



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

Бальзамов Д.С.¹, Бронская В.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

dbalzamov@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Вопросы эффективного использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в промышленном секторе Российской Федерации являются актуальными на протяжении последних десятилетий, что подтверждается изданием различных законодательных актов и нормативных документов на федеральном и региональном уровне. Структура энергетических комплексов действующих предприятий органического синтеза формировалась в условиях взаимосвязи с внешними системами обеспечения энергоресурсами в период их низких внутренних цен. Эти факторы обусловили низкую системную энергоэффективность технологических комплексов в настоящее время и необходимость системного подхода при перспективном планировании направлений развития энергетики действующих предприятий. В соответствии со стратегией развития и модернизации топливно-энергетического комплекса России, направления развития систем обеспечения энергоресурсами предприятий органического синтеза определены в областях ресурсосбережения и создания энерготехнологических комплексов на основе эффективных источников электро- и теплоснабжения в условиях совершенствования основных технологических процессов. *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является исследование теплопотребляющих технологических узлов линии производства этилена на предмет эффективного использования тепловой энергии. Определить потенциал энергосбережения и разработать мероприятия по оптимизации теплопотребления на рассматриваемом производственном участке. *МЕТОДЫ.* Для достижения поставленной цели использовался метод энерготехнологического комбинирования и системного анализа теплотехнологий. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В данной работе проведено исследование работы узла приготовления питательной воды, узла откачки парового конденсата, установки промывки пиролизного газа (пирогаз), узла приготовления пара разбавления участка пиролиза производства этилена в рамках энергетического обследования предприятия в целом. В результате исследования была выполнена оценка тепловых потерь в технологических секциях, составлен материальный баланс технологических потоков, определены возможные резервы экономии тепловой энергии. *ВЫВОДЫ.* Определено, что использование тепла, отводимого в узел щелочной промывки питательной воды для подогрева частично осветленной воды, подаваемой на деаэрактор с установкой дополнительного теплообменника на участке подготовки питательной воды и откачки конденсата, позволит сэкономить водяной пар давлением 3,5 кгс/см² и оборотную воду. На участке водной промывки пиролизного газа экономию тепловой энергии можно достичь путем увеличения коэффициента теплообмена за счет удаления углеводородов из конденсата пара разбавления. Для секции приготовления пара разбавления предложено схемное решение, направленное использовать энергетический потенциал паро-конденсатной смеси греющего пара путем внедрения парожжекторной установки за теплообменником. Предложенная схема позволит получить экономический эффект 6400 Гкал/год, что в денежном выражении составит 5120 тыс. руб./год, а срок окупаемости 1,2 года.

Ключевые слова: энергоэффективность; вторичные энергетические ресурсы; теплотехнология; пиролиз; тепловой баланс; закально-испарительный аппарат; котел-утилизатор.

Для цитирования: Бальзамов Д.С., Бронская В.В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена //

INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMAL ENERGY USE AT THE THERMAL TECHNOLOGY SECTION OF ETHYLENE PRODUCTION

Balzamov D.S.¹, Bronskaya V.V.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

dbalzamov@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The issues of efficient use of fuel and energy resources in the industrial sector of the Russian Federation have been topical for the last decades, which is confirmed by the issuance of various legislative acts and regulatory documents at the federal and regional levels. The structure of energy complexes of operating organic synthesis enterprises was formed in conditions of interconnection with external systems of energy resources supply in the period of their low internal prices. These factors have caused the low system energy efficiency of technological complexes at the present time and the need for a systematic approach to the prospective planning of energy development directions of operating enterprises. In accordance with the strategy of development and modernization of the fuel and energy complex of Russia, the directions of development of energy supply systems of organic synthesis enterprises are defined in the areas of resource conservation and creation of energy technological complexes based on efficient sources of electricity and heat supply under the conditions of improvement of the main technological processes. *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to study the heat-consuming technological units of the ethylene production line for the efficient use of thermal energy. Determine the energy saving potential and develop measures to optimize heat consumption at the considered production site. *METHODS.* In this work we have studied the operation of feed water preparation unit, steam condensate pumping unit, pyrolysis gas (pyrogas) washing unit, dilution steam preparation unit of ethylene production pyrolysis section within the framework of energy inspection of the enterprise as a whole. As a result of the survey, heat losses in technological sections were assessed, material balance of technological flows was drawn up, and possible reserves of heat energy saving were determined. *CONCLUSION.* It is determined that the use of heat discharged to the feed water alkaline flushing unit for heating of partially clarified water supplied to the deaerator with the installation of an additional heat exchanger at the feed water preparation and condensate pumping section will save water steam with pressure of 3.5 kgf/cm² and recycled water. At the section of water washing of pyrolysis gas, heat energy saving can be achieved by increasing the heat exchange coefficient by removing hydrocarbons from the dilution steam condensate. For the dilution steam preparation section a scheme solution is proposed, aimed at using the energy potential of steam-condensate mixture of heating steam by introducing a steam ejector unit behind the heat exchanger. The offered scheme will allow to receive economic effect 6400 Gcal/year, that in monetary terms will make 5120 thousand rubles/year, and payback period 1,2 years.

Keywords: energy efficiency; secondary energy resources; heat technology; pyrolysis; thermal balance; quenching and evaporation apparatus; heat recovery boiler.

For citation: Balzamov D.S., Bronskaya V.V. Increasing the efficiency of thermal energy use at the thermal technology section of ethylene production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 103-115. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-103-115.

Введение (Introduction)

Этилен является универсальным химическим материалом и считается одним из базовых продуктов химической промышленности вместе с пропиленом и ароматическими соединениями. Мировое потребление этилена, а следовательно, и его производство растет с каждым годом в среднем на 3% [1-3].

Как универсальный материал, этилен широко используется в производстве различных химических продуктов и полимеров, например, винилхлорида (Ма, 2020), оксида

этилена (Пио и Салзано, 2020), дихлорэтана (Аль-Захрани, 2001), полиэтилена и других востребованных органических продуктов.

Производство этилена является крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов. В зависимости от производственной мощности предприятия годовое энергопотребление при производстве этилена составляет 8 838 т.у.т топлива (в том числе природного газа и этана), 730 000 Гкал тепловой энергии (в виде водяного пара и теплофикационной воды), 600 000 МВтч электрической энергии. Задача разработки решений по эффективному потреблению энергоресурсов и снижению энергоемкости готовой продукции с каждым годом становится актуальнее как в России, так и во всем мире [4-7]. В качестве перспективного направления энергосбережения можно отметить формирование систем утилизации вторичных энергоресурсов в основных узлах теплотехнологической линии.

Литературный обзор (Literature Review)

Задачи повышения энергетической эффективности крупнотоннажных нефтехимических производств рассматривались в работах зарубежных и отечественных ученых, среди которых можно выделить Симонова В., Назмеева Ю., Конахину И., Башмакова И., Дж. Ролса и многих других [7].

Несмотря на полученные результаты в научном решении проблемы энергосбережения, имеются некоторые ее аспекты, главным образом в промышленном производстве, которые требуют дальнейших углубленных исследований. Специфика деятельности промышленных предприятий может иметь отличия, несмотря на выпуск одного и того же органического продукта. В некоторых случаях мероприятия, которые показали высокую эффективность на одном предприятии, могут быть убыточными на другом объекте [8].

В [3] авторы отмечают, что в большинстве моделей конечного использования энергоресурсов промышленными системами отсутствует описание технологий и процедур, в том числе не хватает реальных эксплуатационных данных. Это серьезный недостаток существующих моделей, поскольку потребление энергии определяется составом оборудования и режимами технологического процесса.

В работах [3, 4] исследуется оптимизация работы паровых крекинг-установок в производстве этилена, в результате чего авторы определили, что экспорт или импорт пара на соседние установки или комплексы может увеличить финансовую выгоду, а оптимизация внутреннего управления водяным паром позволила минимизировать потребление пара и привела к снижению потребления топлива паровыми котлами крекинг-установки на 5 %.

Материалы и методы (Materials and methods)

В данной работе рассматривается оптимизация теплотребления технологического участка производства этилена. Выполнен комплексный анализ структуры выработки и потребления тепловой энергии в таких технологических узлах как узел приготовления питательной воды, узел откачки парового конденсата, узел промывки пиролизного газа (пирогаз), узел приготовления пара разбавления.

Структура выработки, потребления и отпуска тепловой энергии на технологические и хозяйственные нужды представлена на рисунке 1 [9].

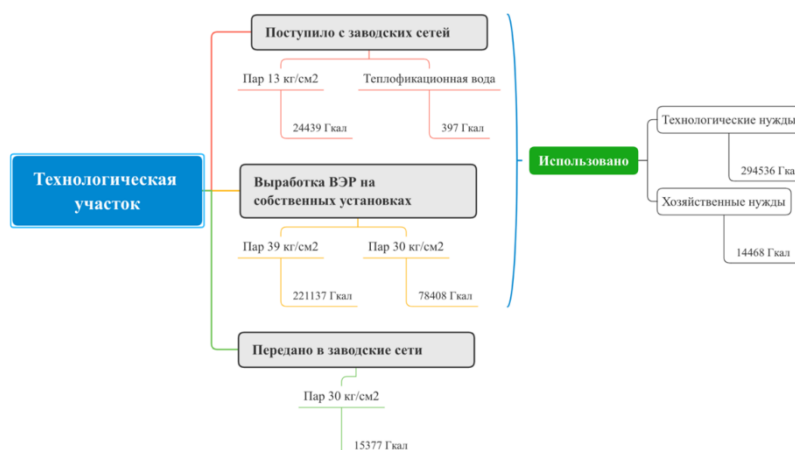


Рис. 1. Получение, выработка, потребление и отпуск тепловой энергии пара и теплофикационной воды на производственном

Fig. 1. Receipt, generation, consumption and supply of steam heat energy and heating water at the production site

участке

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ работы паро-конденсатной схемы технологического участка производства этилена.

Пар из заводского паропровода давлением 13 кг/см^2 подается в основной паропровод технологического участка производства этилена (рис. 2). Туда же поступает водяной пар от котлов утилизаторов КУ-80 (позиция А, Б) и закально-испарительных аппаратов (ЗИА), дросселируемый до давления 13 кг/см^2 . Далее пар разделяется на четыре потока [10]:

1. Поток с давлением 13 кг/см^2 подается в испарители Т-204 узла получения пара разбавления;
2. Второй поток после снижения его давления до 7 кг/см^2 , совместно с паром от Е-202 (Т-204) поступает в качестве пара разбавления на узел печей пиролиза;
3. Третий поток после снижения его давления до $6,5 \text{ кг/см}^2$ подается в узел печей пиролиза для продувки топок, на паротушение и для обогрева теплоспутников;
4. Четвертый поток после снижения его давления с $6,5 \text{ кг/см}^2$ до $3,5 \text{ кг/см}^2$ совместно с паром вторичного вскипания с сепараторов Е-108 узла подготовки питательной воды и сбора продувочных вод поступает в подогреватели Т-102, Т-103, Т-212, Т-217, в деаэрационный бак Е-102, в колонну К-202, в обогревающий элемент факельной емкости, а также используется для пропарки аппаратов и трубопроводов.

Часть пара давлением $3,5 \text{ кг/см}^2$ поступает в цех газоразделения в кипятильники Т-316 (позиции А, Б) этановой колонны К-302, в Т-344 и Т-344а пропановой колонны К-306 и К-306а, в подогреватель Т-338, испарители Т-357 и Т-358, в теплообменник Т-353, в змеевики емкостей жидких продуктов газоразделения, в стояки для пропарки и паротушения, а также на обогрев шкафов контрольно-измерительных приборов (КИП).

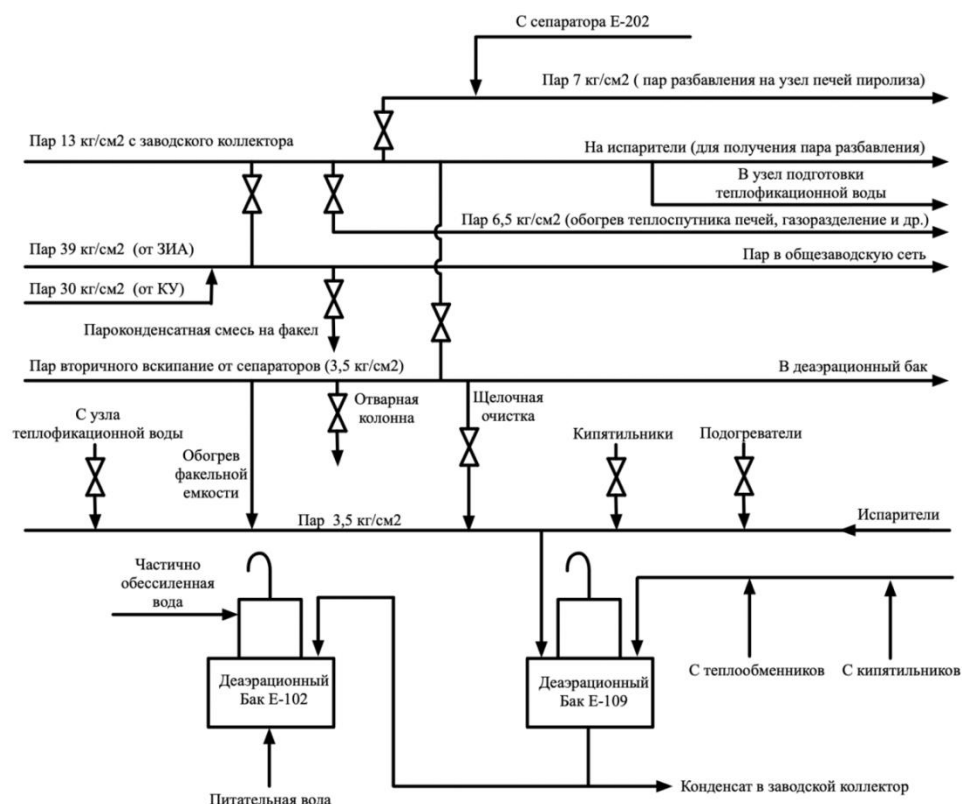


Рис. 2. Паро-конденсатная схема технологического участка Fig. 2. Steam-condensate scheme of the process section

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование пара, вырабатываемого на теплоутилизационных установках технологического участка, имеет приоритетный характер. Пар из паропроводов завода подается для стабилизации параметров давления в паропроводах технологического участка производства этилена и для поддержания в рабочем состоянии магистральных паропроводов паровой сети завода [7, 9, 10].

По целевому назначению использования пара, поступающего на технологические нужды, можно классифицировать следующим образом:

- Впрыск пара в пирогаз для обеспечения необходимого парциального давления и снижения коксования поверхностей теплообмена печей пиролиза и ЗИА со стороны пирогаза;

- Обогрев кипятильников ректификационных колонн в соответствии с параметрами, обусловленными технологическим регламентом;

- Подогрев промежуточных теплоносителей локальных циклов: теплофикационного и метанолового (от теплофикационного цикла подается вода для обогрева технологических спутников);

- Догрев и деаэрация частично-обессоленной воды (ЧОВ) и дымовых газов, а также на узел щелочной отмывки;

- Обогрев сборных емкостей цикла газоразделения;

- Обогрев линий подачи сырья на печи пиролиза;

- Пропарка аппаратов и трубопроводов всех узлов цеха;

- Продувка змеевиков печей пиролиза, находящихся в горячем резерве и при паровоздушном выжиге кокса.

Количественно водяного пара по направлениям теплоснабжения представлено в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Распределение пара, подаваемого к технологическим потребителям

Distribution of steam supplied to process consumers

№	Давление пара, кг/см ²	Потребитель	Расход пара, т/ч
1	30	Т-341 – подогреватель активации свежего катализатора (узел гидрирования)	0,25
2	13	На теплофикацию (Теплоспутниковые аппараты)	4,0
		Т-204 (А,Б,В,Г,Д) – испарители (узел приготовления пара разбавления)	21,0
3	7	В линию пара разбавления	
4	6,5	Для продувки топок, паротушения, в линию обогрева теплоспутников продуктов на печи пиролиза	1,4
		Т-108 – дополнительный подогрев пара разбавления	0,3
5	3,5	Т-102, Т-103 – подогрев этана и метановодородной фракции (МВФ)	2,5
		К-102 – отпарная колонна (узел водной отмывки пирогаза)	0,9
		К-103 – на деаэрацию Е-102	5,5
		Т-212, Т-217 – узел щелочной отмывки пирогаза	1,5
		Т-344, Т-344а – кипятильники пропановой колонны К-306	1,1
		Т-316а, Т-316б – кипятильники этановой колонны К-302	9,0
		Т-357, Т-358 – обогреватели-испарители метанола	0,8
		Т-338 – подогреватель этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) (узел гидрирования)	3,1
		Т-353 – испаритель пропана перед подачей в цех	0,16
		Обогрев факельной емкости Е-222	0,6
		Пропарка аппаратов и трубопроводов	2,2
		Обогрев змеевиков емкости газоразделения	2,0
Итого			56,31

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Часть потребности в теплоснабжении рассматриваемого производственного участка обеспечивается за счет тепла встречных технологических потоков:

- Нагрев питательной воды, подаваемой в деаэрацию, осуществляется за счет тепла конденсата технологических потребителей производственного участка. Охлажденный конденсат поступает в заводские сети;

- Нагрев кубового продукта в кипятильнике Т-346 колонны К-307 и Т-348(А,Б) колонны К-308б осуществляется за счет тепла циркуляционной воды цикла первичной отмывки и охлаждения пирогаза;

- Нагрев газообразной этан-этиленовой фракции в теплообменниках обратных потоков Т-336, Т-337 за счет тепла прогидрированной этан-этиленовой фракции;

- Подогрев куба этиленовой колонны К-303 осуществляется за счет конденсации этилена в кипятильниках Т-319 (А,Б) после его компримирования в компрессоре В-404 на выходе из колонны К-303. Таким образом этиленовая колонна К-303 совместно с компрессором К-404 работает в режиме теплового насоса.

Значительная часть теплообменного оборудования в цикле газоразделения рассматриваемого технологического участка производства этилена функционирует, используя тепло или холод встречных технологических потоков [11-13]. Несмотря на такую организацию, существует потребность в снижении теплоснабжения на технологические нужды производственного участка. Далее выполнена оценка теплотерь в технологических узлах рассматриваемого участка.

Анализ работы узла приготовления питательной воды

В представленной на рисунке 3 схеме подготовки питательной воды, сброса продувочных вод и откачки парового конденсата применен ряд технических решений, направленных на снижение теплоснабжения на участке производства этилена:

- Подогрев питательной воды теплом конденсата от потребителей пара, откачиваемого в общие заводские сети;
- Сепарация продувок от КУ-80 (А,Б) и ЗИА с использованием отсепарированного пара в технологическом цикле участка по производству этилена;
- Использование продувочных вод после сепараторов для подачи на отпарную колонну К-202.

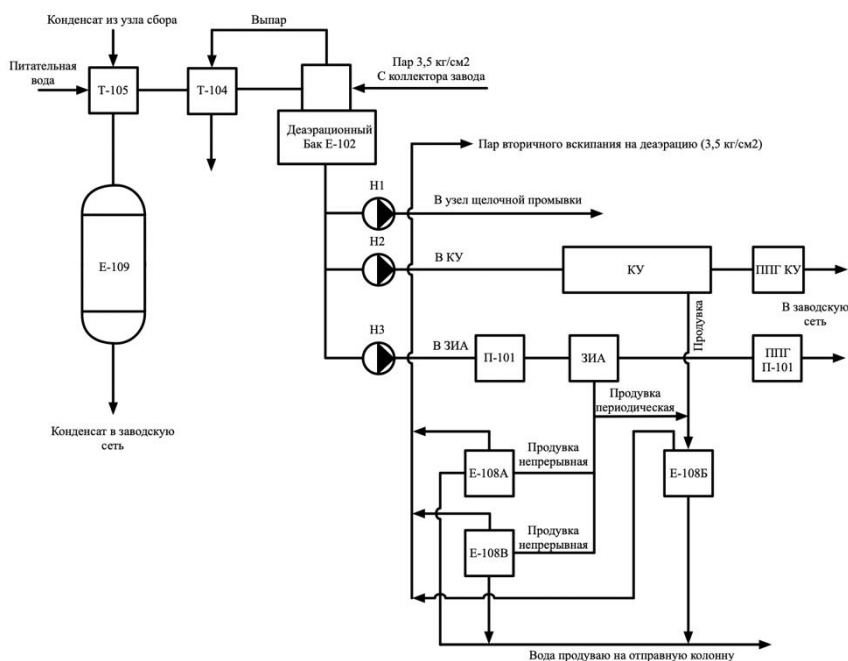


Рис. 3. Узел подготовки питательной воды, сброса продувочных вод и откачки парового конденсата на технологическом участке производства этилена

Fig. 3. Feed water treatment, blowdown water discharge and steam condensate pumping unit at the ethylene production process unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Материальный баланс узла подготовки питательной воды и откачки парового конденсата представлен на рисунке 4.

Анализируя схему узла подготовки питательной воды и сбора конденсата, а также ее материальный баланс можно определить возможные резервы экономии тепловой энергии:

- Использование тепла, отводимого в узел щелочной промывки питательной воды (с температурой 102°C и расходом 9 т/ч) для подогрева частично осветленной воды, подаваемой на деаэратор. Существующего подогрева питательной воды конденсатом явно недостаточно, его объем не более 15-18 т/ч при расходе частично-обессоленной воды (ЧОВ) 62-68 т/ч. Потоки ЧОВ можно разделить, установив дополнительный теплообменник для подогрева питательной воды, подаваемой на щелочную отмывку. Это позволит сэкономить пар давлением 3,5 кг/см², подаваемый на деаэрацию, а также оборотную воду, расходуемую в цикле щелочной отмывки на охлаждение питательной воды.

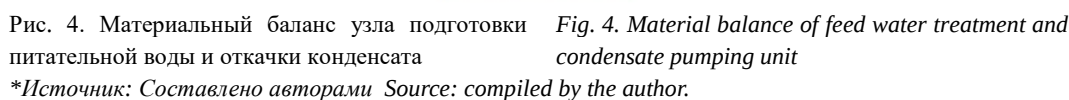
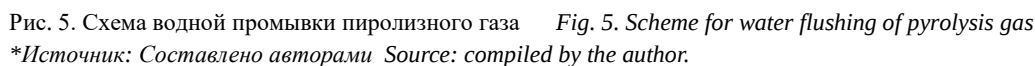


Схема водной промывки пирогаза представлена на рисунке 5.

При этом большая часть тепла циркуляционной воды отводится в атмосферу на воздушных холодильниках Т-201, а также через пропиленовые холодильники Т-203 и Т-225. Часть тепла циркуляционной воды полезно используется в технологическом цикле, в частности в кипятильниках колонн К-307 и К-308 (А,Б) схемы концентрирования пропилена, для подогрева кубовых продуктов до температуры 49°C и 53°C соответственно.



109

600 м³) и до температуры 35-45°C (в объеме 150-160 м³), затрачивая при этом электроэнергию на работу циркуляционных насосов, вентиляторов воздушных холодильников, на приготовление и подачу хладагента в виде жидкого пропилена из холодильного цикла пропилена.

Суммарные затраты электроэнергии составляют порядка 2,0-2,3 кВтч/т циркуляционной воды. Возможности утилизации тепла циркуляционной воды цикла водной промывки пирогаза ограничены из-за значительного загрязнения циркуляционной воды коксом и смолами, затрудняющих работу теплообменного оборудования.

Эффективный вывод из цикла образовавшихся в процессе водной отмывки конденсата пара разбавления углеводородов может сократить затраты электроэнергии на охлаждение за счет увеличения коэффициента теплообмена на охлаждающем теплообменном оборудовании и создать предпосылки для эффективной утилизации тепла циркуляционной воды [14, 16].

Анализ работы узла приготовления пара разбавления

Наиболее крупным потребителем пара давлением 13 кг/см² в технологическом цикле участка производства этилена является узел приготовления пара разбавления (до 25% от общего потребления тепла на технологию).

Пар разбавления получается из химически загрязненной циркуляционной воды, подающейся последовательно в теплообменник предварительного нагрева Т-202 и испарительный теплообменник Т-204. В теплообменнике Т-202 происходит нагрев химически загрязненной циркуляционной воды конденсатом греющего пара давлением 13 кг/см² из теплообменника Т-204. Схема узла приготовления пара разбавления представлена на рисунке 6.

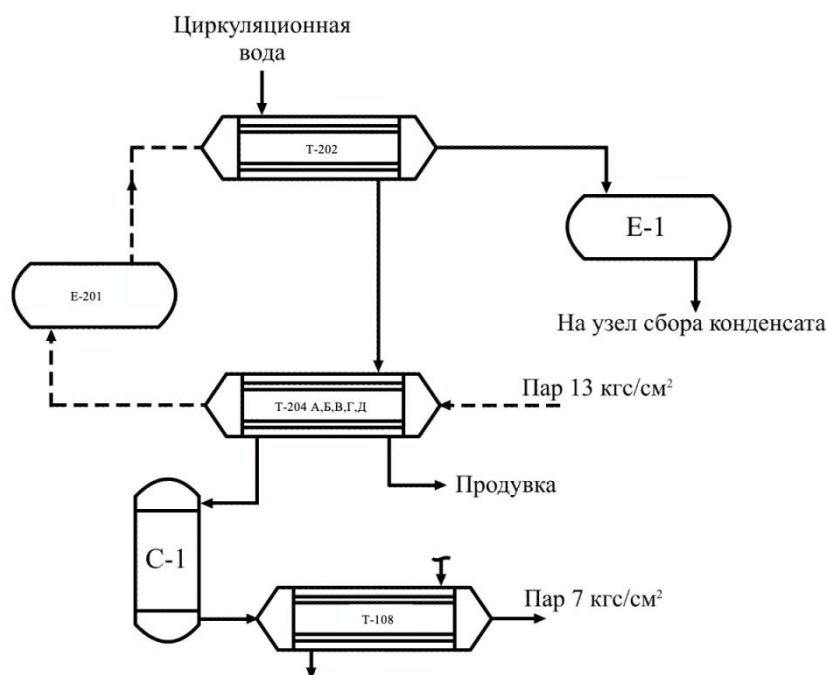


Рис. 6. Схема узла приготовления пара разбавления Fig. 6. Schematic diagram of the dilution steam preparation unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В теплообменнике Т-204 происходит испарение химически загрязненной циркуляционной воды, кипящей в межтрубном пространстве за счет конденсации греющего пара давлением 13 кг/см², подающегося из цехового коллектора. Греющий пар, конденсируясь в теплообменнике Т-204, подается в виде паро-конденсатной смеси в теплообменник Т-202, где захлаживается химически загрязненной циркуляционной водой. Получившийся из химически загрязненной воды в теплообменнике Т-204 пар разбавления давлением 7 кг/см² подается через сепаратор Е-201 и теплообменник Т-108 на впрыск в пирогаз на печах пиролиза [17].

Схема приготовления пара разбавления из химически загрязненной циркуляционной воды обеспечивает снижение объемов химически загрязненных стоков, отводимых на очистные сооружения.

Температура конденсата греющего пара давлением 13 кг/см^2 после теплообменника Т-202 составляет $125\text{--}135^\circ\text{C}$, что приводит к образованию пара вторичного вскипания на узле сбора конденсата. Установка сепаратора с парожекторной установкой на выходе конденсата с Т-202 позволит использовать тепло пара вторичного вскипания в технологическом цикле, снизить температуру конденсата при поступлении на узел сбора конденсата, исключить догрев пара разбавления в Т-108.

Результаты (Results)

На рисунке 7 представлена предлагаемая схема, предназначенная для использования энергетического потенциала паро-конденсатной смеси греющего пара на выходе из Т-202. Теплосодержание соответствует температуре выхода $t = 129^\circ\text{C}$ (рассчитанной по балансу) $q_{\text{вых.}} = 132,8 \text{ ккал/кг}$.

Суть предлагаемой схемы заключается в установке за теплообменником Т-202 парожекторной установки, поддерживающей давление в сепараторе на уровне $1,1 \text{ атм}$ ($0,1 \text{ кг/см}^2$), а так же обеспечивающей отвод и смешивание пара вторичного вскипания из сепаратора с рабочим паром эжектора (13 кг/см^2), для получения пара смешения с давлением $3,5 \text{ кг/см}^2$, который в дальнейшем подается в цеховой коллектор $3,5 \text{ кг/см}^2$.

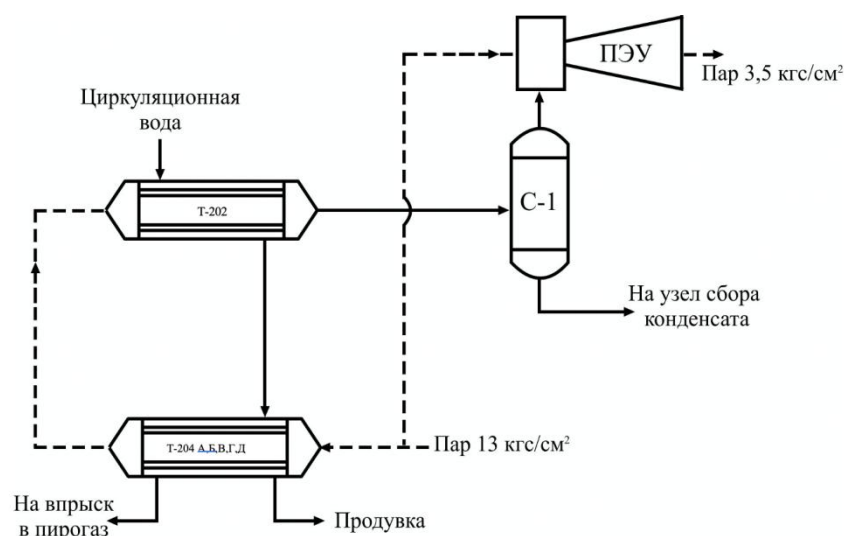


Рис. 7. Предлагаемая схема получения пара разбавления Fig. 7. Proposed scheme for obtaining dilution vapor

ПЭУ – Парокомпрессионная эжекционная установка PEU – Steam Compression Ejection Unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предлагаемая схема позволяет:

- обеспечить дополнительное использование тепла паро-конденсатной смеси греющего пара ($P = 13 \text{ кг/см}^2$) за счет извлечения пара вторичного вскипания в сепараторе;
- обеспечить повышение давления пара вторичного вскипания на парокомпрессорной эжекторной установке до $3,5 \text{ кг/см}^2$, что позволит использовать его в технологическом цикле;
- стабилизировать захлаживание конденсата до температуры 102°C перед подачей на узел сбора конденсата;
- отказаться от догрева пара разбавления на теплообменнике Т-108;
- получить экономический эффект от использования пара вторичного вскипания на уровне 6400 Гкал/год.

Расчет экономии тепловой энергии при внедрении технологии

Тепловой баланс теплообменников Т-202, Т-204:

- данные для расчета (принимаются по технологическому регламенту);
- температура химически загрязненной циркуляционной воды: перед Т-202 $t_1 = 100^\circ\text{C}$, после Т-202 $t_2 = 165^\circ\text{C}$;
- температура и скрытая теплота парообразования пара разбавления (7 кг/см^2) $t_{\text{п.р.}} = 170^\circ\text{C}$, $r_{\text{п.р.}} = 488,8 \text{ ккал/кг}$;
- температура и скрытая теплота парообразования греющего пара (13 кг/см^2) $t_{\text{гр.п.}} = 195^\circ\text{C}$, $r_{\text{гр.п.}} = 467,7 \text{ ккал/кг}$.

Расход пара разбавления принимаем по рабочим листам $G_{п.р.} = 20$ т/ч.

Тепловой баланс теплообменника Т-204:

$$Q_{п.р.} = Q_{гр.п.}$$

где $Q_{п.р.}$ – тепло, подводимое греющим паром;

$Q_{гр.п.}$ – тепло, получаемое паром разбавления и определяется по формуле.

$$Q_{гр.п.} = G_{гр.п.} \cdot r_{гр.п.}$$

где $G_{гр.п.}$ – объём продувок из пара разбавления, выводимых из теплообменника Т-204. В соответствии с технологическим регламентом принимается равным 6% от общего количества пара разбавления.

$$Q_{п.р.} = (G_{гр.п.} - G_{прод.}) \cdot r_{гр.п.}$$

Тогда расход греющего пара, т/ч:

$$G_{гр.п.} = \frac{(G_{п.р.} - G_{прод.}) \cdot r_{п.р.}}{r_{гр.п.}} = \frac{(20 - 20 \cdot 0,06) \cdot 488,8}{467,7} = 19,65$$

Тепловой баланс теплообменника Т-202:

$$Q_{конд.гр.} = Q_{х.з.в.}$$

где $Q_{конд.гр.}$ – тепло, отдаваемое конденсатом греющего пара;

$Q_{х.з.в.}$ – тепло, получаемое химически загрязненной водой.

$$Q_{конд.гр.} = G_{гр.пир} \cdot \Delta t$$

где $\Delta t = t_{гр.п.} - t_{вых}$ – разность температур конденсата греющего пара на входе и выходе из Т-202.

$$\Delta t = \frac{Q_{х.з.в.}}{G_{гр.п.}} = \frac{G_{п.р.} \cdot (t_2 - t_1)}{G_{гр.п.}} = \frac{20 \cdot (165 - 100)}{19,65} = 65^\circ\text{C}$$

где t_2 – температура циркуляционной воды на выходе из теплообменника Т-202;

t_1 – температура циркуляционной воды на входе в теплообменник Т-202.

Температура конденсата греющего пара на выходе из теплообменника Т-202 составит:

$$t_{вых.} = t_{гр.п.} - \Delta t = 195 - 65 = 130^\circ\text{C}$$

Возможное получение пара вторичного вскипания [4, 5]:

$$G_{п.вт.} = \frac{G_{п.к.} \cdot \Delta i_k}{r_{п.}} = \frac{19,65 \cdot (132,8 - 101)}{536} = 1,216 \text{ т/ч}$$

где Δi_k – разность теплосодержаний конденсата насыщенного пара при температуре 130°C (132,8 ккал/кг) и при температуре 100°C , соответствующее давлению 0,1 кг/см² на линии насыщения пара (101 ккал/кг);

$r_{п.}$ – скрытая теплота парообразования при давлении 0,1 кг/см² (538 ккал/кг).

Экономия тепла за год в натуральном выражении составит, Гкал/год:

$$Q_{эк.} = G_{п.вт.} \cdot T \cdot i_{п.} = 1,216 \cdot 7920 \cdot 665 = 6400$$

Экономия тепла за год в денежном выражении составит, руб./год:

$$\Delta_{эк.} = Q_{эк.} \cdot C_{т.э.} = 6400 \cdot 800 = 5120000$$

где T – время работы технологического цикла 3 очереди в течение года и составляет 7920 ч/год;

$i_{п.}$ – теплосодержание пара давлением 14 кг/см² составляет 665 ккал/кг (минимальное давление пара, из которого путем дросселирования получается пар давлением 3,5 кг/см² при существующей схеме теплоснабжения).

$C_{т.э.}$ – действующий тариф на тепловую энергию 800 руб./Гкал.

Затраты электроэнергии на перекачку конденсата из сепаратора на узел сбора конденсата составят, кВт·ч:

$$W = G_{конд.} \cdot T \cdot W_{к.} = 18,434 \cdot 7920 \cdot 0,3 = 43799,2$$

где $G_{конд.}$ – годовой объем перекачки конденсата, т/ч:

$$G_{конд.} = G_{п.к.} - G_{п.вт.} = 19,65 - 1,216 = 18,434$$

$W_{к.}$ – удельный расход электроэнергии на перекачку конденсата и составляет 0,3 кВт·ч/м³ в соответствии с техническими характеристиками конденсатного насоса Кс-50-55-2.

В стоимостном выражении затраты на перекачку конденсата составят, руб./год:

$$З = W \cdot C_{э.э.} = 43799,2 \cdot 4,8 = 210236$$

Годовой экономический эффект от внедрения новой схемы составит, руб.:

$$\Delta_3 = \Delta - З = 5120000 - 210236 = 4909764$$

Ориентировочные затраты на внедрение (K_3) составят:

- проектирование – 500 тыс. руб.;

- стоимость паро-компрессорной установки, бака сепаратора, насосов откачки конденсата и прочего оборудования – 3500 тыс. руб.;
 - стоимость монтажа и обвязки – 1000 тыс. руб.;
 - установка регуляторов и автоматики – 600 тыс. руб.
- Итого затраты на внедрение составят 5600 тыс. руб.
Срок окупаемости предлагаемого решения составит, лет:

$$W = \frac{K_3}{\Xi_3} = \frac{5600000}{4909764} = 1,2$$

Заключение (Conclusions)

В технологическом цикле используется тепло конденсата, собираемого от технологических потребителей, тепло выпара деаэратора, тепло встречных технологических потоков. Вырабатываемый водяной пар ВЭР давлением 39 кг/см² и конденсат от теплоиспользующего оборудования частично передается в заводские сети. От локального теплофикационного цикла технологической схемы производится подпитка подающего теплофикационного заводского трубопровода.

Резервы экономии энергоресурсов связаны с использованием высокого давления пара, вырабатываемого на теплоутилизационном оборудовании рассмотренной схемы, который при использовании в технологическом цикле многократно дросселируется с 30 кг/см² до 13 кг/см² и далее до 6,5 кг/см² и 3,5 кг/см².

Экономия тепловой энергии может быть получена от расширения использования тепла встречных технологических потоков, а именно, нагрев пирогаза перед щелочной отмывкой с использованием тепла питательной воды, подаваемой после деаэратора на щелочную отмывку.

Также экономия тепловой энергии может быть получена от снижения количества пролетного пара в паро-конденсатной смеси, поступающей на узел сбора конденсата от потребителей технологического пара:

- за счет установки конденсатоотводчиков за теплообменниками Т-102, Т-103, Т-108, Т-212, Т-217;
- использование пара вторичного вскипания от Т-202 в технологическом цикле с повышением его давления на паровозжесторной установке и захолаживанием конденсата;
- установка теплообменника Т-105 для подогрева питательной воды теплом конденсата;
- за счет дополнительного захолаживания пароконденсатной смеси в кипятильниках ректификационных колонн при поддержании определенного уровня конденсата в межтрубном пространстве теплообменников Т-103, Т-102, что может обеспечить установка поплавковых конденсатоотводчиков с уравнивающей трубкой к паровому пространству кипятильника.

Дополнительную экономию тепловой энергии можно получить за счет улучшения теплоизоляции теплоиспользующего оборудования и трубопроводов, сокращения продувок и дренажей с паропроводов, за счет установки поплавковых конденсатоотводчиков на дренажах, за счет установки регуляторов температуры на теплоспутниках, использующих теплофикационную воду.

Как показали расчеты внедрение паро-эжекционной установки в технологическом цикле узла получения пара разбавления является экономически целесообразным и технически реализуемым решением. Модернизация схемы позволит полезно использовать пар вторичного вскипания, исключить из эксплуатации часть теплообменного оборудования, в частности теплообменник Т-1, что в свою очередь приведет к снижению эксплуатационных издержек.

Литература

1. Jing-Ming Chen, Biying Yu, Yi-Ming Wei, Energy technology roadmap for ethylene industry in China, Applied Energy, Volume 224, 2018, Pages 160-174.
2. Yongming Han, Hao Wu, Zhiqiang Geng, Qunxiong Zhu, Xiangbai Gu, Bin Yu, Review: Energy efficiency evaluation of complex petrochemical industries, Energy, Volume 203, 2020, 117893.
3. Amaral F, Santos A, Calixto E, Pessoa F, Santana D. Exergetic Evaluation of an Ethylene Refrigeration Cycle. Energies. 2020; 13(14):3753. <https://doi.org/10.3390/en13143753>
4. Shuguang Xiang, Lili Wang, Yinglong Wang, Rongshan Bi, Li Xia, Xiaoyan Sun, Exploration of gradient energy-saving separation processes for ethylene glycol mixtures based on energy, exergy, environment, and economic analyses, Separation and Purification Technology, Volume 279, 2021, 119787. doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119787

5. Anton A. Kiss, Robin Smith, Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry, *Energy*, Volume 203, 2020, 117788. doi.org/10.1016/j.energy.2020.117788
6. Kentaro Hirata, Hiroyuki Kakiuchi, Energy saving for ethylene process by Adsorption Heat Pump, *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, Issue 13, 2011, Pages 2115-2122. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.031
7. Система энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка дегидрирования изоамиленов в изопрен Бальзамов Д.С., Конахина И.А. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2010. №1 (4). С. 16-25.
8. Термодинамический анализ системы сбора и повторного использования конденсата Конахина И.А., Конахин А.М., Шинкевич О.П. Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. №2. С. 11-14.
9. Левин М.С. Использование отработавшего и вторичного пара и конденсата. М.: Энергия, 1971.
10. Balzamor D., Akhmetova I., Bronskaya V., Kharitonova O., Balzamova E. Optimization of Thermal Conditions of Heat Recovery Boilers with Regenerative Heating in the High-Temperature Section of Isoamylene Dehydrogenation. *International Journal of Technology* 2020, 11(8), 1598-1607.
11. Система повторного использования парового конденсата нефтехимического предприятия в условиях его невозврата источнику / И. А. Конахина, А. М. Конахин, Э. А. Ахметов, А. И. Фазуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 5-6. – С. 18-25.
12. Zatsarinnaya Y., Logacheva A., Gainullin R., et al. Solution for renewable future// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124, p.04010.
13. Balzamor D.S., Balzamova E.Yu., Bronskaya V.V., Oykina G.I., Rybkina E.A., Shaikhetdinova R.S., Kharitonova O.S. The beneficial using the heat of the exhaust gases of the furnaces of the technological unit for the ethylene oxide production (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 862(6), 062044. doi 10.1088/1757-899X/862/6/062044
14. Бальзамов Д.С. Сравнительный анализ двух способов энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка / Д. С. Бальзамов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 3-4. – С. 151-156.
15. Зацаринная Ю. Н., Реутин Г. В., Курилов С.С., Исаева О.В., Ковалев Г.С. Прогнозирование выработки электроэнергии от ВИЭ методами машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023.
16. Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity / E. Burlutsky, D. Balzamor, V. Bronskaya [et al.] // *International Journal of Technology*. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009.
17. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Khairullin, D. Balzamor [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571. – DOI 10.3390/en15155571.
18. Temperature Dependence of the Kinetic Parameters of the Titanium–Magnesium Catalyzed Propylene Polymerization / V. Bronskaya, G. Manuyko, G. Aminova [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – P. 5183. – DOI 10.3390/polym14235183.

Авторы публикации

Бальзамов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3877-7643>. E-mail: dbalzamor@mail.ru

Бронская Вероника Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия. E-mail: dweronika@mail.ru

References

1. Jing-Ming Chen, Biying Yu, Yi-Ming Wei, Energy technology roadmap for ethylene industry in China, *Applied Energy*, Volume 224, 2018, Pages 160-174.
2. Yongming Han, Hao Wu, Zhiqiang Geng, Qunxiong Zhu, Xiangbai Gu, Bin Yu, Review: Energy efficiency evaluation of complex petrochemical industries, *Energy*, Volume 203, 2020, 117893.
3. Amaral F, Santos A, Calixto E, Pessoa F, Santana D. Exergetic Evaluation of an Ethylene Refrigeration Cycle. *Energies*. 2020; 13(14):3753. <https://doi.org/10.3390/en13143753>

4. Shuguang Xiang, Lili Wang, Yinglong Wang, Rongshan Bi, Li Xia, Xiaoyan Sun, Exploration of gradient energy-saving separation processes for ethylene glycol mixtures based on energy, exergy, environment, and economic analyses, Separation and Purification Technology, Volume 279, 2021, 119787. doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119787
5. Anton A. Kiss, Robin Smith, Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry, Energy, Volume 203, 2020, 117788. doi.org/10.1016/j.energy.2020.117788
6. Kentaro Hirata, Hiroyuki Kakiuchi, Energy saving for ethylene process by Adsorption Heat Pump, Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issue 13, 2011, Pages 2115-2122. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.031
7. Energy technology combination system for the high-temperature section of dehydrogenation of isoamylenes into isoprene Balzamov D.S., Konakhina I.A. Bulletin of the Kazan State Energy University. 2010. №. 1 (4). p. 16-25.
8. Thermodynamic analysis of a system for collecting and reusing condensate Konakhina I.A., Konakhin A.M., Shinkevich O.P. Bulletin of Ivanovo State Energy University. 2011. №. 2. p. 11–14.
9. Levin M.S. Use of exhaust and secondary steam and condensate. M.: Energy, 1971
10. Balzamov D., Akhmetova I., Bronskaya V., Kharitonova O., Balzamova E. Optimization of Thermal Conditions of Heat Recovery Boilers with Regenerative Heating in the High-Temperature Section of Isoamylene Dehydrogenation. International Journal of Technology 2020, 11(8), 1598-1607.
11. System for reusing steam condensate of a petrochemical enterprise in conditions of its non-return to the source / I. A. Konakhina, A. M. Konakhin, E. A. Akhmetov, A. I. Fazullina // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2009. – №. 5-6. – P. 18-25.
12. Zatsarinnaya Y., Logacheva A., Gainullin R., et al. Solution for renewable future// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124, p.04010.
13. Balzamov D.S., Balzamova E.Yu., Bronskaya V.V., Oykina G.I., Rybkina E.A., Shaikhetdinova R.S., Kharitonova O.S. The beneficial using the heat of the exhaust gases of the furnaces of the technological unit for the ethylene oxide production (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 862(6), 062044. doi 10.1088/1757-899X/862/6/062044
14. Balzamov D.S. Comparative analysis of two methods of energy-technological combination of high-temperature section / D. S. Balzamov // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2009. – No. 3-4. – p. 151-156
15. Zatsarinnaya Yu. N., Reutin G. V., Kurilov S.S., Isaeva O.V., Kovalev G.S. Forecasting electricity generation from renewable energy sources using machine learning methods // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2023
16. Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity / E. Burlutsky, D. Balzamov, V. Bronskaya [et al.] // International Journal of Technology. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009.
17. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Khairullin, D. Balzamov [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571. – DOI 10.3390/en15155571.
18. Temperature Dependence of the Kinetic Parameters of the Titanium–Magnesium Catalyzed Propylene Polymerization / V. Bronskaya, G. Manuyko, G. Aminova [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – P. 5183. – DOI 10.3390/polym14235183.

Authors of the publication

Denis S. Balzamov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: dbalzamov@mail.ru

Veronika V. Bronskaya – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: dweronika@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено

15.11.2024 г.

Отредактировано

27.11.2024 г.

Принято

17.01.2025 г.