

# Энергетическая эффективность технологий использования водорода на ТЭС

В. А. Лебедев, О. Л. Горина

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

Lebedev\_VA@pers.spmi.ru, s180331@stud.spmi.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения водородного топлива для повышения энергоэффективности котельных установок. Приведен анализ зарубежного опыта использования водорода в энергетике. Представлены результаты расчетов влияния состава топливной смеси на основные энергетические характеристики котлоагрегата. В статье предложена технология производства водорода в цикле ТЭС методом парового риформинга метана для повышения эффективности обоих процессов.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, энергоэффективность, котельные установки

## I. ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика – одна из наиболее перспективных отраслей энергетического сектора, интерес к которой возрастает с каждым годом. Несмотря на необходимость постепенного отказа от углеводородного топлива, текущая готовность ВИЭ не позволяет эффективно интегрировать их в энергетическую систему. Именно поэтому специалисты говорят о «переходном периоде», топливом которого должен стать водород.

Водород  $H_2$  – газ с самой высокой удельной теплотой сгорания – 140 МДж/кг (в 3 раза выше, чем у природного газа). При его сжигании не выделяется углекислый газ – только водяные пары. Водород не встречается в природе в естественном состоянии, но может быть получен электролизом воды с использованием мощностей ВИЭ, или еще 200 различными способами – из органического топлива, биомассы и т. д. Водород можно хранить и транспортировать в сжиженном, газообразном или связанном виде. На сегодняшний день около половины водорода получают из органического сырья – угля или природного газа, а наиболее распространенной технологией является метод паровой конверсии метана.

Сейчас в мире ежегодно производится около 70 млн тонн водорода, его основные потребители – химическая промышленность, нефтепереработка и металлургия. Согласно ожиданиям специалистов отрасли, к 2050 году роль крупнейшего потребителя водорода перейдет к энергетическому сектору, со спросом на уровне 370 млн тонн ежегодно и долей в мировом энергобалансе, по пессимистическому или оптимистическому сценарию, от 7 до 24 %. [1]

Ключевыми преимуществами водорода, оправдывающими высокий интерес к данному топливу, являются возможность его сжигания на существующих энергетических установках, экологичность, а также потенциал использования в качестве энергонакопителя, в том числе для интеграции неравномерной выработки электроэнергии ВИЭ в единую энергосистему.

## II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Многие государства, особенно не обладающие собственными запасами органического топлива, возлагают большие надежды на развитие водородной энергетики. Например, согласно «Дорожной карте развития водородной экономики», к 2030 году в Европе будет ежегодно производиться и потребляться около 12 млн тонн, к 2050 – более 18 млн тонн водорода. [2] В Японии аналогичная Дорожная карта – Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells – предполагает рост объемов использования водорода к 2050 году до 10 млн тонн в год. [3]

Кроме водородных топливных элементов, наиболее перспективным считается применение водорода на крупных электро- и теплогенерирующих установках, таких как ГТУ и ПГУ. Разработки в данной сфере идут на протяжении более чем 30 лет, о текущем состоянии отрасли можно судить по работам. [4–7]

Так, в статье General Electric [4] – крупнейшего производителя газовых турбин в США – в 2021 году отчитались о 75 ГТУ, работающих на топливе с повышенным содержанием водорода с суммарной наработкой в 6 млн часов и 300 ТВт выработанной электроэнергии. Из данных проектов 25 турбин используют топливную смесь с объемным содержанием водорода свыше 50 % (их суммарная наработка – около 1 млн часов).

Другая ключевая компания – немецкий конгломерат Siemens – ведут успешные разработки турбин, способных эффективно работать на богатых водородом топливных смесях, в том числе на 100 % водороде. В 2019 году компания представила проекты нескольких водородных турбин нового поколения, описанных в статье. [5]

Анализируя также источники [6 и 7], можно сделать вывод о положительных результатах применения водородного топлива – это повышение коэффициента полезного действия установок и сокращение выбросов углекислого газа в атмосферу. При этом стоит обратить внимание и на технические трудности, в том числе:

- низкую плотность газа, которая требует усовершенствования системы топливоподачи;
- высокую скорость распространения пламени (для обеспечения стабильного горения необходимы особые горелки);
- взрывоопасность и высокую адиабатическую температуру горения водорода;
- повышенные выбросы диоксидов азота, связанные с ростом температуры факела.

Как представлено в приведенных источниках, все перечисленные проблемы находят удовлетворительные решения, и водородные проекты в энергетике в целом отличаются высокой энергоэффективностью.

В настоящий момент внимание исследователей преимущественно уделяется сжиганию водорода в газовых турбинах. Для России, где доля паровых турбин в структуре электрогенерации составляет около 80 %, более актуальным является изучение возможности применения водорода как топлива энергетических котлов.

### III. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки эффективности использования водорода как дополнительного топлива котельных установок был проведен расчет материального и теплового баланса, а также состава уходящих газов на примере котла серии ГТМ-84 Е-420-14-565 ГМ. Это энергетический паровой котел производительностью 420 т/ч и параметрами острого пара – давление 14 МПа, температура 565 °С. Температура питательной воды – 232 °С и температура горячего воздуха при сжигании газа – 238 °С. Котел рассчитан на сжигание газа или мазута, в данной работе рассматривается сжигание газообразного топлива.

Для расчетов был выбран природный газ месторождения Уренгой-Ужгород, объемный состав газа представлен в табл. 1. Вычисления основных показателей работы котлоагрегата далее проводились при увеличении объемной или массовой доли водорода в газовой смеси, как представлено в табл. 2 и 3. Расчеты выполнялись в соответствии с Нормативным методом теплового расчета котлов. [8]

ТАБЛИЦА I ИСХОДНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Компонент	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Объемное содержание, %	98,9	0,12	0,01	0,01	0,9	0,06

ТАБЛИЦА II СОСТАВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОДОРОДА

Компонент	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Объемное содержание, %	0	98,9	0,12	0,01	0,01	0,9	0,06
	10	94	0,11	0,01	0,009	0,81	0,05
	20	84,1	0,1	0,01	0,008	0,72	0,05
	30	69,2	0,08	0,01	0,007	0,63	0,04
	40	59,3	0,07	0,01	0,006	0,54	0,04
	50	49,5	0,06	0,01	0,005	0,45	0,03

ТАБЛИЦА III СОСТАВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МАССОВОЙ ДОЛИ ВОДОРОДА

Компонент	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Массовое содержание, %	0	98	0,23	0,03	0,04	1,55	0,16
	10	88,2	0,2	0,03	0,034	1,4	0,15
	20	78,4	0,18	0,02	0,03	1,24	0,13
	30	68,6	0,16	0,02	0,026	1,09	0,12
	40	58,8	0,14	0,02	0,022	0,93	0,1
	50	49	0,11	0,01	0,019	0,78	0,08

Результаты расчетов далее представлены на рис. 1–8 с приведением расчетных формул и пояснений.

#### A. Влияние состава топлива на его теплотворную способность

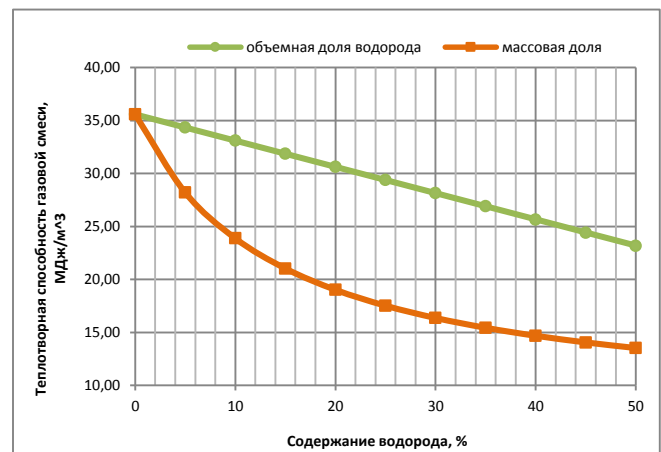


Рис. 1. Зависимость объемной теплоты сгорания газа от его состава

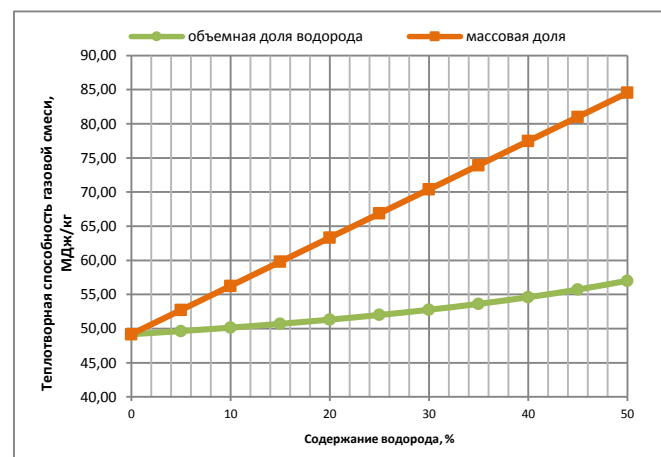


Рис. 2. Зависимость массовой теплоты сгорания газа от его состава

Расчет теплотворной способности газовой смеси производится по формуле:

$$Q = 0,01 * (Q_{H_2S} * H_2S + Q_{CO} * CO + \sum Q_{C_mH_n} * C_mH_n) \text{ кДж/м}^3$$

где  $H_2S, CO, C_mH_n$  – объемные доли соответствующих газов, выраженные в процентах,  $Q_{H_2S}, Q_{CO}, Q_{C_mH_n}$  – их объемные теплотворные способности, в кДж/м<sup>3</sup>

Как видно из представленного материала, при увеличении содержания водорода в газовой смеси ее объемная теплотворная способность уменьшается, но возрастает массовая. Это связано с низкой плотностью водорода – 0,09 кг/м<sup>3</sup> против 0,7 кг/м<sup>3</sup> у природного газа. Очевидно, что использование топлива с повышенным содержанием водорода увеличит нагрузку на систему топливopодачи и работу форсунок.

**В. Влияние состава топлива на его расход котельным агрегатом Е-420-14-565 ГМ при постоянной номинальной мощности**

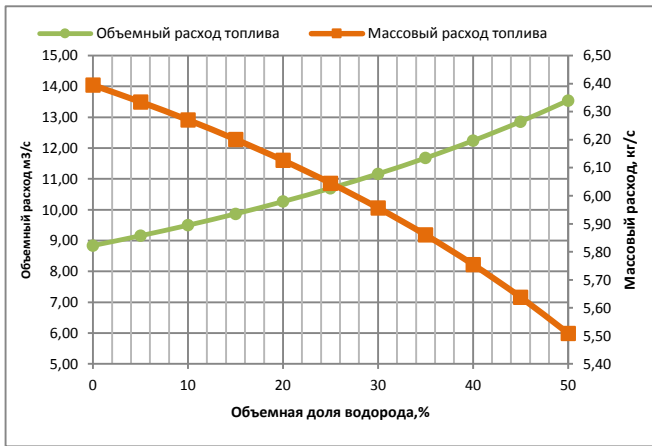


Рис. 3. Зависимость расхода топлива котлом от объемной доли водорода в составе газовой смеси

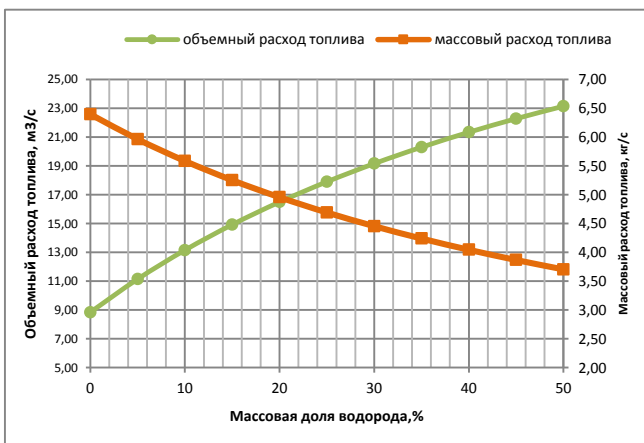


Рис. 4. Зависимость расхода топлива котлом от массовой доли водорода в составе газовой смеси

Расчет расхода топлива производится по формуле

$$B = Q * \eta / D(h_{\text{пп}} - h_{\text{пв}}), \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$$

где  $Q$  – теплотворная способность газовой смеси, кДж/м³ (кДж/кг),  $\eta$  – КПД котлоагрегата,  $D$  – расход свежего пара, кг/с,  $h_{\text{пп}}$  и  $h_{\text{пв}}$  – энтальпии перегретого пара и питательной воды соответственно, кДж/кг. Параметры пара для определения энтальпий приведены в описании котельной установки перед таблицами.

Как можно увидеть из графиков, при увеличении объемной доли водорода в два раза массовый расход топлива уменьшается в 1,2 раза (1,7 раз для 50 % содержания водорода по массе). Изменение объемного расхода более значительно, он возрастает в 1,5 и 2,5 раза для 50 % объемной и массовой доли соответственно. Результаты графиков 3–4 соответствуют результатам расчетов теплотворной способности, приведенным выше.

**С. Влияние состава топлива на расход воздуха котельного агрегата и общий объем ГВС**

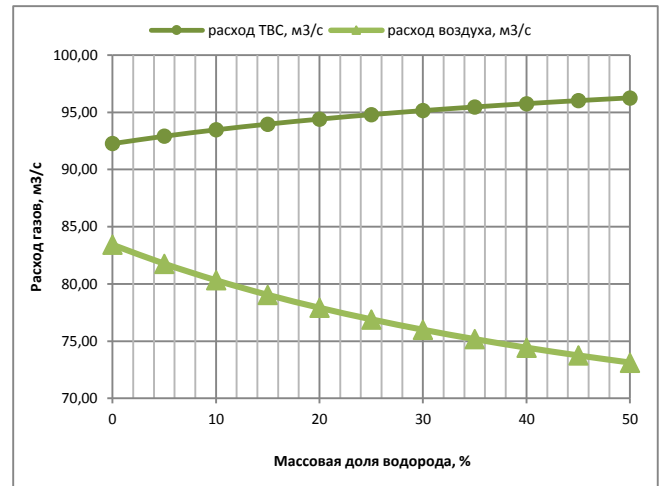


Рис. 5. Зависимость расхода воздуха и общего количества ТВС от массовой доли водорода в топливе

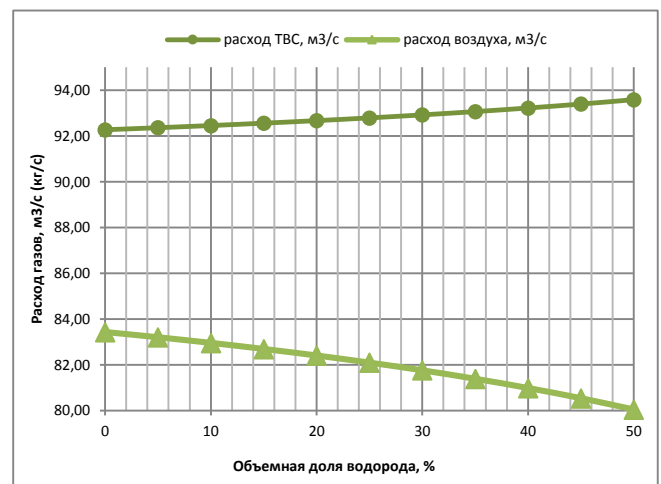


Рис. 6. Зависимость расхода воздуха и общего количества ТВС от объемной доли водорода в топливе

Стехиометрическое количество воздуха, необходимое для сжигания природного газа заданного состава определяется по формуле:

$$V_0^H = 0,0476 * (0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2), \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

где  $H_2S, CO, C_m H_n$  – объемные доли соответствующих газов, выраженные в процентах

Из приведенного графического материала можно сделать вывод, что для сжигания богатого водородом топлива требуется меньшее количество кислорода (воздуха), но при этом общий расход топливно-воздушной смеси, которую необходимо подавать на горелки для поддержания заданной производительности, возрастает из-за уменьшения плотности самого топлива.

#### D. Влияние состава топлива на выбросы углекислого газа от установки

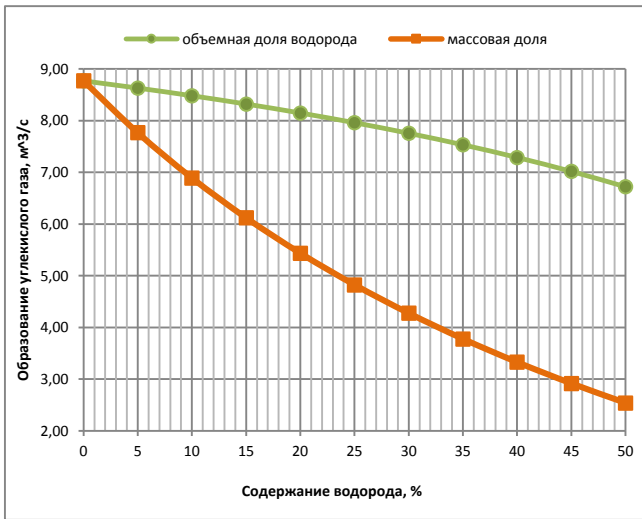


Рис. 7. Зависимость выбросов CO<sub>2</sub> от состава сжигаемого газа

Расчет выбросов углекислого газа от котельной установки выполнялся по формуле

$$V_{RO_2}^H = 0,01(CO_2 + CO + \sum mC_mH_n)$$

где  $CO_2, CO, C_mH_n$  – объемные доли соответствующих газов, выраженные в процентах

Из графика 7 видно, что увеличение доли водорода в составе топлива ведет к значительному снижению выбросов парникового газа (сокращение в 1,4 и 3,6 раз для 50 % содержания водорода по объему и массе соответственно). Уменьшение негативного воздействия на экологическую ситуацию является одной из ключевых причин растущего интереса к водородной энергетике.

#### E. Влияние состава топлива на стоимость выработанной энергии

Согласно наиболее современным источникам [1], стоимость серого водорода (получаемого методом паровой конверсии метана без улавливания углекислого газа) находится около 7 руб/м<sup>3</sup>, а природного газа для его производства в промышленных масштабах – 5,9 руб/м<sup>3</sup>. На рис. 8 представлен расчет стоимости используемой газовой смеси при различной концентрации водорода.

Как можно судить по графику 8, добавление водорода в состав сжигаемого природного газа значительно увеличивает затраты на выработку пара. Аналогичные зависимости были получены на газотурбинных водородных станциях. Например, стоимость электроэнергии на известной станции в Фузине, компания Enel [6], в 5 раз превышала стоимость электричества, полученного от параллельно работающего угольного блока.

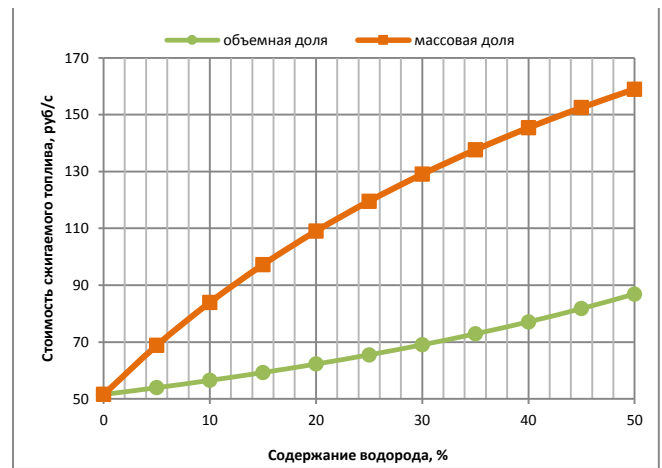


Рис. 8. Зависимость стоимости топливной смеси от ее состава

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Расчитанные в данной статье основные энергетические показатели работы котлоагрегата Е-420-14-565 ГМ представлены в табл. 1–3 и на графиках 1–8. Из анализа приведенного материала следуют выводы:

- С ростом процентного содержания водорода в газовой смеси его объемная теплота сгорания уменьшается, но массовая теплотворная способность увеличивается.

Данная зависимость заслуживает отдельного внимания, так как в существующей практике расчет теплового баланса котлов обычно производят на 1 м<sup>3</sup> топлива.

- С ростом процентного содержания водорода в газовой смеси объемный расход топлива на поддержание той же номинальной мощности увеличивается, но массовый расход уменьшается.

Этот вывод согласуется с предыдущим пунктом, и также объясняется более низкой плотностью водорода по сравнению с метаном. Увеличение объемного расхода предполагает увеличение нагрузки на систему топливоподачи при работе с богатыми водородом смесями.

- С ростом процентного содержания водорода в газовой смеси требуемое для горения количество воздуха значительно уменьшается. За счет этого общий объем газозудной смеси, поступающей в топку, возрастает менее ощутимо, и частично компенсирует необходимость подачи большего количества топлива;
- при сжигании богатого водородом топлива значительно сокращаются выбросы углекислого газа, что благоприятно сказывается на состоянии окружающей среды;
- добавление водорода в состав природного газа увеличивает стоимость вырабатываемой энергии, по крайней мере, при текущем уровне цен и технологий.

## V. ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом усложняющейся экологической обстановки, в ближайшие годы интерес к водородной энергетике продолжит расти. Для достижения действительно заметного сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу, крупнейшими потребителями водородного топлива должны стать энергетические объекты (в настоящий момент на долю энергетики приходится четверть мировых выбросов CO<sub>2</sub>).

Кроме проанализированных выше проблем сжигания водорода, нерешенным остается другой вопрос – хранения и транспортировки этого газа в объемах, которые потребуются энергетике. Данная проблема подробно изложена в статьях [9, 10]

И еще одним препятствием широкого применения водорода в энергетической отрасли является высокая стоимость его получения, что подробно представлено на графике 8.

В связи с перечисленными выше проблемами, перспективным выглядит производство водорода непосредственно на объектах его использования – тепловых электростанциях. Наиболее подходящим и рентабельным для этого методом является паровая конверсия природного газа. На рис. 9 представлена упрощенная схема возможного совмещения циклов тепловой электростанции и парового риформера метана.

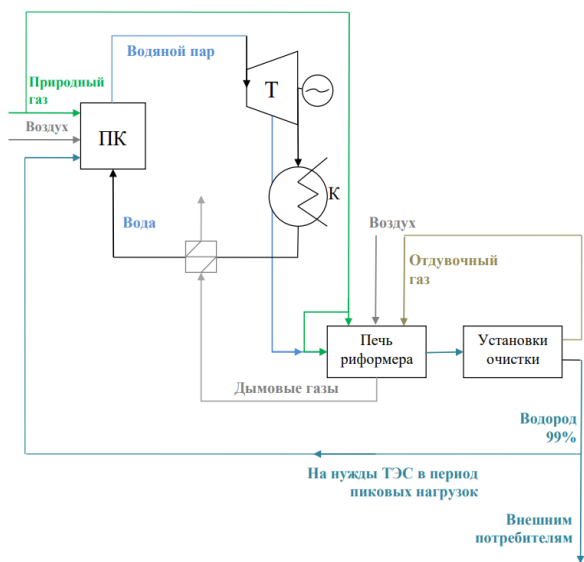


Рис. 9. Возможная схема совместной выработки электроэнергии и производства водорода на ТЭС

Метод паровой конверсии метана предполагает смешение природного газа и водяного пара высоких параметров в трубчатых печах при внешнем подводе теплоты на поверхности катализатора (алюминия, никеля). Кроме самой высокой эффективности, эта технология оптимальна конкретно для ТЭС с энергетическими котлами и паровыми турбинами, так как оба вида сырья присутствуют на объекте.

Совмещение циклов выработки электроэнергии и производства водорода также может повысить коэффициент использования установленной мощности

станций. В период ночных провалов нагрузки избыточный пар может идти на производство водорода в риформерах; в часы пиковой нагрузки водород может подмешиваться в состав сжигаемого природного газа, что продемонстрировано в основной части статьи.

Что касается выбросов углекислого газа, сопутствующих получению водорода методом ПКМ, в настоящий момент существует большое количество технологий улавливания, захоронения и использования углекислого газа. [11] Также разработаны прототипы совмещения циклов ТЭС и ПКМ, доказывающие увеличение эффективности улавливания CO<sub>2</sub> из уходящих газов комбинированных установок. [12]

Таким образом, получение водорода на ТЭС и сжигание его в энергетических котлах в период пиковых нагрузок может стать комплексным решением для увеличения эффективности энергоустановок с минимальным негативным воздействием на экологию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] О.Е. Аксиутин, А.Г. Ишков, К.В. Романов, Р.В. Тетеревлев. Роль российского природного газа в развитии водородной энергетики // Энергетическая политика. 2021. №3. С.6-19.
- [2] European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Brussels, 8.7.2020. COM (2020) 301 final. – URL: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)
- [3] Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council. The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. - Industry-academia-government action plan to realize a “Hydrogen Society” - March 12, 2019 – URL: [https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312\\_002b.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf)
- [4] Goldmeer J. Hydrogen for power generation. Experience, requirements, and implications for use in gas turbines / J. Goldmeer, J.Catillaz // GE, 2021 URL: [www.ge.com/power/future-of-energy](http://www.ge.com/power/future-of-energy)
- [5] Adam P. Hydrogen Turbomachinery. Readiing pipeline compressor stations for 100% hydrogen / P.Adam, R.Bode, M.Groissboeck // Turbomachinery International. 2020. Vol. 61 P. 18-20
- [6] ENEL’s Fusina zero emission combined cycle: experiencing hydrogen combustion / Iarno Brunetti, Nicola Rossi, Stefano Sigali, Giuseppe Sonato, Stefano Cocchi, Roberto Modi // POWER-GEN EUROPE 2010/ Track 2: Reducing the carbon footprint of fossil power generation. Session 2: Hybrid power systems/ ID NUMBER: 219
- [7] Goldmeer J. Hydrogen combustion. Solving the challenge of lean premix combustion with highly reactive fuels / Turbomachinery International. 2020. Vol. 61 P. 14-17
- [8] Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, СПб, 1998. 256 с. с ил.
- [9] Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко, П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслаев // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428-438.
- [10] А.П. Петкова, О.Ю. Ганзуленко. Разработка режима химико-термической обработки элементов внутрикорпусных устройств из аустенитных коррозионно-стойких хромоникелевых сталей для повышения их водородостойкости // Записки Горного института. 2014 Т. 209 С.229-233.
- [11] А.А. Ильинова, Н.В. Ромашева, Г.А. Стройков. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 493-502.
- [12] Herraiz L, Lucquiaud M., Chalmers H. and Gibbins J. Sequential Combustion in Steam Methane Reformers for Hydrogen and Power Production With CCUS in Decarbonized Industrial Clusters. Front. Energy Res. 8:180.