

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОНОГИДРАТНОГО АБСОРБЕРА В ПРОИЗВОДСТВЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ С СИСТЕМОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА АБСОРБЦИИ

К.В. Аксенчик, А.С. Андреев, Л.Н. Драчева

Константин Васильевич Аксенчик (ORCID 0000-0001-8096-0674)*, Александр Сергеевич Андреев (ORCID 0000-0002-2244-1590)

Кафедра химических технологий, Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, Череповец, Российская Федерация, 162600

E-mail: kvaksenchik@chsu.ru*, asandreev@chsu.ru

Любовь Николаевна Драчева (ORCID 0009-0006-6353-2532)

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт по минеральным удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова», Северное шоссе, 75, Череповец, Российская Федерация, 162625
E-mail: lyubadracheva@yandex.ru

В статье поставлена актуальная проблема утилизации вторичных энергетических ресурсов с низким температурным потенциалом в сернокислотных производствах, работающих по методу двойного контактирования и двойной абсорбции. Показано, что основным низкопотенциальным теплом в сернокислотном производстве является тепло нагретой серной кислоты. Разогрев кислоты происходит в процессе абсорбции в результате химического взаимодействия триоксида серы с водой с образованием серной кислоты. В классических схемах данное тепло не используется и полностью теряется в окружающую среду за счет организации охлаждения циркулирующей серной кислоты оборотной водой, которая в свою очередь охлаждается в градирне. В работе представлен краткий анализ известных в мировой практике способов утилизации тепла абсорбции, отмечены их особенности. Для оценки уровня энерготехнологичности объекта исследования в работе использован эксергетический метод. Разработана математическая модель, позволяющая количественно оценивать эксергетический баланс моногидратного абсорбера. В качестве критерия сравнения энерготехнологической эффективности процесса абсорбции по классической схеме и по схеме с утилизацией тепла абсорбции принят эксергетический коэффициент полезного действия моногидратного абсорбера. В результате моделирования установлено, что эксергетический коэффициент полезного действия при внедрении системы утилизации тепла абсорбции увеличивается, потери эксергии уменьшаются. Для более полной оценки энергетической эффективности внедрения системы утилизации тепла абсорбции в классические схемы производства серной кислоты по методу двойного контактирования и двойной абсорбции разработанная модель может быть дополнена эксергетическим балансом теплообменного устройства для утилизации тепла абсорбции, что может стать предметом дальнейших исследований.

Ключевые слова: абсорбция, триоксид серы, серная кислота, эксергия, эксергетический баланс, моногидратный абсорбер, эксергетический коэффициент полезного действия

Для цитирования:

Аксенчик К.В., Андреев А.С., Драчева Л.Н. Эксергетический анализ моногидратного абсорбера в производстве серной кислоты с системой утилизации тепла абсорбции. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 64–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.1f.

For citation:

Aksenchik K.V., Andreev A.S., Dracheva L.N. Exergetic analysis of a monohydrate absorber in the production of sulfuric acid with a heat recovery absorption system. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 5. P. 64–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.1f.

EXERGETIC ANALYSIS OF A MONOHYDRATE ABSORBER IN THE PRODUCTION OF SULFURIC ACID WITH A HEAT RECOVERY ABSORPTION SYSTEM

K.V. Aksenchik, A.S. Andreev, L.N. Dracheva

Konstantin V. Aksenchik (ORCID 0000-0001-8096-0674)*, Aleksandr S. Andreev (ORCID 0000-0002-2244-1590)
Department of Chemical Technologies, Cherepovets State University, Lunacharskogo ave., 5, Cherepovets,
162600, Russia
E-mail: asandreev@chsu.ru, kvaksenchik@chsu.ru*

Lubov' N. Dracheva (ORCID 0009-0006-6353-2532)
Joint-Stock Company «Samoilov Scientific Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides», Severnoe
Shosse, 75, Cherepovets, 162625, Russia
E-mail: lyubadracheva@yandex.ru

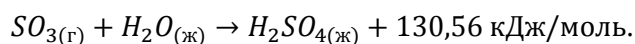
An urgent problem of utilization of secondary energy resources with low temperature potential in sulfuric acid industries operating by the method of double contacting and double absorption is presented in the article. It is shown that the main low-potential heat in sulfuric acid production is the heat of heated sulfuric acid. The acid is heated during the absorption process as a result of the chemical interaction of sulfur trioxide with water to form sulfuric acid. In classical schemes, this heat is not used and is completely lost to the environment due to the organization of cooling of circulating sulfuric acid with recycled water, which in turn is cooled in a cooling tower. A brief analysis of the methods of heat absorption utilization known in the world practice is presented in the paper, their features are noted. To assess the level of energy technology of the object of study, the exergetic method was used in the work. A mathematical model has been developed that allows quantifying the exergetic balance of a monohydrate absorber. The exergetic efficiency coefficient of a monohydrate absorber was adopted as a criterion for comparing the energy-technological efficiency of the absorption process according to the classical scheme and according to the scheme with the utilization of absorption heat. As a result of the simulation, it was found that the exergetic efficiency increases with the introduction of an absorption heat recovery system, and exergy losses decrease. For a more complete assessment of the energy efficiency of the introduction of an absorption heat recovery system into classical sulfuric acid production schemes using the double contacting and double absorption method, the developed model can be supplemented with an exergetic balance of a heat exchange device for heat absorption utilization, which may be the subject of further research.

Keywords: absorption, sulfur trioxide, sulfuric acid, exergy, exergetic balance, monohydrate absorber, exergetic efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой на сегодняшний день в производстве серной кислоты является утилизация вторичных энергетических ресурсов с низким температурным потенциалом. Использование низкопотенциального тепла требует значительных капиталовложений, однако обладает колоссальным энергетическим потенциалом, поэтому преобразование (утилизация) выбрасываемой тепловой энергии в полезную является важной практической задачей. Использование тепла абсорбции позволяет существенно повысить уровень энерготехнологической эффективности и сократить расходы на закупку электроэнергии и природного газа.

На сегодняшний день в сернокислотных производствах при абсорбции триоксида серы растворами серной кислоты выделяется большое количество тепла [1]:



При этом имеются источники низкопотенциального тепла, которое в настоящее время не используется, так как существующие технологические решения экономически не выгодны и технически сложно реализуемы в традиционных теплотехнических устройствах. Для использования низкопотенциального тепла требуется установка но-

вого абсорбционного (абсорбционная башня, сборник и др.) и насосного оборудования, котла-утилизатора и теплообменников в сушильно-абсорбционном отделении.

Известны способы утилизации тепла абсорбции триоксида серы, технически реализованные на территории нашей страны и за рубежом. В мире применяется два варианта утилизации тепла абсорбции: с подогревом теплофикационной воды и с получением насыщенного пара давлением до 1 МПа [2].

Известна технология утилизации тепла абсорбции [3], запатентованная компанией MECS и используемая в более чем в 60 системах по всему миру, под названием «Heat Recovery System», которая позволяет вырабатывать пар с давлением от 4 до 10 бар в различных условиях в зависимости от конкретных требований объекта. Технологическая схема системы утилизации тепла абсорбции по технологии MECS HRS представлена на рисунке.

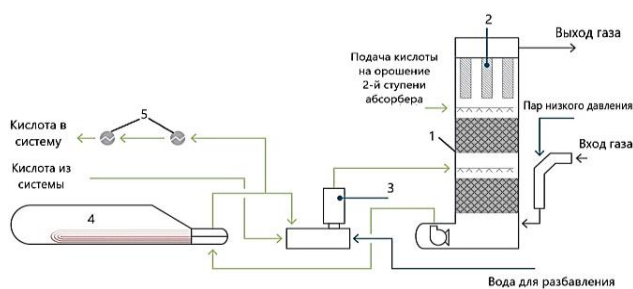


Рис. Технологическая схема системы утилизации тепла абсорбции по технологии MECS HRS: 1 – двухступенчатый абсорбер; 2 – брызготуманоуловители; 3 – разбавитель; 4 – котел-утилизатор; 5 – подогреватели

Fig. Technological scheme of the heat recovery absorption system using MECS HRS technology: 1 – two-stage absorber; 2 – mist eliminators; 3 – diluter; 4 – boiler; 5 – heaters

Низкотемпературное тепло секции суши и абсорбции большинства заводов по производству серной кислоты в Китае, например, Allgreen, рассеивается циркулирующей охлаждающей водой с помощью технологии «DWHS», в результате чего можно получить дополнительно 0,45-0,5 т пара на тонну серной кислоты, что повышает общую степень утилизации тепла на сернокислотных заводах с 60-70% до более чем 90% [4].

Система рекуперации тепла Outotec Heat Recovery System – HEROS, вырабатывает пар, используя отходящее тепло процесса кислотного охлаждения. Она спроектирована как периферийная система, которую можно вводить в эксплуатацию и выводить из нее, не влияя на производство серной кислоты на основной установке при нор-

мальной загрузке установки. Система HEROS значительно снижает общее потребление охлаждающей воды на заводе. Пар может быть использован для отопления или для производства электроэнергии на месте [5].

Известна также технология рекуперации тепла SAFEHR от компании Clark Solutions [6], которая заключается в использовании инертных жидкостей (CS), которые работают в качестве промежуточной среды между горячей кислотой и питательной водой котла. Жидкость CS – инертная полимерная жидкость, не смешивающаяся как с водой, так и с серной кислотой. Система представляет замкнутый контур, в котором горячая кислота охлаждается жидкостью CS, которая, в свою очередь, нагревает питательную воду котла. В результате работы системы может производиться горячая вода или пар, а также часть утилизированной энергии может быть использована для нагрева питательной воды котла высокого давления

Известны примеры внедрения систем утилизации тепла абсорбции с циркуляцией промежуточного теплоносителя с получением теплофикационной воды [2, 7].

Наиболее перспективным методом расчета эффективности использования потребляемой энергии является эксергетический метод термодинамического анализа. Одно из достоинств данного метода – это анализ степени совершенства процессов, протекающих внутри аппарата, по внешней характеристике – разности эксергии на входе и выходе аппарата [8]. Данный метод успешно использован авторами публикации ранее при моделировании и оценке термодинамического совершенства химического реактора [9], моделировании энерготехнологической системы совместного получения серной кислоты и конденсированного диоксида серы [10], моделировании и оценке внедрения в практику энерготехнологического топочного устройства [11].

Цель данной работы состояла в проведении эксергетического анализа производства серной кислоты с системой утилизации тепла абсорбции для оценки энергетической эффективности данной системы.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве базового объекта анализа выбрана классическая сернокислотная система большой единичной мощности по схеме ДК-ДА, в которой тепло экзотермической реакции абсорбции снимается путем охлаждения серной кислоты оборотной водой в кислотных холодильниках. Затем

подогретая вода охлаждается в градирнях путем частичного испарения. Таким образом, тепло процесса абсорбции никак не используется. Моделировалась предполагаемая ситуация, в которой система утилизации тепла абсорбции с получением насыщенного пара низкого давления была внедрена в классическую серноокислотную систему. Для того, чтобы получить пар с давлением 0,6-1,0 МПа температура серной кислоты должна быть повышена с 80-120 °С до 215-225 °С.

Технологическая схема сушильно-абсорбционного отделения с установкой утилизации тепла абсорбции, выбранная для моделирования и анализа, представлена на рисунке.

В моделируемом случае абсорбер состоит из двух ступеней. На первую (нижнюю) ступень абсорбера поступает 150 364 м³/ч технологического газа, содержащего 11,81 об. % SO₃ с температурой 180 °С, на орошение подается 600 м³/ч 99,1 %-ной серной кислоты с температурой 185 °С. Также на первую ступень подается 9443 м³/ч низкогопотенциального пара с давлением 0,15 МПа.

Вторая (верхняя) ступень абсорбера орошается 100-150 м³/ч 98,5 %-ной серной кислотой с температурой 70 °С. В ней происходит дополнительная абсорбция SO₃ и доохлаждение технологического газа с 180 °С до 75 °С.

В результате абсорбции SO₃ образуется 750 м³/ч 99,6 %-ной серной кислоты с температурой 220 °С. Погружным кислотным насосом горячая серная кислота подается в котел-утилизатор, где охлаждается до 180 °С, отдавая тепло на испарение питательной воды с получением насыщенного пара 0,78 МПа в количестве 47,2 т/ч.

Остальная часть серной кислоты поступает в разбавитель, где происходит её разбавление с повышением температуры кислоты примерно на 5 °С, после чего серная кислота направляется на орошение первой ступени абсорбера.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА МОНОГИДРАТНОГО АБСОРБЕРА

Для системного представления эксергетического баланса химического реактора (в нашем случае моногидратного абсорбера) выделена зона химического превращения с контрольной балансовой поверхностью.

При разработке математической модели использовались известные постулаты термодинамики и вытекающие из них уравнения связи между термодинамическими параметрами процесса [8, 12-20].

Баланс эксергий (в кДж/ч) рассматривает-

мого химического реактора (моногидратного абсорбера) имеет вид:

$$E_{\text{вх}} + E_x + \Delta E_{\text{абс}} = E_{\text{вых}} + D_{\text{хр}} + \Delta E_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{вх}}$ – эксергия входного потока; E_x – эксергия реагирующих исходных веществ; $\Delta E_{\text{абс}}$ – потери эксергии в процессе адиабатической абсорбции; $E_{\text{вых}}$ – эксергия выходного потока; $D_{\text{хр}}$ – потери эксергии из-за неравновесности химической реакции; $\Delta E_{\text{пот}}$ – потери эксергии в системе.

На практике при оперативных расчетах эксергии потока на входе и выходе реактора в рассмотрение вводят эксергетические функции. В результате эксергия потока представляется термической эксергией источников тепла с температурными потенциалами, равными соответственно температуре потока на входе и выходе реактора.

Термическая эксергия потока на входе и выходе реактора соответственно определяется по формулам:

$$E_{\text{вх}} = (G_1 \cdot T_1 \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot c_{pi}^0) \cdot (1 - \frac{T_0}{T_1}), \quad (2)$$

$$E_{\text{вых}} = (G_2 \cdot T_2 \cdot \sum_{j=1}^m y_j \cdot c_{pj}^0) \cdot (1 - \frac{T_0}{T_2}), \quad (3)$$

где G_1, G_2 – мольный расход входного и выходного материального потока соответственно, кмоль/ч; T_1, T_2 – температура входного и выходного материального потока соответственно, К; y_i, y_j – мольная доля i -го вещества во входном потоке и j -го вещества в выходном потоке соответственно, доли ед.; c_{pi}^0, c_{pj}^0 – истинная изобарная мольная теплоемкость i -го или j -го индивидуального вещества в потоке, кДж/(кмоль·К); T_0 – температура окружающей среды, К.

Эксергия химического реактора складывается из изменения эксергии потока веществ на его входе и выходе и термической эксергии, выделяющейся в процессе превращения веществ.

Термическая эксергия химического превращения равна теряемой химической работе. Эту работу также можно представить, как эксергию источника тепла, характеризуемого температурой химического превращения $T_{\text{хр}}$:

$$E_x = GI \cdot x_p \cdot \Delta H \cdot (1 - \frac{T_0}{T_{\text{хр}}}), \quad (4)$$

где GI – расход целевого компонента (SO₃) на входе реактора, моль/ч; x_p – равновесная степень химического превращения целевого компонента, доли ед.; ΔH – изменение энтальпии химического превращения, кДж/моль.

Потери эксергии из-за неравновесности химической реакции описываются следующим уравнением:

$$D_{xp} = GI \cdot x_p \cdot T_0 \cdot \frac{\Delta G_T}{T_{xp}}, \quad (5)$$

где ΔGT – изменение потенциала Гиббса при химическом превращении, кДж/моль.

Потери эксергии в результате процесса абсорбции можно оценить по формуле:

$$\Delta E_{abc} = GI \cdot x_p \cdot T_0 \cdot \Delta S, \quad (6)$$

где ΔS – изменение энтропии системы в процессе адиабатической абсорбции, определяемое по уравнению:

$$\Delta S = \left(\frac{c_{abc}}{G} + c_p \right) \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{g_i \cdot Q_{abc}}{\frac{T_1 + T_2}{2}}, \quad (7)$$

где c_{abc} – теплоемкость абсорбента, кДж/(моль·К); G – количество поглощенного SO_3 1 моль абсорбента, моль/моль; c_p – теплоемкость SO_3 на входе в абсорбер, кДж/(моль·К); T_1, T_2 – температура газа на входе и выходе абсорбера соответственно, К; g_i – доля абсорбированного газа, доли ед.; Q_{abc} – теплота абсорбции, кДж/моль.

Для расчета истинных теплоемкостей индивидуальных веществ использованы эмпирические уравнения регрессии:

$$c_p^0 = a + b \cdot T + \frac{c'}{T^2}, \quad (8)$$

где a, b, c' – справочные коэффициенты уравнения регрессии из справочной литературы или баз данных, например, [21].

Критерием степени термодинамического совершенства процесса абсорбции служит эксергетический КПД, показывающий отношение суммы выходящих потоков эксергии к сумме входящих потоков. Значение критерия можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{E_{вых} + D_{xp}}{E_{вх} + E_x + \Delta E_{abc}} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

Таким образом, математическая модель эксергетического баланса моногидратного абсорбера описывается системой уравнений (1)-(9).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксергетические балансы моногидратного абсорбера по классической схеме ДК-ДА и с системой утилизации тепла абсорбции смоделированы по исходным данным, представленным в табл. 1, 2.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования эксергетического баланса моногидратного абсорбера по классической схеме

Table 1. Initial data for modeling the exergetic balance of a monohydrate absorber according to the classical scheme

Параметр	Материальные потоки		
	газ	кислота	вода
G_1 , кмоль/ч	5983,35	18091,84	1500,00
G_2 , кмоль/ч	5277,42	18797,76	794,07
T_1 , К	443	333	333
T_2 , К	348	345,4	345,4
GI , моль/ч	706630		
x_p , доли ед.	0,999		
T_{xp} , К	395,5		
T_0 , К	273		
ΔG_T , кДж/моль	-81,74		

Таблица 2

Исходные данные для моделирования эксергетического баланса моногидратного абсорбера с системой утилизации тепла абсорбции

Таблица 2. Initial data for modeling the exergetic balance of a monohydrate absorber with an absorption heat recovery system

Материальный поток	G_1 , кмоль/ч	G_2 , кмоль/ч	T_1 , К	T_2 , К
газ	6963,21	6141,68	443	348
кислота 98,5%	2690,41	-	343	-
кислота 99,1%	10193,14	13705,08	458	493
вода с кислотой 98,5%	223,06	-	343	-
вода с кислотой 99,1%	504	327,08	458	493
пар	421,55	-	384	-
Параметр				
GI , моль/ч	822356			
x_p , доли ед.	0,999			
T_{xp} , К	395,5			
T_0 , К	273			
ΔG_T , кДж/моль	-81,74			

Результаты моделирования эксергетических балансов в расчете на 1 т получаемого моногидрата серной кислоты представлены в табл. 3, 4.

Эксергетические КПД моногидратного абсорбера по классической схеме ДК-ДА и с системой утилизации тепла абсорбции соответственно равны 61,1% и 79,2%. Рост температуры кислоты, орошающей абсорбер, с 60 °С до 185 °С приводит к пропорциональному росту эксергии входящего и выходящего потоков серной кислоты. Изменения, связанные с организацией материальных потоков на входе абсорбера и их энергетического потенциала, практически не затрагивают потоки термиче-

ской эксергии химического превращения и потери эксергии из-за неравновесности химической реакции, значения которых остаются постоянными.

Таким образом, эксергетический КПД увеличивается на 18,1%, в 1,6 раза уменьшаются потери эксергии в результате процесса абсорбции и их относительный вклад в общий приход эксергетического баланса, а потери эксергии в системе из-за необратимости процессов снижаются в 2,2 раза, что свидетельствует о повышении энергоэффективности абсорбера.

ВЫВОДЫ

В порядке подведения итога по работе можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. В классической технологической схеме производства серной кислоты по методу двойного контактирования и двойной абсорбции основным источником неиспользуемого низкопотенциального тепла является химическая реакция взаимодействия триоксида серы с водой с образованием серной кислоты. В результате протекания данной реакции происходит нагрев кислоты. Избыточное тепло кислоты снимается оборотной водой и выбрасывается в атмосферу.

2. Для оценки уровня энерготехнологической эффективности процесса абсорбции проведено моделирование эксергетических балансов моногидратного абсорбера по классической схеме и с системой утилизации тепла абсорбции. Для разработки модели эксергетического баланса использованы известные постулаты термодинамики и вытекающие из них уравнения связи между термодинамическими параметрами процесса.

3. В результате моделирования установлено, что эксергетический КПД при внедрении системы утилизации тепла абсорбции увеличивается на 18,1%, также в 1,6 раза уменьшаются потери эксергии в результате процесса абсорбции, а потери эксергии в системе из-за необратимости процессов снижаются в 2,2 раза, что свидетельствует о повышении энергоэффективности установки и термодинамической целесообразности внедрения системы утилизации тепла абсорбции.

4. Авторы отмечают, что для более полной оценки уровня энерготехнологической эффективности внедрения системы утилизации тепла абсорбции в классические схемы производства серной кислоты по методу ДК-ДА необходимо моделирование эксергетического баланса и оценка эксергетического КПД также и теплообменного устройства для утилизации тепла абсорбции, что может стать предметом дальнейших исследований.

Таблица 3

Эксергетический баланс моногидратного абсорбера по классической схеме ДК-ДА

Table 3. Exergetic balance of the monohydrate absorber according to the classical DC-DA scheme

Поток	Приход, МДж/т	%
$E_{вх, г}$	496,153	8,2
$E_{вх, к}$	2277,834	37,6
$E_{вх, в}$	97,996	1,6
E_x	418,175	6,9
$\Delta E_{абс}$	2760,698	45,6
<i>Всего:</i>	6050,857	100,0
Поток	Расход, МДж/т	%
$E_{вых, г}$	168,815	2,8
$E_{вых, к}$	2892,084	47,8
$E_{вых, в}$	62,756	1,0
$D_{хр}$	575,741	9,5
$\Delta E_{пот}$	2351,461	38,9
<i>Всего:</i>	6050,857	100,0

Таблица 4

Эксергетический баланс моногидратного абсорбера с системой утилизации тепла абсорбции

Table 4. Exergetic balance of a monohydrate absorber with an absorption heat recovery system

Поток	Приход, кДж/т	%
$E_{вх, г}$	496,150	9,8
$E_{вх, к1}$	343,081	6,8
$E_{вх, к2}$	2048,868	40,4
$E_{вх, в}$	14,637	0,3
$E_{вх, пар}$	19,956	0,4
E_x	418,175	8,3
$\Delta E_{абс}$	1724,624	34,0
<i>Всего:</i>	5065,492	100,0
Поток	Расход, кДж/т	%
$E_{вых, г}$	169,648	3,3
$E_{вых, к}$	3177,172	62,7
$E_{вых, в}$	87,374	1,7
$D_{хр}$	575,740	11,4
$\Delta E_{пот}$	1055,558	20,8
<i>Всего:</i>	5065,492	100,0

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аксенчик К.В.** Технология серной кислоты. Череповец: Череповец. гос. ун-т, 2017. 209 с.
2. **Игин В.В., Долгов Д.В., Грабун Е.М.** Перспективные направления развития технологии получения серной кислоты из серы методом ДК-ДА. Труды НИУИФ: к 100-летию основания института: в 2 т. Т. 1. Вологда: Древности Севера. 2019. 468 с.
3. Sulfuric Acid Heat Recovery System (HRS™) Technology. Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: <https://elessentct.com/technologies/mecs/technologiestechnologies-mecs-elessent-clean-technologies-mecs-processes/mecsr-hrstm-sulfuric-acid-heat-recovery-system-technology/>.
4. Low temperature heat recovery of sulfuric acid plant based on sulfur (DWHS). Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: <https://www.allgreen.sh.cn/en/home>.
5. Improving energy efficiency with the Outotec Heat Recovery System – HEROS. Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: [http:// https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/improving-energy-efficiency-with-the-outotec-heat-recovery-system-heros/](http://https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/improving-energy-efficiency-with-the-outotec-heat-recovery-system-heros/).
6. Safely Increasing Energy Generation. Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: <https://clarksolutions.com.br/en/estudos-tecnicos/safely-increasing-energy-generation/>.
7. **Игин В.В., Филатов Ю.В.** Серная кислота, объемы производства и потребления, пути и перспективы развития. Труды НИУИФ 1919-2014: сборник научных трудов. М.: Галлея-Принт. 2014. С. 232-245.
8. **Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б.** Эксергетический анализ работы промышленных установок. М.: МГТУ имени А.Н. Косыгина. 2000. 297 с.
9. **Андреев А.С., Аксенчик К.В.** Математическое моделирование и оценка термодинамического совершенства химического реактора. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 5. С. 114-120. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6964.
10. **Андреев А.С., Аксенчик К.В.** Постановка задачи и моделирование энерготехнологической системы совместного получения серной кислоты и конденсированного диоксида серы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 87-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6857.
11. **Андреев А.С., Аксенчик К.В.** Моделирование и оценка внедрения в практику энерготехнологического топочного устройства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 81-87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6525.
12. **Бродянский В.М.** Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия. 1973. 296 с.
13. **Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Сычев В.В.** Техническая термодинамика. М.: Изд-во МЭИ. 2016. 496 с.
14. **Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Изд-во Юрайт. 2024. 533 с. Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/557069>.
15. **Белов Г.В.** Техническая термодинамика. М.: Изд-во Юрайт. 2021. 252 с. Дата обращения 13.11.2024. Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/470454>.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Aksenichik K.V.** Sulfuric acid technology. Cherepovets: Cherepovets. Gos. Univ. 2017. 209 p. (in Russian).
2. **Igin V.V., Dolgov D.V., Grabun E.M.** Promising directions for the development of technology for the production of sulfuric acid from sulfur by the DC-DA method. Trudy NIUIF: k 100-letiyu osnovaniya instituta. V.1. Vologda: Drevnosti Severa. 2019. P. 148-154 (in Russian).
3. Sulfuric Acid Heat Recovery System (HRS™) Technology. Date of the address 13.11.2024. Access mode: <https://elessentct.com/technologies/mecs/technologiestechnologies-mecs-elessent-clean-technologies-mecs-processes/mecsr-hrstm-sulfuric-acid-heat-recovery-system-technology/>.
4. Low temperature heat recovery of sulfuric acid plant based on sulfur (DWHS). Date of the address 13.11.2024. Access mode: <https://www.allgreen.sh.cn/en/home>.
5. Improving energy efficiency with the Outotec Heat Recovery System – HEROS. Date of the address 13.11.2024. Access mode: [http:// https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/improving-energy-efficiency-with-the-outotec-heat-recovery-system--heros/](http://https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/improving-energy-efficiency-with-the-outotec-heat-recovery-system--heros/).
6. Safely Increasing Energy Generation. Date of the address 13.11.2024. Access mode: <https://clarksolutions.com.br/en/estudos-tecnicos/safely-increasing-energy-generation/>.
7. **Igin V.V., Filatov Yu.V.** Sulfuric acid, production and consumption volumes, ways and prospects of development. Trudy NIUIF 1919-2014: collection of scientific papers. M.: Galleya-Print. 2014. P. 232-245 (in Russian).
8. **Sazhin B.S., Bulekov A.P., Sazhin V.B.** Exergetic analysis of the operation of industrial installations. M.: MG TU im. A.N. Kosygina. 2000. 297 p. (in Russian).
9. **Andreev A.S., Aksenichik K.V.** Mathematical modeling and evaluation of thermodynamic perfection of a chemical reactor. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 5. P. 114-120 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6964.
10. **Andreev A.S., Aksenichik K.V.** Problem statement and modeling of an energy technology system for the joint production of sulfuric acid and condensed sulfur dioxide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 87-95 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6857.
11. **Andreev A.S., Aksenichik K.V.** Modeling and evaluation of the implementation of an energy technological furnace device into practice. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 81-87 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6525.
12. **Brodyansky V.M.** Exergetic method of thermodynamic analysis. M.: Energiya. 1973. 296 p. (in Russian).
13. **Kirillin V.A., Sheindlin A.E., Sychev V.V.** Technical thermodynamics. M.: Izd. MEI. 2016. 496 p. (in Russian).
14. **Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefanyuk E.V.** Technical thermodynamics and heat transfer. M.: Izd. Urait. 2024. 533 p. Date of the adress 13.11.2024. Access mode: <https://urait.ru/bcode/557069>. (in Russian).

16. **Цирельман Н.М.** Техническая термодинамика. СПб.: Изд-во «Лань». 2018. 352 с.
17. **Амирханов Д.Г., Амирханов Р.Д., Курбангалеев М.С., Мухамадиев А.А., Хайруллин И.Х.** Техническая термодинамика. Казань: Изд-во КНИТУ. 2017. 320 с.
18. **Тишин О.А., Харитонов В.Н., Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии. Тамбов: Изд-во ТГТУ. 2012. 92 с.
19. **Гамбург Ю.Д.** Химическая термодинамика. М.: Лаборатория знаний. 2016. 240 с.
20. **Лобанов Н.Ф.** Теоретические основы энергоресурсосбережения. Новомосковск: РХТУ, Новомосковск. ин-т (фил.). 2011. 64 с.
21. Термодинамические свойства неорганических соединений. Дата обращения 13.12.2024. Режим доступа: https://chemiday.com/ru/thermodynamic_inorganic.
15. **Belov G.V.** Technical thermodynamics. M.: Izd. Urait. 2021. 252 p. Data of the address 13.11.2024. Access mode: <https://urait.ru/bcode/470454>. (in Russian).
16. **Tsirelman N.M.** Technical thermodynamics. SPb.: Izd. «Lan'». 2018. 352 p. (in Russian).
17. **Amirkhanov D.G., Amirkhanov R.D., Kurbangaleev M.S., Mukhamadiev A.A., Khayrullin I.Kh.** Technical thermodynamics. Kazan: Izd. KNITU. 2017. 320 p. (in Russian).
18. **Tishin O.A., Haritonov V.N., Gatapova N.C., Koliuh A.N.** Theoretical foundations of energy and resource conservation in chemical technology. Tambov: Izd. TGTU. 2012. 92 p. (in Russian).
19. **Hamburg Yu.D.** Chemical thermodynamics. M.: Laboratoriya znaniy. 2016. 240 p. (in Russian).
20. **Lobanov N.F.** Theoretical foundations of energy conservation. Novomoskovsk: RHTU, Novomoskovsk. Inst. (filial). 2011. 64 p. (in Russian).
21. Thermodynamic properties of inorganic compounds. Date of the adress 13.12.2024. Access mode: https://chemiday.com/ru/thermodynamic_inorganic.

Поступила в редакцию 04.12.2024

Принята к опубликованию 24.01.2025

Received 04.12.2024

Accepted 24.01.2025