

**ОХРАНА  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ  
ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВ В КОТЛАХ ТЭС И КОТЕЛЬНОЙ**

© 2022 г. П. В. Росляков<sup>а, \*</sup>, Б. А. Рыбаков<sup>б</sup>, М. А. Савитенко<sup>б</sup>, И. Л. Ионкин<sup>а</sup>, Б. Лунинг<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>б</sup>АНО “Центр исследований и научных разработок в области энергетики “Водородные технологические решения”,  
Большая Академическая ул., д. 5, корп. 1, оф. 412, Москва, 127299 Россия

<sup>с</sup>Clean Air Technologies AB, Skeppsbron 2, 211 20 Malmö Sweden

\*e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru

Поступила в редакцию 09.02.2022 г.

После доработки 17.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

В рамках выполнения Парижского соглашения во многих странах мира, включая Россию, проводится большая работа по сокращению выбросов парниковых газов. Одна из основных отраслей промышленности, являющаяся антропогенным источником парниковых газов, — угольная тепло- и электроэнергетика. Перспективной мерой по снижению выбросов углекислого газа в энергетике становится переход с угля на природный газ. При этом особое внимание уделяется сжиганию природного газа в смеси с водородом. В данной работе рассмотрены технические возможности сжигания водородсодержащих газов (ВСГ) в традиционных и конденсационных энергетических установках. Показано, что увеличение доли водорода в смеси с природным газом при сжигании в котлах вызовет изменение тепловосприятия всех поверхностей нагрева, расположенных в газовом тракте котла, температуры газов и, в конечном итоге, КПД котла, что потребует серьезного пересмотра конструкции традиционных газовых и пылеугольных котлов. Одновременно добавка водорода в природный газ приводит к увеличению концентрационной области устойчивого горения такой смеси и росту скорости нормального распространения пламени, что не только играет положительную роль, но и несколько осложняет практическую реализацию сжигания смеси водорода с природным газом в горелочных устройствах и энергетических установках. Необходимо принять меры, исключающие возможность самовоспламенения водородсодержащих газов ввиду их повышенной пожаро- и взрывоопасности, в том числе рассмотреть вопросы размещения технологического оборудования и транспортировки водорода. Одновременное снижение выбросов в атмосферу как водяного пара, так и углекислого газа при сжигании природного и водородсодержащих газов в паровых и водогрейных котлах возможно при использовании конденсационных теплоутилизаторов, что позволит повысить эффективность использования топлива и увеличить тепловую мощность энергетической установки.

*Ключевые слова:* котел, парниковые газы, природный газ, водород, водородсодержащие газы, число Воббе

**DOI:** 10.56304/S0040363622090041

В настоящее время в мире все большее внимание уделяется проблеме глобального потепления, вызванного антропогенными выбросами парниковых газов в атмосферу. В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями большинство стран мира присоединились к Парижскому соглашению [1], цель которого — существенное сокращение глобальных выбросов парниковых газов и ограничение повышения средней климатической температуры в этом столетии не более чем на 2°C. Следуя данному соглашению, страны объявили климатические цели и обязательства по сокращению выбросов парниковых газов и намерены обеспечить углеродную нейтральность к 2050–2060 гг. [2, 3].

Россия подписала Парижское соглашение в 2016 г., в результате чего указом Президента страны Правительству РФ было поручено обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70% относительно их уровня в 1990 г., разработать стратегию по снижению выбросов парниковых газов до 2050 г. и создать условия для реализации мер по сокращению и предотвращению выбросов парниковых газов [4, 5].

#### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Основные парниковые газы Земли: водяной пар H<sub>2</sub>O, углекислый газ CO<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, оксид азота (I) N<sub>2</sub>O и озон O<sub>3</sub> (табл. 1) [6] — обладают вы-

**Таблица 1.** Перечень парниковых газов [5]

Газ	Вклад воздействия на тепловой баланс, %	Концентрация в атмосфере
Водяной пар H <sub>2</sub> O	36–72	–
Углекислый газ CO <sub>2</sub>	9–26	405.5 ± 0.1 ppm*
Метан CH <sub>4</sub>	4–9	1859 ± 2 ppb**
Озон O <sub>3</sub>	3–7	–
Оксид азота N <sub>2</sub> O	–	329.9 ± 0.1 ppb

\* ppm –  $1 \times 10^{-6}$  базового показателя, 1 ppm = 0.0001%.

\*\* ppb –  $1 \times 10^{-9}$  базового показателя, 1 ppb = 0.0000001%.

сокими прозрачностью в видимом диапазоне частот и поглощением излучения в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах. Вследствие наличия таких газов в атмосфере Земли возникает парниковый эффект, который приводит к глобальному потеплению, что в ближайшем будущем может стать причиной экологической катастрофы. Однако следует отметить, что в соответствии с Киотским протоколом пары воды не включены в список парниковых газов.

Потенциально в парниковый эффект могут внести вклад и антропогенные галогенированные углеводороды, однако из-за их низкой концентрации в атмосфере оценка их влияния проблематична. Поэтому при решении проблемы глобального потепления основной акцент делается на снижении выбросов в атмосферу углекислого газа.

Основными антропогенными источниками парниковых газов являются теплоэнергетика (выбросы от сжигания органических топлив достигают 29% всех антропогенных выбросов), промышленность (18%), транспорт (13%), сельское хозяйство (11%), сжигание газа в факелах и утечка метана (8%) [7]. Причина большой доли теплоэнергетики в выбросах парниковых газов – высокие удельные выбросы углекислого газа при сжигании угля, которые на единицу полученной тепловой энергии в 1.8 раза превышают выбросы от сжигания природного газа и в 1.3 раза – нефти [8].

Для снижения выбросов углекислого газа в атмосферу на ТЭС и в котельных принципиально возможны и в настоящее время активно реализуются следующие традиционные подходы:

переход с угля на природный газ;

повышение КПД конденсационной электростанции при производстве электрической энергии путем модернизации действующего и внедрения нового оборудования, в том числе с повышенными (супер- и ультракритическими) параметрами пара;

внедрение когенерации тепловой и электрической энергии на ТЭС, позволяющей повысить эффективность (коэффициент) использования теплоты сгорания топлива;

внедрение парогазовых установок на ТЭС.

В связи с происходящими в электроэнергетике структурными изменениями ожидается также ускоренное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), распределенной генерации, систем накопления энергии, а также энергетического использования водорода в целях быстрого замещения углеводородной генерации в энергетике [9].

### ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные оценки показывают, что переход с угля на природный газ позволяет снизить выбросы углекислого газа примерно на 40–50% [2, 10]. Так, при полном сжигании 1 кг метана – основного компонента природного газа – в атмосферу выбрасывается 2.75 кг CO<sub>2</sub> и выделяется 50 МДж тепла, а при сжигании 1 кг углерода (основного компонента угля и кокса) – 3.67 кг CO<sub>2</sub> и около 34 МДж тепла. Принимая во внимание, что низшая теплота сгорания углерода (в расчете на 1 кг массы) примерно в 1.47 раза меньше, чем у метана, можно констатировать, что выбросы углекислого газа в атмосферу при сжигании углерода для получения эквивалентного количества тепла составят более 5.4 кг.

В табл. 2 приведены расчетные оценки выбросов парниковых газов ТЭС и котельных, в котлах которых сжигают энергетические угли с меньшей, чем у природного газа, теплотой сгорания. Очевидно, что перевод котлов ТЭС и котельных на сжигание природного газа приведет к существенному снижению выбросов углекислого газа в атмосферу, дальнейшее уменьшение которых при сжигании природного газа возможно при подмешивании к нему ВСГ, в том числе чистого водорода.

В настоящее время в России и за рубежом прорабатываются вопросы использования избытка электроэнергии на АЭС, ГЭС, ВЭС и СЭС (ветровой и солнечной электростанциях) для выработки водорода. При этом наряду с развитием независимой водородной инфраструктуры рассматриваются также предложения о возможности добавления водорода к природному газу в магистральных и распределительных сетях [9].

Таблица 2. Характеристики энергетических топлив

Топливо	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Выход основных продуктов сгорания при сжигании 1 кг стехиометрической смеси топлива			
		кг/(кг топлива)		кг/кг у.т.*	
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Метан	50.00	2.75	2.25	1.61	1.32
Природный газ	41.00–49.00	2.67–2.69	1.38–2.37	1.61–1.77	1.31–1.42
Углерод (чистый)	34.00	3.67	0	3.17	0
Антрацит	22.4–25.24	2.22–2.47	0.23–0.33	2.88–3.06	0.30–0.44
Каменные угли	15.86–26.71	1.51–2.49	0.42–0.55	2.73–2.80	0.51–0.89
Бурые угли	9.29–17.25	0.98–1.75	0.60–1.08	2.97–3.10	1.03–3.40

\* В пересчете на 1 кг условного топлива с низшей теплотой сгорания 7000 ккал/кг = 29.33 МДж/кг [11].

Так, в плане мероприятий (“дорожной карте”) по развитию водородной энергетики в России до 2024 г. [12], направленных на увеличение производства водорода и расширение сферы его применения в качестве экологически чистого энергоносителя, предусмотрено создание энергетических установок, работающих на водороде и ВСГ, например котлов и газотурбинных установок (ГТУ). Также планируется внедрение технологий распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии, органических топлив и водорода и интеллектуальных систем управления ими [13].

### ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

При использовании ВСГ появляется реальная возможность снизить эмиссию углекислого газа по сравнению со сжиганием природного газа. Расчетные оценки показывают, что при добавлении 20–30% (по объему) водорода в существующую систему транспортировки и распределения природного газа можно путем сжигания такой ВСГ снизить выбросы углекислого газа в атмосферу на 7–11%. При этом переход на сжигание чистого водорода позволяет обеспечить полную углеродную нейтральность продуктов сгорания (рис. 1).

Для оценки взаимозаменяемости горючих газов (в данном случае природного газа и его смеси с водородом) при сжигании в бытовых и промышленных горелочных устройствах без их изменения используется высшее ( $W_{o,v}$ ) или низшее ( $W_{o,n}$ ) объемное число Воббе (Wobbe Index – W) [14]:

$$W_{o,v, o,n} = \frac{Q_{v,n}^p}{\sqrt{\rho_f / \rho_v}}, \quad (1)$$

где  $Q_{v,n}^p$  – объемная теплота сгорания (высшая или низшая), МДж/м<sup>3</sup>;  $\rho_f, \rho_v$  – плотность газообразного

топлива и воздуха соответственно при стандартных условиях ( $t = 20^\circ\text{C}, p = 101.3 \text{ кПа}$ ), кг/м<sup>3</sup>.

Число Воббе характеризует постоянство теплового потока (тепловой мощности), получаемого при сжигании газа. Газы с одинаковыми или близкими числами Воббе (допустимые отклонения  $W_{o,v, o,n}$  от номинального значения не должны превышать  $\pm 5\%$ ) при равном давлении истечения обычно могут использоваться один вместо другого без замены горелки или форсунки. Если в одной горелке сжигаются горючие газы с разными числами Воббе, то газ с меньшим  $W_{o,v, o,n}$  должен подводиться при большем давлении [14–16].

В табл. 3 для сравнения приведены значения плотности, теплоты сгорания и низшего числа Воббе для природного газа, метана и водорода. Как следует из данных этой таблицы, объемная низшая теплота сгорания водорода в 3.4 раза меньше, чем у природного газа. Однако из-за того, что плотность водорода в 8.3 раза ниже плотности природного газа, массовая теплота сгорания первого в 2.4 раза выше, чем второго. На рис. 2 представлены расчетные зависимости плотности, объемной низшей теплоты сгорания и объемного числа Воббе смеси природного газа с водородом от его объемной доли (значения получены при нормальных условиях).

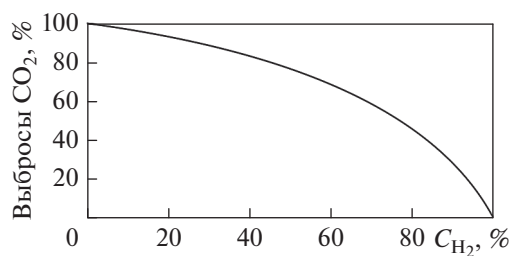
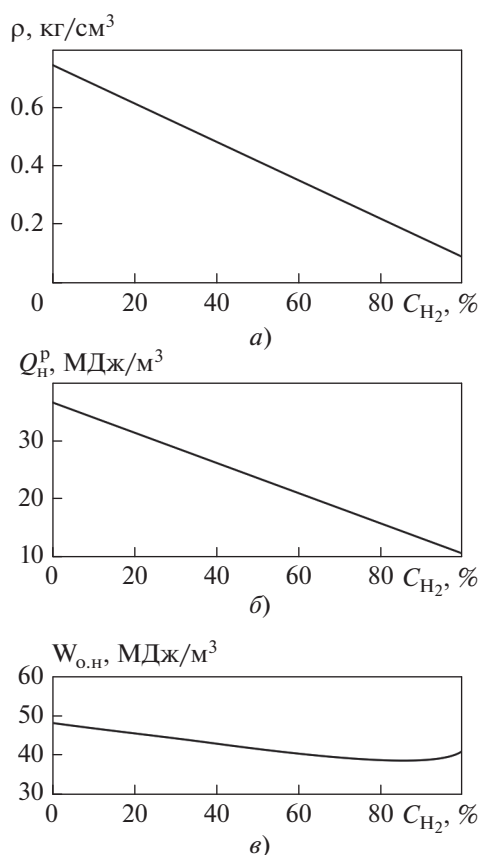


Рис. 1. Снижение выбросов углекислого газа от концентрации водорода в ВСГ  $C_{H_2}$  (смесь природного газ – водород)



**Рис. 2.** Зависимости объемной плотности  $\rho$  (а), объемной низшей теплоты сгорания  $Q_H^p$  (б) и объемного низшего числа Воббе  $W_{o.n}$  (в) смеси природного газа с водородом от объемной доли водорода

Поскольку значения объемного числа Воббе у водорода ниже, чем у природного газа (см. табл. 3), то увеличение его доли в смеси с природным газом до 80–85% приведет к уменьшению числа Воббе. Небольшое повышение числа Воббе на-

блюдается только при возрастании доли водорода сверх 80% (см. рис. 2, в). Кроме того, увеличение доли водорода в смеси с природным газом при сжигании в котлах приведет к изменению светимости факела и, соответственно, к изменению теплоотдачи на поверхности топочной камеры. В этом случае с ростом доли водорода в смеси при сохранении тепловой мощности котла объемный расход образовавшихся продуктов сгорания будет уменьшаться, что, в свою очередь, вызовет изменение теплоотдачи на всех поверхностях нагрева, расположенных в газовом тракте котла, температуры газов и, в конечном итоге, КПД котла. Все это потребует серьезного пересмотра конструкции традиционных газовых и пылеугольных котлов.

На рис. 3 приведены результаты расчетов изменения объемных расходов подаваемого топлива и продуктов его сгорания, а также КПД для котла ПТВМ-100 тепловой мощностью 116 МВт в зависимости от объемной доли водорода в смеси.

На представленных графиках видно, что при сохранении тепловой мощности котла с увеличением доли водорода в ВСГ возрастает ее объемный расход, но при этом уменьшается объем продуктов сгорания. В результате из-за снижения потерь с уходящими газами тепловой КПД котла увеличивается. Однако, согласно предварительным расчетным оценкам, небольшой рост КПД котла при замещении природного газа водородом в традиционных энергоустановках не сможет в полной мере компенсировать увеличение себестоимости производства тепловой и электрической энергии из-за высоких затрат на получение водорода.

Способность горючих газов к устойчивому воспламенению и горению определяется концентрационными пределами воспламенения и скоростью нормального распространения пламени. Верхний и нижний концентрационные пределы распространения пламени характеризуют макси-

**Таблица 3.** Характеристики различных горючих газов\* [17]

Характеристика	Природный газ	Метан	Водород
Объемная теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup> :			
низшая	36.600	35.880	10.79
высшая	40.730	39.820	12.75
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	0.746	0.717	0.09
Относительная плотность ( $\rho_{г}/\rho_{в}$ )	0.580	0.555	0.07
Массовая теплота сгорания, МДж/кг:			
низшая	49.062	50.040	119.89
высшая	54.600	55.700	140.00
Нижнее число Воббе (W), МДж/м <sup>3</sup>	48.000	48.200	40.70

\* Значения приведенных в таблице характеристик получены при нормальных условиях (0°C, 101.3 кПа).

мальное и минимальное содержание горючего в смеси горючее—окислитель, при котором возможно распространение пламени в ней от источника зажигания. Нижний предел воспламенения ограничивает распространение пламени из-за разбавления горючей смеси избыточным воздухом (переобедненная смесь), а верхний — из-за избытка горючего (переобогащенная смесь). Чем больше разность между высшим и низшим концентрационными пределами воспламенения горючего газа, тем больше концентрационная область его устойчивого горения.

В табл. 4 приведены пределы воспламенения различных горючих газов и расчетные пределы для смеси природного газа и водорода в различных соотношениях. Концентрационная область горения водорода в воздушных смесях существенно шире, чем у природного газа, поэтому добавка водорода в природный газ приводит к увеличению области устойчивого горения такой смеси. Характерно, что в смеси природный газ — водород нижний предел воспламенения независимо от доли водорода изменяется в нешироком диапазоне 4.2–4.8% (т.е. содержание водорода оказывает на него незначительное влияние). В то же время диапазон изменения верхнего предела воспламенения смеси природный газ — водород составляет 14.7–68.3% и заметно возрастает с увеличением в ней доли водорода.

Другой важный показатель процесса горения газообразных топлив — нормальная скорость распространения пламени  $U_n$ , см/с, т.е. скорость распространения фронта пламени относительно свежей смеси по нормали к поверхности фронта пламени благодаря молекулярной теплопроводности и диффузии активных центров в несгоревшую смесь [17]. Эта скорость характеризует физико-химические свойства горючей смеси и не зависит от гидродинамических условий. Для организации стационарного пламени при горении в потоке горючая смесь должна поступать к фронту пламени со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени  $U_n$  [18, 19].

Для газообразных горючих смесей  $U_n$  подчиняется закону аддитивности. Максимальное значение  $U_n$  для конкретной смеси природного газа и водорода при горении в воздухе определяется по формуле [18, 19]

$$U_n = (C_1 u_1 + C_2 u_2 + \dots + C_n u_n) / 100\%, \quad (2)$$

где  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) — объемные концентрации компонентов газовой смеси, %;  $u_i$  — максимальные скорости распространения пламени при горении газов (не смесей) в воздухе, м/с.

В табл. 5 приведены расчетные значения скорости нормального распространения пламени для различных газов и газовых смесей (при температуре 20°C и давлении 101.3 кПа). Из данных

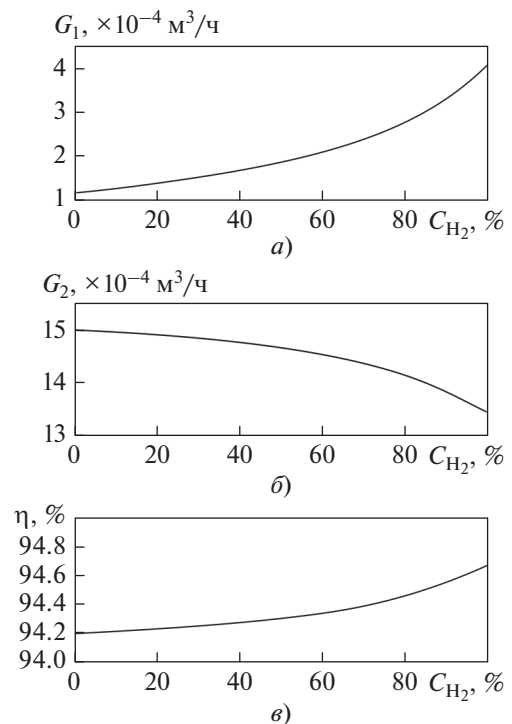


Рис. 3. Расчетные зависимости объемных расходов подаваемой ВСГ  $G_1$  (а), продуктов сгорания  $G_2$  (б) и КПД котла  $\eta$  (в) от объемной доли водорода в ВСГ для котла ПТВМ-100 (расчеты выполнены для номинальной тепловой нагрузки котла при сжигании смеси метана с водородом с коэффициентом избытка воздуха в уходящих газах 1.15)

табл. 5 следует, что с ростом доли водорода в его смеси с природным газом  $U_n$  линейно увеличивается. Этот факт, а также отмеченное ранее расширение концентрационной области устойчивого горения таких смесей однозначно указывают на рост реакционной способности смесей природного газа с водородом. Последнее не только играет положительную роль, но и несколько осложняет практическую реализацию сжигания таких смесей в существующих горелочных устройствах и энергетических установках.

Так, ввиду повышенных для ВСГ скоростей распространения пламени необходимо поддерживать соответствующие скорости подачи топливовоздушной смеси для предотвращения “проскока пламени” в горелочное устройство. Это, в свою очередь, обеспечивается повышенными давлениями ВСГ перед горелкой (о чем уже говорилось ранее) и приводит к росту ее гидравлического сопротивления. Поэтому в горелочных устройствах, адаптированных для сжигания ВСГ и водорода, должна быть предусмотрена защита от распространения пламени вверх по потоку. Конструктивно это может быть выполнено по аналогии с горелками предварительного смешения в малоэмиссион-

**Таблица 4.** Пределы воспламенения горючих газов в воздушных смесях при атмосферном давлении и температуре 20°C [18]

Горючий газ	Концентрационные пределы воспламенения в воздушных смесях, % газа (по объему)	
	нижний	верхний
Водород H <sub>2</sub>	4.1	74.2
Метан CH <sub>4</sub>	5.3	14.0
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.2	12.5
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.4	9.5
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.9	8.4
Пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1.4	7.8
Природный газ (ПГ)	4.8	14.7
90% ПГ + 10% H <sub>2</sub>	4.7	20.7
80% ПГ + 20% H <sub>2</sub>	4.6	26.6
70% ПГ + 30% H <sub>2</sub>	4.6	32.6
60% ПГ + 40% H <sub>2</sub>	4.5	38.5
50% ПГ + 50% H <sub>2</sub>	4.4	44.5
40% ПГ + 60% H <sub>2</sub>	4.4	50.4
30% ПГ + 70% H <sub>2</sub>	4.3	56.4
20% ПГ + 80% H <sub>2</sub>	4.2	62.3
10% ПГ + 90% H <sub>2</sub>	4.2	68.3

ных камерах сгорания ГТУ. Проходные сечения в данных горелках подобраны так, что скорость подачи смеси в зоне предварительного смешения превышает скорость распространения пламени и таким образом исключается его проскок к топливным коллекторам. После выхода из зоны предварительного смешения в результате расширения сечения пламенной трубы скорость смеси снижается, что обеспечивает устойчивое воспламенение смеси [20].

**Таблица 5.** Расчетные скорости распространения пламени в стехиометрических газозвушных смесях (при температуре 20°C и давлении 101.3 кПа)

Газ	Содержание в смеси, % (по объему)		Нормальная скорость распространения пламени, м/с
	газа	водорода	
Водород H <sub>2</sub>	—	100	1.600
Метан CH <sub>4</sub>	100	0	0.280
Природный газ	100	0	0.282
Смесь природного газа и водорода	90	10	0.412
	70	30	0.676
	50	50	0.940
	30	70	1.204
	10	90	1.468

Кроме того, при увеличении температуры и давления концентрационные пределы взрываемости газовых смесей расширяются. Поэтому необходимо принимать меры предосторожности, исключающие возможность самовоспламенения таких ВСГ из-за их повышенной пожаро- и взрывоопасности, в том числе следует уделять особое внимание вопросам размещения технологического оборудования и транспортировки водорода.

Очевидно также, что переход на сжигание ВСГ и тем более чистого водорода в топках уже созданных и эксплуатируемых котлов потребует определенной их доработки и реализации некоторых обязательных конструктивных и технических мероприятий, в первую очередь это касается горелочных устройств и газоподводящего оборудования.

Как было показано ранее, допустимое изменение числа Воббе в пределах  $\pm 5\%$  [14] достигается при содержании водорода в смеси с природным газом не более 20% (по объему). Для сжигания таких ВСГ с меньшей концентрацией водорода принципиально могут использоваться обычные горелочные устройства, работающие на природном газе, а также их газоподводящие трубопроводы с традиционным (рабочим) избыточным давлением.

При сжигании ВСГ с более высокой объемной концентрацией водорода (не менее 20%) уже потребуются замена или модернизация горелочного устройства. Вследствие того что объемная теплота сгорания водорода существенно ниже, чем у природного газа, при увеличении его доли в смеси с последним проходные сечения подводящих газопроводов и оборудования системы подготовки топливного газа (фильтров, запорно-регулирующей арматуры и др.) должны быть увеличены по сравнению с проходными сечениями газопроводов, рассчитанных на работу на природном газе. В связи с тем что объемное число Воббе водорода на 18% ниже такового у природного газа (т.е. превышает допустимое отклонение  $\pm 5\%$ ), водо-

род должен подводиться в горелки при большем давлении, чем при сжигании природного газа, что будет негативно влиять на взрывобезопасность водорода.

Газопроводы и запорно-регулирующая арматура должны быть изготовлены из материалов, позволяющих избежать водородного охрупчивания. В свою очередь, данная система подготовки ВСГ должна включать в себя устройства для предварительного смешения водорода с природным газом и иметь специальную систему мониторинга за состоянием оборудования и газопроводов.

Для обеспечения надежной эксплуатации оборудования при сжигании ВСГ необходимо перед пуском и после останова предусмотреть продувку газопроводов инертными газами, например азотом  $N_2$ . Кроме того, горелочные устройства должны иметь систему контроля факела и защиту от проскока пламени, для этого также потребуется модернизация всей системы автоматизированного управления котлом.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

При сжигании природного газа в атмосферу наряду с углекислым газом поступает водяной пар, причем в количестве большем, чем при сжигании угля (см. табл. 2). Так, например, при сжигании 1 кг  $CH_4$  в атмосферу выбрасывается 2.25 кг воды в виде водяного пара, который также относится к парниковым газам [6]. Поэтому все последствия перевода топливосжигающих установок с угля на природный газ должны быть тщательно изучены.

В данной статье рассматриваются вопросы снижения выбросов в атмосферу парниковых газов — как водяного пара, так и углекислого газа — при сжигании природного газа в паровых и водогрейных котлах. Один из способов одновременного уменьшения выбросов в атмосферу водяных паров и углекислого газа при этом процессе — конденсация водяных паров дымовых газов в конденсационных теплоутилизаторах перед их выбросом в атмосферный воздух.

Как известно, при сжигании органических топлив в традиционных паровых и водогрейных котлах самыми большими являются потери тепла с уходящими дымовыми газами  $q_2$ , температура которых составляет 130–200°C, т.е. существенно превышает температуру точки росы, соответствующую началу конденсации образовавшихся при сжигании водяных паров. Значение температуры точки росы зависит от вида и состава топлива, а также от коэффициента избытка воздуха и обычно равна 45–55°C. При этом влага, содержащаяся в продуктах сгорания, остается в парообразном

состоянии и выбрасывается в атмосферный воздух. Следовательно, теплота конденсации водяного пара в количестве 2500 кДж/кг безвозвратно теряется.

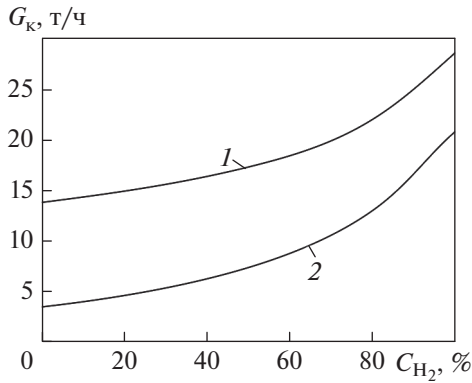
Скрытая теплота конденсации образовавшихся при сжигании топлива водяных паров равна разности между высшей  $Q_v$  и низшей  $Q_n$  теплотой его сгорания и для природного газа в зависимости от его состава соответствует 9–11%  $Q_n$ . Значит, полезное использование тепла, выделившегося при конденсации водяного пара дымовых газов при их охлаждении, повлечет за собой увеличение тепловой мощности энергоустановки или соответствующее уменьшение расхода природного газа при сохранении тепловой нагрузки, что однозначно приведет к уменьшению выбросов в атмосферу обоих парниковых газов.

Исторически сложилось, что при разработке котельных агрегатов необходимо избегать конденсации водяного пара, поскольку уголь и мазут, сжигаемые в котлах, содержат серу, которая при горении окисляется до оксидов ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ). При конденсации водяного пара в присутствии оксидов серы образуются сернистая и серная кислоты, являющиеся причиной низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котельных агрегатов.

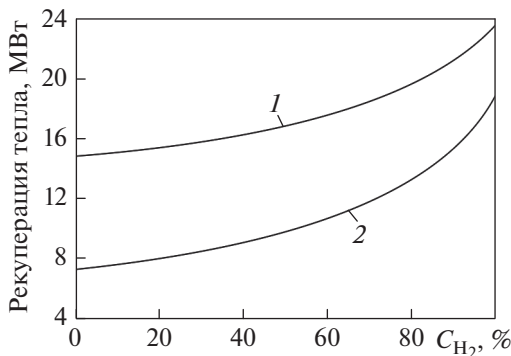
При сжигании природного газа, в составе которого практически отсутствуют сернистые соединения, можно получить дополнительную тепловую энергию благодаря конденсации водяного пара. Если снизить температуру уходящих газов до 30°C, то экономия топлива превысит 11%. Утилизация тепла уходящих дымовых газов широко распространена в странах Евросоюза. Большинство установок утилизации низкопотенциального тепла эксплуатируются на водогрейных и паровых котлах небольшой мощности (5–50 МВт), работающих на природном газе или биотопливе [21].

Разница между объемными высшей и низшей теплотой сгорания метана составляет 11%, а водорода — 18%. Таким образом, возможность использовать скрытую теплоту конденсации водяного пара при охлаждении дымовых газов ниже температуры точки росы при добавлении водорода в природный газ повышается, что при применении конденсоров (конденсационных теплоутилизаторов) приведет к более эффективной их работе благодаря увеличению объема сконденсировавшихся водяных паров и, соответственно, росту тепловой мощности энергоустановки.

Для сравнения, при сжигании 1 кг природного (трубопроводного) газа образуются 2.64 кг углекислого газа и 2.09 кг водяного пара, а при сжигании 1 кг водорода — 9 кг водяного пара при отсутствии  $CO_2$ . Для получения такого же количества тепловой энергии, как и при сжигании водорода, массовый расход природного газа в конденсационном котле должен быть примерно в 2.5 раза



**Рис. 4.** Зависимость выхода конденсата  $G_k$  от доли водорода в смеси с природным газом для различных температур охлаждения уходящих газов за конденсационным теплоутилизатором для котла ПТВМ-100 (тепловая мощность 116 МВт). Температура охлаждения уходящих газов, °С: 1 – 40; 2 – 55



**Рис. 5.** Рекуперация тепла в конденсационном теплоутилизаторе при сжигании природного газа в смеси с водородом в зависимости от доли водорода и температуры уходящих газов после конденсационного теплоутилизатора. Температура охлаждения уходящих газов, °С: 1 – 40; 2 – 55

больше массового расхода водорода. В свою очередь, при одинаковой тепловой мощности при сжигании чистого водорода массовый выход водяного пара будет в 1.7 раза больше, чем при сжигании природного газа.

Расчетные исследования показали (рис. 4), что при увеличении доли водорода в смеси с природным газом (от 0 до 100%) выход конденсата, образующегося в конденсационном теплоутилизаторе, заметно возрастает. При этом существенное влияние оказывает не только доля водорода в составе ВСГ, но и температура охлаждающей среды, при снижении которой массовый выход конденсата увеличивается. Так, при охлаждении дымовых газов до 55°C выход (расход) образовавшегося

конденсата при повышении доли водорода в ВСГ от 0 до 100% возрастает более чем в 5 раз, а при охлаждении до 40°C при тех же условиях – примерно в 2 раза. Однако абсолютное количество образовавшегося конденсата, естественно, больше при более низкой температуре уходящих газов (см. рис. 4). Поэтому чем ниже температура охлаждения дымовых газов в конденсаторе, тем существенней тепловой эффект от их конденсации и меньше объем выбросов водяных паров в атмосферу.

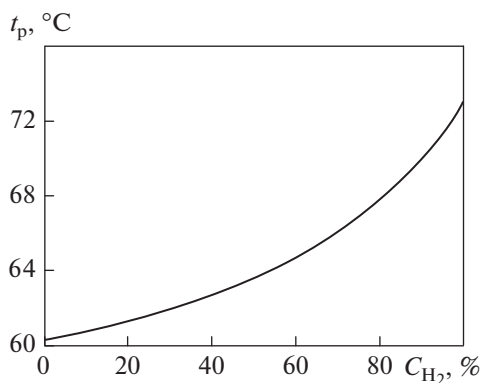
На рис. 5 приведена расчетная зависимость тепловой энергии (рекуперации тепла), получаемой в конденсационном теплоутилизаторе при сжигании ВСГ (смеси природного газа с водородом) в котле ПТВМ-100 (тепловая мощность 116 МВт) при различных соотношениях компонентов в смеси. Очевидно, что при меньшем охлаждении продуктов сгорания в конденсационном теплоутилизаторе (кривая 2) рост эффективности рекуперации при увеличении доли водорода будет более значительным, чем при более глубоком охлаждении газов (кривая 1).

Так как температура продуктов сгорания в большей степени определяется температурой среды, которой передается получаемое тепло (чаще всего обратная сетевая вода в теплосети), то при увеличении доли водорода в ВСГ можно добиться более высокой эффективности рекуперации даже при невозможности глубокого охлаждения дымовых газов в конденсационном теплоутилизаторе.

Тем не менее чем ниже температура обратной сетевой воды, тем активнее конденсация водяных паров и тем выше значение тепловой рекуперации (возврат тепловой энергии от уходящих дымовых газов), которая оказывает прямое влияние на снижение потребления энергии газовым конденсационным котлом. Кроме того, при увеличении доли водорода в топливе повышается содержание водяных паров в продуктах сгорания, в результате чего температура точки росы заметно возрастает. Теоретически при сжигании чистого водорода температура точки росы превышает 70°C (рис. 6), что также позволяет эффективнее использовать конденсационные теплоутилизаторы, так как в этом случае существенно возрастает доля использования тепла конденсации водяных паров и уменьшается потребление топлива конденсационным котлом при сохранении тепловой мощности или увеличивается тепловая мощность при сохранении неизменным расхода топлива.

В предыдущих работах авторов данной статьи [21, 22] было отмечено, что на эффективность процесса конденсации водяных паров существенно влияет коэффициент избытка воздуха, с увеличением которого происходит снижение температуры точки росы. Поэтому для повышения эффективности работы конденсационного теплоутилизатора





**Рис. 6.** Температура точки росы  $t_p$  водяных паров при сжигании смеси природного газа с водородом при стехиометрических условиях в зависимости от соотношения компонентов в смеси

требуется оптимизация процесса сжигания топлива.

Кроме того, при увеличении доли водорода в составе ВСГ возрастает количество конденсата, который после очистки может быть использован для различных целей, например для подпитки теплосети, увлажнения воздуха, подаваемого на горение, производства водородсодержащего газа методом паровой конверсии или получения водорода методом электролиза.

## ВЫВОДЫ

1. Благодаря переводу котлов ТЭС и котельных с угля на природный газ заметно снижаются выбросы углекислого газа, что настоящее время является наиболее простым с практической точки зрения, относительно недорогим и быстро реализуемым мероприятием по сокращению этих выбросов. Однако в перспективе более эффективным решением данной проблемы может стать сжигание природного газа в смеси с водородом (водородсодержащие газы), а в дальнейшем — и сжигание чистого водорода, что позволит обеспечить полную углеродную нейтральность продуктов сгорания. Поэтому при проектировании перспективных энергетических установок имеет смысл уже сейчас прорабатывать технические решения с использованием в качестве топлива ВСГ.

2. При проведении модернизации котлов с переводом их на сжигание водородсодержащего газа необходимо учитывать, что повышение в нем доли водорода однозначно приведет к увеличению выбросов еще одного парникового газа — водяного пара. Таким образом, перспективно использовать в котлах конденсационные теплоутилизаторы. Конденсация водяных паров в дымовых газах котлов, работающих на природном газе и ВСГ, позволит уменьшить расход топлива при сохранении тепло-

вой мощности и одновременно снизить выбросы в атмосферу и углекислого газа, и водяных паров.

3. Реализация водородных проектов связана с большими как техническими, так и экономическими сложностями, прежде всего это обусловлено высокой стоимостью получения самого водорода, крупномасштабное производство которого может быть обеспечено преимущественно при использовании энергии АЭС и ГЭС.

4. Традиционные подходы к оценке технико-экономических показателей водородных технологий в энергетике в настоящее время вряд ли могут дать полную оценку их эффективности. Водородная энергетика может стать доминирующей и экономически обоснованной только при условии разработки безопасных и эффективных способов его получения, хранения и использования, которые сейчас еще далеки от совершенства. Основная экономическая проблема — существенное удешевление всех этих процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Paris Agreement.** United Nations, 2015.
2. **Gas for climate – Gas decarbonization pathways 2020–2050:** Guidehouse. Utrecht, The Netherlands, 2020.
3. **Обзор** климатических обязательств мировых компаний “Корпоративные стратегии углеродной нейтральности”. Департамент многостороннего экономического сотрудничества Минэкономразвития России, 2021.
4. **Указ** Президента РФ от 04.11.2020 № 666 “О сокращении выбросов парниковых газов”.
5. **Стратегия** социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р.
6. **Kiehl J.T., Trenberth K.E.** Earth’s annual global mean energy budget // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1997. V. 78. Is. 2. P. 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EA-GMEV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EA-GMEV>2.0.CO;2)
7. **Назаренко Т.** Справочная информация об антропогенных выбросах парниковых газов. [Электрон. ресурс.] <https://pandia.ru/text/80/310/1378.php>.
8. **Снижение** углеродоёмкости электроэнергии // ТЭК России. 2019. № 11. С. 11–18.
9. **Концепция** развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утв. распоряжением Правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-р.
10. **Рыбаков Б.А., Савитенко М.А.** Влияние состава топлива на выбросы парниковых газов // Энергетика и промышленность России. 2021. № 11–12. С. 415–416.
11. **Постановление** Государственного комитета РФ по статистике от 23.06.1999 № 46 “Об утверждении методологических положений по расчету топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой”.

12. **План мероприятий “Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года”**. Утв. распоряжением Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р.
13. **Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г.** Утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.
14. **ГОСТ 31369–2008.** Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава / Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 33 от 06.06.2008).
15. **ГОСТ 17356–89.** Горелки на газообразном и жидком топливах. Термины и определения. С изм. / Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 34 от 11.12.2008). Введ. в действие с 01.02.2020.
16. **ГОСТ 31369–2021.** Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава / Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 142-П от 26.08.2021).
17. **Муниц В.А., Павлюк Е.Ю.** Горение и газификация органических топлив: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2019.
18. **Хзмалян Д.М., Каган Я.А.** Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976.
19. **Иссерлин А.С.** Основы сжигания газового топлива: справ. рук. Л.: Недра, 1980.
20. **Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Воротынцева И.Е.** Технология малоэмиссионного сжигания топлива и конструктивный облик камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19. № 2. С. 107–120.
21. **Ионкин И.Л., Росляков П.В., Луниг Б.** Применение конденсационных теплоутилизаторов на объектах теплоэнергетики (обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 5–20.  
<https://doi.org/10.1134/S004036361810003X>
22. **Влияние конденсационного утилизатора на работу паровых и водогрейных газовых котлов / И.Л. Ионкин, А.В. Рагуткин, П.В. Росляков, В.М. Супранов, М.Н. Зайченко, Б. Луниг** // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 44–50.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363615050033>

## Assessment of the Potential for Decreasing Greenhouse Gas Emission in Burning Fuels in Boilers at Thermal-Power Plants (TPP) and Boiler Houses

P. V. Roslyakov<sup>a,\*</sup>, B. A. Rybakov<sup>b</sup>, M. A. Savitenko<sup>b</sup>, I. L. Ionkin<sup>a</sup>, and B. Luning<sup>c</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup> ANO Hydrogen Technology Solutions Center for Research and Scientific Development, Moscow, 127299 Russia

<sup>c</sup> Clean Air Technologies AB, Skeppsbron 2, Malmo, 211 20 Sweden

\*e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru

**Abstract**—Many countries around the world, including Russia, are performing extensive work towards meeting the Paris Agreement goals to reduce greenhouse gas emissions. One of the main industries that is an anthropogenic source of greenhouse gases is the coal-fired heat and power industry. A change-over from coal to natural gas becomes a promising measure for reducing carbon dioxide emission in the power industry. In the process, special attention is given to the combustion of natural gas mixed with hydrogen. This work examined engineering capabilities for burning hydrogen-containing gases (HCG) in conventional and condensing power facilities. Increasing the content of hydrogen in a mixture with natural gas when burning it in boilers has been demonstrated to affect the heat absorption of all heating surfaces in the boiler gas path, the gas temperature, and, ultimately, the boiler efficiency of the boiler, thereby requiring in-depth redesign of conventional gas-fired and pulverized coal-fired boilers. At the same time, the addition of hydrogen to natural gas extends the concentration range of stable combustion of such a mixture and increases the normal flame propagation velocity, which not only plays a positive role but also makes more intricate the practical implementation of the combustion of a hydrogen–natural gas mixture in burners and power facilities. Measures should be taken to prevent self-ignition of hydrogen-containing gases due to their higher fire and explosion hazard, including issues related to the location of process equipment and hydrogen transportation. A simultaneous decrease in atmospheric emissions of both water vapor and carbon dioxide during combustion of natural gas or hydrogen-containing gases in steam- and hot-water boilers can be attained by means of condensing heat recovery units that will improve the efficiency of fuel utilization and increase the thermal capacity of the power facility.

**Keywords:** boiler, greenhouse gases, natural gas, hydrogen, hydrogen-containing gases, Wobbe number