождение полученных форм пульсаций в пучке труб от экспериментальных данных не более 11 %. Проведено численное моделирование теплообмена в канале с пучком труб, при наложении низкочастотных пульсаций, с использованием в качестве граничных условий форм пульсаций полученных посредством модели гидравлической системы пульсатор–теплообменник результаты которого показали удовлетворительное согласование с экспериментальными данными 15 %, что позволяет применять разработанный подход моделирования теплообмена в дальнейшем для подобных задач. Численным методом исследован теплообмен центрального цилиндра в пучках труб при противоточных низкочастотных пульсациях потока масла в диапазоне частот от 0,2 до 0,5 Гц, безразмерной амплитуды от 15 до 35, скважностей пульсаций от 0,25 до 0,5, осредненному по расходу числу Рейнольдса от 100 до 1000, числа Прандтля от 215 до 363. Зафиксировано увеличение теплоотдачи до 3 раз в пульсирующем течении по сравнению со стационарным. По данным численных экспериментов получена обобщающая зависимость для расчета теплоотдачи в исследованном диапазоне. Проведено численное исследование влияния вынужденных несимметричных пульсаций на теплообмен при поперечном обтекании коридорного пучка труб. При проведении численного эксперимента число Рейнольдса находилось в диапазоне от 1000 до 2000, относительная амплитуда пульсаций от 1 до 2, число Струхаля от 0,77 до 1,51, число Прандтля и скважность пульсаций имели фиксированные значения 7,2 и 0,25. Установлено, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне режимных параметров. (Хайбуллина, Хайруллин)
3. Рассмотрена влияние относительного шага трубки в пучке для различных компоновок пучков на интенсификацию теплообмена в условиях пульсирующих потоков масла при числе Рейнольдса Re<1000. Относительный шаг отнесенный к диаметру цилиндра пучка труб находился в диапазоне от 1.25 до 1.75. Рассмотрено влияние пульсаций в пучках труб на теплогидравлическую эффективность при одинаковых числах Рейнольдса и теплогидравлическую эффективность при одинаковых мощностях требуемых на прокачку теплоносителя в стационарном и пульсационном течении. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых числах Рейнольдса наблюдалось для коридорного пучка с шагом 1.25. Максимальное значение теплогидравлической эффективности при одинаковых мощностях для коридорного пучка при относительном шаге 1.75. (Хайбуллина, Хайруллин)
4. Проведен численный анализ теплообмена в шахматном пучке труб со стационарным и несимметричным пульсирующим потоком. Отношение поперечного и продольного расстояния к диаметру трубки пучка составляло 1,3. Число Рейнольдса Re равнялось 1100. Рассмотрено влияние числа рядов в пучке труб на интенсификацию теплообмена в пульсирующем потоке. Показано, что интенсификация теплообмена первых рядов существенней, по сравнению с

последующими рядами. (Хайбуллина, Хайруллин)
5. Проведено численное исследование, методом дискретных элементов, влияния вынужденных пульсаций масла на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. Установлено, что наложение пульсаций усиливает касательное напряжение сдвига и скорость эрозии в лобовой и кормовой частях труб пучка, которые наиболее подвержены отложениям. Проведенный анализ подтверждает существенное влияние несимметричных пульсаций на очищающие факторы и перспективность их применения для интенсификации очистки пучков труб. (Хайбуллина)
6. Предложена модернизированная схема систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов, оснащенная пульсационной установкой, при этом достигнут экономический эффект за счет уменьшения расхода охлаждающей воды в маслоохладители кожухотрубного типа марки МБ-63-90. По критерию Кирпичева рассчитана эффективность пульсаций для маслоохладителя марки МБ-63-90, показано, что несимметричные пульсации обладают большей энергетической эффективность по сравнению с симметричными пульсациями. (Хайбуллина, Хайруллин)
7. Исследована возможность применения различных RANS моделей турбулентности для прогнозирования теплообмена стационарного течения при поперечном обтекании пучков труб. Наилучшее согласование с экспериментальными данными получено для модели переноса касательных напряжений Shear Stress Transport (SST). (Хайбуллина, Хайруллин)
8. Методом LES исследовался теплообмен при поперечном обтекании коридорного десяти рядного пучка труб. При моделировании рассматривались различные подсеточные модели турбулентности. Число Рейнольдса Re было 2400. Локальные характеристики теплообмена восьмого ряда сравнены с экспериментальными данными Жукаускаса. Лучшее совпадение с данными эксперимента получено при использовании локальной модели вихревой вязкости, адаптированной для пристеночных течений (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, WALE). (Хайбуллина, Хайруллин)
9. На основе математического моделирования исследован теплообмен в пористой среде при пульсирующем течении. Пористая среда была представлена в виде двухмерного канала с квадратными трубами. Принятое упрощение позволило провести многопараметрическое исследование, включающее 1458 вариантов расчета, что позволило установить взаимосвязи между геометрическими параметрами пористой среды и критериями подобия для стационарного и пульсационного течения. В результате численного эксперимента получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи в пористой среде в условиях пульсирующих потоков воздуха и воды. Полученные критериальные уравнения справедливы для диапазонов числа Рейнольдса Re от 10 до 100, числа Прандтля Pr от 0,7 до 7,01, безразмерной относительной амплитуде пульсаций A/d от 1 до 3, частоте пульсаций f 0,25 до 0,75, порозности от 0,75 до 0,938. Скважность пульсаций не была включена в обобщающие зависимости. Критериальные уравнения были получены для прогнозирования интенсивности и степени интенсификации теплообмена в пульсирующем течении, отдельно для симметричных и несимметричных пульсаций. Интенсивность теплообмена пористой среды при пульсирующем течении существенно зависит от режимных и геометрических параметров пористой среды. С увеличением числа Рейнольдса интенсивность теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке увеличивается, при этом степень интенсификации теплообмена снижается. С увеличением кинематической вязкости среды теплообмен в пульсационном течении уменьшается по сравнению со стационарным течением. Поэтому интенсификация теплообмена в пористой среде при пульсирующем потоке воздуха меньше. При теплообмене в пористой среде при пульсирующем потоке воды степень интенсификации уменьшается с увеличением числа Прандтля. С увеличением порозности интенсивность теплообмена в пульсирующем течении снижается. Степень интенсификации теплообмена в основном увеличивается с повышением порозности, при этом интенсификация может и понижаться в зависимости от интенсивности пульсаций. (Хайбуллина, Хайруллин)
10. Применение трех RANS моделей турбулентности для предсказания теплообмена стационарного течения в пучке труб исследовано численным методом. Численное моделирование проводилось в диапазоне числа Рейнольдса от 1000 до 10200 с шагом 400. Полученное значение числа Нуссельта сравнивались с известными экспериментальными данными. Лучшее совпадение с экспериментальными данными получено при использовании модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией. Отклонение значений Nu с экспериментальными данными в среднем составило около 6,3%. Максимальное отклонение17,3% зафиксировано для числа Рейнольдса 1400. Для модели переноса сдвиговых напряжений SST Ментера среднее отклонение составило 12,4%, максимальное 79,2% при числе Рейнольдсе 1000. Для модели SST решение было не стабильно при числе Re меньше 3400. С увеличением числа Рейнольдса SST модель лучше предсказывает теплообмен, при Рейнольдсе 10200 отклонение с экспериментальными данными 3,2%. При использовании модели SST k-омега среднее отклонение составило 19,1%, максимальное 55,9% при Рейнольдсе 1000. Распределение теплообмена по глубине пучка различно, в зависимости от числа Рейнольдса и модели турбулентности. Для модели RNG k-эпсилон с улучшенной пристеночной функцией теплоотдача второго ряда была всегда выше первого ряда. С дальнейшем, увеличением рядов теплоотдача практически не меняется. Теплоотдача седьмого ряда выше остальных рядов, что проявляется существенней с увеличением числа Рейнольдса. Рост

теплоотдачи второго ряда связан с повышением турбулентности потока в пучке труб. Увеличение теплоотдачи седьмого ряда можно объяснить возникновением вихреобразования в кормовой части последнего ряда. Для моделей SST и SST k-омега похожие результаты получены только при максимальных числах Рейнольдса. (Хайбуллина, Хайруллин)

11. Проведены экспериментальные исследование влияния пульсаций потока на теплообмен в пучке труб. Экспериментальным путем получены закономерности теплообмена в пучке труб при пульсационном режиме течения потока. Возвратно-поступательное течение в пучке труб генерировалось при помощи пульсационной системы на основе поршневого пульсатора и пневмоцилиндра. Теплообмен при стационарном течении был сравнен с известным критериальным уравнением других авторов для коридорного пучка при числе Рейнольдса меньше 1000. Различия с критериальным уравнением составило 3%. Как правило, при теплообмене с принудительными колебаниями потока увеличение амплитуды пульсаций пропорциоанально увеличению интенсивности теплообмена. Увеличение числа Струхаля приводит к росту степени интенсификации теплообмена во всем исследованном диапазоне. Максимальная интенсификация теплообмена составила 3,23 раза. (Хайбуллина, Хайруллин)

12. Численным методом исследовался теплообмен в трубе при пульсирующем потоке масла. Числа Рейнольдса соответствовали 280, 350, 420. Диаметр D трубы составлял 0,014 м. Длина трубы соответствовала 100 диаметрам. Пульсации потока имели несимметричный характер. Задача решалась в двухмерной постановке. Результаты показывают, что увеличение теплоотдачи в пульсирующем течение пропорционально увеличению интенсивности пульсаций. Максимальная интенсификации теплообмена составила 10,5%. На основании данных, полученных в результате численного эксперимента, была проведена оценка уменьшения площади теплообмена маслоохладителя при пульсациях потока. Оценки снижения теплообменной поверхности маслоохладителя при пульсациях потока проводилась на кожухотрубном теплообменнике с шахматным расположением пучка трубок. Теплоноситель внутри трубок было масло, снаружи трубок вода. Необходимая площадь теплообмена для поддержания теплопроизводительности с увеличением амплитуды пульсаций и повышается с увеличением числа Рейнольдса. Уменьшение площади теплообмена с увеличением числа Рейнольдса связано с уменьшением числа Струхаля. Коэффициент теплопередачи существенно зависит от теплоотдачи масла, что связано с его ламинарным течением. Поэтому процент уменьшение площади теплообмена при пульсирующем течении согласуется с процентом интенсификации теплообмена, но не равен ему. Уменьшение площади теплообмена маслоохладителя в зависимости от режима пульсации составило от 2,57% до 8,63%. (Хайбуллина, Хайруллин)

13. Разработан алгоритм для построения, высокопористых металлических и других, пен на языке VusialBasic.Net, основанный на методе трехмерной диаграммы Вороного. Разработанный алгоритм реализован в виде оригинального дополнительного модуля в Ansys Spaceclaime. Данный модуль позволяет генерировать пористые структуры с заданными характеристиками, диаметр фибр, порозность, диаметр ячеек, количество пор на дюйм. Для целей численного исследования выполнено построения двадцати пористых структур. Порозность сгенерированных пен находилась в диапазоне от 0,743 до 0,954, количество пор на дюйм (PPI) от 10 до 80. Для изменения порозности диаметр фибр варьировался от 0,0625 мм до 1,3 мм. Диаметр ячеек пористой среды варьировался от 0,635 мм до 5,8 мм. Полученные результаты по интенсивности теплообмена металлических пен для стационарного течения при порозности 0,954 верифицировались с чужими экспериментальными данными. Отклонения для числа Нуссельта в диапазоне числа Рейнольдса от 20 до 80, числе Прандтля 0,7 составили не более 7%. В результате численного исследования получено, что с увеличением порозности пористой среды происходит уменьшение интенсивности теплообмена. Данная динамика наблюдается при всех PPI. Гидравлическое сопротивление пористой среды увеличивается с повышением порозности независимо от числа Рейнольдса и PPI. Рост гидравлического сопротивления связан с ростом скорости при увеличении порозности. При повышении порозности диаметр фибр уменьшается, соответственно для выдерживания постоянного числа Рейнольдса скорость увеличивается. Изменение PPI не оказывает влияния на теплоотдачу пористой среды не зависимо от порозности и числа Рейнольдса. При этом с увеличением PPI происходит существенный рост гидравлических потерь. С увеличением числа Рейнольдса происходит рост, как гидравлических потерь, так и интенсивности теплообмена. Максимальной теплоотдачей (Нуссельта 5,18) во всем исследованном диапазоне обладает пористая среда с порозностью 0,743 и числом Рейнольдса 80. Минимальными гидравлическими потерями обладает пористая среда с PPI 10, порозностью 0,743 и числом Re 10. (Хайруллин, Хайбуллина)

14. Численным методом исследована эффективная теплопроводность пористых изоляционных материалов. Предложена методика конструирования изоляционного материала с заданными геометрическими характеристиками, позволяющая с достаточной точностью прогнозировать теплопроводность пористой изоляции. Конструирование вспененных пористых теплоизоляционных материалов основывалось на методе диаграммы Вороного в разработанном дополнительном модуле в Ansys Spaceclaime. Эффективная теплопроводность пористых сред определена для двадцати структур с различными геометрическими характеристиками (порозность, диаметр фибр, диаметр узла).

Теплофизические свойства материала соответствовали меламину. Между собой сравнивалась одна регулярная структура и три нерегулярных структуры, с разными диаметрами узлов. Отношение диаметра узла к диаметру фибр нерегулярной структуры соответствовал 1, 2 и 3. Все четыре типа структур сравнивались при одинаковых порозностях. При этом порозность каждой структуры находилась в диапазоне от 0,722 до 0,987. Необходимое значение порозности подбиралось изменением диаметра фибр. Во всем исследованном диапазоне исследованных структур диаметр фибр находился в диапазоне от 0,0489 мм до 0,1259 мм. Диаметр ячейки пористой структуры составлял 0,635 мм, количество пор на дюйм соответствовало 80. Ширина, высота и глубина расчетной области соответствовала двум диаметром ячейки пористой среды. Для верификации численного решения эффективная теплопроводность вспененного меламина с порозностью 0,987 определялась экспериментально. Эффективная теплопроводность вспененного меламина согласно ГОСТ 7076-99. Результат численного моделирования показал удовлетворительное совпадение с экспериментальным значением эффективной теплопроводности. Отличие в значениях теплопроводности с нерегулярными структурами при порозности 0,987 составило 8,7%, 8,5%, 9,1% для структур с отношением диаметра узла к диаметру фибр нерегулярной структуры 1, 2, 3 соответственно. На основе закона сохранения энергии (уравнении Фурье) получено уравнение для прогнозирования эффективной теплопроводности пористых изоляционных материалов. Полученное уравнение позволяет прогнозировать эффективную теплопроводность с учетом конструктивных особенностей структур (длина теплопроводящих фибр, остностительный объем фибр не участвующих в теплообмене и порозность). Эффективная теплопроводность рассчитанная по предложенному уравнению лучше всего согласуется с данными, численного моделирования, полученных для регулярных структур. Максимальное отличие теоретического решения с данными численного моделирования для регулярных структур составляет не более 8,1 %. (Хайруллин, Хайбуллина)
15. Проведены экспериментальные исследования влияния увлажнения на тепловые потери волокнистой изоляции в двухмерном тепловом потоке. Для определения тепловых потерь изоляционного материала, в условиях увлажнения, использовалась нагреваемая труба, с охранными зонами согласна ГОСТ 32025-2012. Увлажнение изоляционного материала проводилось по методу инъекции. Содержание влаги по массе составляло 2%, 4% и 6%, температура нагреваемой трубы 45, 65 и 90 градусов. С увеличением степени увлажнения и температуры тепловые потери через базальтовую вату увеличиваются. При более высоких температурах влияние повышения степени увлажнения на изменение тепловых потерь в основном меньше. При температуре 45 градусов тепловые потери увеличиваются от 1,3 до 1,9 раза при изменении содержания влаги от 2% до 6%. При температуре 90 градусов тепловые потери увеличились от 1,6 до 1,7 раза при изменении содержания влаги от 2% до 6%. (Хайруллин, Хайбуллина)
16. Эффективная теплопроводность волокнистой теплоизоляции, с плотностью 80 и 105 кг на метр кубический, из одного и того же рулона была определена в условиях одномерного и двухмерного теплового потока экспериментальным методом. Теплопроводность, полученная в условиях одномерного и двухмерного потока для сухих образцов, сравнена с экспериментальными данными других авторов. Результаты, полученные в данной работе, совпадают с данными других авторов. Значения теплопроводности изоляции полученной двумя методами лучше совпадает между собой, по сравнению с данными других авторов. Лучшее совпадение значений теплопроводности можно объяснить, тем что образцы подготавливались из одного и того же рулона базальтовой ваты. Таким образом, были исключены возможные различия в производственном процессе при изготовлении изоляции (использование различных связующих и т.д.). Отличие в значениях теплопроводности между двумя методами для плотности 80 и 105 кг на метр кубический составило 3 и 9% соответственно. Теплопроводность изоляции при содержании влаги 5% по массе увеличивается независимо от метода измерений. Теплопроводность выше для изоляции с большей плотностью. Теплопроводность изоляции, с плотностью 105 кг на метр кубический, увеличилась на 94% при измерениях в одномерном тепловом потоке и на 88% при измерениях в двухмерном теологом потоке. Как и для сухой изоляции, теплопроводность увлажненной изоляции, полученная двумя методами, хорошо совпадает между собой. Различия между значениями теплопроводности составили не более 8%. (Хайруллин, Хайбуллина)
17. Экспериментальным методом было рассмотрено влияние содержания влаги на теплопроводность базальтовой ваты тепловых сетей изготавливаемыми разными производителями. При проведении экспериментальных исследований применялся стандартный метод горячей нагреваемой пластины. Для всех рассмотренных образцов с повышением содержания влаги наблюдается увеличение теплопроводности. При увеличении содержании влаги на 13.6% теплопроводность рассмотренных изоляционных образцов увеличивалась на 81.3–312.8% по сравнению с сухим материалом. (Хайруллин)

4.8. Перечень оборудования, материалов, информационных и других ресурсов, имеющихся у научного коллектива для выполнения проекта *(в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)*
Имеется лабораторный стенд «Периодические нестационарные методы повышения эффективности теплообменного оборудования». Разработанный коллективом уникальный экспериментальный стенд позволяет генерировать несимметричные и симметричные пульсации с возвратно-поступательным движением теплоносителя различной

частоты, амплитуды и скважности. Имеется лицензионное программное обеспечение ANSYS Fluent. Будет использоваться для моделирования процессов теплообмена и гидродинамики. Имеется дисплейный класс 12 компьютеров. Будут использоваться при многопараметрических расчетах на URANS моделях, при расчетной сетке меньше 500 тыс. элементов.

4.9. План работы на первый год выполнения проекта *(в том числе указываются запланированные командировки (экспедиции) по проекту)*

1. Проведение экспериментальных исследований на физической модели трубчатого теплообменника для получения характеристики теплообмена при пульсирующих потоках капельной жидкости (вода Pr = 5):

– верификация экспериментальных данных для стационарного течения по известным литературным данным;

– определить влияние безразмерной амплитуды пульсаций на теплоотдачу, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка, при поочередном фиксировании других режимных параметров;

– установить закономерности теплообмена для числа Фурье от 0,003 до 0,009, что соответствует частоте пульсаций 0,18-0,48 Гц, при поочередном фиксировании других режимных параметров;

– определить влияние несимметричности пульсаций на теплоотдачу пучка при скважности пульсаций 0,2-0,5, при поочередном фиксировании других режимных параметров;

– определить влияние числа Рейнольдса (в диапазоне от 1200 до 2400) на теплоотдачу при пульсирующем течении, при поочередном фиксировании других режимных параметров;

– получение обобщающей зависимости, позволяющей прогнозировать теплоотдачу пучка;

–определить временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки.

2. Проведение математического моделирования в стационарном и пульсирующем течении в пучках труб на основе моделирования крупных вихрей LES.

2.1. Определение временных и пространственных масштабов модели. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для стационарного течения. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными других авторов. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для пульсирующих течений. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными в пункте 1.

2.2 Раскрытие физических механизмов процессов переноса тепла в условиях вынужденной нестационарности потока капельной жидкости на основе вихреразрешающих LES подходов:

– проанализировать динамику мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур;

– получить информацию о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб;

– получить результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи;

– определить мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб;

– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты пульсаций;

– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от амплитуды пульсаций;

– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от скважности пульсаций;

– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от геометрических симплексов пучков.

Участие на всероссийской конференции с международным участием «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» 2023 г. Новосибирск, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ).

Публикация результатов экспериментальных исследований пульсирующих течений в пучках труб в Applied Thermal Engineering (Q1) (WoS, Scopus) – 1 статья

Публикация результатов численных исследований физических механизмов процессов переноса тепла, полученные вихреразрешающими методами LES в International Journal of Heat and Mass Transfer (Q1) (WoS, Scopus) – 1 статья

4.10. Планируемое на первый год содержание работы каждого члена научного коллектива *(включая руководителя проекта)*

1. Проведение экспериментальных исследований на физической модели трубчатого теплообменника для получения

характеристики теплообмена при пульсирующих потоках капельной жидкости (вода Pr = 5):
– верификация экспериментальных данных для стационарного течения по известным литературным данным; (Хайруллин А.Р.)
– определить влияние безразмерной амплитуды пульсаций на теплоотдачу, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка, при поочередном фиксировании других режимных параметров; (Хайруллин А.Р.)
– установить закономерности теплообмена для числа Фурье от 0,003 до 0,009, что соответствует частоте пульсаций 0,18-0,48 Гц, при поочередном фиксировании других режимных параметров; (Хайбуллина А.И.)
– определить влияние несимметричности пульсаций на теплоотдачу пучка при скважности пульсаций 0,2-0,5, при поочередном фиксировании других режимных параметров; (Хайбуллина А.И.)
– определить влияние числа Рейнольдса (в диапазоне от 1200 до 2400) на теплоотдачу при пульсирующем течении, при поочередном фиксировании других режимных параметров; (Хайруллин А.Р.)
– получение обобщающей зависимости, позволяющей прогнозировать теплоотдачу пучка; (Хайбуллина А.И.)
–определить временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки. (Хайруллин А.Р.)
2. Проведение математического моделирования в стационарном и пульсирующем течении в пучках труб на основе моделирования крупных вихрей LES.
2.1. Определение временных и пространственных масштабов модели. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для стационарного течения. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными других авторов. Проведение тестовых расчетов течений в пучках труб для пульсирующих течений. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными в пункте 1. (Хайруллин А.Р.)
2.2 Раскрытие физических механизмов процессов переноса тепла в условиях вынужденной нестационарности потока капельной жидкости на основе вихреразрешающих LES подходов:
– проанализировать динамику мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур; (Хайбуллина А.И.)
– получить информацию о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб; (Хайбуллина А.И.)
– получить результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи; (Хайруллин А.Р.)
– определить мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб; (Хайбуллина А.И.)
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты пульсаций; (Хайбуллина А.И.)
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от амплитуды пульсаций; (Хайруллин А.Р.)
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от скважности пульсаций; (Хайбуллина А.И.)
– установить связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от геометрических симплексов пучков. (Хайбуллина А.И.)
Участие на всероссийской конференции с международным участием «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» 2023 г. Новосибирск, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ). (Хайбуллина А.И.)
Опубликованная статья результатов экспериментальных исследований пульсирующих течений в пучках труб в Applied Thermal Engineering (Q1) (WoS, Scopus) – 1 статья
Опубликованная статья результатов численных исследований физических механизмов процессов переноса тепла, полученные вихреразрешающими методами LES в International Journal of Heat and Mass Transfer (Q1) (WoS, Scopus) – 1 статья

4.11. Ожидаемые в конце первого года конкретные научные результаты *(форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы)*
1. На основе экспериментальных данных, впервые полученные закономерности о взаимодействии режимных параметров на теплообмен в пучке труб при пульсирующих потоках для заданных режимных параметров. Полученная информация в основном будет представлена в виде графиков с текстовыми пояснениями к ним. Будут получены результаты как минимум для 192 отдельных опытов. В частности будут представлены графические зависимости:
– числа Нуссельта от числа Рейнольдса для стационарного течения;
– числа Нуссельта от безразмерной амплитуды пульсаций, при амплитудах 4-16 диаметров трубки пучка, для различных режимных параметров;

– числа Нуссельта от частоты пульсаций 0,18-0,48 Гц, для различных режимных параметров;
– числа Нуссельта от числа Рейнольдса 1200-2400, для различных режимных параметров;
– числа Нуссельта от скважности пульсаций 0,2-0,5, для различных режимных параметров;
–определенные временные характеристики давления в пучке труб при всех режимных параметрах. Определены временные характеристики осредненной скорости в пучке труб, методом скоростной съемки.
2. На основе вихреразрешающих LES подходов получены следующие результаты:
– проанализирована динамика мгновенных температурных и векторных полей потока в трехмерном пространстве, с выявлением формирования вихревых структур;
– получена информация о распределении и динамике кинетической энергии турбулентности и Рейнольдсовых напряжений в межтрубном пространстве пучков труб;
– получены результаты численного исследования динамики локального и интегрального коэффициента теплоотдачи;
– определены мгновенные и осредненные за период пульсаций профили статистических характеристик потока в разных сечениях пучка труб;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от частоты пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от амплитуды пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от скважности пульсаций;
– установлена связь между пространственно временными характеристиками потока и теплопереносом в пучке труб, в зависимости от геометрических симплексов пучков.
Доложенная презентация на всероссийской конференции с международным участием «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» 2023 г. Новосибирск, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ).

4.12. Перечень планируемых к приобретению за счет гранта оборудования, материалов, информационных и других ресурсов для выполнения проекта *(в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)*
Приобретение персонального компьютера на базе процессора AMD Ryzen 8-ядер и более или Intel core i9 8-ядер и более, оперативная память 64 Gb и более - для численных исследований.

4.13. Файл с дополнительной информацией 1
С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.
Текст в файлах с дополнительной информацией должен приводиться на русском языке. Перевод на английский язык требуется в том случае, если руководитель проекта оценивает данную информацию существенной для эксперта.

4.14. Файл с дополнительной информацией 2 ***(если информации, приведенной в файле 1 окажется недостаточно)***
С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.
скачать...

Подпись руководителя проекта _____ /А.И. Хайбуллина/

Форма 5. Запрашиваемое финансирование на 2023 год

5.1. Планируемые расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	ВСЕГО	1500
	Вознаграждение членов научного коллектива (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии), без лиц категории «вспомогательный персонал»)	940
	Вознаграждение лиц категории «вспомогательный персонал» (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии))	0
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии))	940
2	Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта Не более 15 процентов от суммы гранта.	0
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая обучение работников, монтажные, пуско-наладочные и ремонтные********** работы) ********** Не связанные с осуществлением текущей деятельности организации.	350
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	60
6	Накладные расходы организации Не более 10 процентов от суммы гранта.	150

5.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования средств гранта, расшифровка
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии)) (указывается сумма вознаграждения (включая руководителя проекта, членов научного коллектива и иных исполнителей, привлекаемых к выполнению работ по проекту), включая установленные законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний) 940 тыс. руб. Руководитель проекта, Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна, к.т.н., доцент - 658 тыс. руб. Исполнитель проекта Хайруллин Айдар Рафаэлевич, аспирант - 282 тыс. руб.
2	Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта (приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора) Не запланировано.
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (представляется перечень планируемых к закупке оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (в соответствии с п. 4.12 формы 4)) Приобретение персонального компьютера на базе процессора AMD Ryzen 8-ядер и более или Intel core i9 8-ядер и более, оперативная память 64 Gb и более 350 тыс. руб.
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования (представляется расшифровка запланированных материалов и комплектующих (в соответствии с п. 4.12 формы 4)) Не запланировано.

5 Иные расходы для целей выполнения проекта

(приводятся иные затраты на цели выполнения проекта, в том числе на командировки, оплату услуг связи, транспортных услуг, расходы не расшифровываются)

Участие на всероссийской конференции с международным участием «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» 2023 г. Новосибирск, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (РИНЦ) - 60 тыс. руб.

Подпись руководителя проекта _____ **/А.И. Хайбуллина/**

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации**.

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

_____ /_____ /

М.П.