

УДК 628.165

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

Владимир Владимирович Смирнов

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

Роман Дмитриевич Семяшкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

Перспективы использования низкопотенциальных источников энергии в системах орошения на базе газоконтактных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Низкопотенциальные вторичные энергетические ресурсы, к которым относятся жидкости с температурой менее 150 °C и газы с температурой ниже 300 °C, составляют большую часть всех видов тепловых вторичных энергетических ресурсов. Использование вторичных энергетических ресурсов в различных процессах позволяет снизить потребление органического топлива и, как следствие, количество выбросов, поступающих в атмосферу и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Поскольку в термических орошительных установках около 40–50 % от стоимости обессоленной воды составляют затраты на тепловую энергию, то для ее снижения целесообразно использование низкопотенциальных источников энергии. Актуальным является использование низкопотенциальных источников энергии в газоконтактных орошительных установках, поскольку процесс испарения воды в них может осуществляться при температурах ниже температуры насыщения. Кроме этого, в установках данного типа возможна непосредственная утилизация газообразных вторичных энергетических ресурсов, например продуктов сгорания, использование которых позволяет не только получать пресную воду, пригодную для технических нужд, но и осуществлять очистку дымовых газов. В зависимости от требований, предъявляемых к орошаемой воде, а также параметров и вида теплоносителей может быть предложено несколько вариантов утилизации вторичных энергетических ресурсов.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием метода балансовых расчетов процессов теплообмена в технологических энергоустановках.

Результаты. В зависимости от вида и параметров низкопотенциальных источников энергии предложено несколько схем утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов в системах обессоливания, основанных на газоконтактных орошительных установках. Выполнена оценка эффективности интеграции трансформаторов теплоты в тепловые схемы газоконтактных орошительных установок для утилизации вторичных энергетических ресурсов с температурой менее 80 °C для различных рабочих тел: R600, R600a, R1234ze(Z), R142b, R717, R245fa, R134a. Для наиболее эффективных рабочих тел построены номограммы, позволяющие в зависимости от температуры вторичных энергетических ресурсов определить затраты энергии на привод компрессора, а также количество энергии, отбираемое от вторичных энергетических ресурсов. Определено требуемое количество дымовых газов для получения 1 м³ пресной воды в паровоздушных орошительных установках в зависимости от параметров дымовых газов и условий работы.

Выводы. Установлено, что при утилизации продуктов сгорания в поверхностных теплообменниках паровоздушных орошителей для получения 1 м³ пресной воды требуется от 1,96 до 18,47 тысяч килограмм уходящих газов в зависимости от их параметров и режима работы установки; при утилизации вторичных энергетических ресурсов с использованием трансформаторов теплоты наиболее эффективным и экологичным является использование рабочих агентов R1234ze(Z), R245fa и аммиака; утилизация низкопотенциальных источников энергии с использованием трансформаторов теплоты при температурах теплоносителя менее 24 °C является нецелесообразной.

Ключевые слова: уходящие газы, низкопотенциальные источники энергии, вторичные энергетические ресурсы, орошительная установка, трансформаторы теплоты

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

Vladimir Vladimirovich Smirnov

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

Roman Dmitrievich Semyashkin

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

Prospects for the use of low-potential energy sources in desalination systems based on gas-contact installations

Abstract

Background. Low-potential secondary energy resources are the majority of all types of thermal secondary energy resources. They include liquids with temperatures below 150 °C and gases with temperatures below 300 °C. The use of secondary energy resources in various processes makes it possible to reduce the consumption of organic fuels and, as a result, the number of emissions entering the atmosphere and having a negative impact on the environment. Since in thermal desalination plants about 40–50 % of the cost of desalinated water is the cost of thermal energy, it is advisable to use low-potential energy sources to reduce it. Application of low-potential secondary energy resources in gas-contact desalination plants is relevant, since the process of evaporation of water can be carried out at temperatures below the saturation temperature. In addition, direct utilization of gas secondary energy resources is possible in installations of this type, for example, combustion products. The use of combustion products allows not only to obtain fresh water suitable for technical needs, but also to purify flue gases. Several options for the utilization of secondary energy resources can be proposed depending on the requirements for desalinated water, as well as the parameters and type of heat carriers.

Materials and methods. The study has been conducted using the method of balance calculations of heat exchange processes in technological power plants.

Results. The authors have proposed several schemes for the utilization of low-potential secondary energy resources in desalination systems based on gas-contact desalination plants depending on the type and parameters of the low potential energy resources. The authors have evaluated the efficiency of the integration of heat transformers into the thermal circuits of gas-contact desalination plants for the disposal of secondary energy resources with a temperature less than 80 °C for various working agent: R600, R600a, R1234ze(Z), R142b, R717, R245fa, R134a. Nomograms have been constructed for the most efficient working agent. Depending on the temperature of secondary energy resources, it is possible to determine the energy consumption for the compressor drive, as well as the amount of energy taken from secondary energy resources. The required amount of flue gases has been determined to produce a cubic meter of fresh water in steam-air desalination plants, depending on the flue gas parameters and operating conditions.

Conclusions. It has been established that when disposing combustion products in surface heat exchangers of steam-air desalination plants, from 1,96 to 18,47 thousand kilograms of exhaust gases are required to produce 1 m³ of fresh water, depending on their parameters and the operating mode of the installation. When utilizing secondary energy resources using heat transformers, the most efficient and environmentally friendly is the use of working agents R1234ze(Z), R245fa and ammonia. Disposal of low-potential energy sources using of heat transformers at temperatures of the heat carrier less than 24 °C is impractical.

Key words: exhaust gases, low-potential energy sources, secondary energy resources, desalination plant, heat transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.017-027

Введение. Низкопотенциальные источники энергии (НИЭ), к которым относятся вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) с температурой менее 150 °C для жидкостей и ниже 300 °C для газов [1] (сточные воды, вентиляционные выбросы, охлаждающая вода, дымовые газы, вода после продувки котельных агрегатов и т.д.), не получили широкого распространения в промышленности и энергетике.

Перспективным вариантом утилизации НИЭ является их применение в термических опреснительных установках, поскольку около 40–50 % от стоимости обессоленной воды в них составляют затраты на подводимую тепловую энергию [2]. Наиболее эффективным вариантом

является использование НИЭ в газоконтактных опреснительных установках, так как процесс испарения в них может осуществляться при температурах ниже температуры насыщения.

В опреснителях данного типа в качестве энергоносителя, контактирующего с морской водой, может использоваться воздух, а также дымовые газы, покидающие различные энергетические установки.

Использование уходящих газов в контактных опреснителях позволяет повысить интенсивность тепломассообменных процессов, протекающих в испарительной колонне, а также обеспечивает очистку продуктов сгорания от диоксида углерода, снижая выбросы парниковых

газов, однако обессоленная вода, полученная в ходе работы таких установок, может использоваться только для технических целей. Однако применение продуктов сгорания в таких установках также интенсифицирует процессы коррозии.

Известен ряд тепловых схем, в которых продукты сгорания используются в контактных колоннах в качестве греющей среды [3–6], при этом рассматриваются два пути получения обессоленной воды: путем нагрева охлаждаемой воды и последующим ее адиабатическим испарением, а также путем увлажнения дымовых газов и их осушкой.

Согласно исследованиям [3], при контакте морской воды с дымовыми газами, полученными в результате сжигания газового топлива, существенного изменения качества морской воды не происходит, наблюдается повышение концентрации диоксида углерода в рассоле, что свидетельствует об очистке продуктов сгорания от CO_2 , жесткость же и солесодержание изменяются в соответствии с кратностью упаривания. При использовании продуктов сгорания мазута происходит частичная нейтрализация щелочности исходной воды. Степень нейтрализации зависит от количества сернистых соединений, содержащихся в топливе. В условиях, когда сжигается сернистый мазут, общая щелочность упаренной в контактной камере морской воды снижается до 1,2–2,8 мг-экв/кг, при этом обеспечивается pH 5,5–6,2.

При работе паровоздушных охлаждающих установок получаемая обессоленная вода имеет более высокое качество [7] и после минерализации может использоваться для целей питьевого водоснабжения. В таких установках низкопотенциальная теплота утилизируется в рекуперативных теплообменниках, обеспечивая испарение морской воды, ее нагрев, а также компенсацию тепловых потерь.

Кроме этого, использование НИЭ позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду за счет снижения выбросов, образующихся при сжигании органического топлива.

Решение задач, направленных на применение низкопотенциальных ВЭР в системах охлаждения, является актуальным, так как объем таких ВЭР составляет более 60 % от суммы всех видов ВЭР [8].

Тепловые схемы газоконтактных охлаждающих установок для утилизации НИЭ. Работа газоконтактных охлаждающих установок включает в себя два основных процесса: увлажнение газа, требующее подвода теплоты, а также осушку парогазовой смеси, осуществляющую отводом энергии. Работа охлаждающей установки при низких температурах увлажнения позволяет снизить интенсивность накипеобразования, а также данному обстоятельству способствует непосредственный контакт морской воды и газового потока, при котором процесс испарения происходит в объеме. То есть подвод теплоты необходимо осуществлять

в зону контакта морской воды и взаимодействующих с ней газов.

В зависимости от вида и параметров НИЭ можно предложить следующие варианты использования их потенциала:

- использование НИЭ в качестве греющей среды;
- прямое использование НИЭ в контактных установках (применимо для дымовых газов);
- использование в качестве источника теплоты в трансформаторах теплоты (ТТ), интегрированных в тепловые схемы охлаждающих установок.

Выбор схемы утилизации тепловых ВЭР зависит от вида (газ, жидкость) и параметров энергоносителя.

Одним из вариантов организации контакта охлаждаемой воды и воздушного потока является барботаж паровоздушной смеси, который осуществляется в испарительной колонне с размещенным в ней газораспределительным устройством. При этом для более интенсивного увлажнения рекомендуется подводить тепловую энергию в зону барботажа.

Газообразные источники энергии, например продукты сгорания органического топлива, могут использоваться в качестве греющей среды в охлаждающих установках, в которых с морской водой контактирует воздух (рис. 1). В таком случае газообразные ВЭР поступают в нагревательный элемент установки, где за счет теплообмена с находящейся в зоне барботажа морской водой они охлаждаются, а затем покидают установку.

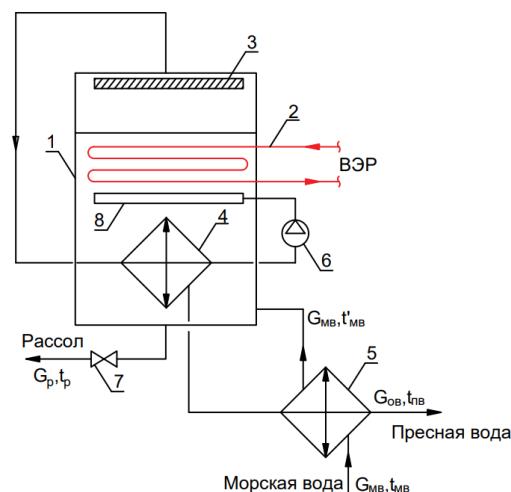


Рис. 1. Принципиальная схема газоконтактной охлаждающей установки для утилизации низкопотенциальных ВЭР: 1 – испарительная колонна; 2 – теплоутилизатор; 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор; 5 – теплообменник; 6 – газодувка; 7 – сливной кран; 8 – газораспределительная решетка

Стоит отметить, что при охлаждении продуктов сгорания до температуры ниже точки росы в поверхностном теплообменнике возможно выпадение капельной влаги с последующим

образованием соединений, способных негативно влиять на состояние теплообменных поверхностей. Значение температуры точки росы зависит от вида и состава сжигаемого топлива. В этой связи для исключения низкотемпературной коррозии следует охлаждать дымовые газы до температуры, превышающей температуру точки росы минимум на 5–10 °C. Для продуктов сгорания природного газа значение данного параметра составляет от 52 до 60 °C, в зависимости от влажности поступающего на горение воздуха, величины избытка воздуха, а также его давления [8].

Предложенная тепловая схема (рис. 1) функционирует следующим образом. Морская вода подогревается в теплообменнике 5 за счет охлаждения пресной воды, поступающей из конденсатора 4. Затем опресняемая вода поступает в испарительную колонну 1, где подогревается до температуры барботажа. В испарительной колонне также осуществляются процессы сопряженного тепломассообмена между воздухом, поступающим из газораспределительной решетки 8, и морской водой, в результате чего воздух увлажняется, а также повышается его температура. Далее полученная паровоздушная смесь проходит через каплеотбойник 3 и поступает в конденсатор 4, где осушается. Сконденсировавшийся водяной пар представляет собой пресную воду, которая отправляется в теплообменник 5 для подогрева морской воды. Осушенный воздух после конденсатора газодувкой 6 вновь подается в газораспределительную решетку 8. Полученный в ходе работы установки рассол через сливной кран 7 удаляется. Догрев морской воды и компенсация тепловых потерь осуществляются за счет отводимой от ВЭР энергии в нагревателе 2.

Альтернативным вариантом утилизации теплоты уходящих газов, покидающих различные энергетические установки, является их использование в испарительных камерах, в которых осуществляется диспергирование морской воды [3, 9].

При работе установок данного типа продукты сгорания органического топлива, покидающие различные энергетические установки, могут использоваться для первоначального подогрева морской воды либо напрямую поступать в контактную испарительную колонну (рис. 2). В таком случае предварительный нагрев морской воды до температуры мокрого термометра может осуществляться за счет охлаждения образующегося концентрата. Для исключения капельного уноса в верхней части испарительной камеры устанавливается каплеотбойник.

Основным фактором, определяющим производительность газоконтактных опреснителей (рис. 2), является соотношение расходов дымовых газов и воды, поступающих в контактную камеру. Согласно исследованиям [3], наибольшая эффективность достигается при соотношении расходов опресняемой воды и дымовых газов от 0,1 до 0,4 кг обессоленной воды на 1 м³ дымовых газов.

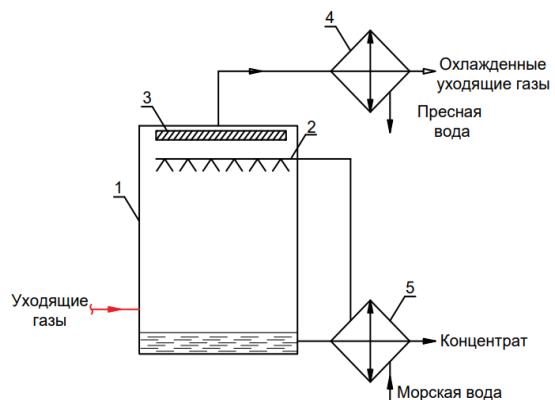


Рис. 2. Принципиальная схема газоконтактной опреснительной установки для утилизации уходящих газов: 1 – испарительная колонна; 2 – система диспергирования опресняемой воды (форсунки); 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор-осушитель; 5 – теплообменник

В установках данного типа продукты сгорания поступают в испарительную колонну, где диспергируется предварительно подогретая морская вода, в результате контакта с которой дымовые газы увлажняются (процесс 1–2), а затем от них отводится тепловая энергия, в результате чего происходит их осушка (процессы 2–3 (без выпадения влаги) и 3–4 (конденсация водяных паров)) (рис. 3). Реализуемый термодинамический цикл является разомкнутым, соответственно, после осушки продукты сгорания выбрасываются в атмосферу.

В основных в таких установках реализуется адиабатическое увлажнение продуктов сгорания, соответственно, возникает необходимость подогрева исходной воды перед входом в контактную камеру до температуры мокрого термометра, что требует установки поверхностных теплообменных аппаратов, в которых могут образовываться карбонатные отложения.

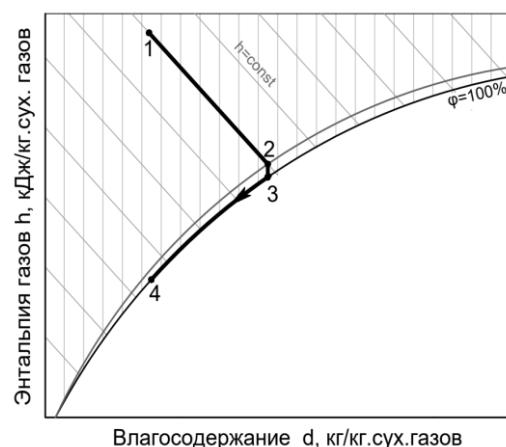


Рис. 3. Термодинамический цикл работы газоконтактной опреснительной установки: 1–2 – увлажнение продуктов сгорания; 2–3 – охлаждение продуктов сгорания до температуры точки росы; 3–4 – осушка продуктов сгорания

Этих недостатков лишена схема с контактным подогревом воды дымовыми газами и последующим адиабатным испарением. Для одноступенчатой установки такого типа производительность установки составляет от 0,043 до 0,22 кг на 1 м³ продуктов сгорания с температурой от 110 до 400 °C [3, 9].

Для НИЭ с температурой менее 80 °C для обеспечения работы оросительной установки необходимо повысить потенциал ВЭР путем использования встраиваемого в тепловую схему ТТ (рис. 4).

В данном случае речь должна идти о парокомпрессионных ТТ, поскольку для абсорбционных установок необходим источник теплоты более высокого потенциала для обеспечения работы генератора.

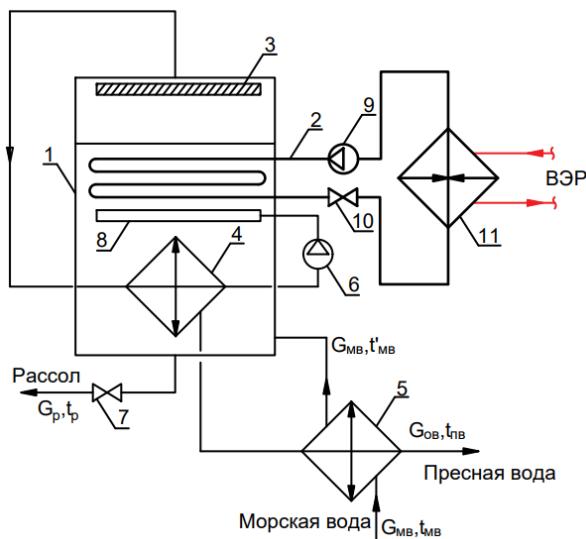


Рис. 4. Принципиальная схема газоконтактной оросительной установки с трансформатором теплоты: 1 – испарительная колонна; 2 – конденсатор ТТ; 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор; 5 – теплообменник; 6 – газодувка; 7 – сливной кран; 8 – газораспределительная решетка; 9 – компрессор; 10 – терморегулирующий вентиль; 11 – испаритель

В установках с парокомпрессионными ТТ низкотенциальный теплоноситель поступает для охлаждения в испаритель ТТ, за счет чего низкокипящий рабочий агент испаряется, а затем поступает в компрессор, где повышается его давление и температура. В состоянии перегретого пара рабочий агент поступает в конденсатор ТТ, который расположен в испарительной колонне оросительной установки. В результате отвода тепла рабочий агент конденсируется, а затем отправляется в дроссельное устройство, после которого поступает в испаритель. Для повышения эффективности в предложенной схеме устанавливаются поверхностные теплообменники для осушки паровоздушной смеси, а также предварительного подогрева морской воды за счет охлаждения пресной воды, покидающей установку.

Основным недостатком данного технического решения является усложнение схемы, а

также потребление электрической энергии для обеспечения работы компрессора.

Примером ВЭР, которые могут использоваться в схеме с ТТ, являются: сбросное тепло системы охлаждения ТЭС и АЭС (от 20 до 70 °C); промышленные сточные воды (от 30 до 40 °C); вентиляционные выбросы (от 20 до 40 °C).

Оросительные установки (рис. 1 и 3) работают по замкнутому термодинамическому циклу (рис. 5), при реализации которого в зону контакта воздушного потока и морской воды подводится низкотенциальная тепловая энергия. Процесс изменения состояния паровоздушной смеси представлен в диаграмме В.И. Прохорова, в которой учитывается изменение давления паровоздушной смеси в ходе работы установки [11]. В результате подвода теплоты в зону барботажа интенсифицируются процессы увлажнения воздуха, количество влаги, содержащейся в паровоздушной смеси, возрастает (процесс 2–3). Затем она охлаждается, при этом происходит конденсация влаги, содержащейся в воздухе (процесс 3–1). Далее осушенный воздух газодувкой подается в зону барботажа, при этом возрастает его давление (процесс 1–2).

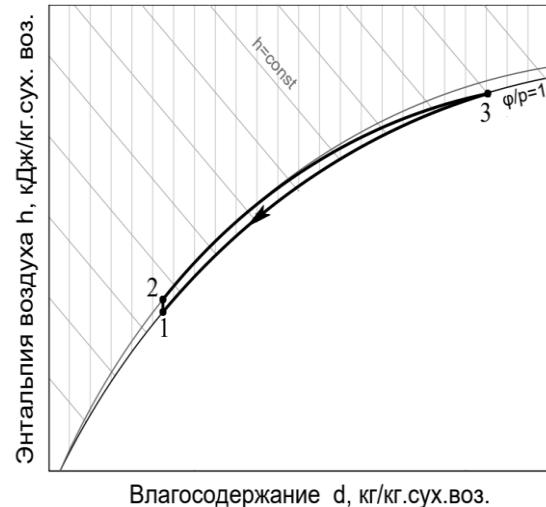


Рис. 5. Термодинамический цикл работы оросительных установок с воздушным потоком: 1–2 – повышение давления в газодувке; 2–3 – увлажнение паровоздушной смеси; 3–1 – осушка паровоздушной смеси

Методы исследования. Для исследования влияния параметров НИЭ на эффективность работы оросительной установки был использован метод балансовых расчетов.

Количество энергии, которое должно вноситься с низкотенциальным ВЭР, для газоконтактной установки, в которой ВЭР используются в качестве греющей среды, определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{ВЭР}} = G_{\text{пв}} c_{\text{п.пв}} t_{\text{пв}} + G_{\text{п}} c_{\text{п.п}} t_{\text{п}} + G_{\text{мв}} c_{\text{п.мв}} (t_{\text{б}} - t'_{\text{мв}}) - G_{\text{мв}} c_{\text{п.мв}} t_{\text{мв}} + Q_{\text{пп}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{пв}}$, $G_{\text{мв}}$, $G_{\text{п}}$ – расходы пресной и морской воды, кг/с ; $t_{\text{пв}}$, $t_{\text{п}}$, $t_{\text{мв}}$ – температуры пресной

воды и рассола на выходе из установки, температура морской воды на входе в установку, °С; $c_{p, nv}$, $c_{p, mb}$, $c_{p, p}$ – массовая изобарная теплоемкость пресной и морской воды, кДж/(кг·К); t_6 – температура морской воды в зоне барботажа, °С; t'_{mb} – температура морской воды на выходе из теплообменника рекуперации теплоты пресной воды, °С; Q_{tp} – тепловые потери, кВт.

Для определения массовых расходов пресной и морской воды, рассола совместно решаются уравнения материального баланса по расходу воды и примесям.

Соответственно, уравнение материального баланса установки по морской воде имеет вид

$$G_{mb} = G_{nv} + G_p. \quad (2)$$

Уравнение материального баланса по массе соли имеет вид

$$\frac{G_{mb} S}{1000} = \frac{G_{nv} S'}{1000} + \frac{G_p S''}{1000}, \quad (3)$$

где S – соленость исходной морской воды, г/л; S'' – соленость рассола, г/л; S' – соленость пресной воды, г/л.

Количество испарившейся пресной воды, уносимое с паровоздушной смесью, может быть определено по формуле

$$G_{nv} = L \rho (d'' - d'), \quad (4)$$

где L – расход сухого воздуха, м³/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; d'' , d' – влагосодержание воздуха на выходе и входе в испарительную колонну, кг/(кг с.в.).

Для расчета параметров работы установки в характерных точках схемы необходимо обладать сведениями о влагосодержании и энталпии газов после контакта с морской водой, а также после осушки. При расчете термодинамических параметров воздуха используется модель идеального газа, основанная на уравнении состояния Менделеева–Клапейрона.

Влагосодержание воздуха может быть определено по формуле

$$d = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{сух.в}} \frac{p_H \varphi}{B - p_H \varphi}, \quad (5)$$

где μ_{H_2O} – молярная масса воды, кг/кмоль; $\mu_{сух.в}$ – молярная масса сухого воздуха, кг/кмоль; p_H – парциальное давление насыщения водяных паров, Па; φ – относительная влажность, в долях; B – общее давление смеси, Па.

Энталпия паровоздушной смеси во всех характерных точках схемы определяется в соответствии с выражением

$$h_i = h_{cb} \left(1 - \frac{d_i}{d_i + 1}\right) + h_{v.p.i} \frac{d_i}{d_i + 1}, \quad (6)$$

где h_{cb} – энталпия сухого воздуха при температуре и давлении в i -й точке схемы, кДж/кг; $h_{v.p.i}$ – энталпия 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.в.

Поскольку воздушный поток и дымовые газы взаимодействуют не с чистой водой, а с морской, представляющей собой раствор различных солей, то при расчете парциального давления, используемого при определении влагосодержания, необходимо учитывать, что оно пропорционально мольной доле воды, которая зависит от солености морской воды.

В тепловых схемах с трансформатором теплоты количество энергии, которое должно отводиться от НИЭ, определяется по формуле

$$Q_{TT}^{BEP} = (G_{nv} c_{p, nv} t_{nv} + G_p c_{p, p} t_p + G_{mb} c_{p, mb} \times (t_6 - t'_{mb}) - G_{mb} c_{p, mb} t_{mb} + Q_{tp}) \frac{(k-1)}{k}, \quad (7)$$

где k – коэффициент трансформации ТТ.

Определение коэффициента трансформации, а также других характеристик парокомпрессионного ТТ при его работе в составе тепловой схемы оросительной установки выполнялось в соответствии с рекомендациями, приведенными в [12].

Результаты исследования. Согласно исследованиям [13], наиболее эффективным является эксплуатация паровоздушных установок при температуре увлажнения от 75 до 95 °С и температурах осушки, изменяющихся в диапазоне от 40 до 90 °С.

Низкопотенциальные источники, в частности, могут быть представлены продуктами сгорания, покидающими различные энергетические установки, и могут использоваться в поверхностных теплообменных аппаратах в качестве греющей среды.

Для установки с прямым использованием тепловых ВЭР (рис. 1) были получены зависимости требуемого расхода уходящих газов для получения 1 м³ пресной воды (рис. 6).

Мощность низкопотенциальных ВЭР в таком случае определяется в соответствии с формулой (1).

Согласно полученным зависимостям, меньшее количество уходящих газов требуется при более низкой температуре барботажа, однако в таком случае возрастает мощность газодувки, обеспечивающей перемещение паровоздушной смеси, поскольку при этом воздух способен удерживать меньшее количество влаги. Кроме этого, при более низких температурах интенсивность как процесса увлажнения, так и процесса осушки уменьшается, что приводит к возрастанию требуемой поверхности тепло-массообмена для достижения той же производительности.

В ходе работы оросительных установок различного принципа действия образуется рассол, который негативно влияет на окружающую среду. Рассол имеет уровень солености в 1,6–2 раза больше, чем у исходной (морской) воды. Кроме этого, в его составе находятся

различные химические вещества высокой концентрации, такие как хлорид натрия, хлорид железа, хлорид алюминия, гидросульфит натрия и другие соединения, а также продукты их распада [10]. Сегодня на большинстве действующих оросительных станций рассол не утилизируется.

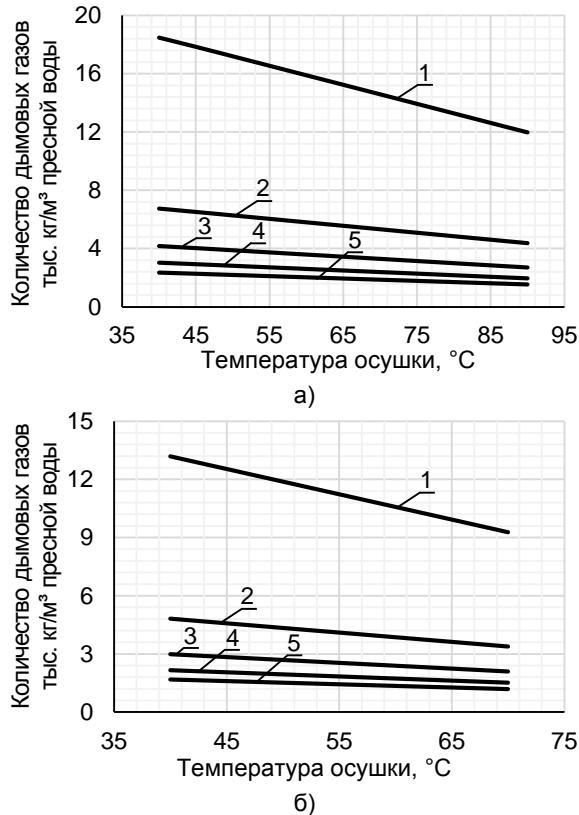


Рис. 6. График зависимости объема уходящих газов от температуры осушки паровоздушной смеси для получения 1 m^3 пресной воды для температуры барботажа 95 $^{\circ}\text{C}$ (а) и 75 $^{\circ}\text{C}$ (б): 1 – температура уходящих газов $t_{\text{tx}} = 100$ $^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_{\text{tx}} = 150$ $^{\circ}\text{C}$; 3 – $t_{\text{tx}} = 200$ $^{\circ}\text{C}$; 4 – $t_{\text{tx}} = 250$ $^{\circ}\text{C}$; 5 – $t_{\text{tx}} = 300$ $^{\circ}\text{C}$

Существует несколько способов утилизации рассола: разбавление перед сбросом; глубоководный сброс через рассеивающие диффузоры для ускорения смещивания; использование испарительных бассейнов (в засушливых регионах) с последующей добычей солей; рекуперация полезных веществ (магния, лития, брома) для промышленности.

Стоит отметить, что НИЭ также возможно использовать для интенсификации процесса упаривания рассола в испарительных бассейнах для получения соли. Например, при более высоком потенциале ВЭР абсорбционные трансформаторы теплоты могут применяться в системах оросения, при этом избытки теплоты, которые отводятся от абсорбера, могут использоваться для упаривания рассола. Зависимости количества энергии, необходимого для упаривания рассола, образующегося при производстве 1 m^3 пресной воды, от солености и температуры осушки приведены на рис. 7.

В ранее проведенных исследованиях [5] была определена зависимость производительности газоконтактных оросительных установок, в которых осуществляется взаимодействие дымовых газов и морской воды, от температуры уходящих газов и их расхода. Стоит отметить, что вода, получаемая в таких установках, является непригодной для потребления в качестве питьевой и может использоваться только для технических и хозяйствственно-бытовых нужд.

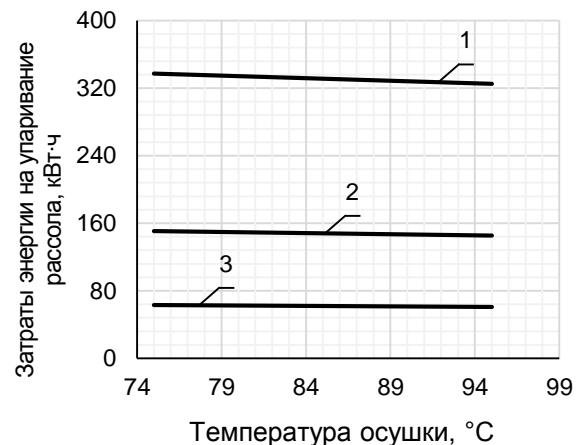


Рис. 7. Зависимости затрат энергии на упаривание рассола от температуры осушки и солености морской воды: 1 – $S = 35$ г/л; 2 – $S = 20$ г/л; 3 – $S = 10$ г/л

При температуре НИЭ менее 80 $^{\circ}\text{C}$ для повышения потенциала подаваемого в колонну энергоносителя могут устанавливаться ТТ. Значение коэффициента трансформации зависит от типа рабочего агента, а также температурных уровней работы ТТ. При выборе рабочего тела необходимо учитывать не только энергетические, но и экологические аспекты: озоноразрушающий потенциал (ОРП), а также потенциал глобального потепления/ Global Warming Potential (GWP) [14].

Для выбранного диапазона температур работы оросительной установки в ТТ могут использоваться рабочие агенты R600, R600a, R142b, R717, R245fa, R134a, R1234ze (Z), характеристики которых приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что использование практически всех рассматриваемых рабочих тел не приводит к разрушению озона (ОРП равен или близок к 0), однако R142b менее экологичен из-за наличия в составе его молекулы хлора. Из всех вышеперечисленных рабочих тел только аммиак характеризуется нулевым потенциалом глобального потепления.

Для выбора наиболее эффективного рабочего тела был выполнен тепловой расчет оросительной установки с ТТ, результаты которого представлены на диаграмме (рис. 8). В качестве одного из показателей эффективности установки рассматривается энергопотребление компрессора ТТ.

Рабочий агент	Название и химическая формула	Критическая температура, °C	GWP	ОРП
R600	Бутан (C_4H_{10})	152,0	3	0
R600a	Изобутан ($(CH_3)_3CH$)	135,0	3	0
R1234ze(Z)	Цис-1,3,3,3-тетрафторпропен (Z-изомер) ($C_3H_2F_4$)	153,7	<1	0
R142b	Дифторхлорэтан (CF_2ClCH_3)	137,1	540	0,057
R717	Аммиак (NH_3)	132,4	0	0
R245fa	1,1,1,3,3-пентафторпропан ($C_3H_3F_5$)	157,6	1030	0
R134a	Тетрафторэтан ($C_2H_2F_4$)	101,1	1300	0

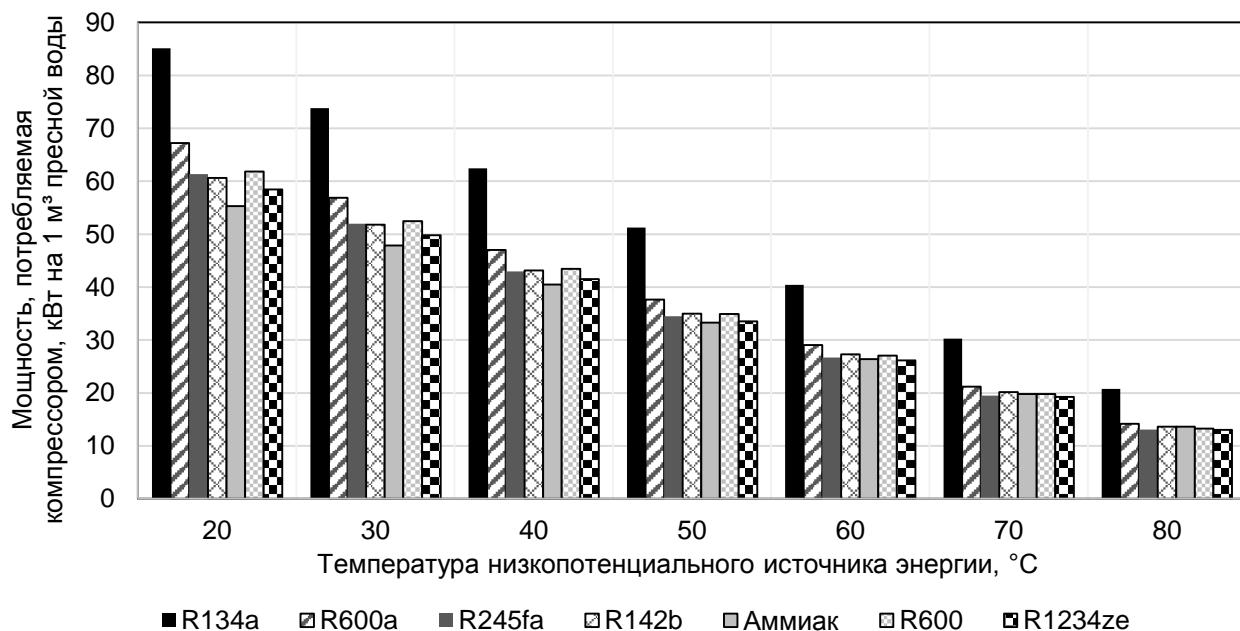


Рис. 8. Зависимость мощности, потребляемой компрессором трансформатора теплоты, от температуры низкопотенциального источника для разных рабочих тел

Анализ диаграммы (рис. 8) показывает, что практически во всем диапазоне температур НИЭ наиболее эффективным является использование аммиака в качестве рабочего тела ТТ. Однако при более высоких температурах (более 60 °C) аммиак по эффективности незначительно уступает фреону R245fa.

В целом при всех исследуемых температурах наиболее эффективным является аммиак, R1234ze и R245fa. В этой связи более подробное исследование было проведено для данных рабочих тел. Были построены номограммы (рис. 9), позволяющие по температуре низкопотенциального источника при различных температурах барботажа определить количество электрической энергии, потребляемой компрессором для производства 1 м³ пресной воды, а также количество энергии, отбираемое от НИЭ.

Согласно полученным зависимостям (рис. 8), количество энергии, потребляемое

компрессором при работе ТТ на R1234ze и R245fa, отличается во всем диапазоне рассматриваемых температур барботажа и НИЭ не более чем на 4 % (0,67 кВт·ч/м³). Минимальное энергопотребление характерно для аммиака, однако данное рабочее тело является токсичным.

Для оценки эффективности интеграции ТТ в тепловые схемы газоконтактных опреснительных установок при различных параметрах был рассчитан расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для производства 1 м³ пресной воды при использовании ТТ и при использовании тепловой энергии, полученной в результате сжигания топлива (рис. 10).

Согласно результатам расчетов, расход условного топлива для получения 1 м³ пресной воды при использовании ТТ в зависимости от параметров НИЭ составляет от 3,12 до 19,78 кг.

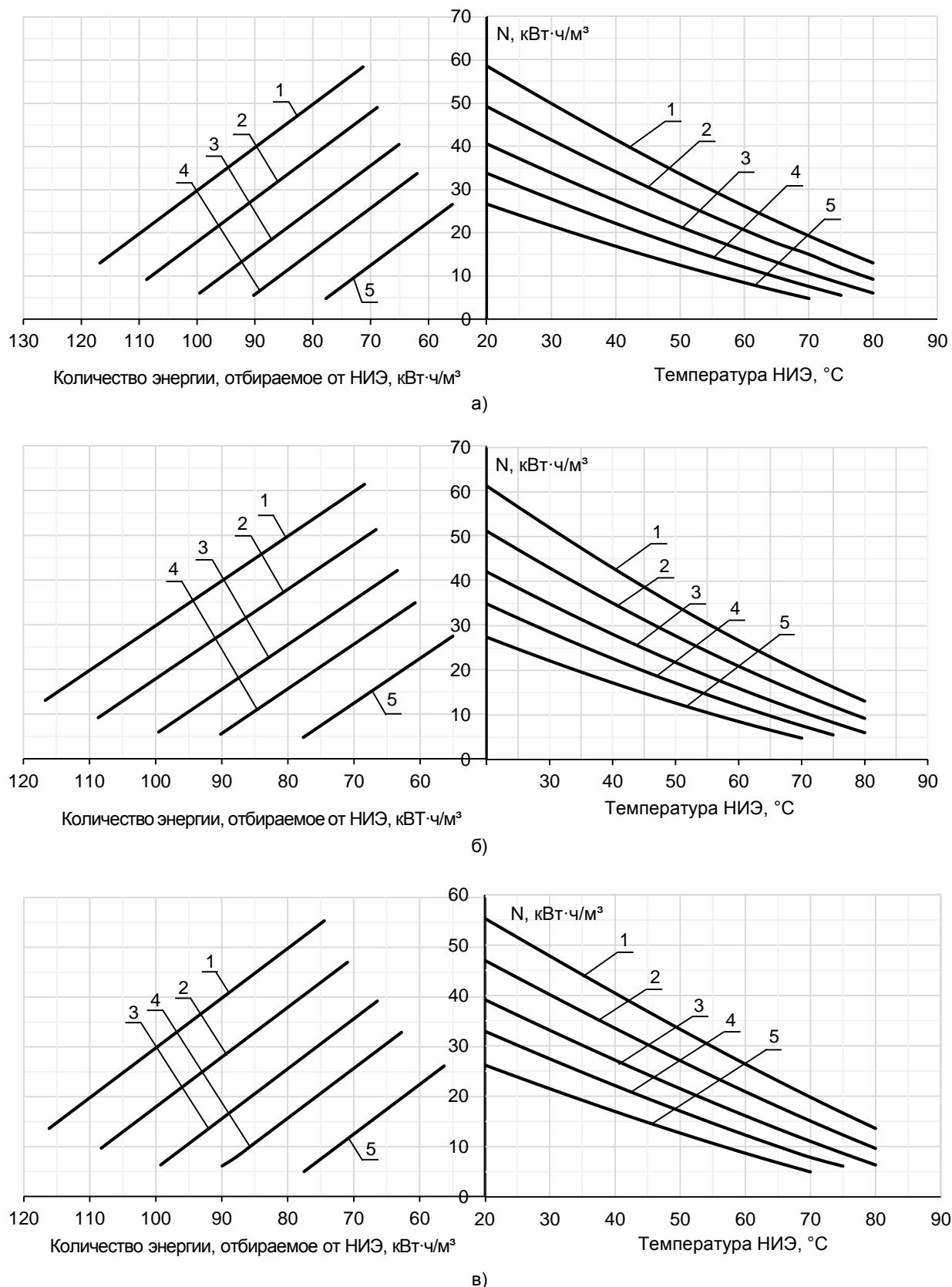


Рис. 9. Зависимость мощности, потребляемой компрессором ТГ, от температуры НИЭ и соответствующей ей требуемой мощности НИЭ для R1234ze (а), R245fa (б); аммиака (в): 1 – температура барботажа $95\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $90\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $85\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – $75\text{ }^{\circ}\text{C}$

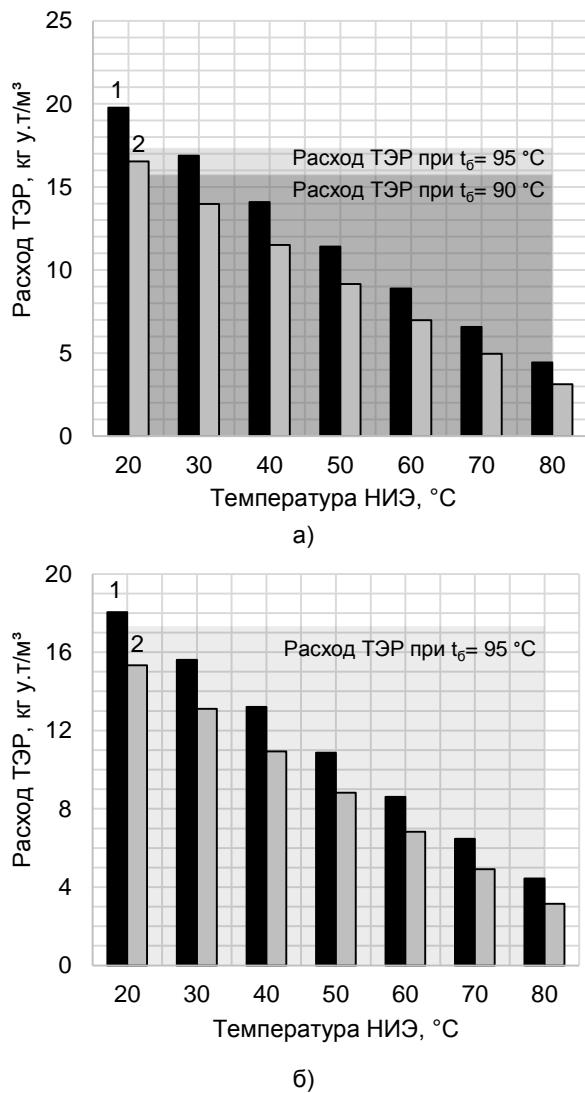


Рис. 10. Расход топливно-энергетических ресурсов при работе ТТ в составе оросительной установки при утилизации НИЭ: а – R245fa; б – аммиак; 1 – $t_b = 95^\circ\text{C}$; 2 – $t_b = 90^\circ\text{C}$

В результате исследования выявлено, что использование ТТ для утилизации НИЭ при температурах источника менее 29°C (для R142b и для R245fa) и 24°C (для аммиака) при температуре барботажа 95°C по затратам ТЭР становится сопоставимым с использованием тепловой энергии, получаемой в результате сжигания топлива.

Выводы. Предложенные схемные решения по использованию низкопотенциальных ВЭР в системах оросения, функционирующих на базе газоконтактных оросительных установок, для различных параметров НИЭ и их видов, имеют преимущества и недостатки. Параметрический анализ этих схем показал, что для утилизации теплоты продуктов сгорания, в зависимости от требований, предъявляемых к пресной воде, возможно их использование в контактной испарительной колонне, в которой протекают тепломассообменные процессы между дымо-

выми газами и морской водой, а также в качестве греющей среды в паровоздушных оросительных установках.

Выявлено, что при температурах ВЭР превышающих 80°C , возможно их использование в поверхностных теплообменных аппаратах паровоздушных оросительных установок. При более низком потенциале ВЭР необходима установка трансформаторов теплоты, усложняющих тепловую схему оросителя.

Установлено, что для рабочего диапазона температур газоконтактных оросительных установок наибольшая эффективность парокомпрессионных трансформаторов теплоты достигается при использовании аммиака, являющегося наиболее экологичным рабочим телом, а также R142b и R245fa.

При температурах ВЭР менее 24°C использование в тепловых схемах оросителей парокомпрессионного трансформатора теплоты становится неэффективным при температурах барботажа 90 и 95°C .

Список литературы

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник / А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: НИУ МЭИ, 2021. – 504 с.
2. Слесаренко В.Н. Современные методы оросения морских и соленых вод. – М.: Энергия, 1973. – 248 с.
3. Дыхно А.Ю. Использование морской воды на тепловых электростанциях. – М.: Энергия, 1974. – 269 с.
4. Ковалев О.П. Тепломассообмен в контактных пленочных аппаратах судовой утилизационной оросительной установки на дымовых газах (разработка методики теплового расчета): дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05. – Владивосток, 1984. – 171 с.
5. Разработка тепловой схемы газоконтактной оросительной установки и анализ условий ее применения / В.М. Лапшова, М.В. Козлова, А.В. Банников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 6. – С. 5–14.
6. Слесаренко В.Н. Дистилляционные оросительные установки. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.
7. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 6. – С. 43–49.
8. Николаева Н.А. Определение потенциала энергосбережения вторичных энергоресурсов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 12-1. – С. 69–72.
9. Пат. № 2841750 С1 Российская Федерация, МПК C02F 1/02, C02F 1/16. Газоконтактная оросительная установка: заявл. 08.10.2024: опубл. 17.06.2025 / 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».
10. Современные методы оросения воды / М.В. Колодин, А.Ю. Дыхно, А. Гельдыев, Е.М. Рутгайзер; под науч. ред. д-ра техн. наук проф. В.А. Клячко;

АН Туркм. ССР. Ин-т пустынь. – Ашхабад: ылым, 1967. – 181 с.

11. **Прохоров В.И.** I-d-диаграммы влажного воздуха для переменных давлений. – М.: Книга, 1973. – 30 с.

12. **Соколов Е.Я., Бродянский В.М.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – М.: Энергия, 1968. – 336 с.

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

14. **Коршунова Т.Е., Колесов В.А.** Исследование экологической безопасности, эффективности и развития хладагентов судового холодильного оборудования рыбной отрасли России в рамках международных протоколов // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2024. – Т. 70, № 4. – С. 204–213.

References

1. Garyaev, A.B., Yakovlev, I.V., Klimenko, A.V., Danilov, O.L., Ochkov, V.F., Vakulko, A.G. *Energosberzhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in thermal power engineering and heat technologies]. Moscow: NIU MEI, 2021. 504 p.

2. Slesarenko, V.N. *Sovremennye metody opresneniya morskikh i solenykh vod* [Modern methods of desalination of marine and salt waters]. Moscow: Energiya, 1973. 248 p.

3. Dykhno, A.Yu. *Ispol'zovanie morskoy vody na teplovyykh elektrostantsiyakh* [The use of marine water in thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 269 p.

4. Kovalev, O.P. *Teplomassoobmen v kontaktakh plenochnykh apparatov sudovoy utilizatsionnoy opresnitel'noy ustanovki na dymovykh gazakh (razrabotka metodiki teplovogo rascheta)*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in compact film apparatuses of a ship's waste desalination plant using diesel gases (development of a thermal calculation methodology)]. Cand. tech. sci. diss.]. Vladivostock, 1984. 171 p.

5. Lapshova, V.M., Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Bannikova, S.A., Gorbunov, V.A. Razrabotka teplovoy skhemy gazokontaktnoy opresnitel'noy ustanovki i analiz usloviy ee primeneniya [Development of the thermal circuit of a gas-contact desalination plant and analysis of its

application conditions]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 6, pp. 5–14.

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

7. Biryukov, A.B., Lebedev, A.N., Kaminskiy, K.D. Metodika opredeleniya temperatury tochki rosy produktov sgoraniya prirodnogo gaza [Methodology for determining the dew point temperature of natural gas combustion products]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 6, pp. 43–49.

8. Nikolaeva, N.A. Opredelenie potentsiala energosberzheniya vtorichnykh energoresursov [Determination of the energy saving potential of secondary energy resources]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2014, no. 12-1, pp. 69–72.

9. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Lapshova, V.M. *Gazokontaktnaya opresnitel'naya ustanovka* [Gas contact desalination plant]. Patent RF, no. 2841750 C1, 2025.

10. Kolodin, M.V., Dykhno, A.Yu., Gel'dyev, A., Rutgayer, E.M. *Sovremennye metody opresneniya vody* [Modern methods of water desalination]. Ashkhabad: Ylym, 1967. 181 p.

11. Prokhorov, V.I. *I-d-diagrammy vlazhnogo vozdukh dlya peremennykh davleniy* [I-d-diagrams of moist air for variable pressures]. Moscow: Kniga, 1973. 30 p.

12. Sokolov, E.Ya., Brodyan'skiy, V.M. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhлzhdeniya* [Energy foundations of heat transformation and cooling processes]. Moscow: Energiya, 1968. 336 p.

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

14. Korshunova, T.E., Kolesov, V.A. Issledovanie ekologicheskoy bezopasnosti, effektivnosti i razvitiya khladagentov sudovogo kholodil'nogo oborudovaniya rybnoy otrassli Rossii v ramkakh mezhdunarodnykh protokolov [Investigation of environmental safety, efficiency and development of refrigerants of marine refrigeration equipment in the fishing industry of Russia within the framework of international protocols]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtusa*, 2024, vol. 70, no. 4, pp. 204–213.