



С.П. Пантилеев, В.С. Малышев
Мурманский арктический университет

НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕГАЗИФИКАЦИИ СПГ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе предлагаются технологии регазификации, которые позволят обеспечить как высокую эффективность работы котельных, так и их экологическую чистоту. Приведены примеры регазификации котельных Мурманской области.

Сжиженный природный газ (СПГ), газорегулировочная станция, котельная, уходящие продукты сгорания, автономная регазификация СПГ, топливная эффективность, экологическая чистота, декарбонизация, твердый углекислый газ (сухой лед), коммерческая привлекательность.

В Мурманске уже почти 2 года успешно эксплуатируется котельная, работающая на СПГ, привозимом автотранспортом из Ленинградской области. Нами была проанализирована работа котла LAVART 2000 и предложены варианты повышения эффективности его работы. У данной котельной особый потребитель пара – это мазутное хозяйство, которое потребляет пар и не возвращает конденсат в котельную.

По режимной карте подпитка котла составляет на номинальном режиме 2,12 т/ч (0,589 кг/с) при производстве пара 2,08 т/ч. Разница идет на непрерывную продувку, которая составляет $p=100(2,12-2,08)/2,0=2\%$. При таком режиме работы это возможно только при низкой солености воды в Мурманске.

В котельной используется стандартная схема регазификации с использованием атмосферных испарителей. В зимний период СПГ можно испарить и нагреть в зависимости от температуры наружного воздуха и степени очистки от инея труб испарителя до температуры не выше $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейший подогрев полученного природного газа до температуры $20\text{ }^\circ\text{C}$ проводится в электрическом подогревателе. По режимной карте температура уходящих из котла газов $t_{\text{гр}}=169\text{ }^\circ\text{C}$, в действительности она составляет $200\text{ }^\circ\text{C}$ и выше.

Очевидно, что для повышения эффективности работы котельных на СПГ требуется осуществить перевод котлов на конденсационный режим работы.

Для рассматриваемого котла действительная энтальпия продуктов сгорания при работе с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1,15$ и температуре уходящих газов $200\text{ }^\circ\text{C}$ составит:

$$J_{\text{r}200} = J_{\text{r}200}^{\text{т}} + (\alpha-1) J_{\text{в}200}^{\text{т}} = 3045 + (1,15-1) 2591 = 3428,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Температура точки росы для природного газа составляет $t_{\text{рв}}=52\text{ }^\circ\text{C}$. Продукты сгорания природного газа без конденсации в них паров воды можно направлять в трубу при температуре $t_{\text{труб}}=70\text{ }^\circ\text{C}$.

Действительная энтальпия продуктов сгорания для нашего газа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1,15$ при температуре $70\text{ }^\circ\text{C}$ составит:

$$J_{\text{r}70} = (70/200) J_{\text{r}200} = (70/200) 3428,6 = 1200 \text{ кДж/м}^3.$$

При этом можно дополнительно получить с 1 м^3 газообразного топлива следующее количество тепла:

$$\Delta Q = J_{\text{r}200} - J_{\text{r}70} = 3428,6 - 1200 = 2228,6 \text{ кДж/м}^3.$$

При расходе газа в котле $V=142\text{ м}^3/\text{ч}=0,03944\text{ м}^3/\text{с}=0,3266\text{ кг/с}$ тепловая мощность, которую можно получить при охлаждении продуктов сгорания от $200\text{ }^\circ\text{C}$ до $70\text{ }^\circ\text{C}$, составит:

$$Q_{\text{доп}} = 0,95 V \Delta Q = 0,95 \cdot 0,03944 \cdot 2228,6 = 83,5 \text{ кВт}.$$

При переводе котлов в конденсационный режим главным препятствием является отсутствие в котельной теплоносителя с начальной температурой ниже точки росы продуктов сгорания, требующих подогрева. В нашем же случае таких теплоносителей два: вода подпитки и собственно СПГ, хранящийся при температуре $-161\text{ }^\circ\text{C}$. Первый способ возможен лишь в котельных с преимущественно большой подпиткой и не представляет особой проблемы, достаточно установить дополнительный подогреватель и просчитать дымосос.

Рассмотрим подробно вариант использования СПГ.

Вода в жидком состоянии имеет удельную теплоемкость, равную $c_{\text{ж}}=4200\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, в твердом состоянии (лед) – $c_{\text{л}}=2100\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, в газообразном состоянии (водяной пар) – $c_{\text{п}}=2200\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Определим теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания до $0\text{ }^\circ\text{C}$ при заморозке полученного конденсата:

$$Q_{\text{H}2\text{O}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{зам}} = 283,8 + 1693,9 + 226,3 = 2204 \text{ кВт},$$

где $Q_{\text{охл}} = V \cdot V_{\text{0.H}2\text{O}}^{\text{н}} \cdot q_{\text{охл}} = 0,3944 \cdot 2,14 \cdot 335,6 = 283,8 \text{ кВт}$ – тепловая мощность охлаждения водяных паров;

$q_{\text{охл}} = c_{\text{п}} \cdot (200-52) = 2,200 \cdot (200-52) = 335,6 \text{ кДж/м}^3$ – теплота охлаждения паров воды до момента конденсации, отнесенная к 1 м^3 водяных паров; $Q_{\text{кон}} = V \cdot \gamma_{\text{кон}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3944 \cdot 2500 \cdot 1,718 = 1693,9 \text{ кВт}$ – тепловая мощность конденсации водяных паров; $Q_{\text{зам}} = V \cdot \gamma_{\text{зам}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3944 \cdot 334 \cdot 1,718 = 226,3 \text{ кВт}$ – тепловая мощность заморозки конденсата водяных паров.

Если принять условие, что пары CH_4 при давлении $P=0,1 \text{ МПа}$ будут подогреты до температуры $T_0=300 \text{ К}$ ($27 \text{ }^\circ\text{C}$), то тогда по данным работы [2, 3] получаем дополнительное количество холода:

$$q_{\text{п}} = i_{300\text{K}} - i'' = 1200,2 - 796,1 = 404,13 \text{ кДж/кг},$$

где $=1200,2 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия при температуре $T_0=300 \text{ К}$ ($27 \text{ }^\circ\text{C}$); $i'' = 796,1 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия при температуре испарения СПГ $T_{\text{и}}=112 \text{ К}$ ($-161 \text{ }^\circ\text{C}$).

Количество теплоты, которое необходимо передать СПГ, чтобы его превратить в газ с температурой $t_0=27 \text{ }^\circ\text{C}$, составит:

$$q_0 = \gamma_{\text{СПГ}} + q_{\text{п}} = 510,5 + 404,13 = 914,63 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловая мощность для этого составит:

$$Q_{\text{СПГ}} = V \cdot q_0 = 0,3266 \cdot 914,63 = 298,7 \text{ кВт}.$$

СПГ газифицировать и подогревать ПГ необходимо для всей котельной. При работе двух котлов тепловая мощность составит:

$$Q_{\text{СПГ}2} = 2 \cdot 298,7 = 597,4 \text{ кВт}.$$

Тепловая мощность на подогрев подпитки и газификации СПГ и подогрева ПГ составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{подп}} + Q_{\text{СПГ}2} = 209,7 + 597,4 = 807,1 \text{ кВт}.$$

Это от тепловой мощности $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ продуктов сгорания, охлажденных до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и замороженных, составит следующую долю:

$$X = Q_{\Sigma} / Q_{\text{H}_2\text{O}} = 807,1 / 2204 = 0,366 = 36,6 \text{ } \%$$

Эту часть продуктов сгорания направить через подогреватель воды подпитки и через испаритель СПГ. Тогда температура продуктов сгорания после смешивания составит $200 \cdot (1-0,366) = 126,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Данную величину можно увеличить, если продукты сгорания охладить до температуры $-90 \text{ }^\circ\text{C}$, при которой углекислый газ перейдет в твердую фазу «сухой лед». При этом тепловая мощность увеличится на величину:

$$Q_{\text{CO}_2} = V \cdot (c_{\text{лс}} \cdot 90 + \rho_{\text{CO}_2} \cdot V_{0, \text{CO}_2} \cdot \gamma_{\text{CO}_2}) = 0,3266 \cdot (1,042 \cdot 90 + 1,964 \cdot 1,05 \cdot 523,5) = 394,4 \text{ кВт}.$$

Тепловая мощность на подогрев подпитки и газификации СПГ и подогрева ПГ и получения «сухого льда» составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{подп}} + Q_{\text{СПГ}2} + Q_{\text{CO}_2} = 209,7 + 597,4 + 394,4 = 1201,5 \text{ кВт}.$$

Доля продуктов сгорания, идущая на процесс, составит:

$$X = Q_{\Sigma} / Q_{\text{H}_2\text{O}} = 1201,5 / 2204 = 0,5451 = 54,51 \text{ } \%$$

Тогда температура продуктов сгорания после смешивания составит:

$$[200 \cdot (1-0,5451) - 90 \cdot 0,5451] = 41,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При этом в части продуктов сгорания останется только азот и избыточный кислород, что благоприятно для работы дымоходов и дымовой трубы.

Схема для обеспечения частичного конденсационного режима работы котла с газификацией СПГ представлена на рисунке 1. Она позволяет проводить газификацию СПГ продуктами сгорания в непрерывном процессе при помощи двух испарителей, которые попеременно работают в режиме испарения СПГ и в режиме оттайки, что исключает механическую чистку труб испарителей.

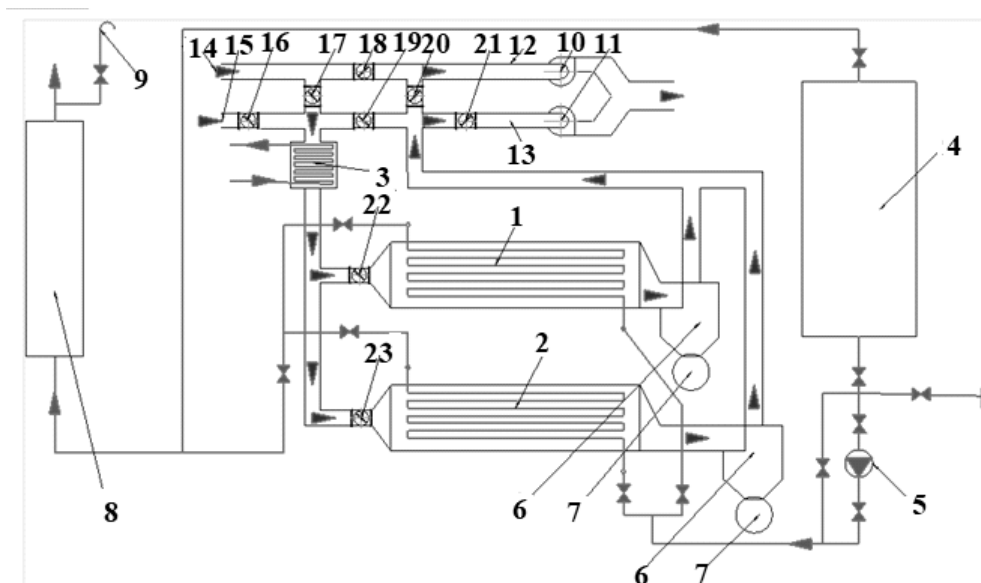


Рис. 1. Схема газификации СПГ: 1, 2 – испаритель СПГ; 3 – подогреватель подпиточной воды; 4 – хранилище СПГ; 5 – насос криогенный; 6 – циклон для улавливания льда; 7 – дисковый питатель; 8 – ресивер ПГ; 9 – свеча безопасности; 10, 11 – дымососы; 12 – дымоход котла 1; 13 – дымоход котла 2; 14 – подвод продуктов сгорания котла 1; 15 – подвод продуктов сгорания котла 2; 16–23 – шиберы регулировочные

При работе испарителя 1 от котла 1 продукты сгорания направляются в него через открытые шиберы 17, 23 и 20 (остальные шиберы закрыты); шибер 23 приоткрыт для оттайки испарителя 2. Температуру на выходе из циклона 6 за испарителем 1 поддерживают в районе $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ при помощи шибера 18. СПГ при этом полностью подают при помощи соответствующего переключения запорной арматуры. В это время испаритель 2 без подачи СПГ омывается частью продуктов сгорания и в нем на поверхности труб происходит плавление водяного и «сухого льда», конденсат стекает в низ циклона 6 и удаляется через дисковый питатель 7, а испарившийся углекислый газ уходит через шибер 20. Часть водяного льда и «сухого льда», не осевшая на поверхности труб и унесенная в циклон 6, отделяется от продуктов сгорания и при заполнении нижней части циклона удаляется из нее через дисковый питатель 7 в емкости с тепловой изоляцией (на рисунке не показана).

После того, как трубы испарителя 1 покроются слоем льда, что можно заметить по повышению температуры продуктов сгорания на выходе из циклона, необходимо произвести переключение работы испарителей: испаритель 1 поставить на оттайку, а испаритель 2 пустить на газификацию СПГ соответствующими переключениями шиберов продуктов сгорания и газовой запорной арматуры.

При работе такой схемы из всей части продуктов сгорания, прошедших испаритель, будет получен весь конденсат водяных паров и часть «сухого льда», которая была унесена потоком продуктов сгорания в циклон. Для количественной оценки выноса «сухого льда» необходимо провести дополнительные испытания установки.

Предложенная схема использования холода СПГ безусловно эффективна, максимально экологична (практически реализуется декарбонизация уходящих газов), вместе с тем достаточно сложна из-за наличия большого количества газоходов с регулируемыми шиберами, требует специальной системы автоматизации и может быть применена при полной реконструкции существующих котельных и ее безусловно стоит

проектировать и применять при строительстве новых котельных на СПГ.

Существующим котельным для обеспечения бесперебойной газификации СПГ с получением водяного конденсата, но уже из атмосферного воздуха, подойдет схема газификации СПГ, предложенная в работах [4–7]. Авторы в этих работах предлагают использовать атмосферные испарители с принудительной конвекцией и обогревом при помощи вентиляторов и электрического подогрева воздуха. Для непрерывной работы системы создается схема, включающая два испарителя или количество испарителей, кратное двум, с автоматическим переключением потоков криопродукта. Схема такой установки показана на рисунке 2.

В конце 2015 г. специалистами компании ООО «НПО Мониторинг» была разработана конструкция испарителей с принудительной конвекцией и системой обогрева теплообменной поверхности аппарата. Секция теплообменных элементов испарителя заключена в кожух для создания направленного потока воздуха вдоль оребренных труб. Поток воздуха подается осевым вентилятором, установленным в верхней части аппарата. В нижней части испарителя смонтирован шкаф управления, а также блок ТЭНов, предназначенный для обогрева («регенерации») аппарата по определенной программе. Для повышения эффективности обогрева испарителя между вентилятором и зоной размещения теплообменных элементов устанавливается приводная заслонка, блокирующая поток естественной циркуляции нагретого воздуха во время обогрева испарителя.

Атмосферные испарители с системой принудительной конвекции и блоком ТЭНов для обогрева аппарата обеспечивают непрерывную газификацию криопродукта в течение 24-х часов в сутки, семь дней в неделю при любой температуре окружающего воздуха. При этом затраты внешней электрической или тепловой энергии при таком способе газификации составляют менее 15 % от затрат на газификацию криопродукта с использованием электрических или пароводяных испарителей.

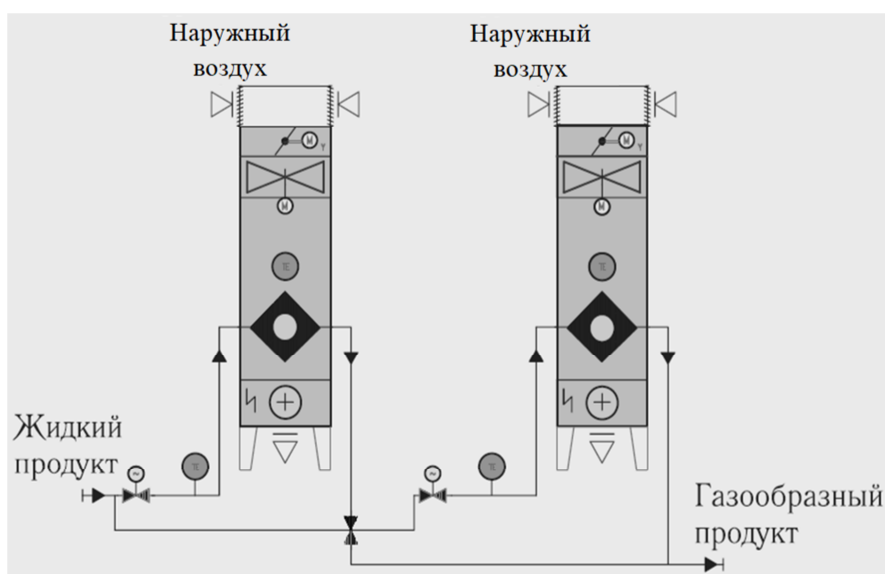


Рис. 2. Схема включения испарителей с системой принудительного обогрева

По нашему мнению, данную схему при проведении газификации СПГ для котельной можно реконструировать путем замены электрического подогрева ПГ за испарителем на подогреватель калориферный с промежуточным теплоносителем, который получает тепло уходящих продуктов сгорания от одного из котлов котельной.

Для рассмотренной выше котельной промежуточный теплоноситель при охлаждении части продуктов сгорания до температуры 0 °С (без заморозки воды) может получить следующее количество тепла:

$$Q_{H_2O} = Q_{охл} + Q_{кон} = 283,8 + 1693,9 + 226,3 = 1978 \text{ кВт},$$

где $Q_{охл} = V \cdot V_{0,H_2O}^H \cdot q_{охл} = 0,3944 \cdot 2,14 \cdot 335,6 = 283,8 \text{ кВт}$ – тепловая мощность охлаждения водяных паров; $q_{охл} = c_{п} \cdot (200 - 52) = 2,200 \cdot (200 - 52) = 335,6 \text{ кДж/м}^3$ – теплота охлаждения паров воды до момента конденсации, отнесенная к 1 м³ водяных паров; $Q_{кон} = V \cdot r_{кон} \cdot m_{H_2O} = 0,3944 \cdot 2500 \cdot 1,718 = 1693,9 \text{ кВт}$ – тепловая мощность конденсации водяных паров.

При температуре ПГ за испарителем -50 °С для нагрева его для двух котлов до 27 °С потребуется:

$$q_{п} = i_{300K} - i'' = 1200,2 - 846,1 = 354,1 \text{ кДж/кг},$$

где $i_{300K} = 1200,2 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия при температуре $T_0 = 300 \text{ К}$ (27 °С); $i'' = 846,1 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия при температуре испарения СПГ $T_{и} = 223 \text{ К}$ (-50 °С).

Тепловая мощность для этого составит:

$$Q_{СПГ} = V \cdot q_0 = 0,3266 \cdot 354,1 = 115,44 \text{ кВт}.$$

СПГ газифицировать и подогревать ПГ необходимо для всей котельной. При работе двух котлов тепловая мощность подогревателя промежуточного теплоносителя составит:

$$Q_{СПГ2} = 2 \cdot 115,44 = 230,9 \text{ кВт}.$$

Доля продуктов сгорания одного котла для обеспечения этого процесса составит:

$$x = Q_{СПГ2} / (0,95 \cdot Q_{H_2O}) = 230,9 / (0,95 \cdot 1978) = 0,123 = 12,3 \text{ \%}.$$

Из этой доли продуктов сгорания выделится следующее количество конденсата водяных паров:

$$W_{кон} = x \cdot V \cdot m_{H_2O} = 0,123 \cdot 0,0394 \cdot 1,718 = 0,00758 \text{ кг/с} = 27,29 \text{ кг/ч}.$$

При оттайке выделится конденсат отложений инея из воздуха. Для этого необходимо направить в неработающий испаритель часть горячего термомасла при выключенном вентиляторе и перекрытии воздушного канала. Это потребует подачи дополнительного количества продуктов сгорания в подогреватель термомасла.

Схема подключения подогревателя промежуточного теплоносителя (термомасла) показана на рисунке 3.

В качестве теплообменников «Продукты сгорания – термомасло» и «Воздух – термомасло» применим водовоздушные калориферы КСк-4 Костромского завода [8]. Использование калориферов КСк-4 в качестве конденсационных утилизаторов тепла рассмотрено в работе [2]. Автор экспериментально определил для этих теплообменников коэффициенты теплопередачи от продуктов сгорания при конденсации в них водяных паров к нагреваемой жидкой среде. По данным [2] коэффициенты теплопередачи составляет $k = 50 \dots 60 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Для рассмотренной схемы при среднем температурном перепаде $\Delta t = 25 \text{ °С}$ калорифера должна быть:

$$F = Q_{СПГ2} / (k \cdot \Delta t) = 230 \cdot 10^3 / (55 \cdot 25) = 167 \text{ м}^2.$$

Серийно выпускается калорифер КСк4-12-02ХЛЗБ, который имеет площадь теплопередачи 172,4 м² и площадь фронтального сечения 2,488 м², что вполне удовлетворяет нашим требованиям.

Схема газификации СПГ с промежуточным теплоносителем выполнима на базе серийно выпускаемых атмосферных испарителей фирмы ООО «НПО Мониторинг» и калориферов КСк-4, выпускаемых фирмой ОАО «Калориферный завод» (г. Кострома). Для этого можно использовать испарители необходимой мощности, под которыми следует дополнительно установить калориферы. Электрические подогреватели можно оставить в качестве резервных.

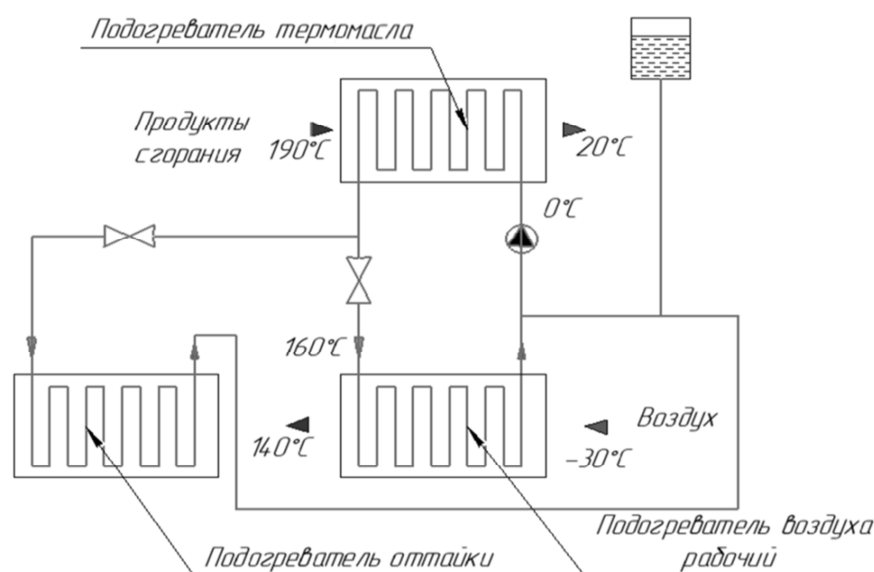


Рис. 3. Схема подключения подогревателя промежуточного теплоносителя (термомасла)

Ныне активное и безусловно перспективное использование СПГ в качестве топлива котельных требует проектировать и применять при строительстве новых существенную модернизацию, при которой СПГ непосредственно участвует в процессе регазификации и обеспечивает при этом высокую эффективность и максимально экологичность, так как при этом практически реализуется декарбонизация уходящих газов, возможно получение таких востребованных продуктов, как азот, дистиллят и сухой лед.

Для существующих и эксплуатируемых на СПГ котельных с целью обеспечения их бесперебойной и экономичной работы и для исключения затрат на обслуживание при механической очистке поверхностей испарителя от отложений инея и снега, следует существенно модернизировать схему регазификации путем перехода на спаренные испарители СПГ, один из которых выполняет основную функцию – газификация СПГ и подогрев полученного ПГ, а второй в это время работает в режиме оттайки. При этом не потребуются расходование энергии на подогрев, а предлагается использовать бросовое тепло уходящих продуктов сгорания.

В зависимости от принятой схемы обеспечен как переход котлов на конденсационный режим работы, так и получение из продуктов сгорания сопутствующих материалов, таких как водяной лед, «сухой лед», азот и конденсат водяных паров из воздуха.

Литература

1. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : НПОЦКТИ, 1998. – 266 с.
2. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А. А. Кудинов. – Москва : Машиностроение, 2011. – 373 с. – URL: <https://www.co-k.ru/library/document/12863/35756.pdf> (дата обращения: 06.12.2024). – Текст : электронный.
3. Наумов Федор Валерьевич. Автоматизированный расчет газификатора сжиженного природного газа. – URL: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/605a6855ccefde000190a69e.pdf?ysclid=lpwmbwlbwr786993218> (дата обращения: 06.12.2024). – Текст : электронный.
4. Иванов, К. А. Современные атмосферные испарители криогенных жидкостей / К. А. Иванов, Н. В. Павлов // Технические газы. – 2010. – № 3. – С. 31–34.
5. Иванов, К. А. Атмосферные испарители высокого давления для газификации сжиженных ПРВ и СПГ / Иванов К. А., Павлов Н. В. // Технические газы. – 2012. – № 3. – С. 28–30.
6. Иванов, К. А. Использование атмосферных спарителей в системах хранения и газификации жидких криопродуктов / Иванов К. А., Павлов Н. В. // Технические газы. – 2013. – № 4. – С. 70–72.
7. Иванов, К. А. Атмосферные испарители с принудительными конвекцией и отоплением / К. А. Иванов, Н. В. Павлов // Технические газы. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 65–68.

*S.P. Pantileev, V.S. Malyshev
Murmansk Arctic University*

NEW METHODS OF LNG REGASIFICATION TO INCREASE BOILER EQUIPMENT EFFICIENCY

The paper proposes regasification technologies that will ensure both high efficiency of boiler houses and their environmental cleanliness. Examples of regasification of boiler houses in the Murmansk region are given.

Liquefied natural gas (LNG), gas control station, boiler house, exhaust combustion products, autonomous regasification of LNG, fuel efficiency, environmental cleanliness, decarbonization (solid carbon dioxide (dry ice), commercial attractiveness.