ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Повышение энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа

Е.А.ЮШКОВА✉, В.А.ЛЕБЕДЕВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Повышение энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427. EDN LXDVDP

Аннотация. Повышение энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия – актуальная задача государства. Объектом исследования является вакуумная установка перегонки мазута, включающая блок предварительного нагрева сырья и печь подогрева мазута перед колонной. Пинч-анализ позволяет проанализировать и оптимизировать большое количество тепловых потоков. Анализ и повышение энергоэффективности объекта исследования проводится энтальпийным пинч-анализом. С целью снижения тепловой нагрузки печей введены дополнительные потоки в систему теплообмена блока подогрева нефти. Проведена параметрическая оптимизация новой системы теплообмена, определены минимальные потребности системы теплообмена во внешних энергоносителях. Построен энтальпийный каскад системы теплообмена, который наглядно показывает распределение тепла между каждым тепловым потоком системы. Поиск оптимальной потоковой теплоемкости продуктов сгорания печи – важный пункт в анализе энергоэффективности печи. Выявлена оптимальная потоковая теплоемкость, при которой потери тепла с уходящими газами минимальны. В результате проведенных исследований повышена эффективность блока предварительного нагрева мазута за счет доведения рекуперации тепла до максимума, а затраты на внешние энергоносители минимизированы. Уменьшением потерь тепла с уходящими газами удалось увеличить КПД печи.

***Ключевые слова*:** вакуумная установка перегонки мазута; повышение энергоэффективности; пинч-анализ; тепловой каскад; энтальпия

Поступила: 10.03.2023 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 19.07.2023*** ***Опубликована: 19.07.2023***

Введение. Повышение энергоэффективности является главным фактором экономического роста предприятия и государства [1-3]. Энергоэффективные технологии могут сократить потребление природных ресурсов и уменьшить ущерб окружающей среде [4-6]. Федеральный закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» подтверждает актуальность уменьшения выбросов в окружающую среду.

Ученые всего мира создают энергоэффективные технологии [7-9]. Современные исследования включают в себя компьютерные технологии [10-12]. Существует множество различных методов оценки энергоэффективности [13-15]. Актуальными направлениями исследований являются 4-Э [16]: энтальпия; эксергетика; эксэргоэкономика; экономический анализ. Исследования продвигаются вперед, и 4-Э можно дополнить анализом окружающей среды [17-20].

Одним из эффективных методов оптимизации тепловых потоков является пинч-анализ [21]. Теоретические основы в области интеграции тепловых процессов и пинч-анализа представлены в работе Р.Смита и др. [22, 23]. Пинч-анализ позволяет работать с большим количеством тепловых потоков и провести параметрическую и структурную оптимизацию системы теплообмена.

Нефтеперерабатывающая промышленность является энергоемкой [20] – у заводов много тепловых потоков с большими потенциалами тепловой энергии, что делает использование пинч-анализа целесообразным [24-26].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В исследовании [27] подробно представлен метод повышения энергетической эффективности установок первичной перегонки сырой нефти без внесения изменений в структуру теплообменной сети. Повышение экономической эффективности технологических установок достигается за счет применения методов математического программирования. Также удается достичь снижения выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Распространенным методом проектирования теплообменных сетей является графический метод интеграции процессов [28]. Данный метод имеет ряд существенных преимуществ, в частности обеспечивается интерактивная визуализация анализа теплообменной сети, что может заменить использование различных программных продуктов (Aspen Energy Analyser и др.). Практическое применение метода имеет место в рамках модернизации нефтеперерабатывающего завода в Кувейте [29], однако он применим только к теплообменным сетям с одной минимальной разностью температур.

Одним из главных результатов исследования [30] является получение графического инструмента для проектирования теплообменных сетей при одновременном присутствии нескольких минимальных температурных перепадов.

В работе [31] приводится пример оптимизации теплообменной сети установки первичной перегонки сырой нефти на примере нефтеперерабатывающего завода, расположенного в Бахрейне. Особое внимание обращается на сокращение выбросов углекислого газа.

Пинч-анализ включает в себя различные инструменты: параметрическую и структурную оптимизацию; большую составную кривую и тепловые каскады. Существуют различные варианты использования пинч-анализа – энтальпийный, эксергетический и т.д. [32-34]. Метод структурной и параметрической оптимизации на основе эксергетического пинч-анализа описан в исследованиях [35]. Новизной данного исследования является использование технологии пинч-анализа с целью разработки мер для повышения энергоэффективности вакуумной установки по перегонке мазута.

Методы. Вакуумная трубчатая установка перегонки мазута топливного профиля предназначена для переработки мазутной фракции и фракции атмосферного газойля с атмосферной трубчатой установки АТ-5 с целью получения вакуумного дизельного топлива, легкого и тяжелого вакуумного газойля. Общая схема исследуемых блоков вакуумной установки ВТ-1 представлена на рис.1.

Объектами исследования являются блок предварительного нагрева сырья вакуумной установки по перегонке мазута ВТ-1 и печь подогрева мазута перед колонной. Основные этапы исследования:

• анализ существующей системы теплообмена блока предварительного нагрева сырья с помощью энтальпийного пинч-анализа;

• пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута:

– параметрическая оптимизация новой системы теплообмена блока предварительного нагрева;

– построение и исследование энтальпийного каскада, который показывает долю энтальпии на каждом интервале температур;

– анализ системы теплообмена с помощью большой составной кривой, который позволит оптимизировать работу печи подогрева мазута.

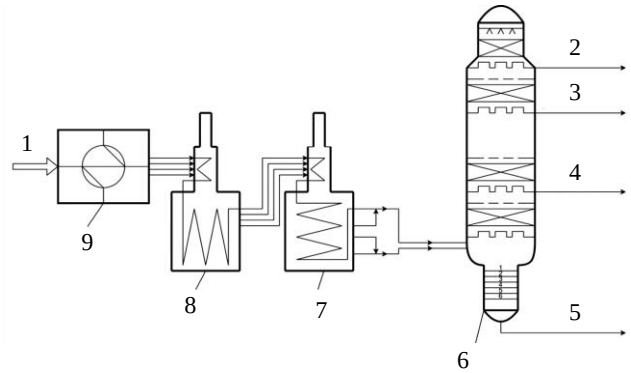


Рис.1. Схема исследуемых блоков вакуумной установки ВТ-1

1 – мазут в Т-27/1,2; 2 – вакуумный компонент дизельного топлива (КДТВ) и первое циркуляционное орошение (ЦО) из К-4 в ВХ-10/1,2; 3 – фракция легкого вакуумного газойля (ЛВГ) из К-4 в Т-22/1,2; 4 – фракция тяжелого вакуумного газойля (ТВГ) + II ЦО К-4 в Т-26/3,4; 5 – гудрон + квенч в Т-31/3,4; 6 – вакуумная колонна К-4; 7 – печь вакуумной колонны П-3; 8 – печь вакуумной колонны П-3Н; 9 – блок предварительного нагрева сырья

Анализ существующей системы теплообмена блока предварительного нагрева сырья. Перед тем как перейти к преобразованию тепловых потоков, их интеграции, необходимо понять общее устройство блока предварительного подогрева мазута. Теплообменная система вакуумной установки перегонки мазута топливного профиля ВТ-1 представлена

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427
© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

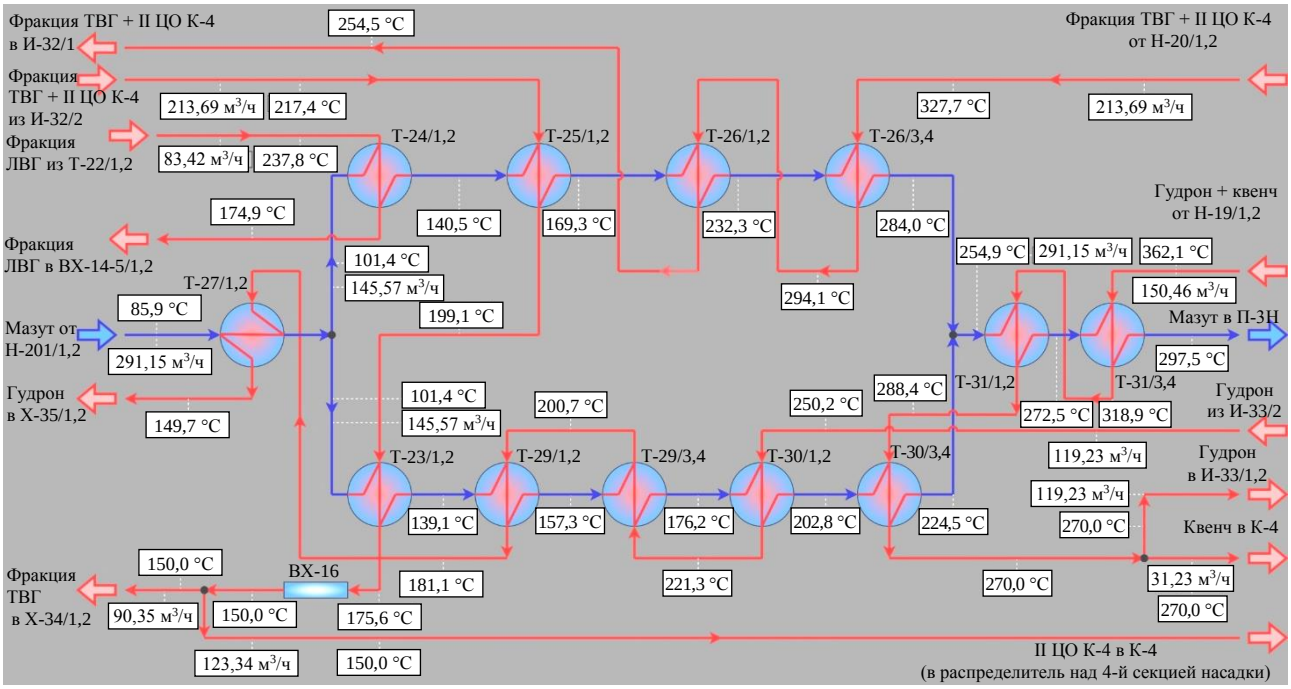


Рис.2. Система теплообмена блока предварительного нагрева мазута установки ВТ-1

на рис.2. Сырьем установки является мазут или близкий по физико-химическим свойствам нефтепродукт.

Согласно заданному режиму работы вакуумной колонны К-4, температура мазута, поступающего в ректификационную колонну, должна быть равна 393 °С. Для достижения данной температуры мазут после теплообменника Т-31/3,4 поступает в блок огневого нагрева сырья (мазута), который состоит из трубчатых печей нагрева мазута П-3Н и П-3. В первую очередь мазут проходит конвекционную и радиантную секции печи П-3Н, где нагревается до температуры, равной 320 °С. При этом печь П-3Н четырехпоточная – мазут поступает в нее четырьмя потоками и выводится так же. Далее мазут поступает в печь вакуумной колонны П-3, где при прохождении через конвекционную и радиантную секции нагревается до 393 °С.

После прохождения через блок огневого нагрева сырья мазут с температурой 393 °С поступает двумя потоками в вакуумную колонну К-4, которая предназначена для разделения под вакуумом мазута на фракции по следующей топливной схеме: вакуумная дизельная фракция; легкий и тяжелый вакуумные газойли; гудрон.

Холодным потоком установки ВТ-1 является мазут. Но для построения составной кривой холодных потоков данный поток будет представлен как четыре отдельных холодных потока. Горячими потоками для данной технологической схемы являются фракции мазута, выводимые из соответствующих отборов ректификационной колонны. Опираясь на состав технологической схемы установки ВТ-1, могут быть выделены пять горячих потоков, которые используются для нагрева мазута (холодные потоки) в блоке предварительного нагрева сырья. Определены тепловые потоки, данные которых представлены в табл.1.

Изменение теплосодержания технологического потока при изменении его температуры (при постоянном значении теплоемкости в пределах данного температурного интервала) определяется по формуле

$$\Delta H = CP\left[T_2 - T_1\right], \qquad (1)$$

где CP – потоковая теплоемкость, является произведением массового расхода на удельную теплоемкость, Вт/°С; T_1 – начальная температура; T_2 – конечная температура.

Горячая составная кривая объединяет потоки, которые отдают тепло. Потоки мазута, требующие нагрева, объединяются в холодную составную кривую. На основании параметров холодных и горячих технологических потоков построены холодная и горячая составные кривые потоков (рис.3, *а*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

Таблица 1

Исходные данные тепловых потоков установки

Тип	Поток	Температура, °С		Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·°С)	Потоковая теплоемкость, кВт/°С	Изменение энтальпии потока, МВт
		Начальная	Конечная				
Горячий поток 1	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из колонны К-4 от Н-20/1,2 в Т-26/3,4	328	255	56,0	2,8	154,1	–11,2
Горячий поток 2	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из И-32/2 в Т-25/1,2	232	176	56,0	2,4	136,7	–7,7
Горячий поток 3	Гудрон и квенч от Н-19/1,2 в Т-31/3,4	362	270	44,2	2,7	118,5	–10,9
Горячий поток 4	Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2	250	150	35,0	2,3	81,5	–8,2
Горячий поток 5	Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2	238	175	21,0	2,5	52,9	–3,3
Холодный поток 1	Мазут от Н-201/1,2 в Т-27/1,2	86	101	79,2	2	160,2	2,4
Холодный поток 2	Мазут из Т-27/1,2 в Т-24/1,2	101	284	39,6	2,4	93,5	17,1
Холодный поток 3	Мазут из Т-27/1,2 в Т-23/1,2	101	225	39,6	2,3	89,7	11,1
Холодный поток 4	Мазут в Т-31/1,2	255	393	79,2	2,7	217,2	29,8

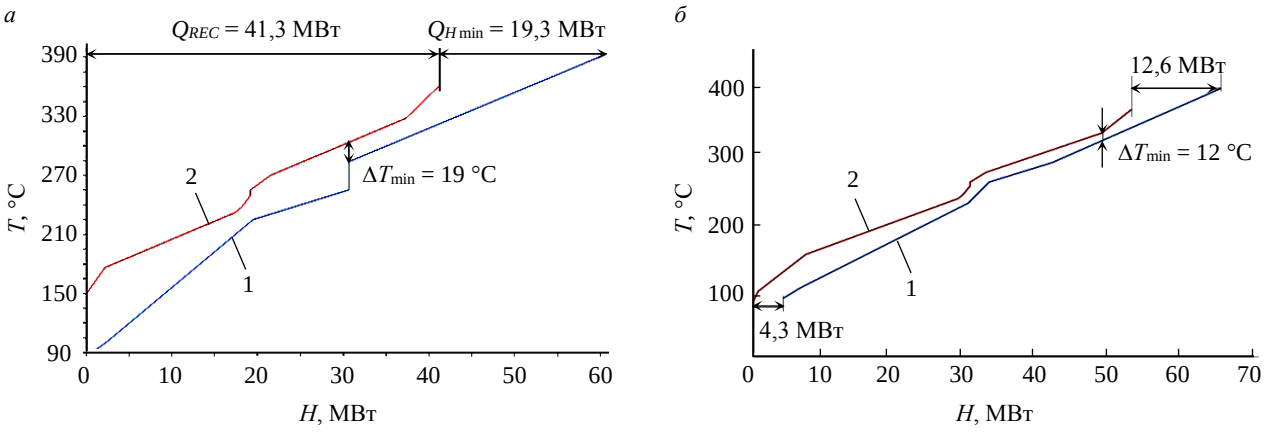


Рис.3. Составные кривые технологических потоков до (*а*) и после (*б*) преобразования

1 – холодная; 2 – горячая

Значение наименьшего теплового напора в теплообменной химико-технологической системе (ХТС) получают путем изменения положения составной кривой холодных потоков на температурно-энтальпийной плоскости. Обусловлено это тем, что начальные и конечные температуры технологических потоков должны сохраняться, а энтальпия – величина относительная. Сохраняется только изменение энтальпий потоков, следовательно, составные кривые можно сдвигать вдоль оси абсцисс на *TH*-диаграмме [22].

Опираясь на полученные значения, можно сделать вывод, что построение горячей и холодной составных кривых на температурно-энтальпийной диаграмме позволяет определить значения рекуперации теплоты и внешних горячих и холодных утилит.

По построенной составной кривой получены следующие данные:

• минимальная разность температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, которая определяется по минимальному расстоянию между составными кривыми вдоль температурной оси на *TH*-диаграмме:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427
© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

$$\Delta T_{\min} = 19\ ^{\circ}\text{C};$$

• количество рекуперируемой теплоты (максимальная рекуперация теплоты)

$$Q_{REC} = 41{,}3\ \text{МВт};$$

• целевые значения горячих утилит

$$Q_{H\min} = 60{,}6 - 41{,}3 = 19{,}3\ \text{МВт};$$

• целевые значения холодных утилит

$$Q_{C\min} = 0\ \text{МВт}.$$

Целевые значения горячих утилит $Q_{H\min}$ определяют количество внешней тепловой энергии, которое не получить холодными потоками от существующих горячих потоков установки ВТ-1 и должно быть подведено от внешних источников энергии (печи нагрева мазута П-3Н и П-3).

Целевые значения холодных утилит $Q_{C\min}$ определяют количество тепловой энергии, которое не может быть передано от горячих потоков к холодным и должно быть отдано внешним холодным утилитам. Для установки ВТ-1 остаточная теплота горячих потоков отводится в холодильниках и аппаратах воздушного охлаждения (АВО). Чтобы уменьшить требуемое количество внешних горячих утилит и, следовательно, снизить тепловую нагрузку на печи П-3Н и П-3, необходимо исследовать возможность доохлаждения существующих горячих потоков в блоке предварительного нагрева мазута до подачи их в холодильники и АВО.

Рассмотрим возможность дополнительного использования каждого из представленных в табл.1 горячих потоков:

• Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения К-4 из И-32/2 в Т-25/1,2. Поток проходит через теплообменники Т-25/1,2, Т-23/1,2 и поступает в АВО ВХ-16. После прохождения через данный АВО поток охлаждается от температуры, равной 176 °С, до 150 °С. Несмотря на то что ТВГ должен быть охлажден перед поступлением в парк до 80,4 °С, II ЦО К-4 должно быть охлаждено до 150 °С, так как данный поток после ВХ-16 поступает в ректификационную колонну К-4. Следовательно, изменение температуры II ЦО К-4 недопустимо, так как это может вызвать изменение режима работы вакуумной колонны. Но можно исключить из работы АВО ВХ-16 за счет охлаждения фракции ТВГ + II ЦО К-4 в теплообменниках Т-25/1,2 и Т-23/1,2 сразу до 150 °С. Это позволит не только снизить нагрузку на внешние горячие утилиты, но и уменьшить расход электроэнергии на привод вентиляторов АВО ВХ-16.

• Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2. Данный поток проходит через теплообменники Т-30/1,2, Т-29/3,4, Т-29/1,2, Т-27/1,2 и выводится в холодильники Х-35/1,2 и Х-35/3,4, где охлаждается за счет нагрева циркуляционной воды. Охлаждение гудрона необходимо, потому что температура фракции гудрона при поступлении в парк или на битумную установку (в зависимости от режима работы установки ВТ-1) должна быть равна 96 °С. Температура гудрона на выходе из блока предварительного нагрева мазута равна 150 °С. Следовательно, нужно рассмотреть возможность доохлаждения гудрона до его целевой температуры именно в блоке предварительного нагрева сырья, т.е. исключить из работы холодильники Х-35/1,2 и Х-35/3,4.

• Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2. Поток проходит через теплообменник Т-24/1,2, далее поступает в АВО ВХ-14/5-1,2, ВХ-14/5-3,4, ВХ-17 и выводится в парк или линию гудрона в парк (в зависимости от требований к получаемым продуктам). Температура фракции легкого вакуумного газойля после теплообменника Т-24/1,2 равна 175 °С. Температура фракции ЛВГ на выходе из установки ВТ-1 должна быть равна 80 °С. Следовательно, стоит рассмотреть возможность доохлаждения данного потока до целевой температуры в блоке предварительного нагрева сырья, что позволит исключить из работы АВО и снизить тепловую нагрузку на печи нагрева мазута П-3Н и П-3.

Энтальпийный пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута. Параметры измененных тепловых потоков после преобразований представлены в табл.2. Параметры остальных потоков остались без изменения. Составные кривые на плоскости температура – энтальпия представлены на рис.3, *б*. Данные составные кривые сближены до $\Delta T_{\min} = 12$ °С.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Данные измененных тепловых потоков системы теплообмена

Тип	Поток	Температура, °С		Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·°С)	Потоковая теплоемкость, кВт/°С	Изменение энтальпии потока, МВт
		Начальная	Конечная				
Горячий поток 2	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из И-32/2 в Т-25/1,2	232	150↓	56,0	2,4	134,2	–11
Горячий поток 4	Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2	250	96↓	35,0	2,1	74,4	–11,5
Горячий поток 5	Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2	238	80↓	21,0	2,3	48,7	–7,7

По построенной составной кривой получены следующие данные:

• минимальная разность температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, которая определяется по минимальному расстоянию между составными кривыми вдоль температурной оси на *TH*-диаграмме $\Delta T_{min} = 12$ °С;

• количество рекуперируемой теплоты (максимальная рекуперация теплоты), которое определяется по области перекрытия составных кривых технологических потоков вдоль энтальпийной оси на *TH*-диаграмме: $Q_{REC} = 48$ МВт;

• целевые значения горячих утилит $Q_{Hmin} = 12{,}6$ МВт;

• целевые значения холодных утилит $Q_{Cmin} = 4{,}3$ МВт.

Полученные целевые энергетические значения по использованию внешних горячих и холодных утилит определены при минимальной разности температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, равной $\Delta T_{min} = 12$ °С.

За счет построения составных кривых технологических потоков можно задавать значение наименьшего теплового напора в теплообменной ХТС. Так, для кожухо-трубчатых теплообменников минимальная разность температур между технологическими потоками должна быть не менее 10 °С. Такое требование обусловлено тем, что при малых значениях ΔT_{min} теплообменные аппараты должны работать в чисто противоточном режиме. При проектировании новой или реконструкции существующей теплообменной ХТС оптимальное значение ΔT_{min} выбирается путем достижения экономического компромисса между зависимостями от минимальной разности температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, стоимости внешних утилит (энергоносителей) и капитальных вложений на устройство системы теплообмена.

Следующий этап исследования и оптимизации установки заключается в построении теплового каскада, который позволит показать процесс теплообмена между потоками. По методике пинч-анализа [22] для построения теплового каскада необходимо, чтобы сдвинутые составные кривые касались друг друга в точке пинча. Представим, что горячие потоки холоднее на величину $\Delta T_{min}/2$, холодные – на $\Delta T_{min}/2$. Результатом такого сдвигания составных кривых вдоль температурной оси становится возможна теплопередача между потоками, содержащими в холодной и горячей составные кривые в пределах каждого температурного интервала. Изменение границ температурных интервалов сохраняет баланс теплоты всей системы.

Энергетические значения внешних утилит и локализация точки пинча будут определяться при $\Delta T_{min} = 12$ °С. Для построения теплового каскада необходимо получить новые температуры, сдвинутые на $\Delta T_{min}/2$. Измененные значения начальных и конечных температур потоков представлены в табл.3. Расположение технологических потоков на температурной оси после преобразований представлено в табл.4.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427
© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

Таблица 3

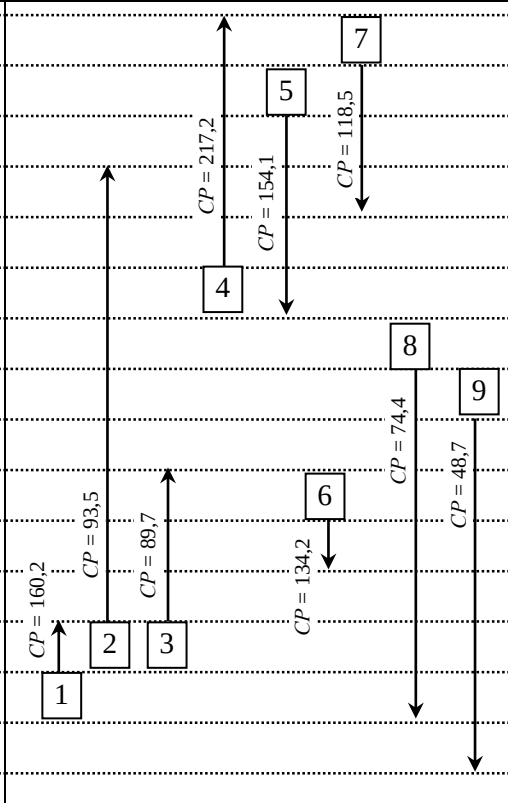
Сдвинутые температурные интервалы

Поток	Тип	$T_н$, °С	$T_к$, °С	$T_н$, °С	$T_к$, °С
1	Холодный	86	101	92	107
2	–"–	101	284	107	290
3	–"–	101	225	107	231
4	–"–	255	393	261	399
5	Горячий	328	255	322	249
6	–"–	232	150	226	144
7	–"–	362	270	356	264
8	–"–	250	96	244	90
9	–"–	238	80	232	74

Таблица 4

Баланс тепла в сдвинутых температурных интервалах

Температура на границах интервалов T, °С	Распределение потоков	Величина температурного интервала T, °С	$\Sigma CP_{хол} - \Sigma CP_{гор}$, кВт/°С	Тепловая нагрузка интервала, МВт	Избыток/ недостаток
399					
	7	43	217,2	9,339	Недостаток
356					
	5	34	98,7	3,356	Недостаток
322					
		32	–55,4	–1,773	Избыток
290					
		26	38,1	0,991	Недостаток
264					
		3	156,6	0,469	Недостаток
261					
		12	–60,6	–0,727	Избыток
249					
	8	5	93,5	0,468	Недостаток
244					
	9	12	19,1	0,229	Недостаток
232					
		1	–29,6	–0,029	Избыток
231					
	6	5	60,1	0,301	Недостаток
226					
		82	–74,1	–6,076	Избыток
144					
		37	60,1	2,224	Недостаток
107					
		15	37,1	0,557	Недостаток
92					
		2	–123,1	–0,246	Избыток
90					
		16	–48,7	–0,779	Избыток
74					



Следующим шагом в решении задачи табличным способом является энергетический баланс для каждого сдвинутого температурного интервала:

$$\Delta H_i = \left(\sum CP_{хол} - \sum CP_{гор}\right)_i \Delta T_i \ , \qquad (2)$$

где $\Sigma CP_{хол}$, $\Sigma CP_{гор}$ – сумма потоковых теплоемкостей всех холодных и горячих потоков соответственно, Вт/°С; ΔT_i – величина i-го температурного интервала, °С .

В формуле (2) ΔH_i представляет собой изменение энтальпии для каждого сдвинутого температурного интервала. Положительное ΔH_i обозначает, что на i-м интервале дефицит тепловой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

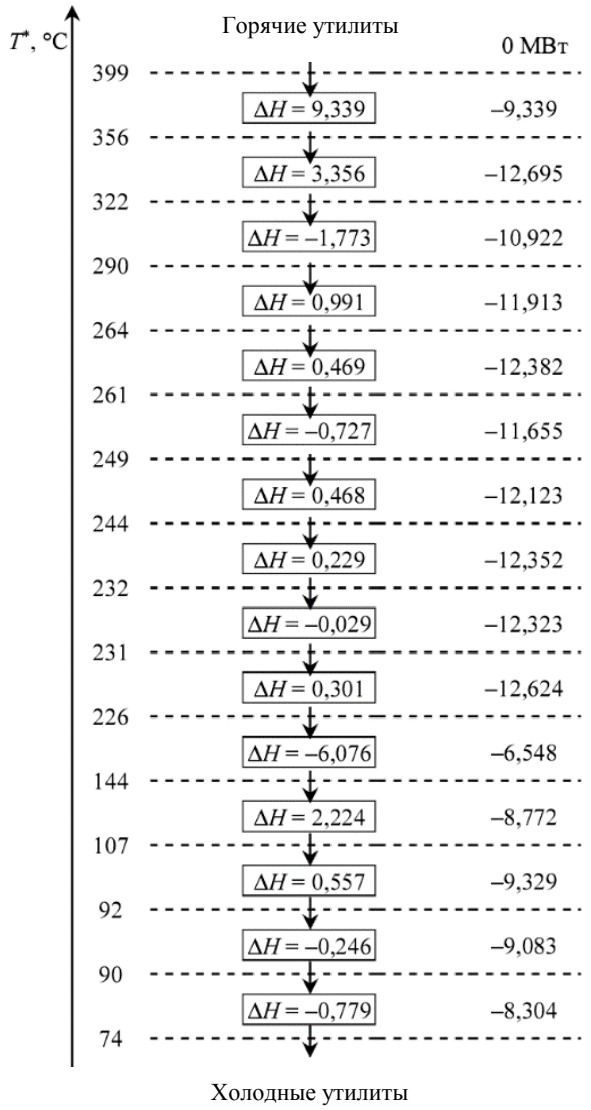


Рис.4. Каскад различных остатков теплоты при нулевых горячих утилитах

энергии, поэтому необходимо подводить тепло из внешних источников. Отрицательное ΔH_i значит, что в i-м интервале избыток тепловой энергии. Значения ΔH_i каждого температурного интервала представлены в табл.4.

Чтобы рассмотреть возможность рекуперации теплоты между температурными интервалами, в данном методе предусматривается построение каскадов тепловых потоков. Для этого необходимо создать каскад, в котором суммируется изменение энтальпии сверху вниз. При этом нужно построить два каскада. Предполагается, что первый температурный интервал не получает тепловую энергию от внешних энергоносителей, т.е. $Q_{H\min} = 0$. Построенный энтальпийный каскад при нулевых горячих утилитах представлен на рис.4.

Как видно из рис.4, первый температурный интервал имеет нетто-дефицит тепловой энергии, равный 9,339 МВт. Он передается второму температурному интервалу, который тоже имеет недостаток тепловой энергии горячих потоков – 3,356 МВт. В результате недостаток теплоты составляет величину, равную –12,695 МВт. Третий температурный интервал имеет избыток тепловой энергии горячих потоков –1,773 МВт, в результате чего недостаток теплоты уменьшается и становится равным –10,992 МВт. По такому принципу изменяется величина избытка или недостатка тепловой энергии на каждом из температурных интервалов. Но стоит задача определить с помощью построенного каскада тепловых потоков локализацию пинча, целевые энергетические значения горячих и холодных утилит. Для этого нужно действовать, основываясь на том, что тепловые потоки не могут быть отрицательными, потому что невозможно передавать энергию вверх по температурной шкале от низких температур к более высоким. Отрицательных потоков не должно быть, для этого к первому интервалу подводят значение наибольшей отрицательной величины. В данном исследовании –12,69 МВт (рис.4). Полученный каскад тепловых потоков представлен на рис.5.

Из построенного каскада можно сделать вывод, что в данном случае отсутствуют отрицательные тепловые потоки. Это говорит о возможности передачи теплоты от одного температурного интервала к другому. При этом на температурном интервале 322-356 °С тепловой поток равен нулю. Опираясь на полученные значения, можно заключить, что целевые энергетические значения для горячих и холодных утилит равны $Q_{H\min} = 12{,}6$ и $Q_{C\min} = 4{,}39$ МВт соответственно. Данные равны значениям, которые получены при построении составных кривых технологических потоков на *TH*-диаграмме (см. рис.3, *б*). Температура пинча составляет 322 °С – это и есть пинч-точка, при которой тепловой поток на границе интервалов равен нулю. Реальные значения горячих холодных потоков в точке пинча равны $T_{\text{пинч}}^{\text{гор}} = 328$ и $T_{\text{пинч}}^{\text{хол}} = 316$ °С соответственно. Значения согласуются с данными, полученными при построении составных кривых горячих и холодных потоков.

Таким образом, алгоритм теплового каскада позволяет упростить расчет целевых энергетических значений внешних энергоносителей и определить локализацию пинч-точки. Построение составных кривых технологических потоков позволяет наглядно представить взаимосвязь горячих

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427
© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

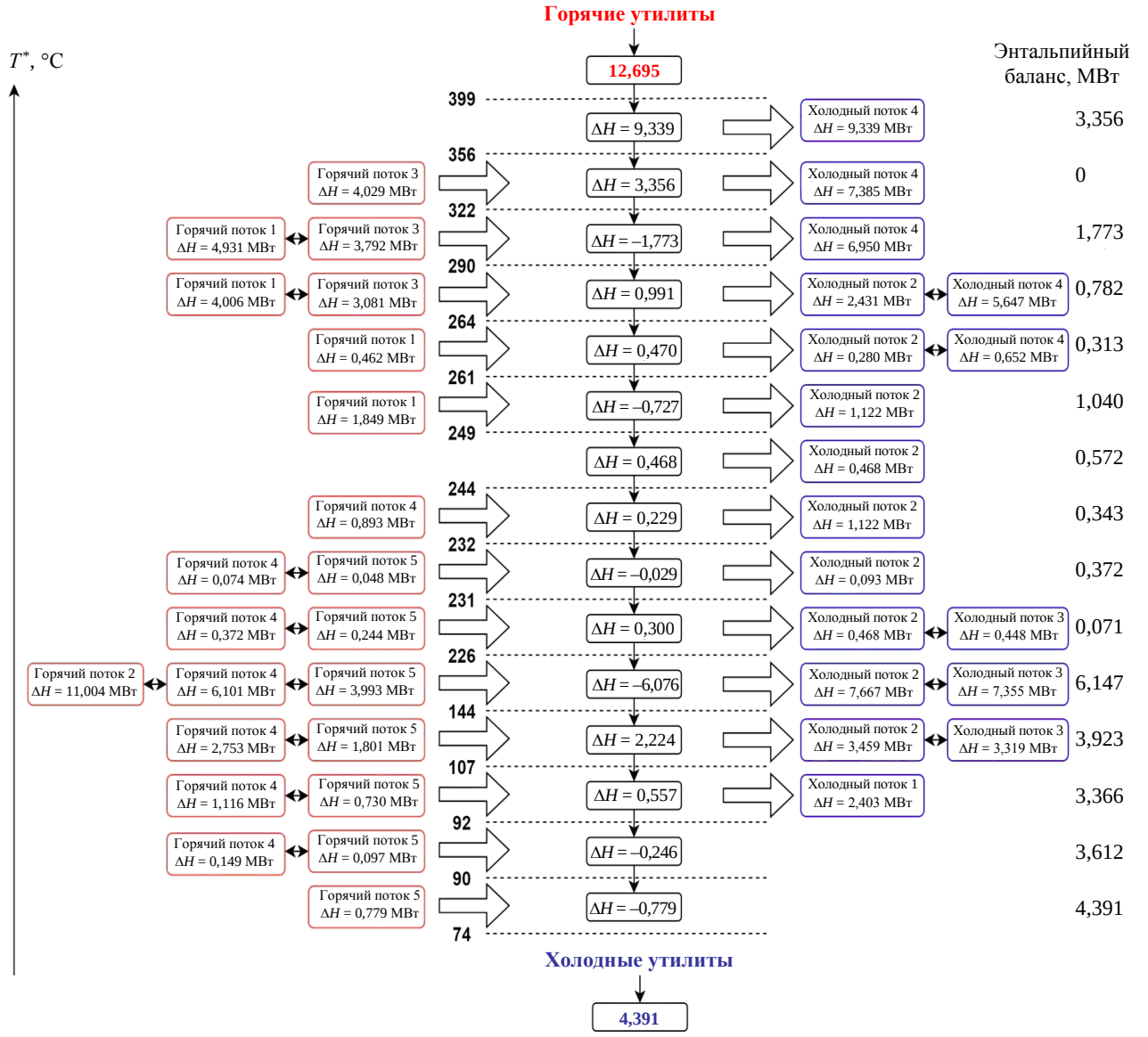


Рис.5. Тепловой каскад системы теплообмена установки перегонки мазута

$T^*_{\text{пинч}}$ = 322 °C; $T^{\text{гор}}_{\text{пинч}}$ = 328 °C для горячих потоков; $T^{\text{хол}}_{\text{пинч}}$ = 326 °C для холодных потоков

и холодных потоков теплообменной системы, т.е. это необходимо для «концептуального понимания процесса». Затем анализируется система теплообмена с помощью третьего инструмента пинч-анализа – большой составной кривой. Данный анализ позволит оптимизировать работу печи, которая является внешним горячим источником.

Большая составная кривая строится на основе теплового каскада, получаемого ранее. Она представляет собой кривую на плоскости сдвинутых температур на $\Delta T_{\text{min}}/2$ и энтальпии. На оси абсцисс проставляют значение недостатка тепловой энергии данного температурного интервала (рис.6). Коэффициент полезного действия печи до оптимизации составлял 80 %. Для анализа печи вместе с большой составной кривой строится график изменения температур дымовых газов печи, который представляет собой наклонную прямую. Первая точка – температура горения ($T_{1\text{печь}}$ = 2000 °C), вторая – температура уходящих газов.

В установке для разных теплообменников – разное значение ΔT_{min}. Для потоков системы теплообмена объекта исследования сдвиг температурных интервалов определен и равен 6 °C. Для дымовых газов печи сдвиг будет равен 25 °C. Тогда на рекуперативных теплообменниках потоков ΔT_{min} = 12 °C, а на теплообменных аппаратах, передающих тепло от дымовых газов к технологическим потокам, ΔT_{min} = 6 + 25 = 31 °C.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

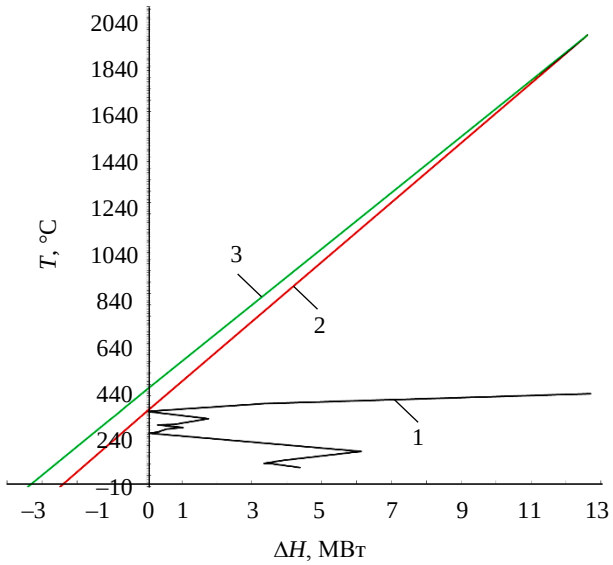


Рис.6. Большая составная кривая и профили дымовых газов печи

1 – большая составная кривая; 2 – дымовые газы № 1 CP = 0,0076 МВт/°С; 3 – дымовые газы № 2 CP = 0,008 МВт/°С

Поскольку на оси ординат представлены сдвинутые температуры на $\Delta T/2$, то профиль дымовых газов начинается на температуре 2000 – 25 = 1975 °С. Наклон прямой выше пинча ничем не ограничен. При изменении наклона кривой оптимизируется расход топлива. Для сравнения на рис.6 представлены две прямые дымовых газов, проведенные от начальной точки. График прямой № 1 проходит через пинч-точку, № 2 проведен через максимальную температуру холодных потоков. После пересечения прямой оси ординат теплота дымовых газов отводится в атмосферу, т.е. это потери печи с уходящими газами.

Из графика видно, что дымовые газы № 1 для печи эффективнее: потери теплоты с уходящими газами минимальны и равны 2,29 МВт; потоковая теплоемкость минимальная.

Реальная температура уходящих газов 322 + 25 = 347 °С, она выше кислотной точки росы, т.е. исключается возможность образования серной кислоты, которая негативно влияет на конструкционные материалы. Минимальные внешние горячие энергоносители, необходимые системе теплообмена, равны $Q_{\min}$ = 12,6 МВт. Определим оптимальную потоковую теплоемкость дымовых газов, используя формулу

$$CP_{\text{дым.газов}} = \frac{Q_{H\min}}{T_2 - T_1} = \frac{12,69}{1975 - 322} = 0,0076 \text{ МВт/°С}. \quad (3)$$

В идеальном случае энергия, отданная топливом $Q_{\text{топлива}}$, равна энергии, которую дымовые газы отдали при охлаждении от теоретической температуры горения до температуры окружающей среды. Следовательно, применяется формула

$$Q_{\text{топлива}} = CP_{\text{дым.газов}}\Delta T = 0,0076(2000 - 15) = 15 \text{ МВт}. \quad (4)$$

Эффективность печи определяется формулой

$$\eta_{\text{печи}} = \frac{Q_{H\min}}{Q_{\text{топлива}}} \cdot 100\,\% = \frac{12,69}{15} \cdot 100\,\% = 84\,\%. \quad (5)$$

Обсуждение результатов. Повышение энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия важная и сложная задача. Пинч-анализ позволяет проанализировать и оптимизировать большое количество тепловых потоков. Анализ и повышение энергоэффективности объектов исследования проводились энтальпийным пинч-анализом.

Предложены меры по оптимизации:

• Изменить конечную температуру горячего потока 2 с 176 до 150 °С, горячего потока 4 с 150 до 96 °С, горячего потока 5 с 175 до 80 °С. Таким образом, увеличивается энтальпия горячих потоков, и уменьшаются затраты на их охлаждение.

• После параметрической оптимизации определены значения максимальной рекуперации тепла, минимальные значения внешних энергоносителей. В дальнейших исследованиях будет проведена структурная оптимизация системы теплообмена пинч-анализом.

• Эффективность печи подогрева нефти можно увеличить за счет уменьшения потерь тепла с уходящими газами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427
© Е.А.Юшкова, В.А.Лебедев, 2023

В технической характеристике печи указано, что температура уходящих газов до оптимизации составляет 400 °С. Фактическая потоковая теплоемкость дымовых газов для нагрева холодных потоков 12,6 МВт:

$$CP_{\text{дым.газов}} = \frac{12,69}{1975-400} = 0,008 \text{ МВт/°С}.$$

Если принять $Q_{\text{топлива}}$ для идеального случая:

$$Q_{\text{топлива}} = 0,008(2000-15) = 15,88 \text{ МВт}.$$

Эффективность печи до оптимизации определяется формулой (5):

$$\eta_{\text{печи}} = \frac{12,69}{15,88} \cdot 100\,\% = 80\,\%.$$

Расчетный КПД при проектных условиях имеет примерно такое же значение. В данном исследовании эффективность печи увеличена на 4 %.

Заключение. Проанализирована существующая система теплообмена блока предварительного нагрева сырья с помощью энтальпийного пинч-анализа, определены пути оптимизации. Для снижения тепловой нагрузки на печи подогрева нефти введены дополнительные потоки в систему теплообмена блока подогрева нефти.

Проведен энтальпийный пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута и параметрическая оптимизация новой системы теплообмена. Построены составные кривые горячих и холодных потоков на температурно-энтальпийной плоскости. Определены минимальные потребности системы теплообмена во внешних энергоносителях.

Построен энтальпийный каскад при $\Delta T_{\min}$ = 12 °С, который подтверждает правильность определения точки пинча и значения внешних энергоносителей, определенных при параметрической оптимизации.

Проанализирована система теплообмена с помощью большой составной кривой, что позволило оптимизировать работу печи подогрева мазута. Поиск оптимальной потоковой теплоемкости продуктов сгорания печи является важным пунктом в анализе энергоэффективности печи. Определена оптимальная потоковая теплоемкость, при которой потери тепла с уходящими газами минимальны.

Предложены меры для повышения эффективности блока предварительного нагрева мазута за счет доведения рекуперации тепла до максимума, а затраты на внешние энергоносители минимизированы. С помощью уменьшения потерь тепла с уходящими газами удалось увеличить КПД печи с 80 до 84 %. Результаты исследования могут быть использованы для повышения энергоэффективности как существующих объектов нефтеперерабатывающей промышленности, так и проектируемых.

Авторы выражают благодарность Д.Д.Тупикову за помощь в сборе информации по объекту исследования и Ю.В.Борисовой за информационную поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rudko V.A., Derkunskii I.O., Gabdulkhakov R.R. et al.* Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of decantoil // Egyptian Journal of Petroleum. 2022. Vol. 31. Iss. 1. P. 33-38. DOI: 10.1016/j.ejpe.2022.02.002

2. *König W., Löbbe S., Büttner S., Schneider C.* Establishing Energy Efficiency–Drivers for Energy Efficiency in German Manufacturing Small- and Medium-Sized Enterprises // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 19. № 5144. DOI: 10.3390/en13195144

3. *Muraveinikov S.S., Sulin A.B., Baranov I.V., Nikitin A.A.* Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. Iss. 1. № 030019. DOI: 10.1063/1.5122069

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Xinxiao Chen, Paprouschi A., Elveny M. et al.* A laboratory approach to enhance oil recovery factor in a low permeable reservoir by active carbonated water injection // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 3149-3155. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.043

5. *Pyagai I., Zubkova O., Babykin R. et al.* Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum // Materials. 2022. Vol. 15. Iss. 12. № 4335. DOI: 10.3390/ma15124335

6. *Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A., Nikitin A.A. et al.* Energy and environment options of working fluid alternative for different refrigeration configurations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 826. № 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012017

7. *Kondrasheva N.K., Eremeeva A.M., Nelkenbaum K.S. et al.* Development of environmentally friendly diesel fuel // Petroleum Science and Technology. 2019. Vol. 37. Iss. 12. P. 1478-1484. DOI: 10.1080/10916466.2019.1594285

8. *Tcvetkov P.* Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO_2 Utilization // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 2. № 411. DOI: 10.3390/en14020411

9. *Kopteva A., Kalimullin L., Tcvetkov P., Soares A.* Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. № 718. DOI: 10.3390/en14030718

10. *Malarev V., Kopteva A., Koptev V., Gotsul Yu.* Improvement of Efficiency of Steam-Thermal Treatment of High-Viscous Oil Formations Using Downhole Electric Steam Generators // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 2. P. 17-24. DOI: 10.12911/22998993/130630

11. *Morenov V., Leusheva E., Buslaev G., Gudmestad O.T.* System of Comprehensive Energy-Efficient Utilization of Associated Petroleum Gas with Reduced Carbon Footprint in the Field Conditions // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 18. № 4921. DOI: 10.3390/en13184921

12. *Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91

13. *Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D. et al.* The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2664-2680. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.001

14. *Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N.* Technology for Preventing the Wax Deposit Formation in Gas-Lift Wells at Offshore Oil and Gas Fields in Vietnam // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 16. № 5016. DOI: 10.3390/en14165016

15. *Resniova E., Ponomarenko T.* Sustainable Development of the Energy Sector in a Country Deficient in Mineral Resources: The Case of the Republic of Moldova // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 6. № 3261. DOI: 10.3390/su13063261

16. *Kumar R.* A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2017. Vol. 20. Iss. 1. P. 283-292. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.08.018

17. *Sciubba E.* Exergy-based ecological indicators: From Thermo-Economics to cumulative exergy consumption to Thermo-Ecological Cost and Extended Exergy Accounting // Energy. 2019. Vol. 168. P. 462-476. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.101

18. *Aghbashlo M., Tabatabaei M., Hosseinpour S.* On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 164. P. 385-398. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.086

19. *Nami H., Mahmoudi S.M.S., Nemati A.* Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO_2 and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO_2) // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 110. P. 1315-1330. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.197

20. *Кондрашева Н.К., Рудко В.А., Назаренко М.Ю., Габдулхаков Р.Р.* Влияние параметров процесса замедленного коксования асфальта на выход и качество жидких и твердофазных продуктов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 97-104. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.97

21. *Hon Huin Chin, Varbanov P.S., Fengqi You et al.* Plastic Circular Economy Framework using Hybrid Machine Learning and Pinch Analysis // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 184. № 106387. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106387

22. *Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. и др.* Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 458 с.

23. *Ibrahim D., Jobson M., Jie Li, Guillén-Gosálbez G.* Optimal design of flexible heat-integrated crude oil distillation units using surrogate models // Chemical Engineering Research and Design. 2021. Vol. 165. P. 280-297. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.09.014

24. *Ndunagu P.U., Alaike E.E., Megueptchie T.* A Practical Approach to Energy Optimization Using Pinch Analysis: A Case Study of an Oil Refinery // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2-4 August 2021, Lagos, Nigeria. OnePetro, 2021. № SPE-207096-MS. DOI: 10.2118/207096-MS

25. *Yong Zheng.* Optimization of Chenzhuang Combined Station through Pinch Analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2442. № 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/2442/1/012036

26. *Bayomie O.S., Abdelaziz O.Y., Gadalla M.A.* Exceeding Pinch limits by process configuration of an existing modern crude oil distillation unit – A case study from refining industry // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 231. P. 1050-1058. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.041

27. *Kunru Yang, Shirun Liu, Chang He et al.* Improving energy saving of crude oil distillation units with optimal operations // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 263. № 121340. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121340

28. *Gadalla M.A.* A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration // Energy. 2015. Vol. 81. P. 159-174. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.011

29. *Alhajri I.H., Gadalla M.A., Abdelaziz O.Y., Ashour F.H.* Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 26. № 101030. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101030

30. *Dianliang Fu, Zeting Yu, Yanhua Lai.* Linking pinch analysis and shifted temperature driving force plot for analysis and retrofit of heat exchanger network // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. № 128235. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128235

31. *Mrayed S., Bin Shams M., Al-Khayyat M., Alnoaimi N.* Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit // Cleaner Engineering and Technology. 2021. Vol. 4. № 100168. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100168

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Konur O., Saatcioglu O.Y., Korkmaz S.A. et al.* Heat exchanger network design of an organic Rankine cycle integrated waste heat recovery system of a marine vessel using pinch point analysis // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44. Iss. 15. P. 12312-12328. DOI: 10.1002/er.5212

33. *Qi Zhang, Jin Xu, Xiaoyu Zhao, Yujie Wang.* Energy and exergy analyses of an integrated iron and steel making process // International Journal of Exergy. 2018. Vol. 26. № 4. P. 454-480. DOI: 10.1504/IJEX.2018.093190

34. *Goodarzvand-Chegini F., GhasemiKafrudi E.* Application of exergy analysis to improve the heat integration efficiency in a hydrocracking process // Energy & Environment. 2017. Vol. 28. Iss. 5-6. P. 564-579. DOI: 10.1177/0958305X17715767

35. *Лебедев В.А., Юшкова Е.А.* Эксергетический пинч-анализ всех элементов котельного агрегата и котельного агрегата в целом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 8. С. 92-98. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2771

***Авторы*: Е.А.Юшкова**, *канд. техн. наук, ассистент, atenoks@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8492-0159* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **В.А.Лебедев**, *канд. техн. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0003-0956-5772* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0