ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 628.165

Виктория Михайловна Лапшова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: lapschova.victoria@yandex.ru

Мария Владимировна Козлова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Александр Васильевич Банников
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Светлана Андреевна Банникова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Владимир Александрович Горбунов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Разработка тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки и анализ условий ее применения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Дымовые газы, покидающие различные энергетические установки, широко используются в качестве греющей среды в котлах-утилизаторах, контактных теплообменных аппаратах с активной насадкой, рекуперативных теплообменниках. Одним из перспективных направлений использования теплоты дымовых газов является их применение в процессе получения обессоленной воды. Уходящие газы в большинстве существующих опреснительных установок используются только для подогрева опресняемой воды, при этом данный процесс осуществляется в поверхностных теплообменных аппаратах, однако организация контактного теплообмена позволяет повысить эффективность процесса опреснения. Продукты сгорания содержат в себе парниковые газы, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду, но обладают при этом энергетическим потенциалом, который может быть полезно использован. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с разработкой технологий, позволяющих утилизировать теплоту уходящих газов, а также осуществлять их очистку.
Материалы и методы. При разработке методики расчета тепловой схемы опреснительной установки и оценке эффективности процесса опреснения использованы методы балансовых расчетов.
Результаты. Разработана тепловая схема газоконтактной опреснительной установки с адиабатическим увлажнением дымовых газов. Определено влияние температуры дымовых газов и солености морской воды на эффективность работы опреснительной установки.

© Лапшова В.М., Козлова М.В., Банников А.В., Банникова С.А., Горбунов В.А., 2024
Вестник ИГЭУ, 2024, вып. 6, с. 5–14.

Выводы. Использование дымовых газов в процессе получения обессоленной воды в контактных опреснителях позволяет не только получать пресную воду, пригодную для технических нужд, но и осуществлять очистку продуктов сгорания. В результате проведенного исследования установлено, что изменение температуры уходящих газов при адиабатическом увлажнении с 365 до 120 °С приводит к снижению производительности установок газоконтактного типа в 2,62 раза, а увеличение солености морской воды, поступающей в установку, с 10 до 90 г/л приводит к увеличению ее расхода на 8–10 %.

Ключевые слова: уходящие газы, обессоливание морской воды, газоконтактная опреснительная установка, адиабатическое увлажнение, метод балансовых расчетов

Victoria Mikhailovna Lapshova
Ivanovo State Power Engineering University, Student of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lapschova.victoria@yandex.ru

Maria Vladimirovna Kozlova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Alexander Vasilyevich Bannikov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Svetlana Andreevna Bannikova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Vladimir Alexandrovich Gorbynov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Development of thermal scheme of gas contact desalination plant and analysis of its application conditions

Abstract

Background. Flue gases of various power plants are widely used as a heating medium in waste heat boilers, contact heat exchangers with an active nozzle, and regenerative heat exchangers. Use of flue gases in the process of obtaining desalinated water is one of the promising directions of using heat of flue gases. The exhaust gases in most existing desalination plants are used only to heat desalinated water, in this case, this process is carried out in regenerative heat exchangers. However, contact heat exchange makes it possible to increase the efficiency of the desalination process. Combustion products contain greenhouse gases that have a negative impact on the environment, but at the same time have an energy potential that can be effectively used. In this regard, the tasks of the development of technologies that allow us to utilize heat of the exhaust gases, as well as to purify them, are relevant.
Materials and methods. Balance calculation methods have been used to develop a method for calculating the thermal scheme of a desalination plant and evaluating the effectiveness of the desalination process.
Results. A thermal scheme of a gas-contact desalination plant with adiabatic humidification of flue gases has been developed. The effect of flue gas temperature and sea water salinity on the efficiency of the installation has been determined.
Conclusions. The use of flue gases in the process of obtaining desalinated water in contact desalinators allows us not only to obtain fresh water suitable for technical needs, but also to purify combustion products. As a result of balance calculations, it has been found that a change of the temperature of exhaust gases during adiabatic humidification from 365 to 120 °C leads to a 2,62-fold decrease in the productivity of gas-contact type installations. An increase of the initial salinity of seawater entering the installation leads to an increase of its consumption by 8,5 %.

Key words: exhaust gases, seawater desalination, gas-contact desalination plant, adiabatic humidification, balance calculation method

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.005-014

Введение. Объем выбросов загрязняющих веществ от различных источников составляет более 20 000 тысяч тонн в год[1], при этом большая их часть образуется в результате сжигания органического топлива.

Продукты сгорания содержат в себе парниковые газы, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду, но обладают при этом энергетическим потенциалом, который может быть полезно использован. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с разработкой технологий, позволяющих утилизировать тепло уходящих газов, а также осуществлять их очистку.

Дымовые газы, покидающие различные энергетические установки, применяются в качестве греющей среды в различных агрегатах: котлах-утилизаторах, контактных теплообменных аппаратах с активной насадкой, рекуперативных теплообменниках [1, 2].

Схема утилизации теплоты дымовых газов и вид применяемых утилизаторов зависят от источника продуктов сгорания, возможности использования их потенциала, вида сжигаемого топлива, их состава, определяющего их агрессивность по отношению к материалу оборудования [3].

В свою очередь, утилизация тепла дымовых газов является одним из способов повышения эффективности процесса опреснения.

Анализ технических решений по использованию дымовых газов при опреснении показал, что продукты сгорания используются в основном для нагрева опресняемой воды, при этом данный процесс осуществляется в поверхностных теплообменных аппаратах [4, 5].

Использование контактного способа утилизации тепла дымовых газов в термических опреснителях позволяет не только более полно использовать их потенциал, но и осуществлять их очистку.

В качестве источника тепла в газоконтактных опреснительных установках могут использоваться уходящие газы котельных агрегатов, судовых двигателей, газотурбинных установок газоперекачивающих станций [6].

Опреснение с использованием тепла уходящих газов может быть реализовано двумя путями. Первый способ включает в себя нагрев и испарение морской воды при контакте с продуктами сгорания с последующей конденсацией из парогазовой смеси в поверхностном или смешивающем конденсаторе. Второй способ заключается в нагреве воды уходящими газами и сбросе ее в испаритель мгновенного вскипания. При реализации первого способа возможно не только получение пресной воды, но и очистка дымовых газов перед сбросом их в окружающую среду.

Тепловая схема газоконтактной опреснительной установки. Настоящее исследование направлено на разработку тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки, в которой осуществляется утилизация теплоты дымовых газов.

Так как получение пресной воды в таких установках включает в себя 2 основных процесса – увлажнение и осушку дымовых газов, то одним из параметров, влияющих на эффективность работы газоконтактной опреснительной установки, является температура воды, с которой контактируют дымовые газы.

Возможны следующие варианты организации контакта дымовых газов и воды (рис. 1):

– взаимодействие продуктов сгорания с водой, температура которой ниже температуры точки росы (процесс О-1).

– контакт уходящих газов с водой, температура которой равна температуре точки росы (процесс О-2);

– взаимодействие дымовых газов и воды, температура которой соответствует температуре продуктов сгорания по мокрому термометру (процесс О-3);

– контакт продуктов сгорания и воды, температура которой выше температуры дымовых газов по мокрому термометру (процесс О-4).

При взаимодействии дымовых газов и воды, температура которой ниже температуры точки росы, будет происходить осушка дымовых газов, при этом вода подогреется, однако образовавшийся концентрат будет содержать в себе различные кислоты, что сделает его неприменимым для использования.

При контакте уходящих газов и воды, температура которой соответствует температуре точке росы продуктов сгорания, выпадения конденсата не произойдет. В результате контакта воды и газов морская вода подогреется, однако будет содержать в себе различные кислоты и соли.

[1] Охрана окружающей среды в России. 2022: статистический сборник / Росстат. – М., 2022. – 115 с.

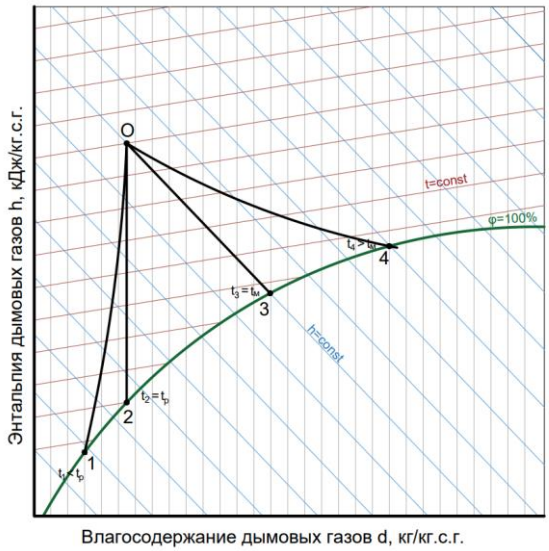


Рис. 1. Процессы взаимодействия дымовых газов и воды, построенные в h-d-диаграмме

При адиабатическом увлажнении дымовых газов (процесс О-3) влагосодержание продуктов сгорания возрастет, при этом их температура понижается. В таком случае осуществляется увлажнение газов, так как они уносят с собой пресную воду. Данные процессы протекают без поступления тепла извне.

Для организации процесса О-4 необходимо подводить тепловую энергию, однако в таком случае с дымовыми газами может быть унесено больше влаги.

Таким образом, увлажнение дымовых газов возможно осуществить путем их взаимодействия с водой, температура которой равна или выше температуры продуктов сгорания по мокрому термометру, однако при последнем варианте усложняется конструкция опреснителя. В этой связи при разработке тепловой схемы было рассмотрено адиабатное увлажнение дымовых газов.

Процесс взаимодействия дымовых газов и морской воды может быть организован разными способами. Контактные аппараты могут быть насадочными, пленочными и форсуночными. Форсуночные аппараты обеспечивают равномерное и мелкодисперсное распыление морской воды, что увеличивает площадь контакта воды и дымовых газов. Это способствует эффективному насыщению газов влагой.

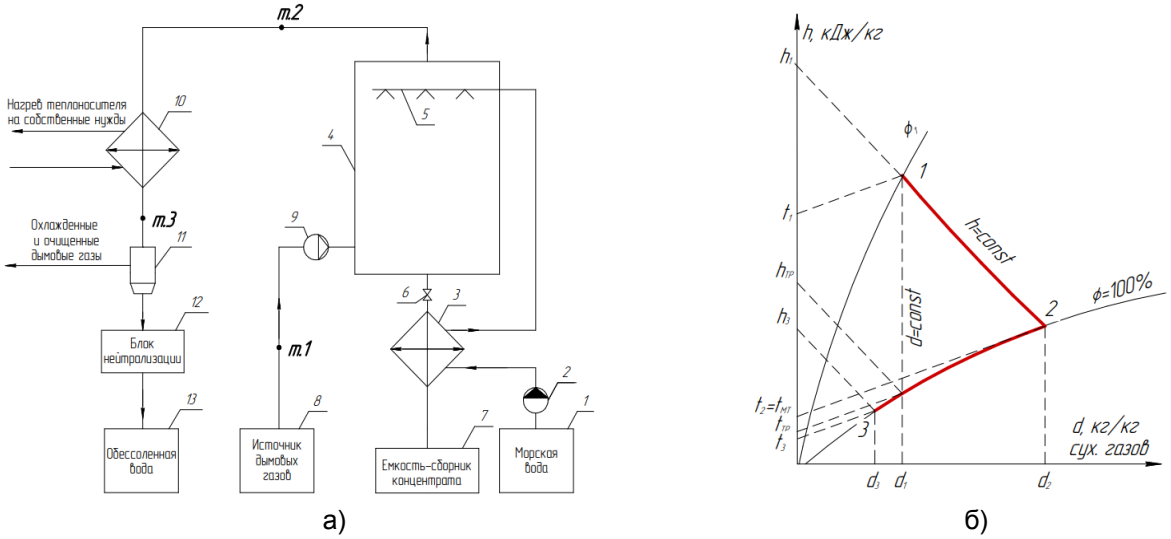
За счет интенсивного распыления и быстрого контакта воды с дымовыми газами время пребывания морской воды и увлажненных дымовых газов в аппарате минимально. Это сокращает время, в течение которого могут происходить химические реакции, вызывающие коррозию и образование отложений. Таким образом, в форсуночных аппаратах износ идет менее интенсивно, тем самым продлевается срок службы оборудования. В этой связи рассмотрим форсуночную контактную колонну.

Принципиальная схема тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки представлена на рис. 2,а.

Процесс получения пресной воды в оригинальной тепловой схеме осуществляется следующим образом. Морская вода, предварительно нагретая в теплообменнике концентрата *3* насосом *2*, подается в верхнюю часть контактной колонны *4* и разбрызгивается в виде мелких капель. Дымовые газы после энергетической установки через газодувку *9* поступают в нижнюю часть контактной колонны *4*, создавая противоточное движение между дымовыми газами и каплями морской воды. В ходе тепломассообменных процессов дымовые газы насыщаются влагой, охлаждаются, очищаются и покидают контактную колонну в верхней ее части. В ходе взаимодействия морской воды и дымовых газов происходят химические реакции, в результате которых дымовые газы очищаются от сажи, диоксида углерода и диоксида серы. Все эти компоненты остаются в концентрате, который также насыщается солью из поступающей морской воды. Концентрат подогревает морскую воду, а затем отправляется в емкость-сборник *7* для дальнейшего хранения и утилизации. Увлажненные дымовые газы затем направляются в теплообменный аппарат *10*, где происходит их охлаждение и осушка, после чего в сепараторе *11* происходит разделение на охлажденные и очищенные дымовые газы, выбрасываемые в атмосферу, и обессоленную морскую воду, которая подается в блок нейтрализации *13* для восстановления нейтральной pH среды. Далее обессоленная вода используется по назначению.

Для исключения явления капельного уноса с дымовыми газами в верхней части контактной колонны устанавливается каплеотбойник.

Контактная колонна, в которой происходит насыщение дымовых газов влагой, должна быть изготовлена из материалов, устойчивых к коррозии и агрессивной среде, возникающей в результате взаимодействия морской воды и дымовых газов.



а) б)

Рис. 2. Тепловая схема (а) и цикл работы газоконтактной опреснительной установки в h-d-диаграмме (б): 1 – емкость исходной опресняемой воды; 2 – насос; 3 – теплообменник концентрата; 4 – контактная колонна; 5 – система диспергирования опресняемой воды (форсунки); 6 – релугилирующий клапан; 7 – емкость-сборник концентрата; 8 – источник продуктов сгорания; 9 – газодувка; 10 – конденсатор-осушитель дымовых газов; 11 – сепаратор; 12 – блок нейтрализации; 13 – емкость-сборник обессоленной воды; 1-2 – адиабатное увлажнение дымовых газов; 2-3 – охлаждение и осушка дымовых газов

Тепловая схема, представленная на рис. 2,а, работает в соответствии с разомкнутым циклом, приведенным на рис. 2,б, в соответствии с которым процесс 1-2 (увлажнение) протекает в контактной колонне, процесс 2-3 (осушка) – в поверхностном охладителе.

Исследование установок, принцип работы которых основан на контактном взаимодействии дымовых газов и морской воды, показало, что полученный в результате их работы дистиллят может быть использован для технических нужд [7]. Характеристики получаемой пресной воды приведены в таблице.

Результаты санитарно-гигиенического исследований полученной обессоленной воды

№ п/п	Показатель	Результаты измерений	Норматив	Единицы измерений
1	Цветность	14	20	град.
2	Водородный показатель	6,5	6–9	ед. pH
3	Запах	0	2	балл
4	Хлориды	103	250	мг/дм³
5	Жесткость общая	3,55	7	мг-экв/дм³

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что полученный в результате работы установки дистиллят соответствует требованиям, предъявляемым к дистиллированной воде.

В результате применения контактного способа взаимодействия морской воды и дымовых газов при функционировании разработанной тепловой схемы достигаются следующие эффекты:

1) *снижение выбросов CO_2.* При взаимодействии дымовых газов с морской водой часть углекислого газа растворяется в воде, что способствует снижению его концентрации в дымовых газах. Диоксид углерода вместе с образовавшимся концентратом покидает опреснительную установку;

2) *удаление SO_2 и других загрязнителей*. Морская вода эффективно улавливает диоксид серы (SO_2) и другие вредные примеси, такие как сажа и твердые частицы. Удаление этих веществ из дымовых газов снижает их выбросы в атмосферу и уменьшает кислотные осадки, способствуя улучшению качества воздуха;

3) *охлаждение дымовых газов*. Взаимодействие дымовых газов с морской водой также способствует их охлаждению. Снижение температуры выбросов позволяет снизить локальные тепловые выбросы и их воздействие на окружающую среду.

Методы исследования. Для исследования влияния различных параметров на эффективность работы опреснительной

установки были использованы методы балансовых расчетов [8, 9].

Для расчета параметров работы установки в характерных точках схемы необходимо обладать сведениями о влагосодержании и энтальпии дымовых газов после энергетической установки, после контакта с распыляемой водой, а также после осушки. Температура уходящих газов после энергетической установки считается известной. В ходе расчета термодинамических параметров дымовых газов используется модель идеального газа, основанная на уравнении состояния Менделеева-Клапейрона [10].

Влагосодержание дымовых газов после энергетической установки рассчитывается по формуле

$$d_1 = \frac{G_{H_2O}}{G_{пс} - G_{H_2O}}, \quad (1)$$

где G_{H2O} – массовый расход водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, кг/с; $G_{пс}$ – расход продуктов сгорания, кг/с.

При этом расход водяных паров может быть рассчитан на основе теории горения.

Энтальпия дымовых газов во всех характерных точках схемы определяется в соответствии с выражением

$$h_i = h_{пс_i}\left(1 - \frac{d_i}{d_i + 1}\right) + h_{в.п.i}\,\frac{d_i}{d_i + 1}, \quad (2)$$

где $h_{пс i}$ – энтальпия продуктов сгорания при температуре и давлении в i-й точке схемы, кДж/кг; $h_{в.п.i}$ – энтальпия водяных паров при температуре и давлении в i-й точке схемы, кДж/кг; d_i – влагосодержание продуктов сгорания в i-й точке схемы, кг/кг с.г.

Энтальпия продуктов сгорания в характерных точках схемы определяется с учетом состава уходящих газов.

Влагосодержание в точках 2 и 3 определяется согласно выражению

$$d = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{сух.дг}}\,\frac{p_н\,\varphi}{B - p_н\,\varphi}, \quad (3)$$

где μ_{H_2O} – молярная масса воды, кг/кмоль; $\mu_{сух.дг}$ – молярная масса сухих дымовых газов, кг/кмоль; $p_н$ – давление насыщения водяных паров, Па; φ – относительная влажность, в долях; B – общее давление смеси, Па.

Молярная масса сухой части уходящих газов рассчитывается с учетом частичной очистки продуктов сгорания от CO_2 и SO_2.

Положение точки 2 зависит от исходного состояния продуктов сгорания, так как процесс 1-2 является адиабатическим, то энтальпия продуктов сгорания в точке 1 соответствует энтальпии в точке 2. Температура продуктов сгорания в данной точке соответствует температуре мокрого термометра дымовых газов. При этом влажность дымовых газов находится в диапазоне от 95 до 97 %.

В качестве исходных данных в расчетах используются: расход продуктов сгорания; соленость и температура исходной опресняемой воды; соленость концентрата; соленость пресной воды.

Для определения производительности установки составляются уравнения теплового и материального балансов контактной колонны. При этом в качестве допущения не учитываются тепловые эффекты от химических реакций, протекающих между продуктами сгорания и морской водой.

Уравнение материального баланса для контактной камеры опреснительной установки записывается следующим образом:

$$G_{дг} + G_м = W' + G_к, \quad (4)$$

где $G_{дг}$ – расход дымовых газов, покидающих энергетическую установку, кг/с; $G_м$ – расход морской воды, поступающей на опреснение, кг/с; W' – расход увлажненных очищенных дымовых газов после контакта с морской водой, кг/с; $G_к$ – расход концентрата, кг/с.

Уравнение солевого баланса газоконтактной опреснительной установки имеет вид

$$G_м S_м = G_o S' + G_к S_к, \quad (5)$$

где $S_м$ – соленость исходной морской воды, ‰; S' – соленость обессоленной воды, ‰; $S_к$ – соленость концентрата, ‰; G_o – расход обессоленной воды, кг/с;

Уравнение теплового баланса колонны газоконтактной опреснительной установки с адиабатным увлажнением дымовых газов имеет вид:

$$B_{пс} h_1 + G_м c_м t = G_к c_к t_к + W' h_2, \quad (6)$$

где $B_{пс}$ – расход дымовых газов, поступающих в контактную колонну, кг/с; h_1 – энтальпия дымовых газов на входе в контактную колонну, кДж/кг; $c_м$ – средняя массовая теплоемкость морской воды, кДж/(кг·К); t – температура морской воды на входе в контактную колонну, °С; $c_к$ – средняя массовая теплоемкость концентрата, кДж/(кг·К); $t_к$ – температура концентрата, °С; h_2 – энтальпия

дымовых газов на выходе из контактной колонны, кДж/кг.

Морская вода характеризуется сложными физико-химическими свойствами, что объясняется многообразием ее состава. Вещества, содержащиеся в составе морской воды, классифицируются на растворенные в ней соли, газы, электролиты, неэлектролиты и органические соединения, а также находящиеся в форме самостоятельной фазы твердые частицы и газовые пузыри. Следует учитывать, что содержание веществ в воде непостоянно и зависит от климатических условий, температурных факторов, глубины отбора воды.

Физические свойства морской воды, кинетика протекающих в ней химических процессов определяются свойствами воды как растворителя и составом растворенных в ней веществ.

В основном растворенные в воде элементы обычно находятся не в чистом виде, а в виде соединений, например:

1) хлоридов ($NaCl$, $MgCl_2$, KCl);

2) сульфатов ($MgSO_4$, $CaSO_4$, K_2SO_4);

3) карбонатов ($CaCO_3$).

При взаимодействии морской воды и дымовых газов могут происходить химические реакции, которые зависят от состава дымовых газов и химического состава морской воды. Основные компоненты дымовых газов включают углекислый газ (CO_2), оксиды серы (SO_2 и SO_3), оксиды азота (NO_x) и др. Морская вода содержит соли, главным образом хлорид натрия ($NaCl$).

Рассмотрим основные реакции, которые происходят в контактной колонне опреснительной установки.

1. Растворение углекислого газа

$$CO_2(г)+H_2O(ж) \rightarrow H_2CO_3(водн). \quad (7)$$

Далее угольная кислота может диссоциировать:

$$H_2CO_3(водн) \leftrightarrow H^+(водн) + HCO_3^-(водн); \quad (8)$$

$$HCO_3^-(водн) \leftrightarrow H^+(водн) + CO_3^{2-}(водн). \quad (9)$$

2. Реакции с оксидами серы:

$$SO_2(г)+H_2O(ж) \rightarrow H_2SO_3(водн). \quad (10)$$

Сернистая кислота может диссоциировать:

$$H_2SO_3(водн) \leftrightarrow H^+(водн) + HSO_3^-(водн); \quad (11)$$

$$HSO_3^-(водн) \leftrightarrow H^+(водн) + SO_3^{2-}(водн). \quad (12)$$

Также возможно окисление сернистой кислоты до серной кислоты:

$$2SO_2(г)+O_2(г)+2H_2O(ж) \rightarrow 2H_2SO_4(водн). \quad (13)$$

3. Образование осадков.

Некоторые реакции могут приводить к образованию нерастворимых солей, которые выпадают в осадок. Например, сульфат ионы могут реагировать с кальцием, образуя сульфат кальция:

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow CaSO_4. \quad (14)$$

Карбонаты могут реагировать с кальцием и магнием, образуя карбонат кальция и карбонат магния:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3; \quad (15)$$

$$Mg^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow MgCO_3; \quad (16)$$

4. Ионные обменные реакции.

Сульфат магния в воде может взаимодействовать с хлоридом кальция, образуя осадок сульфата кальция:

$$MgSO_4 + CaCl_2 \rightarrow CaSO_4 + MgCl_2. \quad (17)$$

Таким образом, оксиды углерода и серы из газообразного состояния преобразуются в новые соединения и в жидком или твердом виде находятся в концентрате, тем самым снижается негативное воздействие на атмосферу.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при работе газоконтактной опреснительной установки будет осуществляться очистка дымовых газов, что будет способствовать снижению углеродного следа, в том числе, за счет использования вторичных энергетических ресурсов.

Результаты исследования. В результате теплового расчета газоконтактной опреснительной установки был получен ряд зависимостей, отражающих влияние температуры уходящих газов и солености опресняемой воды на производительность установки.

Основным параметрами, влияющими на производительность установки, являются температура и влагосодержание уходящих газов, поскольку предельно допустимое количество влаги, уносимое дымовыми газами при контакте с опресняемой водой, определяется температурой мокрого термометра данных продуктов сгорания. При этом чем выше температура уходящих газов, тем больше влаги они смогут удерживать. Зависимости влагосодержания и температуры по мокрому термометру от температуры уходящих газов приведены на рис. 3.

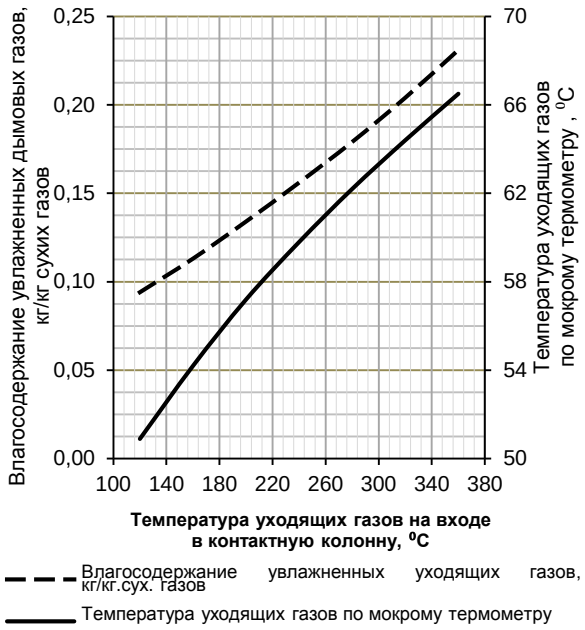


Рис. 3. Зависимость влагосодержания и температуры уходящих газов по мокрому термометру от температуры уходящих газов на входе в контактную колонну

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что зависимость влагосодержания и температуры дымовых газов по мокрому термометру носит нелинейный характер, при изменении температуры уходящих газов на входе в контактную колонну с 365 до 120 °С температура уходящих газов по мокрому термометру меняется от 66,5 до 50,9 °С, что соответствует влагосодержанию 0,231 и 0,094 кг/кг с.г. соответственно.

Зависимость производительности установки от расхода уходящих газов и их температуры приведена на рис. 4.

Представленные на рис. 4 зависимости получены при заданном влагосодержании поступающих в установку дымовых газов, равном 0,062 кг/кг с.г. Влагосодержание рассматриваемых дымовых газов, полученных в результате сжигания малосернистого мазута, определено в соответствии с выражением (1).

Необходимо отметить, что температура осушки принята равной 40 °С, поскольку при более низких температурах влагосодержание уходящих газов меняется незначительно. Кроме того, при выполнении расчетов соленость опресняемой воды принята равной 30 ‰, соленость получаемого дистиллята – 1 г/л.

Анализ представленной на рис. 4 зависимости показывает, что при температуре уходящих газов 365 °С (в расчетах принята температура продуктов сгорания после судового двигателя, работающего на малосернистом мазуте) расход получаемой обессоленной воды и расход дымовых газов соотносятся как 1:5. При понижении температуры уходящих газов на входе в установку до 120 °С расход дымовых газов для получения того же количества пресной воды возрастает при прочих равных условиях в 2,62 раза.

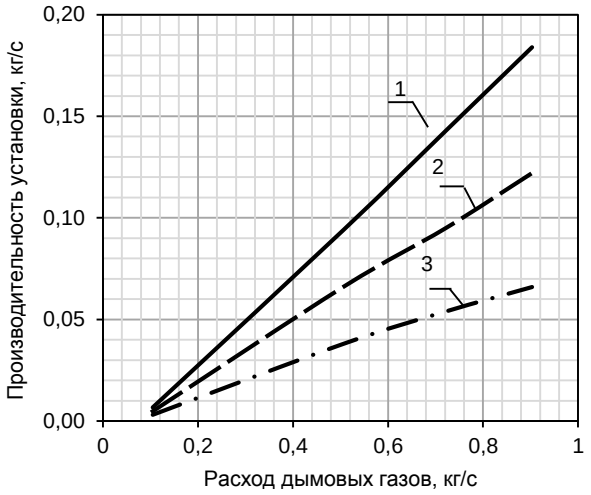


Рис. 4. Зависимость производительности установки от температуры и расхода уходящих газов: 1 – температура уходящих газов 365 °С; 2 – температура уходящих газов 260 °С; 3 – температура уходящих газов 120 °С

Другим фактором, оказывающим влияние на эффективность работы установки, является соленость опресняемой воды. При ее возрастании снижается производительность установки. Для получения одного и того же количества пресной воды в таком случае в установку должно поступать большее количество морской воды, что приводит к возрастанию затрат энергии на ее перемещение. На рис. 5 представлена зависимость требуемого расхода морской воды, поступающей в установку для получения одного и того же количества пресной воды при расходе дымовых газов 1 кг/с, от солености и температуры уходящих газов.

Анализ данных зависимостей показывает, что увеличение солености от 10 до 90 ‰ приводит к росту расхода морской воды при температуре уходящих газов 365 °С на 8,5 %. Необходимо отметить, что при меньших температурах уходящих газов рост данной величины находится ориентировочно на том же уровне.

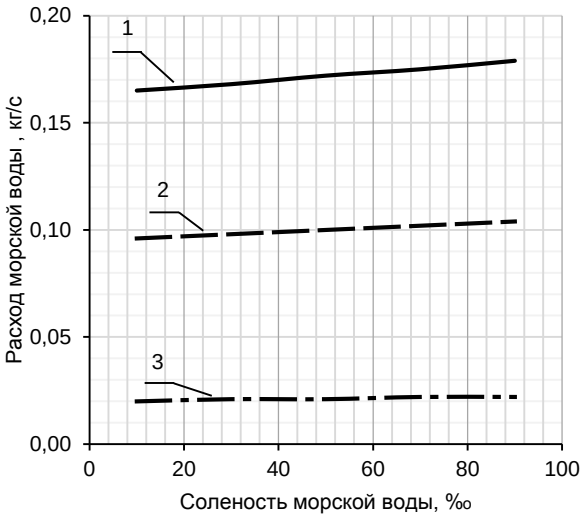


Рис. 5. Зависимость расхода морской воды от солености и температуры уходящих газов: 1 – температура уходящих газов 365 °С; 2 – температура уходящих газов 260 °С; 3 – температура уходящих газов 120 °С

В ходе работы контактных опреснителей образуется концентрат, который содержит в себе различные соли и кислоты. Обращение с этим концентратом требует особого внимания. Одним из возможных вариантов его утилизации является его захоронение, а также использование для получения различных солей, производства хлора и натрия.

Выводы. Таким образом, применение разработанной тепловой схемы позволяет получать обессоленную воду, которая может использоваться для технических нужд. Кроме этого, в процессе опреснения при работе предлагаемой установки осуществляется очистка уходящих газов, что позволяет снизить их негативное влияние на окружающую среду.

Предложенное техническое решение может использоваться на судах, котельных, и ТЭЦ, расположенных на прибрежных территориях и функционирующих на органическом топливе.

В результате выполненных балансовых расчетов установлено, что снижение температуры уходящих газов с 365 до 120 °С приводит к уменьшению производительности опреснителя в 2,62 раза при работе установки на дымовых газах, полученных в результате сжигания малосернистого мазута.

При увеличении солености исходной воды требуемый расход поступающей в установку морской воды возрастает на 8–10 % при изменении солености с 10 до 90 г/л.

Суммарное энергопотребление установки состоит из затрат энергии на привод нагнетательных устройств (газодувок и насосов).

Список литературы

1. **Кальметова А.Г., Кулешов О.Ю.** Энергоэффективные проектные решения котельных с глубокой утилизацией теплоты дымовых газов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – № 13(70). – С. 127–129.

2. **Хамидуллин Р.Н.** Рекуперация тепла дымовых газов контактным теплообменом // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 88–90.

3. **Чехранов С.В., Симашов Р.Р., Ханькович И.Н.** Развитие теплоутилизационных технологий в судовой энергетике // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3-2(37). – С. 107–111.

4. **Алиева О.О.** Технология утилизационного опреснения морской воды // Вестник науки и образования. – 2022. – № 1-1(121). – С. 36–41.

5. **Слесаренко В.Н.** Дистилляционные опреснительные установки. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.

6. **Наими А., Рассохин В.А.** Эффективность газотурбинного цикла с впрыском пара и анализ его взаимодействия с опреснительной установкой // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 2(55). – С. 58–68.

7. **Ковалев О.П.** Тепломассообмен в контактных пленочных аппаратах судовой утилизационной опреснительной установки на дымовых газах (разработка методики теплового расчета): дис. … канд. техн. наук. – Владивосток, 1984. – 171 с.

8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666115 Российская Федерация. Расчет тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки / М.В. Козлова, А.В. Банников, В.М. Лапшова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – № 2024664340: заявл. 24.06.2024; опубл. 10.07.2024.

9. **Козлова М.В., Банников А.В., Банникова С.А.** Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 5. – С. 21–30.

10. **Козлова М.В., Соколов П.С., Банников А.В.** Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 4. – С. 5–13.

References

1. Kal'metova, A.G., Kuleshov, O.Yu. Energoeffektivnye proektnye resheniya kotel'nykh s glubokoy utilizatsiey teploty dymovykh gazov [Energy-efficient design solutions for boiler houses with deep utilization of flue gas heat]. *Matematicheskie metody v*

tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT, 2014, no. 13(70), pp. 127–129.

2. Khamidullin, R.N. Rekuperatsiya tepla dymovykh gazov kontaktnym teploobmenom [Heat recovery flue gases by contact heat exchange]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 88–90.

3. Chekhranov, S.V., Simashov, R.R., Khan'kovich, I.N. Razvitie teploutilizatsionnykh tekhnologiy v sudovoy energetike [Development of thermal insulation technologies in marine power engineering]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 3-2(37), pp. 107–111.

4. Alieva, O.O. Tekhnologiya utilizatsionnogo opresneniya morskoy vody [Technology of utilization of seawater desalination]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2022, no. 1-1(121), pp. 36–41.

5. Slesarenko, V.N. *Distillyatsionnye opresnitel'nye ustanovki* [Distillation desalination plants]. Moscow: Energiya, 1980. 248 p.

6. Naimi, A., Rassokhin, V.A. Effektivnost' gazoturbinnogo tsikla s vpryskom para i analiz ego vzaimodeystviya s opresnitel'noy ustanovkoy [Efficiency of a gas turbine cycle with steam injection and analysis of its interaction with a desalination plant]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2(55), pp. 58–68.

7. Kovalev, O.P. *Teplomassoobmen v kontaktnykh plenochnykh apparatakh sudovoy utilizatsionnoy opresnitel'noy ustanovki na dymovykh gazakh (razrabotka metodiki teplovogo rascheta)*. Diss. … kand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in contact film apparatuses of a shipboard waste gas desalination plant (development of a thermal calculation methodology). Cand. tech. sci. diss.]. Vladivostock, 1984. 171 p.

8. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Lapshova, V.M. *Raschet teplovoy skhemy gazokontaktnoy opresnitel'noy ustanovki* [Calculation of the thermal circuit of a gas-contact desalination plant]. Certificate RF of state registration of the computer program, no. 2024666115, 2024.

9. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Bannikova, S.A. Issledovanie raboty termicheskoy opresnitel'noy ustanovki s kontaktnym isparitelem i kompressiey parovozdushnoy smesi [Investigation of the operation of a thermal desalination plant with a contact evaporator and compression of a steam-air mixture]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 5, pp. 21–30.

10. Kozlova, M.V., Sokolov, P.S., Bannikov, A.V. Issledovanie vliyaniya real'nykh fizicheskikh svoystv vlazhnogo vozdukha na tochnost' rascheta teplomassoobmennykh protsessov [Investigation of the influence of real physical properties of humid air on the accuracy of calculation of heat and mass transfer processes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 4, pp. 5–13.