Круглый стол «Снижение углеродного следа при производстве электроэнергии и тепла. Пути декарбонизация в энергетике»

ПУТИ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Росляков П.В., Ионкин И.Л., Рыбаков Б.А., Савитенко М.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», АНО "Центр исследований и научных разработок в области энергетики "Водородные технологические решения"

НИУ

Москва, ОАО «ВТИ», 3 марта 2022 г.

МЭИ

Меры по обеспечению сокращения выбросов парниковых газов до 70% относительно уровня 1990 года к 2030 году и разработке стратегии развития страны с низким уровнем выбросов парниковых газов

1. Paris Agreement/ United Nations, 2015
2. Указ Президента РФ от 4 ноября 2020 года № 666 **«О сокращении выбросов парниковых газов».**
3. Распоряжение ПП РФ от 29.10.2021 № 3052-р. Об утверждении **«Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».**
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р **«Об утверждении концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации».**
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.10.2020 № 2634-р **«Об утверждении плана мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г.».**
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9.06.2020 № 1523-р **«Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».**

ТРАДИЦИОННЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO_2 НА ТЭС

- переход с угля на сжигание природного газа;
- внедрение когенерации тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, позволяющей повысить эффективность (коэффициент) использования теплоты топлива;
- внедрение парогазовых установок на ТЭС;
- повышение коэффициента полезного действия при производстве электрической энергии на КЭС за счет модернизации действующего и внедрения нового оборудования, в том числе с повышенными (супер- и ультракритическими) параметрами пара.

ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ РАЗНЫХ ТОПЛИВ

Топливо	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Выход основных продуктов сгорания топлива при стехиометрическом сжигании 1 кг топлива			
		кг/(кг топлива)		кг/(кг у.т.)	
		CO_2	H_2O	CO_2	H_2O
Водород	120	0	9	0	2,2
Метан	50	2,75	2,25	1,61	1,32
Природный газ	41-49	2,67-2,69	1,38-2,37	1,61-1,77	1,31-1,42
Углерод (чистый)	34	3,67	0	3,17	0
Антрацит	22,4–25,24	2,22–2,47	0,23–0,33	2,88-3,06	0,3–0,44
Каменные угли	15,86-26,71	1,51-2,49	0,42-0,55	2,73-2,8	0,51-0,89
Бурые угли	9,29-17,25	0,98-1,75	0,6-1,08	2,97-3,1	1,03-3,4

Перевод котлов ТЭС и котельных на сжигание природного газа приводит к существенному снижению выбросов в атмосферу углекислого газа

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИКЕ

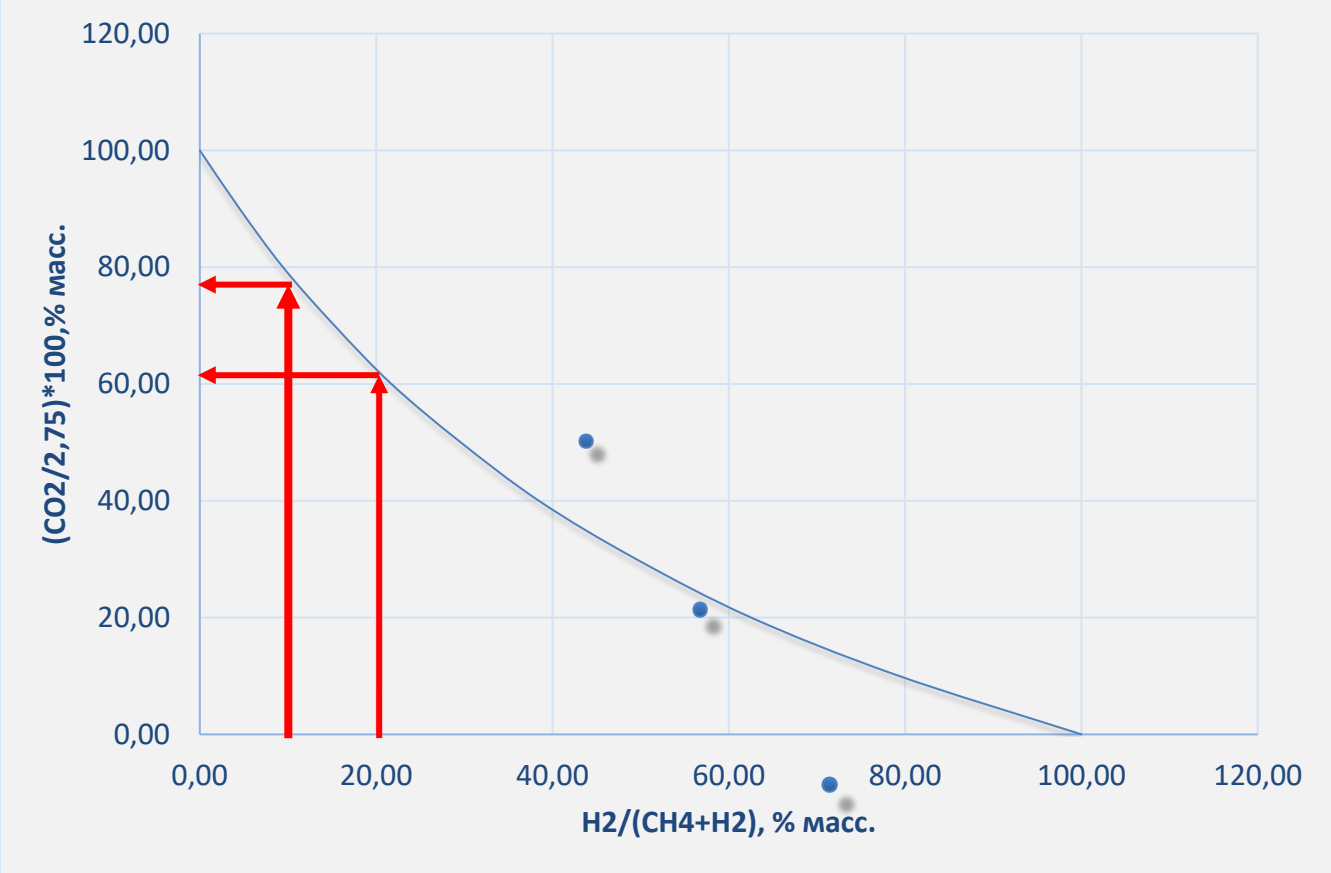
Уменьшение выбросов в атмосферу углекислого газа при сжигании природного газа возможно при подмешивании к нему чистого водорода (сжигание водородсодержащих газов - ВСГ).

С этой целью в России и за рубежом рассматриваются вопросы добавления водорода к природному газу в магистральных и распределительных сетях.

В плане мероприятий («дорожной карте») по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года предусмотрена, в частности, разработка энергетических установок, работающих на водороде и ВСГ (котлов и ГТУ).

Цель работы – исследование возможностей использования водородсодержащих смесей в котлах для снижения выбросов углекислого газа

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ CO_2 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАССОВОЙ ДОЛИ ВОДОРОДА В ВСГ



При добавлении 10 - 20 % (масс.) водорода в существующую систему транспортировки и распределения природного газа, можно при сжигании такой ВСГ обеспечить снижение выбросов в атмосферу углекислого газа около 20 - 40%.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СЖИГАНИЯ ВСГ В СЕРИЙНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Для оценки взаимозаменяемости горючих газов (природного газа и его смеси с водородом-ВСГ) при сжигании в бытовых и промышленных горелочных устройствах **без их изменения** используется число Воббе (Wobbe Index - WI):

$$W_{OB,OH} = \frac{Q^{P}_{B,H}}{\sqrt{\rho_{Г} / \rho_{В}}} \text{ ; МДж/м}^3$$

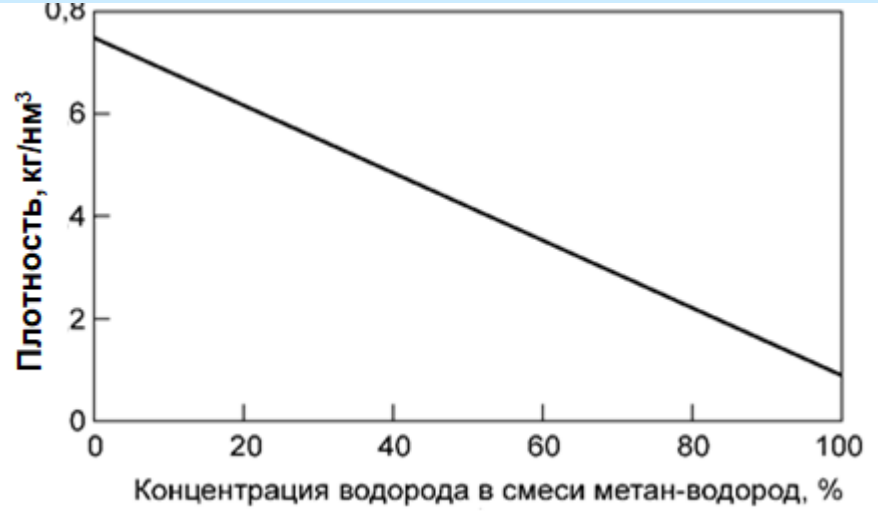
Газы с одинаковыми или близкими числами Воббе (допустимое отклонение числа Воббе от номинального значения не должно превышать ± 5%) **могут использоваться** один вместо другого **без замены горелки** при равном давлении истечения **.**

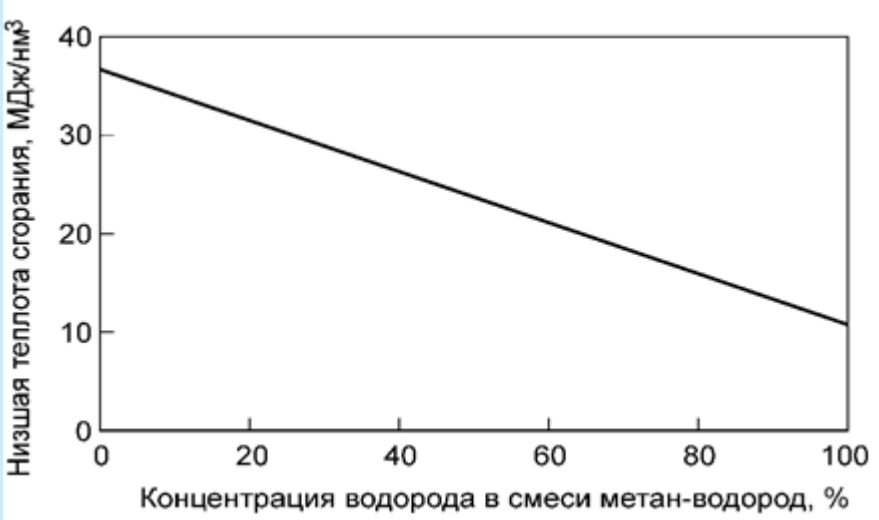
При сжигании горючих газов с разными числами Воббе в одной горелке газ с меньшим числом Воббе должен подводиться при большем давлении.

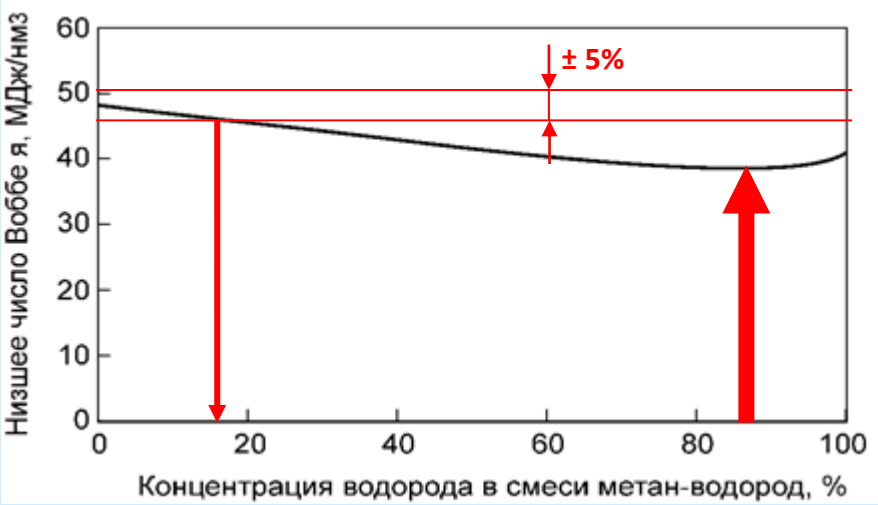
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗНЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Характеристики	Природный газ	Метан CH_4	Водород H_2
Объемная низшая теплота сгорания (НТС) при нормальных условиях (0°С, 101,325 кПа), МДж/м^3	36,6	35,88	10,79
Объемная высшая теплота сгорания (ВТС), МДж/м^3	40,73	39,82	12,75
Плотность при нормальных условиях, ρ, кг/нм^3	0,746	0,717	0,09
Относительная плотность ($\rho_г/\rho_в$)	0,58	0,5548	0,07
Массовая низшая теплота сгорания при нормальных условиях, МДж/кг	49,062	50,04	119,89
Массовая высшая теплота сгорания при нормальных условиях, МДж/кг	54,6	55,7	140
Низшее число Воббе (WI), МДж/нм^3	48	48,2	40,7

ВЛИЯНИЕ ОБЪЁМНОЙ ДОЛИ ВОДОРОДА В ВСГ

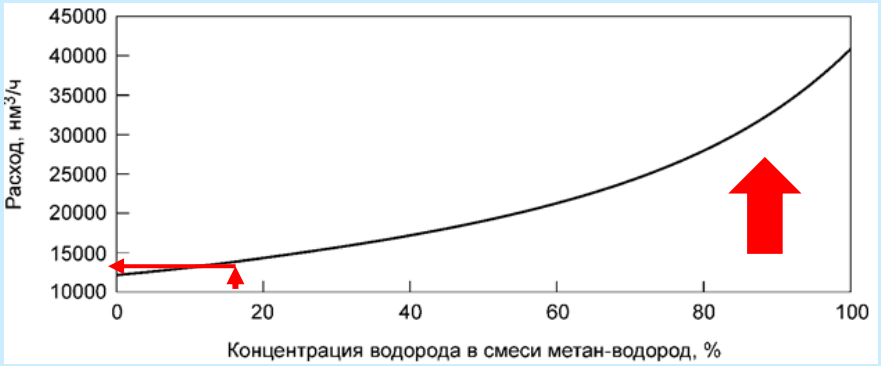




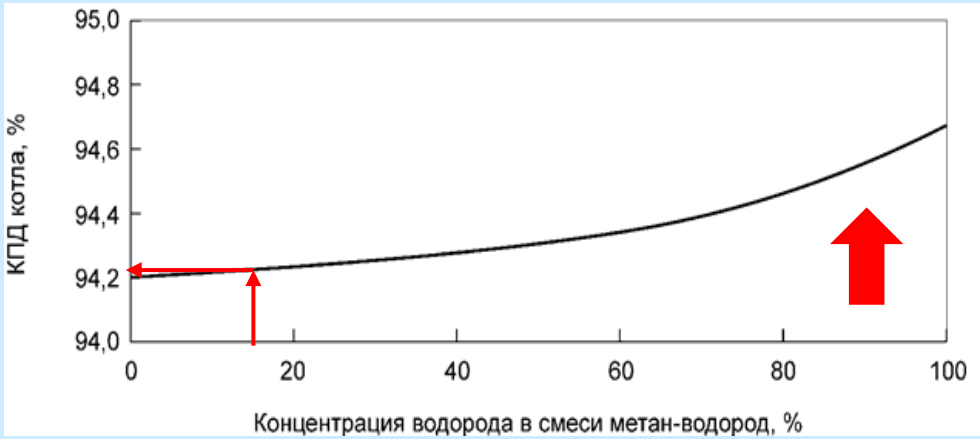


РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КОТЛА ПТВМ-100 (116 МВт) ОТ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОДОРОДА В ВСГ ДЛЯ

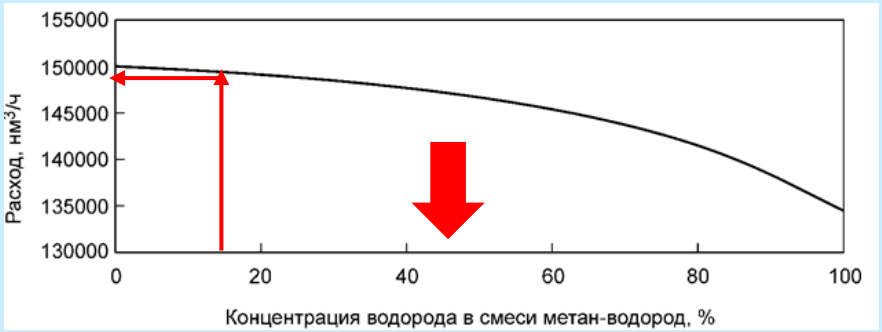
Объемный расход ВСГ, нм³/час



КПД котла, %



Объемный расход газов, нм³/час



В пределах допустимого изменения числа Воббе (± 5%) изменение эксплуатационных характеристик незначительно.

УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ ВОДОРОДА В СМЕСИ С ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ПРИ СЖИГАНИИ В КОТЛАХ

- приведет к изменению светимости факела и соответственно к изменению тепловосприятия топочный камеры;
- при одинаковой тепловой мощности котла объемный расход образовавшихся продуктов сгорания будет уменьшаться;
- вызовет изменение тепловосприятия всех поверхностей нагрева, расположенных в газовом тракте котла, температуры газов и в конечном счете КПД.

Все это потребует серьезного пересмотра конструкции традиционных газовых и пылеугольных котлов.

ОЦЕНКА СПОСОБНОСТИ ВСГ К УСТОЙЧИВОМУ ВОСПЛАМЕНЕНИЮ

Горючий газ	Концентрационные пределы воспламенения в воздушных смесях, % газа по объему	
	Нижний (переобедненная смесь)	Верхний (переобогащенная смесь)
Водород – H_2	4,1	74,2
Метан – CH_4	5,3	14,0
Этан – C_2H_6	3,2	12,5
Пропан – C_3H_8	2,4	9,5
Бутан – C_4H_{10}	1,9	8,4
Пентан – C_5H_{12}	1,4	7,8
Природный газ (ПГ)	4,8	14,7
90% ПГ + 10% H_2	4,7	20,7
80% ПГ + 20% H_2	4,6	26,6
70% ПГ + 30% H_2	4,6	32,6
60% ПГ + 40% H_2	4,5	38,5
50% ПГ + 50% H_2	4,4	44,5
40% ПГ + 60% H_2	4,4	50,4
30% ПГ + 70% H_2	4,3	56,4
20% ПГ + 80% H_2	4,2	62,3
10% ПГ + 90% H_2	4,2	68,3

Область устойчивого воспламенения газа характеризуется разностью между высшим и низшим концентрационными пределами воспламенения

Добавка водорода в природный газ приводит к увеличению области устойчивого горения ВСГ.

Нижний предел воспламенения независимо от доли водорода изменяется в диапазоне всего 4,2 – 4,8%.

Диапазон изменения верхнего предела воспламенения ВСГ составляет 14,7 – 68,3% и заметно возрастает с увеличением доли водорода в смеси

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ВСГ

Газ	Содержание в смеси, об. %		Нормальная скорость распространения пламени, м/с
	газа	водорода	
Водород H_2	--	100	1,6
Метан CH_4	100	0	0,28
Природный газ*) (ПГ)	100	0	0,282
Смесь природного газа и водорода	90	10	0,412
	70	30	0,676
	50	50	0,94
	30	70	1,204
	10	90	1,468

Для организации стационарного пламени при горении в потоке горючая смесь должна поступать к фронту пламени со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени.

С ростом доли водорода в его смеси с природным газом скорость нормального распространения пламени линейно увеличивается.

ОЦЕНКА РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ВСГ

Реакционная способность смесей природного газ с водородом возрастает благодаря:

- расширению концентрационной области воспламенения
- увеличению скорости нормального распространения пламени

Наряду с положительным эффектом это, тем не менее, осложняет практическую реализацию сжигания ВСГ в реальных горелочных устройствах и энергетических установках.

Допустимое изменение числа Вобба в пределах ±5% достигается при содержании водорода в смеси с природным газом около 15 %(об.). Для сжигания таких ВСГ принципиально могут использоваться обычные горелочные устройства для природного газа и их газоподводящие трубопроводы с традиционным (рабочим) избыточным давлением.

При сжигании ВСГ с более высокой объемной концентрацией водорода (≥ 15-20%) уже потребуется серьезная модернизация или замена горелочного устройства.

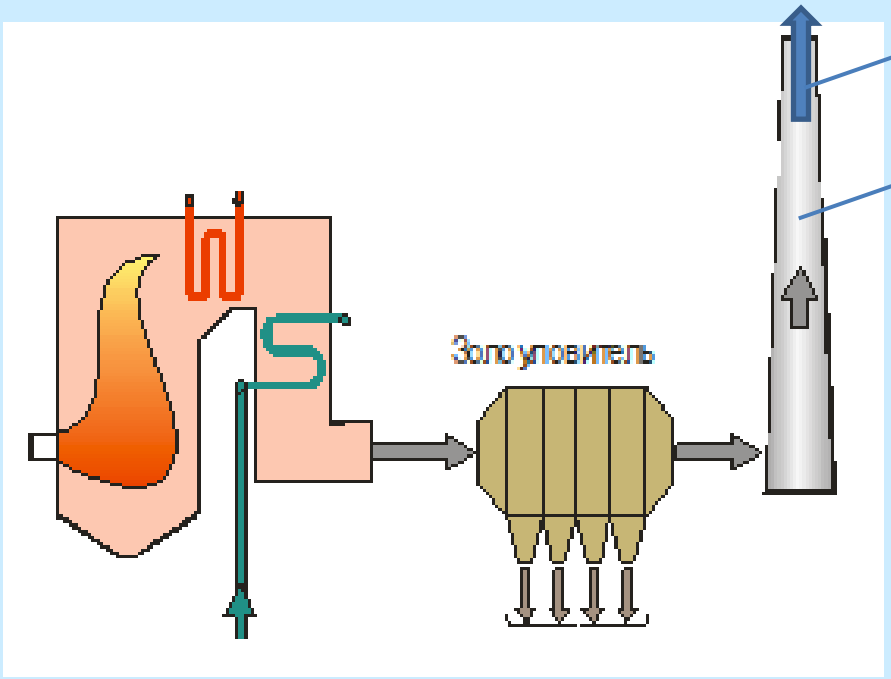
СЛОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСГ С СОДЕРЖАНИЕМ H_2 БОЛЕЕ 15%

- Ввиду повышенных для ВСГ скоростей распространения пламени, необходимо поддерживать соответствующие скорости подачи топливовоздушной смеси для предотвращения «проскока пламени» в горелочное устройство.
- Для этого необходима замена горелок или повышенные давления ВСГ перед горелкой, что приведет к росту ее сопротивления.
- В горелочных устройствах, адаптированных для сжигания ВСГ, должна быть предусмотрена защита от распространения пламени вверх по потоку (конструктивно это может быть выполнено по аналогии с горелками предварительно смешения в малоэмиссионных камерах сгорания ГТУ).
- Принятие мер, исключающих возможность самовоспламенения таких ВСГ ввиду их повышенной пожаро- и взрывоопасностью, включая вопросы размещения технологического оборудования и транспорта водорода.

СЛОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСГ

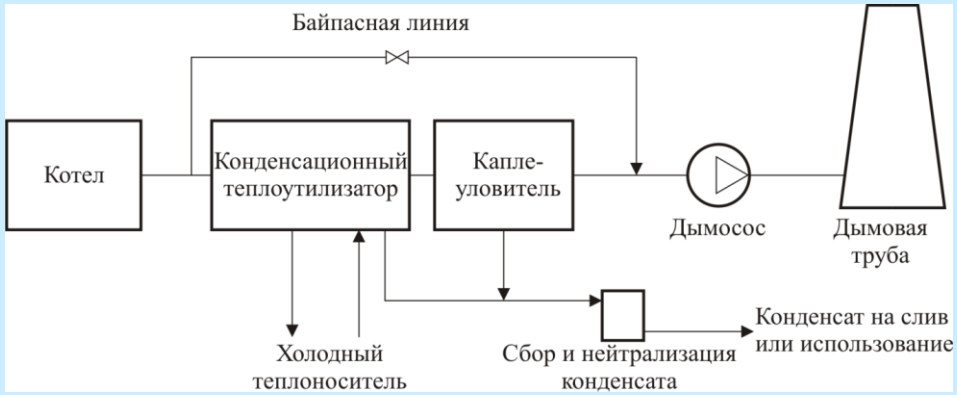
- Сжигание ВСГ в топках существующих котлов потребует определенной их доработки и реализации ряда необходимых конструктивных и технических мероприятий, в первую очередь горелочных устройств и газоподводящего оборудования.
- Газопроводы и запорно-регулирующая арматура должны быть изготовлены из материалов, позволяющих избежать водородного охрупчивания.
- Система подготовки ВСГ должна включать устройства для предварительного смешения водорода с природным газом и должна иметь специальную систему мониторинга состояния 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.

КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНЫХ ПАРОВ



Потери 2500 кДж/кг

120 - 150°С > t_P

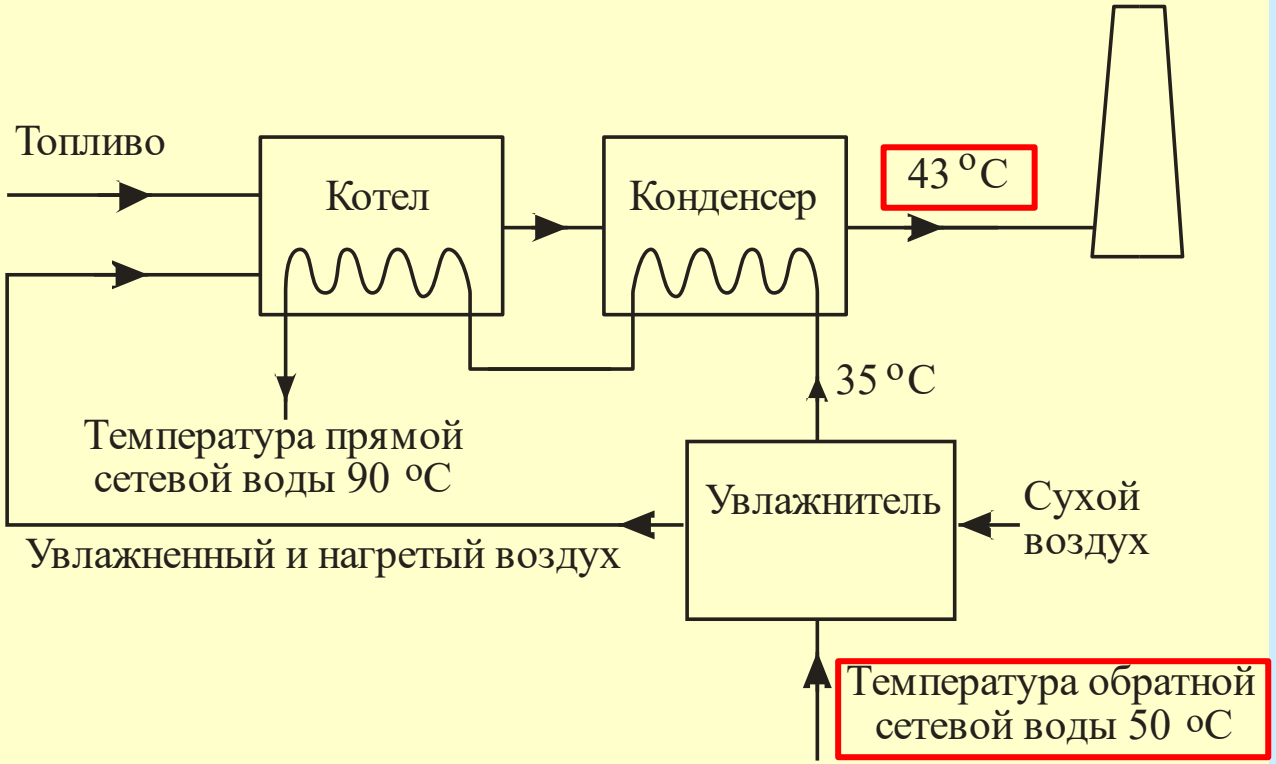


Водяной пар, как и углекислый газ, является парниковым газом. Снижение его выбросов в атмосферу также является актуальной задачей.

Одновременное уменьшение выбросов в атмосферу водяных паров и углекислого газа при сжигании природного газа возможно за счет конденсации водяных паров дымовых газов перед их выбросом в атмосферный воздух.

Для природного газа Q_B - Q_H ≈ 10% от Q_H; 18,5 % - для водорода

СХЕМА КОНДЕНСАЦИОННОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА (КТУ) В ВАРИАНТЕ «КОНДЕНСЕР И УВЛАЖНИТЕЛЬ»

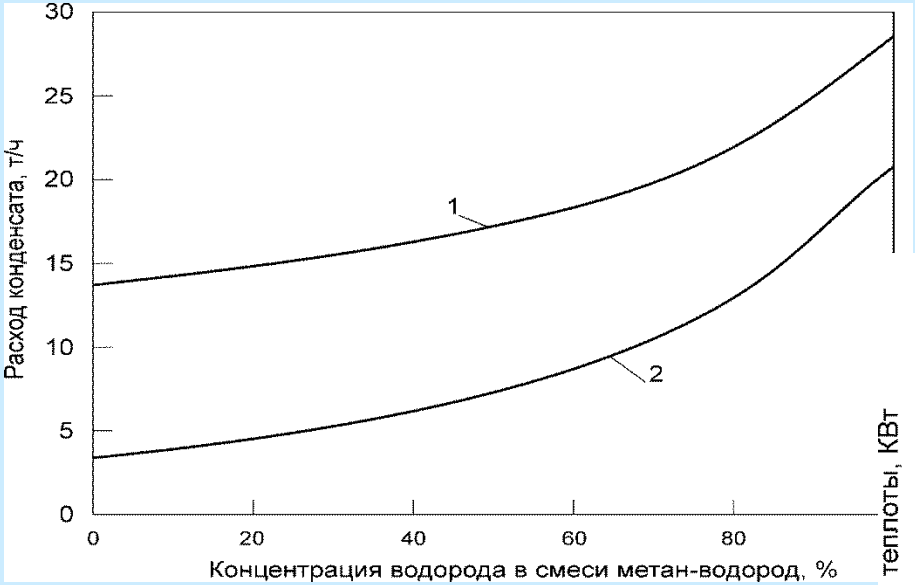


За счет предварительного подогрева и увлажнения воздуха температура уходящих дымовых газов ниже, чем температура обратной сетевой воды.

При одинаковой тепловой мощности при сжигании чистого водорода массовый расход водяного пара будет в 1,7 раза больше, чем при сжигании природного газа. Возможности использования скрытой теплоты конденсации водяного пара при добавлении водорода в природный газ увеличиваются.

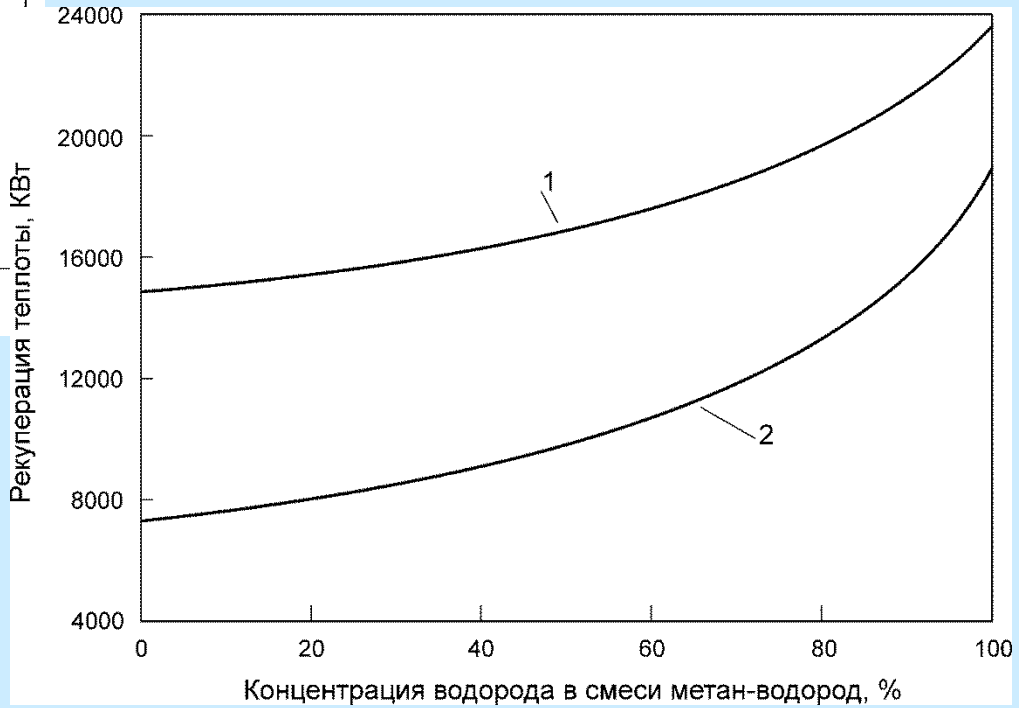
РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ КОТЛА ПТВМ-100 (116 МВТ) ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОХЛАЖДЕНИЯ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ЗА КТУ

Выход конденсата от доли водорода в ВСГ



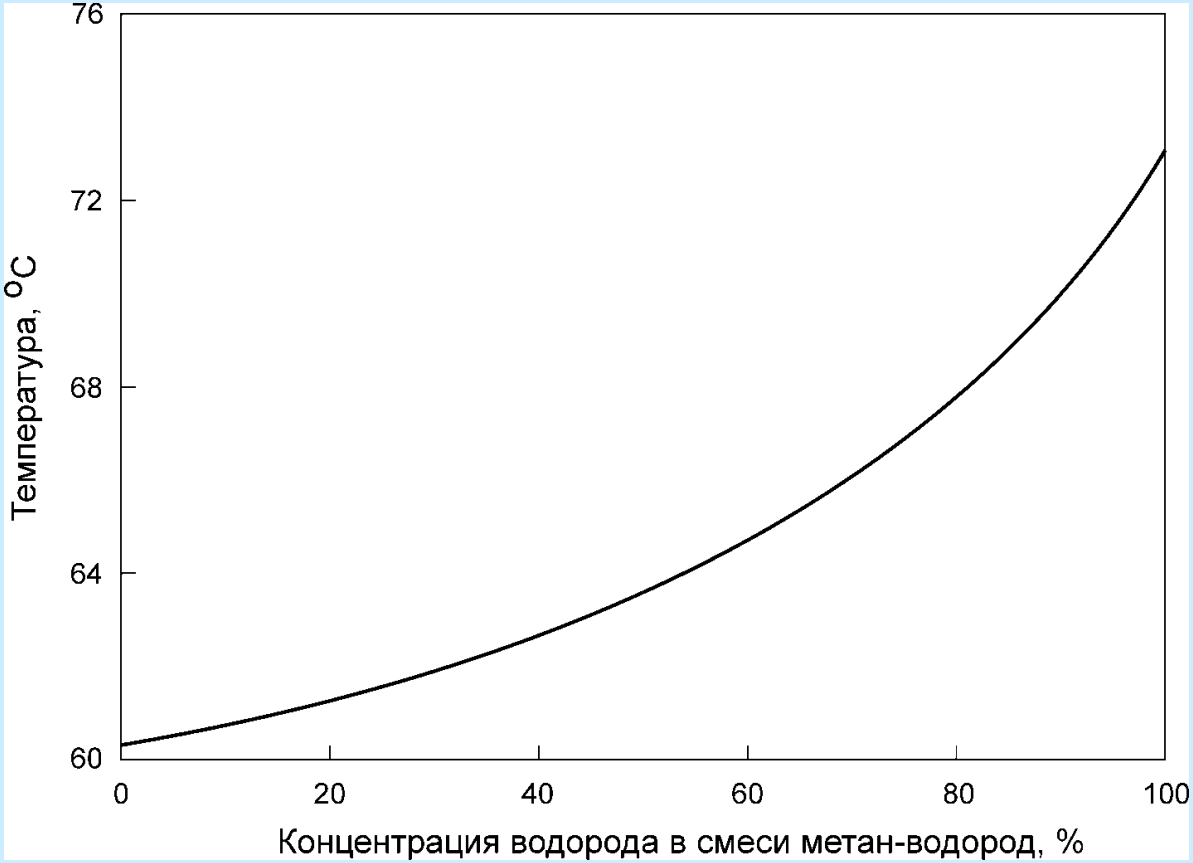
1 - $t_{ух}$ = 40°C; 2 - $t_{ух}$ = 55°C

Рекуперация теплоты в КТУ



Увеличение доли водорода в ВСГ обеспечивает более высокую эффективность рекуперации независимо от охлаждения дымовых газов в КТУ.

ТЕМПЕРАТУРА ТОЧКИ РОСЫ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ПРИ ВСГ (ДЛЯ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ)



Увеличение доли водорода в ВСГ повышает содержание водяных паров в продуктах сгорания и приводит к заметному росту температуры точки росы.
В результате эффективность использование КТУ увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Перевод ТЭС и котельных с угля на сжигание природного газа безусловно заметно снижает выбросы углекислого газа и является в настоящее время наиболее простым с практической точки зрения мероприятием.
- В перспективе более эффективным мероприятием по снижению выбросов углекислого газа является сжигание природного газа в смеси с водородом.
- При проектировании перспективных энергетических установок имеет смысл уже сейчас прорабатывать технические решения, которые в будущем позволят использовать в качестве топлива водородсодержащий газ (ВСГ).
- Модернизация котлов для перевода на сжигание ВСГ однозначно приведет к увеличению выбросов с дымовыми газами водяного пара – еще одного парникового газа.
- В этом случае перспективным является использование в котлах конденсационных теплоутилизаторов, что позволяет уменьшить расход топлива при сохранении тепловой мощности и одновременно снизить выбросы в атмосферу обоих парниковых газов: углекислого газа и водяных паров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Реализация «водородных проектов» связана с большими сложностями как технического, так и экономического характера. Прежде всего это определяется высокой стоимостью получения самого водорода, крупномасштабное производство которого может быть обеспечено преимущественно при использовании энергии АЭС и ГЭС.
- Использование ВСГ однозначно приведет к увеличению себестоимости производства тепловой и электрической энергии из-за высоких затрат на производство водорода, что является основной экономической проблемой.
- Водородная энергетика может стать экономически обоснованной только при условии разработки безопасных, эффективных и относительно недорогих способов его получения, хранения и использования.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

КОНТАКТЫ:

111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14,

НИУ «МЭИ», кафедра МиПЭУ

д.т.н., профессор

Росляков Павел Васильевич

RoslyakovPV@mpei.ru; **+7 (495) 362-79-01**