

УДК 66.021.3/4

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, А. И. Хафизова,
Р. Р. Гайнатуллин, Д. Н. Латыпов**

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ОТВОДЕ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ОТ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКА ОРОСИТЕЛЯ С ГОФРИРОВАННЫМИ ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Ключевые слова: низкопотенциальное тепло, градирня, охлаждение воды, блок оросителя, водоочистительная система, водораспределительная система.

Разработка новых технологий по отводу низкопотенциального тепла от воды путем ее охлаждения является актуальной задачей. На данный момент времени на предприятиях нашей страны эту функцию выполняют различные модификации градирен, которые подразделяются на сухие и испарительные. К недостаткам сухих градирен относят низкую эффективность по сравнению с испарительными градирнями. К недостаткам испарительных (мокрых) градирен относят необходимость в большей площади относительно закрытых градирен и необходимость в дополнительном оборудовании - система водоподготовки, устройства очистки воды и др. Авторами данной работы была разработана бесконтактная испарительная градирня, сочетающая в себе достоинства сухой и мокрой градирен. Представленная конструкция градирни позволяет снизить экономические затраты на обслуживание техники, так как отсутствует водоочистительная система, охлаждаемая водооборотная вода не имеет непосредственного контакта с окружающим воздухом, тем самым исключается загрязнение воды насекомыми, грязью и др. Исследование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Нестационарная задача решалась методом конечных элементов. Представленная трехмерная модель градирни имела следующие размеры: длина и ширина пластины – 126 и 117 мм соответственно, диаметр отверстий, диаметр гофр и шаг между отверстиями в пластине составляли по 10 мм, диаметр водораспределителя жидкости – 7 мм, угол между пластинами составлял 30°, высота корпуса градирни – 232 мм. В ходе численного моделирования изменялись значения давлений на входе в градирню и выходе из нее. Результаты исследований показали, что для выхода на стационарный режим (объем входящий жидкости соответствует объем выходящей жидкости) необходимо 3 с. При этом предложенный блок оросителя, состоящий из четырех гофрированных перфорированных пластин, позволяет добиться распределения жидкости по трем пластинам на 98,7% их общей площади. Верхняя, четвертая пластина выполняет функцию каплеуловителя. В ходе проделанной работы было подтверждено, что предлагаемый блок оросителя с гофрированными перфорированными перегородками позволяет достичь распределения жидкости, вводимую только через единичную точку ввода, по всей поверхности блока оросителя..

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, A. I. Khafizova,
R. R. Gaynatullin, D.N. Latipov**

REDUCING ENERGY COSTS WHEN WITHDRAWING LOW-POTENTIAL HEAT FROM RETURN WATER, USING A FILLER UNIT WITH CORRUGATED PERFORATED PLATES

Keywords: low-potential heat, cooling tower, water cooling, filler unit, water purification system, water distribution system.

Developing new technologies to withdraw low-potential heat from water by cooling it is a relevant task. At the enterprises of our country, this function is currently fulfilled by various modifications of cooling towers that are subdivided into dry and evaporative ones. Disadvantages of dry cooling towers include their low efficiency as compared to evaporative ones. Disadvantages of evaporative (wet) cooling towers include the need for a larger area as compared to closed circuit cooling towers, as well as the need for additional equipment, such as water treatment systems, water purifiers, etc. The authors have developed a non-contact evaporative cooling tower combining the advantages of both dry and evaporative cooling towers. The cooling tower design proposed allows reducing the economic costs related to equipment maintenance, since there is no water purification system, while the return water to be cooled does not directly contact the ambient air, which excludes contaminating the water with insects, dirt, etc. The study was performed within the ANSYS Fluent software package. Non-stationary problem was solved by the finite element method. The three-dimensional cooling tower model presented was sized as follows: Length and width of the plate are 126 and 117 mm, respectively, diameter of holes, diameter of corrugations, and the spacing between holes in the plate were 10 mm each, diameter of the water distributor was 7 mm, angle between plates was 30°, and the chimney height was 232 mm. In numerically modeling, the values of pressures were different at the inlet and at the outlet of the cooling tower. The findings have shown that 3° C are necessary for starting the stationary mode, i.e., where the volume of incoming liquid corresponds with that of the outgoing liquid. At the same time, the filler unit proposed, consisting of four corrugated perforated plates, allows achieving the distribution of the liquid among three plates by 98.7 % of their total area. The fourth, upper plate acts as a drop separator. In the course of our studies, it was confirmed that the filler unit proposed, with corrugated perforated plates, allowed achieving the distribution of the liquid entering through only one inlet over the entire surface of the filler unit.

В связи с выполнением комплекса приоритетных задач перед нашей страной - реализацией программы импортозамещения, максимально эффективного

использования природных энергетических ресурсов, создания и использования энергоэффективных аппаратов, что является особенно значимым для

отечественных промышленных отраслей - химической, энергетической, металлургической и др., появляется необходимость в разработке новых технологий по отводу низкопотенциального тепла от воды путем ее охлаждения. На данный момент времени на предприятиях нашей страны эту функцию выполняют различные модификации градирен, которые подразделяются на сухие и испарительные [1 – 16]. В сухих градирнях теплообмен между теплоносителем и окружающим воздухом происходит через стенки рекуперативного теплообменника. Вентилятор, обеспечивающий принудительный поток воздуха, охлаждающий стенки теплообменника, повышает эффективность охлаждения. Основными преимуществами сухих градирен являются возможность эксплуатации при отрицательных температурах и замкнутый контур, исключаящий загрязнение, унос и испарение воды. К недостаткам сухих градирен относят низкую эффективность по сравнению с испарительными градирнями. В мокрых градирнях осуществляется непосредственный контакт воды и окружающего воздуха, охлаждение происходит за счет испарения воды и отдачи тепла более холодному воздушному потоку. Большинство мокрых градирен, как и сухие, оборудованы вентиляторами. Среди мокрых градирен наиболее распространенными являются безнасадочные и оросительные. Основным преимуществом мокрых градирен является высокая эффективность охлаждения воды, как правило, после выхода из градирни температура воды ниже температуры окружающего воздуха. К недостаткам мокрых градирен относят необходимость в большей площади относительно закрытых градирен и необходимость в дополнительном оборудовании - система водоподготовки, устройства очистки воды и др. Несмотря на большую популярность данных аппаратов в промышленности, вопрос о повышении эффективности охлаждения воды и уменьшении энергетических затрат стоит всегда. В последнее десятилетие было опубликовано большое количество работ, посвященных этому вопросу. В них предлагаются и исследуются различные методы и технологии: интенсификация теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах; разработка менее энергозатратных вентиляторов; создание блоков оросителей, обеспечивающих низкий коэффициент аэродинамического сопротивления и высокую охлаждающую способность и др. Большое количество этих методов внедряется на предприятиях, но практика показывает, что потребность в повышении эффективности охлаждения воды остается. Поэтому разработка новых технологий и аппаратов для отвода низкопотенциального тепла от воды является актуальной [17 – 35].

Авторами данной работы была разработана бесконтактная испарительная градирня (рис. 1), сочетающая в себе достоинства сухой и мокрой градирен. Принцип действия бесконтактной испарительной градирни заключается в следующем. Горячая оборотная вода после технологических процессов через линию подачи воды 1 поступает в

пучок труб 2 и циркулирует по контуру градирни, после чего охлажденная оборотная вода отправляется на технологические нужды через выход воды 3. Охлаждение оборотной воды происходит преимущественно за счет:

1) Поперечного потока воздуха, который нагнетается вентилятором 4, холодный поток воздуха забирается с нижней части градирни 5 и движется в верхнюю часть 6, обдувая пучки труб и забирая с них тепловую энергию, подобно действию сухой градирни [36 – 40].

2) Растекания охлажденной оборотной воды по пучку труб. Часть воды поступает из бассейна 7 в градирню через распределитель жидкости 8, после чего она растекается по блоку оросителя, состоящего из нескольких гофрированных перфорированных пластин 9, что способствует ее дополнительному охлаждению и падает обратно в бассейн 7, по пути омывая и охлаждая пучок труб 2, подобно мокрой градирне. Для уменьшения уноса воды в верхней части градирни располагается каплеуловитель 10, который улавливает и распределяет воду по насадкам 11, по которым вода стекает в бассейн. Для повышения эффективности каплеулавливания, верхняя пластина 9 также выполняет функцию каплеуловителя. Несмотря на наличие каплеуловителей, некоторая часть воды уносится из градирни. Для восполнения воды используется горячая оборотная вода, поступающая в градирню через линию подачи воды 1 через задвижку 12.

3) Испарения капель воды с внешних поверхностей пучков труб 2. Часть воды, которая уносится покрывает пучки труб 2 и испаряется с них, забирая при этом часть тепловой энергии.

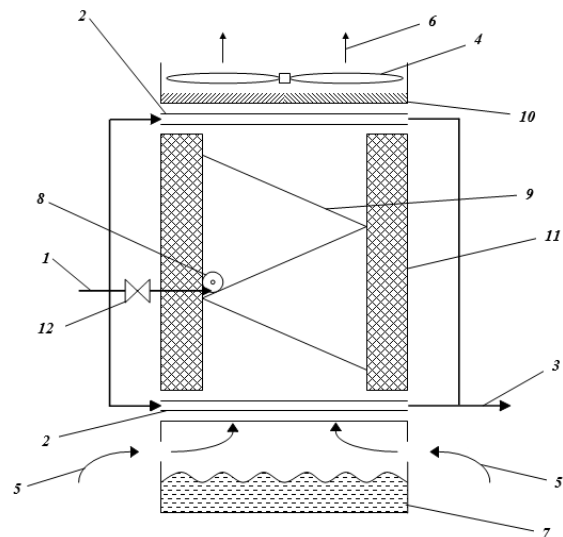


Рис. 1 – Бесконтактная испарительная градирня: 1 – линия подачи воды; 2 – пучок труб; 3 – выход воды; 4 – вентилятор; 5 – поток воздуха, входящий в градирню; 6 – поток воздуха, выходящий из градирни; 7 – бассейн; 8 – распределитель жидкости; 9 – гофрированная перфорированная пластина; 10 – каплеуловитель; 11 – насадка; 12 – задвижка

Представленная конструкция градирни позволяет снизить экономические затраты на обслуживание

техники, так как отсутствует водоочистительная система, охлаждаемая водооборотная вода не имеет непосредственного контакта с окружающим воздухом, тем самым исключается загрязнение воды насекомыми, грязью и др.

Повышению эффективности охлаждения оборотной воды способствует равномерное растекание по трубам 2 падающей холодной воды. Поэтому особый интерес представляет создание блока оросителя, способного распределить воду равномерно по всей площади пластин 9, что в результате позволит равномерно орошать и охлаждать пучки труб (рис. 1). Целью данной работы является исследование растекания воды по блоку оросителя.

Исследование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Нестационарная задача решалась методом конечных элементов. Для сокращения времени расчетов была построена упрощенная 3D модель бесконтактной испарительной градирни, включающая корпус, блок оросителя, распределитель жидкости и вентилятор (рис. 2).

Представленная трехмерная модель градирни имела следующие размеры: длина и ширина пластины – 126 и 117 мм соответственно, диаметр отверстий, диаметр гофр и шаг между отверстиями в пластине составляли по 10 мм, диаметр водораспределителя жидкости – 7 мм, угол между пластинами составлял 30° , высота корпуса градирни – 232 мм.

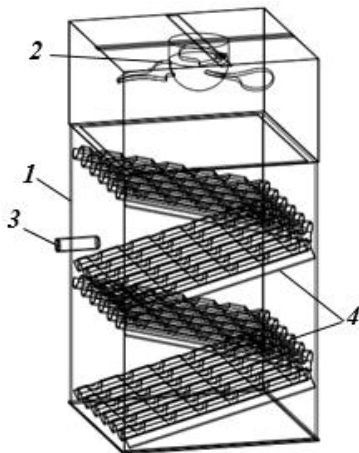


Рис. 2 – Упрощенная 3D модель градирни: 1 – корпус градирни; 2 – вентилятор; 3 – водораспределитель жидкости; 4 – блок оросителя

В исследуемой модели блок оросителя включал 4 пластины в отличие от модели, представленной на рисунке 1. Данное обстоятельство никак не влияет на конечные результаты, так как при проектировании градирни число пластин в блоке оросителя будет определяться расчетным путем. Первый запуск модели показал, что нагнетание воздуха вентилятором существенно усложняет численное моделирование и увеличивает время расчета, поэтому для упрощения задавался определенный перепад давления на нижней и верхней частях

градирни, чтобы обеспечить движения воздуха снизу в верх.

При проведении расчетов задавались следующие постоянные параметры: плотность окружающего воздуха $\rho = 1,22 \text{ кг/м}^3$ и динамическая вязкость воздуха $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Также были заданы граничные условия: входная скорость воды через водораспределитель жидкости $W = 0,4 \text{ м/с}$, давление в верхней части градирни 101 275 Па и давление в нижней части градирни 101 325 Па.

Результаты исследований показали, что для выхода на стационарный режим (объему, входящей жидкости соответствует объем выходящей жидкости) необходимо 3 с. При этом предложенный блок оросителя, состоящий из четырех гофрированных перфорированных пластин, позволяет добиться распределения жидкости по трем пластинам на 98,7% их общей площади. Верхняя, четвертая пластина выполняет функцию каплеуловителя.

Стоит отметить, что такой высокий процент распределения достигается при вводе воды в градирню только через водораспределитель жидкости 3, что позволяет отказаться от сложной классической водораспределительной системы, состоящей из трубопровода и вводного коллектора по всей площади градирни, которая зачастую забивается отложениями, что приводит к неравномерности распределения воды и в результате часть оросителя не смачивается (рис. 2).

Рассмотрим распределение жидкости в момент времени $\tau = 2,4 \text{ с}$. Как видно под действием напора вода попадает через водораспределитель жидкости на 3 пластину и поднимается по ней на 48,7 % ее площади, после чего жидкость переливается через гофры и равномерными струйками стекает на 2 пластину, где происходит равномерное распределение воды по всей поверхности пластины, вследствие геометрической структуры поверхности пластины и упорядоченного потока жидкости со 3 пластины, после чего через проделанные отверстия в пластине и зазоры между пластинами около стенок жидкость равномерно стекает на 1 пластину (рис. 3).

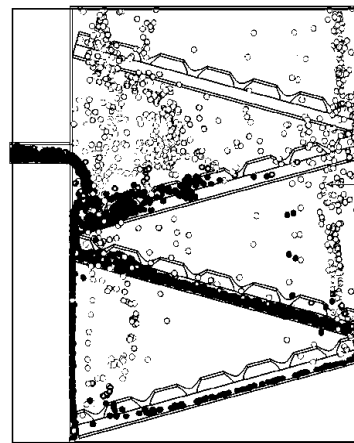


Рис. 3 – Распределение жидкости по блоку оросителя в градирне в момент времени $\tau = 2,4 \text{ с}$ (вид сбоку)

Как видно в момент времени $\tau = 2,4$ с верхняя часть третьей пластины (около 51,3 % площади) была не занята водой (рис. 3), однако в момент времени $\tau = 3$ с она равномерно заполнена жидкостью вследствие того, что осуществляется процесс уноса жидкости и пластины работают в качестве водоуловителей. Таким образом, достигается равномерное распределение жидкости по трем пластинам на 98,7 % их площади (рис. 4).

В ходе проделанной работы было подтверждено, что предлагаемый блок оросителя с гофрированными перфорированными перегородками позволяет достичь распределения жидкости, вводимую только через единичную точку ввода, по всей поверхности блока оросителя.

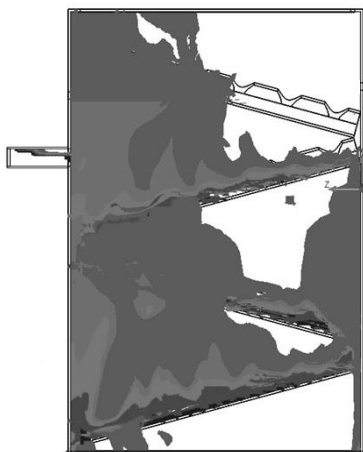


Рис. 4 – Распределение жидкости по блоку оросителя в градирне в момент времени $\tau = 3$ с (вид сбоку)

Преимуществами предлагаемой бесконтактной испарительной градирни являются: малые энергетические затраты, простота конструкции, исключение водораспределительной и водоочистительной систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-417.2019.8.

Литература

1. А.В. Митинов, Е.В. Сафронова, *Вестник Полоцкого государственного университета*, **3**, 116-119 (2018).
2. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуен Ву Линь, *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, **10**, 1(37), 74-81 (2018).
3. Г.Р. Мингалеева, Ю.Н. Зацيرانная, Е.К. Вацагина, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, **1(2)**, 22-31 (2005).
4. В.И. Борнсов, В.О. Зайцев, *Journal of advanced research in technical science*, **10(2)**, 45-51 (2019).
5. А.А. Атаманюк, Н.П. Назаренко, А.П. Сидоренко, *Экология и промышленность*, **2(55)**, 8-14 (2018).
6. О.С. Николаева, *Известия всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*, **283**, 82-87 (2017).
7. С.В. Новичков, Р.А. Долгов, *Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области*, 144-147 (2018)

8. В.К. Кивран, Н.А. Атанов, *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. строительные технологии*, 373-379 (2015).
9. О.С. Николаева, Б.Л. Свердлин, К.В. Пилипенко, *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Н. Веденеева*, **260**, 78-85 (2010).
10. С.Д. Ермишко, М.Ю. Сарилов, *Научно-техническое творчество аспирантов и студентов*, 364-366 (2017).
11. А.С. Уланова, А.Г. Михайлов, *Техника и технологии: роль в развитии современного общества*, **9**, 2-5 (2016).
12. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, *Вестник казанского технологического университета*, **17**, 6, 134-136 (2014).
13. И.И. Королев, Е.В. Генова, С.Э. Бенклян, *Теплоэнергетика*, **11**, 49-45, (1996).
14. Ю.Н. Агапов, Д.А. Давыдов, *Вестник Воронежского государственного технического университета*, **14**, 3, 52-55 (2018).
15. О.С. Кочетов, М.В. Сошенко, М.В. Зубкова, *Матрица научного познания*, **9**, 9-12 (2017).
16. О.В. Крюков, *Научный вестник*, **3(9)**, 65-74 (2016).
17. А.Б. Голованчиков, Н.А. Меренцов, В.А. Балашов, *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*, **28(47)**, 171-178 (2012).
18. Н.А. Меренцов, А.Б. Голованчиков, В.А. Балашов, М.Г. Рязанов, Е.Е. Чугунова, *Известия Волгоградского государственного технического университета*, **1(128)**, 54-60 (2014).
19. А.И. Бадриев, В.Н. Шарифуллин, *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*, **6**, 15-20 (2016).
20. В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, Ю.Ю. Морева, *Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену*, 145-146 (2018).
21. О.С. Попкова, О.С. Дмитриева, Л.В. Круглов, *Вестник технологического университета*, **20**, 15, 112-113 (2017).
22. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник технологического университета*, **20**, 15, 78-80 (2017).
23. Г.П. Соломаха, В.И. Реут, В.И. Ващук, М.И. Ключенкова, *Теоретические основы химической технологии*, **13**, 1, 3-9 (1979).
24. Т.М. Фарахов, М.М. Башаров, И.М. Шигапов, *Электронный научный журнал нефтегазовое дело*, **2**, 192-207 (2011).
25. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, Э.И. Салахова, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 75-79 (2018).
26. N. Karwa, L. Schmidt, P. Stephan, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 13-14 (2012).
27. K. Moran, J. Inumaru, M. Kawaji, *International Journal of Multiphase Flow*, **28**, 5, 731-755 (2002).
28. B. Moshtari, E.G. Babakhani, J.S. Moghaddas, *Petroleum & Coal*, **51**, 1, 27-32 (2009).
29. I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, A.N. Nikolaev, *Chemical and Petroleum Engineering*, **51**, 5, 383-387 (2015).
30. А.В. Дмитриев, Л.В. Круглов, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева, М.А. Молчанов, *Вестник технологического университета*, **21**, 4, 78-80 (2018).
31. А.А. Шагивалеев, А.А. Овчинников, Н.А. Николаев, *Теоретические основы химической технологии*, **XC**, 1, 13-15 (2013).
32. А.В. Дмитриев, А.И. Хафизова, Л.В. Круглов, О.С. Дмитриева, Г.Х. Гумерова, Д.Р. Гумеров, *Вестник технологического университета*, **22**, 1, 54-57 (2019).
33. Jignesh R. Mehta, Tushar K. Desai, Akshay K. Patela, Hardik V. Diyoraa, Akash S. Rabadiya, *Energy Procedia*, **109**, 167-173 (2017).

34. М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев, *Вестник Казанского технологического университета*, 9, 152-158 (2011).
35. А.С. Пушнов, А.С. Соколов, М.М. Бутрин, *Химическая промышленность*, 39, 6, 625-628 (2005).
36. А.Ф. Хайруллин, *Экспозиция Нефть Газ*, 5 (37), 71-72 (2014).
37. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, 21, 9, 58-81 (2018).
38. Н.Н. Пашков, Ф.М. Долгачев, *Гидравлика. Основы гидрологии*. Энергоатомиздат, Москва, 1993. 448 с.
39. А.А. Харитонов, А.С. Пушнов, М.Г. Лагуткин, *Химическая промышленность сегодня*, 6, 50-56 (2011).
40. Е.В. Полиенова, А.Ю. Вальдберг, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2, 12-16 (2011).

© **В. Э. Зинуров** – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **А. И. Хафизова**, аспирант ФГБОУ ВО «КНИТУ», aliyahi@mail.ru, **Р. Р. Гайнатуллин** – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», gaynatullin97@mail.ru, **Д. Н. Латыпов** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой ПАХТ НХТИ (филиала) ФГБОУ ВО «КНИТУ», dlatypov@yandex.ru.

© **V. E. Zinurov** – post-graduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – doctor of technical sciences, associate professor, the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **A. I. Khafizova** – post-graduate student, KNRTU, aliyahi@mail.ru, **R. R. Gaynatullin** – graduate student, KSPEU, gaynatullin97@mail.ru, **D. N. Latypov** – candidate of Technical Sciences, associate professor, head of the Department processes and devices of Chemical Technology Nizhnekamsk Chemical Technology Institute of KNRTU, dlatypov@yandex.ru.