

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетика

Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы

«Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве
добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M0711300 – Энергетика и электротехника

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

УДК 662.769.21

На правах рукописи

Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана
Направление подготовки	7М0711300 – Энергетика и электротехника



Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор
Д.Р. Умышев
" 06 " 06 2022 г.

Рецензент
Доктор PhD, ассист. проф.
«Академии логистики и транспорта»
Ж.Ж. Калиев
" 09 " 06 2022 г.



Нормоконтроль
Магистр техн. наук,
сениор-лектор
А.О. Бердибеков
" 09 " 06 2022 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «Энергетика»,
PhD, ассоциированный профессор
А. Сарсенбаев
" 09 " 06 2022 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
И.И.Сатпаев
Институт энергетики
и машиностроения

Алматы 2022

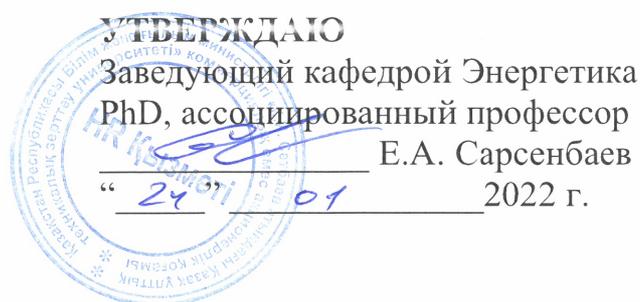
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетики

7M0711300 – Электроэнергетика



ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Сагынбай Еркебұлан Галымұлы

Тема: Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана

Утверждена приказом Ректора Университета №1998-М от "28" 10 2020 г.

Срок сдачи законченной диссертации "10" июня 2021 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Исходные данные, предоставляемые проектом NaturalHy, обоснованная рамочными программами Европейского Союза.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Раскрыть основные подходы к определению сущности понятия «водородная энергия»;

б) Изучить водород в качестве топлива, и обосновать его химические особенности;

в) Анализировать возможность смешивание водорода в системы природного газа;

г) Обосновать безопасность и оценка рисков для систем распределения природного газа, работающих на водороде.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): диссертация состоит из 8 рисунков

Рекомендуемая основная литература:

1 Новоселов С. В. Возможности использования водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. — М. 2007. -145с.

2 Гриб Н. Водородная энергетика: мифы и реальность. — Спб. 2020. -15с.

3 Глинка Н. Л. Общая химия: Учебное пособие для вузов / Под ред. Ермакова А.И Изд. 28-с, переработанное и дополненное. — М.: Интеграл-Пресс, 2000. 728 с.

4 Обраен Дж. Высокотемпературный электролиз для эффективного производства водорода в энергетике. — Техас.: Цех водорода, 2014. -154 с.

5 Синяк Ю.В. Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения. - 2007. - N 3. - С.42-59. - Библиогр.: 20 назв.

6 Потявин, Д.А. Силовые преобразователи в возобновляемой энергетике. Национальный исследовательский томский политехнический университет, - 2010.- С30.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Исследование текущей состояний водородной энергетики в Казахстане	07.02.2022г.	нет
Проведение анализа со смешиванием водорода в сетях природного газа, и его влияние на конечного пользователя	27.12.2021г.	нет
На основании полученных данных разработать модель системы внедрения водородной энергетики в домашние инженерные сети	27.03.2022г.	нет

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты	Дата подписа-ния	Подпись
Исследование текущей состояний водородной энергетики в Казахстане	Д.Р. Умышев PhD, ассоц.проф.	09.06.2022 г.	
Проведение анализа со смешиванием водорода в сетях природного газа	Д.Р. Умышев PhD, ассоц.проф.	09.06.2022 г.	
Разработать модель системы внедрения водородной энергетики в домашние инженерные сети	Д.Р. Умышев PhD, ассоц.проф.	09.06.2022 г.	
Нормоконтролер	А.О. Бердибеков магистр техн. наук, сениор-лектор	09.06.2022	

Научный руководитель





Д.Р. Умышев

Задание принял к исполнению обучающийся



Е.Ф. Сағынбай

Дата

" 24 " 07 2022 г.

АНДАТПА

Бұл магистрлік жұмыстың мақсаты – «сутегі энергиясы» түсінігінің мәнін анықтаудың негізгі тәсілдерін ашу. Сутекті отын ретінде зерттеп, оның химиялық және физикалық ерекшеліктерін негіздеу. Табиғи газ жүйесіне сутекті араластыру мүмкіндігін талдаңыз. Сутегімен жұмыс істейтін табиғи газ тарату жүйелері үшін қауіпсіздік пен тәуекелді бағалауды негіздеңіз. Сутегі энергиясын енгізу моделін жасау, Қазақстандағы үй инженерлік желілеріне қоспалар ретінде сутегі отынын пайдаланудың рентабельділігі мен пайдасын есептеңіз.

АННОТАЦИЯ

Цель данной магистерской диссертации является – раскрыть основные подходы к определению сущности понятия «водородная энергетика». Изучить водород в качестве топлива, и обосновать его химические и физические особенности. Анализировать возможность смешивание водорода в системы природного газа. Обосновать безопасность и оценка рисков для систем распределения природного газа, работающих на водороде. Разработать модель внедрения водородной энергии, рассчитать рентабельность и выгоду использования водородного топлива в качестве добавок к домашним инженерным сетям в условиях Казахстана.

ANNOTATION

The purpose of this master's thesis is to reveal the main approaches to defining the essence of the concept of "hydrogen energy". To study hydrogen as a fuel, and to substantiate its chemical and physical features. Analyze the possibility of blending hydrogen into natural gas systems. Justify the safety and risk assessment for natural gas distribution systems powered by hydrogen. Develop a model for the introduction of hydrogen energy, calculate the profitability and benefits of using hydrogen fuel as additives to home engineering networks in Kazakhstan.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Особенности водорода	12
2	Методы получения водорода	15
2.1	Термохимические методы получения водорода	15
2.2	Электролитические методы получения водорода	16
2.3	Биологические методы получения водорода	19
2.4	Методы получения водорода солнечной энергией	20
3	Водородные топливные элементы	21
4	Смешивание водорода с природным газом	24
4.1	Природный газ и смесь водорода/природного газа	26
4.2	Коэффициент избытка воздуха и влияние систем управления горением	31
4.3	Влияние на системы конечного использования	37
5	Безопасность	39
6	Утечка водорода	45
7	Проект внедрения водородной энергии в домашние инженерные сети	50
	Заключение	53
	Список использованной литературы	54

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования:

Теоретически обосновать и разработать организационно-экономические основы и моделировать результат, рассчитать выгоду от возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана. Выбрать самый оптимальный и экологичный способ получения водорода. Определить какой уровень водорода в составе топлива относительно безопасен для реализации проекта. Также исследовать безопасность использования водорода, его влияние на пользователя.

Задачи исследования:

- 1) Раскрыть основные подходы к определению сущности понятия «водородная энергетика»;
- 2) Изучить водород в качестве топлива, и обосновать его химические особенности.
- 3) Анализировать возможность смешивание водорода в системы природного газа
- 4) Обосновать безопасность и оценка рисков для систем распределения природного газа, работающих на водороде.

Актуальность исследования:

Энергетический сектор меняется очень быстро, и использование водорода играет ключевую роль в переходе к более устойчивой энергетической системе. Расширение роли возобновляемых газов, таких как водород, помогает снизить выбросы парниковых газов, поскольку они постепенно заменят производство электроэнергии на основе углерода, а также другие сектора, которые трудно сократить.

Есть два способа использования водорода в существующей газовой сети: смешивание его с природным газом или переход на 100% водородную сеть. Тем не менее, его закачка в газовую сеть является сложной задачей, поскольку не все трубопроводы в Европе одинаково совместимы. Таким образом, существует необходимость в дальнейшем понимании и изучении того, как водород может быть безопасно и эффективно включен в существующие газовые сети без ущерба для активов и оборудования, не говоря уже о соблюдении требований к качеству газа.

Ожидается, что использование водорода в качестве источника энергии сыграет ключевую роль в декарбонизации европейской энергетической системы. Тем не менее, необходимо глубже понять, какие технологии могут обеспечить безопасный и эффективный способ закачки водорода — либо в чистом виде, либо в смеси с природным газом — в газовые сети.

Современные газовые сети проектировались без учета использования водорода. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования, чтобы убедиться, что вся газовая сеть и ее компоненты могут поддерживать замену ПГ на H₂, уменьшая таким образом выбросы парниковых газов.

Научная новизна исследования:

Выделены ряд задач, способствующих на использование водорода в качестве добавки к традиционному топливу; Определен алгоритм проектирования и экономический расчет энергетической среды, на добавления водорода к имеющимся инженерным сетям; детально показан влияние добавления различного уровня водорода в природный газ и безопасность использования компонентного топлива.

Объект исследования:

Жилой дом, среднестатистическими показателями по региону Алматинской области. Общая площадь составляет – 100 м², где проживает 4 человека. Относительно хорошо утеплен, в зависимости от климатических особенностей данного региона. Общая мощность нагрузки равна 7500 Вт. Рассчитать, насколько будет выгоден водород при домашнем генерировании и использовании в домашних инженерных сетях.

Изменение климата и связанная с этим необходимость сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) при одновременном обеспечении энергией растущего населения мира является одной из основных проблем 21-го века, затрагивающей все секторы общества и экономики. В то время как широкое использование электроэнергии из возобновляемых источников является одним из вариантов сокращения выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой, использование водорода в качестве безуглеродного топлива также считается многообещающим вариантом декарбонизации, особенно в приложениях, которые трудно уменьшить, например, авиация, тяжелый автомобильный и морской транспорт или некоторые промышленные высокотемпературные процессы.

В Европе природный газ сегодня является вторым по важности первичным источником энергии (после нефти) [1]. Европейская газовая промышленность считает, что водород (H₂) необходим для обезуглероживания их бизнес-модели. Они поддерживают создание специализированной водородной инфраструктуры, поставляющей водород конечным пользователям, но также готовятся к закачке водорода в существующие газопроводы, чтобы быстро сократить выбросы CO₂ и увеличить спрос на водород. В Германии, например, Немецкая ассоциация по газу и воде (DVGW) планирует в ближайшем будущем увеличить допустимую концентрацию водорода в природном газе с чуть менее 10 об. % до 20 об. % [3]. Аналогичная ситуация и в других европейских странах, и в самом ЕС [6].

В Европейском Союзе потребление природного газа относительно равномерно распределяется между жилым и коммерческим, промышленным и энергетическим секторами, в то время как транспортные средства играют незначительную роль. Жилищно-коммерческий сектор является самым большим как по потреблению газа, так и по количеству установленных приборов. Подсчитано, что парк установленных приборов составляет более 200 миллионов бытовых и коммерческих приборов в Европейском Союзе. Это включает в себя системы отопления, устройства для производства горячей воды, устройства для приготовления пищи и общественного питания, и устройства микро-ТЭЦ (ТЭЦ:

комбинированное производство тепла и электроэнергии), а также другие приложения, такие как декоративные камины.

В рамках проекта Horizon 2020 «ТНУГА – Тестирование водорода для газовых применений» девять исследовательских организаций и компаний из ЕС изучают, как примесь водорода в природном газе может повлиять на приборы в жилом и коммерческом секторах, изучая смеси природного газа (Н₂NG) с содержанием Н₂ до 60 об.%. Проводятся измерения до 100 приборов различных типов и технологий. Кампании по измерениям сопровождаются анализом рынка [8], теоретическими исследованиями влияния водорода на процессы горения в этих устройствах, обзором литературы и анализом для оценки того, могут ли и каким образом материалы в трубах и фитингах подвергаться воздействию Н₂. Дополнительные исследования изучают, как можно смягчить потенциальное негативное воздействие примеси водорода и как процессы сертификации и стандартизации, возможно, придется адаптировать к высоким уровням примеси водорода.

В данной работе примесь водорода к природному газу анализируется с точки зрения теории горения. Обсуждается влияние на соответствующие характеристики топлива, такие как индекс Воббе, теплотворная способность, потребность в воздухе и скорость ламинарного горения, а также выводится и обсуждается потенциальное влияние на типичное конечное оборудование в полевых условиях.

1 Особенности водорода

Водород, безусловно, является самым распространенным элементом во Вселенной, составляя 75% массы всей видимой материи в звездах и галактиках.

Водород — самый простой из всех элементов. Вы можете представить себе атом водорода как плотное центральное ядро с одним вращающимся по орбите электроном, как единственную планету на орбите вокруг Солнца. Ученые предпочитают описывать электрон как находящийся в «облаке вероятностей», окружающем ядро, что-то вроде нечеткой сферической оболочки.

В большинстве атомов водорода ядро состоит из одного протона, хотя редкая форма (или «изотоп») водорода содержит и протон, и нейтрон. Эта форма водорода называется дейтерием или тяжелым водородом. Существуют и другие изотопы водорода, такие как тритий с двумя нейтронами и одним протоном, но эти изотопы нестабильны и распадаются радиоактивно [3].

Большая часть массы атома водорода сосредоточена в его ядре. На самом деле протон более чем в 1800 раз массивнее электрона. Нейтроны имеют почти такую же массу, как протоны. Однако радиус орбиты электрона, определяющий размер атома, примерно в 100 000 раз больше радиуса ядра! Ясно, что атомы водорода состоят в основном из пустого пространства. Атомы всех элементов состоят в основном из пустого пространства, хотя все остальные тяжелее и имеют больше электронов.

Протон имеет положительный электрический заряд, а электрон — отрицательный. Нейтроны не несут заряда.

Вместе заряды, связанные с протоном и электроном каждого атома водорода, компенсируют друг друга, так что отдельные атомы водорода электрически нейтральны.

С химической точки зрения атомное расположение одного электрона, вращающегося вокруг ядра, очень реактивно. По этой причине атомы водорода естественным образом объединяются в молекулярные пары (H_2 вместо H). Чтобы еще больше усложнить ситуацию, каждый протон в водородной паре имеет связанное с ним поле, которое можно визуализировать и математически описать как «спин». Молекулы, в которых оба протона имеют одинаковый спин, известны как «ортоводород». Молекулы, в которых протоны имеют противоположные спины, известны как «параводород».

Более 75% нормального водорода при комнатной температуре представляет собой ортоводород. Это различие становится важным при очень низких температурах, поскольку ортоводород становится нестабильным и переходит в более стабильное расположение параводорода, выделяя при этом тепло. Это тепло может сравниться с низкотемпературными водородными процессами, особенно сжижением.

Для нас естественно сравнивать водород с другими видами углеводородного топлива, с которыми мы более знакомы. Все углеводородные топлива представляют собой молекулярные комбинации атомов углерода и

водорода. Существуют тысячи типов углеводородных соединений, каждое из которых имеет определенную комбинацию атомов углерода и водорода в уникальной геометрической форме.

Простейшим из всех углеводородов является метан, который является основным компонентом природного газа. (Другие компоненты природного газа включают этан, пропан, бутан и пентан, а также примеси.) Метан имеет химическую формулу CH_4 , что означает, что каждая молекула имеет четыре атома водорода и один атом углерода.

Другими распространенными углеводородами являются этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}). Все они считаются легкими углеводородами, поскольку содержат менее пяти атомов углерода на молекулу и, следовательно, имеют низкую молекулярную массу (атом углерода почти в 12 раз тяжелее атома водорода).

Бензин состоит из смеси многих различных углеводородов, но важным компонентом является гептан (C_7H_{16}). Бензин, дизельное топливо, керосин и соединения, встречающиеся в асфальте, тяжелой нефти и восках, считаются тяжелыми углеводородами, поскольку они содержат много атомов углерода на молекулу и, следовательно, имеют высокую молекулярную массу [3].

Температуры кипения и замерзания водорода наиболее осмысленно сравнивать относительно «абсолютного нуля». Абсолютный ноль (0°R ; 0 K ; $-459,69^\circ\text{F}$; $-273,15^\circ\text{C}$) – это самая низкая температура во Вселенной, при которой останавливается всякое молекулярное движение. Водород имеет вторую самую низкую температуру кипения и плавления среди всех веществ, уступая только гелию.

Водород представляет собой жидкость при температуре ниже точки кипения 20 K (-423°F ; -253°C) и твердое тело при температуре ниже точки плавления 14 K (-434°F ; -259°C) и атмосферном давлении.

Очевидно, что эти температуры чрезвычайно низкие. Температуры ниже -100°F (200 K ; -73°C) в совокупности известны как криогенные температуры, а жидкости при этих температурах известны как криогенные жидкости.

Температура кипения топлива является критическим параметром, поскольку определяет температуру, до которой его необходимо охладить, чтобы хранить и использовать в виде жидкости. Жидкое топливо занимает меньше места при хранении, чем газообразное, и его, как правило, легче транспортировать и обрабатывать. По этой причине топливо, которое является жидким при атмосферных условиях (например, бензин, дизельное топливо, метанол и этанол), особенно удобно. И наоборот, виды топлива, представляющие собой газы при атмосферных условиях (например, водород и природный газ), менее удобны, поскольку их необходимо хранить в виде сжатого газа или криогенной жидкости [3].

Чистый водород не имеет запаха, цвета и вкуса. Струя водорода из течи почти не видна при дневном свете. Такие соединения, как меркаптаны и тиофаны, используемые для придания аромата природному газу, нельзя добавлять к водороду для использования в топливных элементах, поскольку они

содержат серу, отравляющую топливные элементы. Водород, получаемый при риформинге других видов ископаемого топлива, обычно сопровождается азотом, двуокисью углерода, окисью углерода и другими следовыми газами. В целом все эти газы также не имеют запаха, цвета и вкуса.

Водород нетоксичен, но может вытеснить кислород из воздуха. Тем самым человек может удушиться. Так как низкие показатели кислорода критически опасно влияют на наш организм.

Водород имеет самый низкий атомный вес среди всех веществ и поэтому имеет очень низкую плотность как в газообразном, так и в жидком состоянии.

Удельный объем газообразного водорода составляет 11,9 м³/кг при 20 °С и 1 атм, а удельный объем жидкого водорода составляет 0,014 м³/кг при – 253 °С и 1 атм [3].

Когда водород хранится в виде жидкости, он испаряется при расширении до атмосферных условий с соответствующим увеличением объема. Коэффициент расширения водорода 1:848 означает, что водород в газообразном состоянии при атмосферных условиях занимает в 848 раз больше объема, чем в жидком состоянии.

Водород воспламеняется в очень широком диапазоне концентраций в воздухе (4–75 %) и взрывоопасен в широком диапазоне концентраций (15–59 %) при стандартной атмосферной температуре. Пределы воспламеняемости увеличиваются с температурой. В результате даже небольшие утечки водорода могут воспламениться или взорваться. Утечка водорода может концентрироваться в замкнутом пространстве, что повышает риск воспламенения и взрыва. Для водорода температура самовоспламенения относительно высока и составляет 585 °С. Это затрудняет воспламенение водородно-воздушной смеси только за счет тепла без дополнительного источника воспламенения.

Водород обладает дополнительным свойством низкой электропроводности, так что поток или перемешивание газообразного или жидкого водорода может генерировать электростатические заряды, которые приводят к возникновению искр. По этой причине все оборудование для транспортировки водорода должно быть тщательно заземлено. Горючие смеси водорода и воздуха легко воспламеняются.

2 Методы получения водорода

Низкоуглеродистый водород может сыграть важную роль в борьбе с изменением климата и ухудшением качества воздуха. В этой работе рассматривается вопрос о том, как можно производить водород в полезных масштабах для питания транспортных средств, обогрева домов и обеспечения промышленных процессов.

Рассмотрены четыре группы технологий производства водорода.

2.1 Термохимические методы получения водорода

Водород производился в промышленных масштабах с использованием ископаемого топлива на протяжении десятилетий. До конца 1960-х годов преобладающим источником газа в Великобритании был бытовой городской газ, содержащий примерно 50% водорода.

В настоящее время около 95% мирового производства всего водорода производится из исключительно ископаемого топлива, в основном из природного газа, который почти что состоит из метана, методом паровой конверсии метана, также газификации угля. Производство водорода в Великобритании следует этой тенденции, при этом большая часть общего объема производства (26,9 ТВтч/год) приходится на паровой риформинг метана. Газификация угля, вероятно, будет по-прежнему вносить небольшой вклад, а газификация биомассы имеет потенциал в небольших масштабах.

Все эти термохимические методы выделяют углекислый газ либо в результате подводимой энергии, либо в качестве побочного продукта. Таким образом, улавливание и хранение углерода является необходимым условием, если любой из этих методов должен играть какую-либо роль в низкоуглеродной водородной экономике.

Паровой риформинг метана включает реакцию природного газа с парами при высоких температурах над катализатором с получением синтез-газа, такие как монооксида углерода и смесь водорода, который затем подвергается дальнейшей обработке для отделения водорода [4].

Мощность производства водорода на типичной установке паровой конверсии метана составляет от 150 до 440 МВт с энергоэффективностью обычно 70%. Если паровой риформинг метана должен стать основным низкоуглеродным источником водорода, то улавливание и хранение углерода, в наши дни, имеет важное значение. Желательно повышение эффективности, так как добавление улавливания и хранения углерода приведет к снижению общей эффективности производства на 5–14 %.

Подсчитано, что от 71% до 92% углерода при паровом риформинге метана может быть уловлено, однако потребуются более высокие степени улавливания, если процесс будет использоваться в долгосрочной перспективе.

2.2 Электролитические методы получения водорода

Электролитическое производство водорода, также известное как электролиз, расщепляет воду на водород и кислород с использованием электричества в электролизере. Электролиз производит чистый водород, который идеально подходит для низкотемпературных топливных элементов, например, в электромобилях.

Существует целый ряд различных электролизерных технологий. Щелочные электролизеры являются наиболее технически развитыми, при этом самая крупная действующая установка имеет мощность до 2,5 МВт. Однако щелочные электролизеры плохо работают с прерывистыми возобновляемыми источниками энергии. Крупнейшая в мире щелочная электролизерная установка мощностью 135 МВт эксплуатировалась Norsk Hydro в Гломфьорде, Норвегия, с 1953 по 1991 год, пока она не стала нерентабельной по сравнению с низкой стоимостью природного газа.

Быстро развиваются мембранные электролизеры с полимерным электролитом. Siemens эксплуатирует электролизер мощностью 6 МВт в Майнце с 2015 года. ITM Power Ltd заключила проект совместного предприятия с Shell по строительству электролизера мощностью 10 МВт на комплексе нефтеперерабатывающих заводов Рейнланд в Германии.

Электролизеры на твердом оксиде технически менее совершенны, но потенциально предлагают самую высокую эффективность из всех вариантов электролизеров, если их можно соединить с подходящим источником безуглеродного тепла.

Эффективность электролизеров неуклонно растет. Ожидается, что в ближайшем будущем эффективность процесса от 85% до 95% станет возможной как для малых, так и для средних электролизеров. Срок службы электролизера зависит от скорости производства водорода, при этом некоторые исследования указывают на компромисс между скоростью и долговечностью из-за постепенной деградации полимерных мембран электролизера. Эффективность всех электрохимических технологий в значительной степени не зависит от масштаба, что поддерживает использование небольших устройств для распределенного производства водорода. В конечном счете углеродный след водорода от электролиза будет зависеть от используемого источника энергии. Выбросы углерода будут ниже, если источник электроэнергии низкоуглеродный.

Все электролизеры сталкиваются с общими научными и инженерными проблемами. В ближайшем будущем разработка лучших электродов и новых катализаторов приведет к снижению затрат, поскольку такое же количество

водорода будет производиться в реакторах меньшего размера. Этому будет способствовать лучшая системная интеграция и создание цепочки поставок для обеспечения специализированными компонентами, используемыми в электролизерах. В более долгосрочной перспективе усовершенствование электролитов, лучшее понимание механизмов и внедрение систем высокотемпературных электролизеров повысят эффективность и приведут к дальнейшему снижению затрат на водород. Такие улучшения со временем будут способствовать автономному развертыванию электролиза с использованием возобновляемых источников энергии.

Рамочные программы Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий финансирует проекты в области электролиза, и также осуществляются проекты по электролизу на уровне государств-членов ЕС. Самые крупные проекты — ELYGRID, INGRID и Don Quichote.

Чтобы улучшить и адаптировать щелочные электролизеры в сочетании с прерывистыми возобновляемыми источниками энергии (энергия ветра), проект ELYGRID (2011–2014) разрабатывает щелочной электролизер высокого давления и высокой производительности с меньшими затратами и более высокой эффективностью. Новая топология ячейки позволила достичь эффективности батареи 70%, тем самым снизив общую стоимость произведенного водорода. Кроме того, была разработана новая и эффективная силовая электроника, которая хорошо работает в сочетании с возобновляемыми источниками энергии. Разработаны новые противовыбросовые превенторы, которые позволяют разместить все компоненты электролизера MW в одном контейнере.

Для демонстрации щелочного электролизера с твердотельной системой хранения водорода и топливными элементами для балансировки спроса и предложения энергии в активных распределительных сетях был запущен проект INGRID (2012–2016). Применяются передовые технологии активного управления сетью Smart Grid на основе ИКТ для балансировки сильно меняющегося энергоснабжения и спроса в сценарии высокого проникновения возобновляемых источников энергии. Проект направлен на повышение эффективности доставки туда и обратно (50%–60%), плотности энергии (600 кВтч/м³), модульности и диспетчеризации.

Проект Don Quichote (2012-2017) демонстрирует технологию электролизера PEM, электрохимическое сжатие и технологию топливных элементов в качестве расширения существующей станции заправки водородом, состоящей из щелочного электролиза и механического сжатия. Продемонстрированные технологии позволяют производить водород из дешевой электроэнергии и производить электроэнергию при высоких ценах на электроэнергию. Технологические, экономические и экологические характеристики демонстрируемого оборудования сравниваются с существующей инфраструктурой, чтобы определить прогресс по сравнению с современным уровнем техники.

Электролиз воды используется в промышленности уже более 100 лет, но, несмотря на зрелость этой технологии, в последние годы достигнут

значительный прогресс. Электролизерные технологии различаются по конфигурации электродов и электролита:

- Щелочной: когда два электрода работают в жидком щелочном растворе электролита гидроксида калия или гидроксида натрия.

- PEM: в этой технологии электролит представляет собой твердый полимер (PEM). Этот электролит обеспечивает проводимость протонов, разделение образующихся газов и электрическую изоляцию электродов.

- SOEC: Электролизер с твердым оксидом использует керамический электролит и работает при высоких температурах (500-1000°C).

Преобразование энергии в водород связано с особыми проблемами, поскольку электролизер может работать только часть года (когда имеется избыток электроэнергии), но должен быть в состоянии запуститься в короткие сроки (порядка минут). Эти новые режимы работы требуют достижений в технологии электролиза, связанных с производительностью и безопасностью. Частичная нагрузка, прерывистая работа и быстрое реагирование — это новые условия эксплуатации, с которыми придется столкнуться электролизерам, когда они будут интегрированы в электростанцию или при предоставлении вспомогательных услуг. Новые ключевые показатели эффективности (KPI) должны быть определены для охвата этих новых условий эксплуатации с описанием соответствующих методов и протоколов тестирования (см. Спецификацию новых ключевых показателей эффективности). Стационарное хранилище водорода обычно включается в систему электролизера и поэтому зависит от производительности электролизера.

Текущие стандарты для электролизеров, ISO 22734–1: 2008 для промышленного применения и ISO 227342: 2011 для бытового применения, касаются в основном аспектов безопасности и сертификации и в настоящее время объединяются в один стандарт (ISO 22734). Это обновление позволит включить в стандарт системы с молекулярной массой, новую технологию электролизеров (например, AEM: анионообменную мембрану), а также требования к дизайну и испытаниям [4].

Однако пробелы в стандартизации все еще остаются. Например, твердооксидный электролиз (SOEL) — это новая технология, для которой могут быть полезны методологии испытаний и процедуры определения рабочих характеристик элементов, блоков и систем, но в настоящее время они не входят в область применения. Кроме того, в настоящее время отсутствуют специальные процедуры тестирования и связанные с ними профили нагрузки для моделирования динамических условий работы электролизеров, прямо или косвенно связанных с возобновляемыми источниками энергии, такими как прерывистые возобновляемые источники энергии или работающие с частичной нагрузкой. Для сравнения эффективности электролизеров необходимы стандарты производительности, которые определяют условия эксплуатации (см. действие по стандартизации Стандарты установки и эксплуатации), методы расчета и границы системы. Кроме того, необходимы требования к производительности электролизера для подключения к неустойчивым

источникам энергии (например, ветровой или солнечной) и к газовой сети (для доставки произведенного водорода) в приложениях преобразования энергии в газ. Кроме того, необходимо решить ряд серьезных проблем, связанных с затратами, эффективностью и производительностью, начиная с НИОКР и заканчивая предварительными нормативными исследованиями (PNR). Эти темы исследований, которые необходимо решить, могут быть определены на уровне ячейки, стека и системы.

2.3 Биологические методы получения водорода

Микробные процессы могут преобразовывать биомассу в водород и другие ценные конечные продукты. Как правило, биомасса расщепляется микроорганизмами в отсутствие кислорода с образованием водорода в процессе, известном как анаэробное сбраживание. Микробные процессы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими технологиями производства водорода, таких как более низкие рабочие температуры, более простая технологическая основа и возможность использования с широким спектром влажных и сухих типов биомассы, таких как солома и сточные воды.

Анаэробное сбраживание используется для производства энергии из влажной биомассы и успешно используется для производства метана из отходов биомассы в течение многих десятилетий. Эта технология может быть адаптирована для производства водорода.

Производство водорода посредством анаэробного сбраживания является частью общепринятого процесса производства метана. В ферментере, производящем метан, водород, произведенный одной группой организмов, превращается в метан второй группой. В ферментере, производящем водород, вторая группа организмов избирательно ингибируется путем изменения условий, таких как pH и температура, для предотвращения превращения водорода в метан [2].

Существуют проблемы связанные с биоконверсией в водород, например, при использовании фотоферментации для преобразования органических кислот в дополнительный водород. Основной проблемой здесь является выделение азота из биоматериала перед фотоферментацией, и по этому вопросу были проведены некоторые исследования.

Процессы биоконверсии водорода также могут быть применены к существующим углеводородным ресурсам для извлечения водорода и оставления углерода под землей. Сообщалось о биологической конверсии нефтяных и угольных углеводородов в газообразный метан, и благодаря сочетанию подходов инженерии и синтетической биологии можно заменить производство метана производством водорода. В среднесрочной перспективе необходимо продемонстрировать жизнеспособность этих новых технологий производства биологического водорода в промышленных масштабах.

Необходимо спроектировать и построить экспериментальные исследовательские и демонстрационные установки для производства водорода.

Исследования в области биологического производства водорода имеют значительную историю в Европе с рядом рамочных проектов, включая Hyvolution и HyTime. В соответствии с Соглашением Международного энергетического агентства по водороду в настоящее время реализуется задача «Биологический водород для энергетики и окружающей среды», которую возглавляет Университет Южного Уэльса.

2.4 Методы получения водорода солнечной энергией

В настоящее время рассматривается широкий спектр материалов и конструкций реакторов для интегрированных технологий преобразования солнечной энергии в топливо. Они варьируются от нанесения катализаторов для синтеза топлива на фотоэлектрические устройства (часто называемые «искусственными листьями») до суспензий фотокаталитических наночастиц. Первый подход в настоящее время является наиболее эффективным, но второй имеет наибольшее потенциальное снижение затрат. Светопоглощающие материалы в таких реакторах варьируются от обычных полупроводников, таких как кремний, до менее традиционных полупроводников, таких как оксиды металлов, а также материалы на молекулярной и полимерной основе, включая нитриды углерода. Такие материалы интегрируются с целым рядом неорганических и молекулярных катализаторов, как правило, в наномасштабе, при этом во всех областях наблюдается стремительный научный прогресс.

3 Водородные топливные элементы

Идее получения электрической энергии путем окисления водорода кислородом более 180 лет. Британский физик и юрист сэр Уильям Гроув обнаружил, что процесс электролиза, при котором вода расщепляется на водород и кислород, также можно обратить вспять. Еще в 1839 году он представил «гальваническую газовую батарею», которая вырабатывала электричество за счет «холодного сжигания» водорода и кислорода. Однако измеряемое напряжение и ток были настолько малы, что топливный элемент не мог противостоять таким изобретениям, как электродинамо и двигатель внутреннего сгорания.

В топливном элементе непрерывно подаваемое топливо (например, водород из природного газа) вступает в реакцию с окислителем (например, кислородом из воздуха). Это производит воду, электричество и тепло. Эта электрохимическая реакция также известна как «холодное сгорание» и является особенно эффективной.

Структура топливного элемента сравнима со структурой батареи. Оба состоят из двух электродов: анода (положительный полюс) и катода (отрицательный полюс). Электролит отделяет электроды друг от друга и отвечает за перенос ионов между анодом и катодом. Поэтому он должен быть проницаем для ионов [2].

Электролиты представляют собой твердые, жидкие или гелеобразные химические вещества, которые могут проводить электричество. В топливном элементе PEMFC электролит состоит из тонкой твердой пластиковой оболочки, полимерной мембраны. PEMFC расшифровывается как «топливный элемент с протонной обменной мембраной», на немецком языке: топливный элемент с полимерным электролитом. Электролит топливных элементов ТОТЭ, с другой стороны, состоит из высокотехнологичного керамического диоксида циркония, устойчивого к нагреву и коррозии даже при высоких температурах. Аббревиатура SOFC расшифровывается как «Твердооксидный топливный элемент». Основное различие в конструкции двух типов топливных элементов заключается в используемом электролите.

Функционирование топливных элементов также можно сравнить с работой аккумуляторов: энергия вырабатывается в результате химической реакции между анодом и катодом. Партнерами химической реакции в топливном элементе являются водород и кислород.

Топливный элемент с протонно-обменной мембраной, PEMFC (для топливного элемента с протонно-обменной мембраной) также называют топливными элементами PEFC.

Элемент водород снова реагирует с кислородом, образуя воду. Топливные элементы используют этот простой принцип в том, как они работают: так называемый риформер производит водород из природного газа или метанола. В топливном элементе этот водород вступает в реакцию с кислородом воздуха. Это

производит воду, электричество и тепло. Эта электрохимическая реакция также известна как «холодное сгорание», чтобы отличить ее от сгорания, производящего энергию в двигателях или турбинах.

При «холодном сгорании» топливные элементы вырабатывают не только электрическую, но и тепловую энергию. Большое преимущество, но не только это делает их такими энергоэффективными. Преобразуя энергию напрямую, топливные элементы почти полностью используют энергосодержание используемого топлива.

Электрохимическое преобразование энергии имеет еще больше преимуществ перед сжиганием: большинство топливных элементов работают на месте практически без выбросов, так как производят только водяной пар. Только нагрев установки риформинга вызывает выбросы углекислого газа, поскольку здесь обычно используется обычный природный газ. CO₂ также образуется при использовании метанола [3].

Поэтому было бы еще более безвредно для климата, если бы топливные элементы использовали в качестве топлива чистый водород вместо природного газа и, следовательно, могли бы обходиться без установки риформинга. Однако для производства водорода следует использовать только возобновляемые источники энергии. Для более широкого рынка это мечта о будущем. Однако уже сейчас можно использовать CO₂-нейтральный биогаз вместо природного газа в системах отопления на топливных элементах. Аналогичная ситуация и с метанолом, который также CO₂-нейтрален, но до сих пор почти не использовался для топливных элементов.

Кроме того, топливные элементы в значительной степени устраняют необходимость в движущихся частях, таких как поршни и шестерни, которые могут вызывать громкий рабочий шум. Это делает их малоизнашиваемыми и неприхотливыми в обслуживании.

Существенным недостатком топливного элемента являются его сравнительно высокие технические требования. Это и связанные с этим высокие затраты замедлили развитие технологии на многие десятилетия. Кроме того, обогреватели на топливных элементах покрывают только базовую потребность в тепле.

Еще одним топливом для топливного элемента является метанол. Он уже используется в спортивном автомобиле «Натали». Производитель также планирует внедорожник, грузовик и малолитражку с метанольным топливным элементом. Недостатком метанола является то, что он производит CO₂ в топливном элементе. Однако это можно компенсировать CO₂-нейтральным метанолом. Одним из преимуществ является то, что обычные заправочные станции могут использоваться для метанола.

Ни один другой тип топливного элемента не является столь универсальным, как топливный элемент с мембраной или топливный элемент с PEM. Из-за высокой динамики выходной мощности топливные элементы PEM часто используются в мобильном секторе, например. В автомобилях, фургонах и автобусах, а также для применения в авиации, аэрокосмической

промышленности и судоходстве. Широкой областью применения топливных элементов PEM, которые относятся к низкотемпературным топливным элементам, является также аварийное электроснабжение, например, на железнодорожном транспорте и в телекоммуникациях, а также защита критически важных промышленных инфраструктур или центров обработки данных.

Системы топливных элементов меньшего размера используются, например, в портативных генераторах или стационарных в области бытового энергоснабжения теплоэлектростанциями. Более крупные системы топливных элементов PEM можно найти, например, в больницах, бассейнах или других коммунальных службах. Топливный элемент PEM в настоящее время имеет наибольший потенциал среди всех типов топливных элементов, особенно с точки зрения массового производства [5].

Топливный элемент на основе оксидной керамики характеризуется сравнительно простой системой, длительным сроком службы и высокой эффективностью. Рабочая температура оксидно-керамических топливных элементов до 1000 °С предопределяет использование этих высокоэффективных высокотемпературных топливных элементов для извлечения технологического тепла и, таким образом, для стационарного использования на электростанциях и теплоэлектростанциях, а также для системы отопления в частных и двухквартирных домах. В сочетании с газовыми турбинами топливные элементы с расплавленным карбонатом также используются на небольших комбинированных теплоэлектростанциях и крупных электростанциях.

4 Смешивание водорода с природным газом

Водород может играть важную роль в качестве энергоносителя в устойчивом, надежном и рентабельном энергетическом будущем. В этом отчете рассматриваются ключевые вопросы, связанные с концепцией смешивания водорода с сетями газопроводов. При соответствующих условиях и при относительно низких концентрациях водорода смешивание может потребовать лишь незначительных изменений в работе и техническом обслуживании сети трубопроводов. Компонент водородной смеси может быть доставлен в системы конечного пользователя, или водород может быть извлечен ниже по потоку и использован в таких приложениях, как автомобильные или стационарные топливные элементы. В целом, на основании проведенных на сегодняшний день исследований, при использовании смесей с содержанием водорода менее 5–15 % (по объему) возникают лишь незначительные проблемы, в зависимости от конкретных условий и конкретного состава природного газа. Для более высоких смесей в диапазоне 15%–50% необходимо решить более важные вопросы, такие как переоборудование бытовых приборов или увеличение мощности сжатия вдоль распределительных сетей, обслуживающих промышленных потребителей. Смеси с содержанием выше 50% сталкиваются с более сложными проблемами во многих областях, включая материалы трубопроводов, безопасность и модификации, необходимые для устройств конечного использования или других целей [18].

Смешивание водорода может оказаться жизнеспособным средством увеличения производительности объектов возобновляемой энергии, таких как ветряные электростанции, за счет обеспечения путей хранения и доставки водорода в широком диапазоне географических точек. Учитывая большой географический охват и масштабы существующей инфраструктуры природного газа, даже очень низкие уровни смеси (менее 3%–5%) могут поглощать очень большие количества урезанной или нерентабельной ветровой или солнечной энергии. Смешивание возобновляемого водорода с природным газом может улучшить углеродоемкость и устойчивость конечного продукта природного газа, поставляемого потребителям. Хотя этот путь требует дополнительного анализа и исследований и может быть ограничен конкретными условиями, в ближайшем будущем он представляется жизнеспособным.

Смешивание также может оказаться жизнеспособным средством доставки водорода, произведенного в удаленных местах, и извлечения водорода ниже по потоку рядом с конечными приложениями, такими как FCEV или стационарные топливные элементы. Доставка водорода по трубопроводу считается экономически эффективным способом перемещения водорода от места его производства к конечным потребителям, но только в больших объемах и на большие расстояния. Кроме того, стоимость строительства крупномасштабной специализированной системы водородных трубопроводов очень высока, а завершение может занять десятилетия. Альтернативные пути доставки будут

использоваться на ранней стадии роста рынка. Некоторые ранние рыночные пути, такие как автоцистерны или производство на месте, могут сохраниться наряду с поставкой по трубопроводу в зрелой водородной инфраструктуре. Если смешивание водорода с природным газом с последующим извлечением окажется экономически выгодным на ранней стадии роста рынка, оно может оказаться жизнеспособным в долгосрочной перспективе в качестве дополнительного способа доставки.

Институт газовых технологий (GTI) провел обзор и оценил некоторые аспекты смешивания водорода с существующей системой газопроводов. Этот обзор охватывает основные аспекты смешивания, рассматриваемые европейским проектом NaturalHy (Florisson).

Целью проекта NaturalHy является определение возможных условий, при которых водород, произведенный на централизованной производственной площадке, можно будет закачивать в магистральные трубопроводы высокого давления и доставлять конечным потребителям через распределительные сети. Проект NaturalHy, софинансируемый Европейской комиссией в рамках Шестой рамочной программы исследований, разработки и демонстрации технологий.

Потенциальные преимущества добавления водорода к природному газу были рассмотрены в «Комплексе проектных работ 1 NaturalHy» посредством оценки жизненного цикла и социально-экономической оценки.

Таким образом, следующие преимущества добавления водорода в сеть природного газа:

Общие преимущества:

– Значительное сокращение выбросов парниковых газов при производстве водорода из возобновляемых источников;

– Использование водорода в автомобилестроении: потенциальные выгоды от снижения потребления бензина и улучшения качества воздуха за счет сокращения выбросов двуокиси серы, оксидов азота и твердых частиц.;

– Экологизация природного газа: когда в существующих приборах для производства тепла и электроэнергии используется смесь водорода и природного газа. Это преимущество похоже на увеличение количества возобновляемых источников энергии в электросети, поскольку оно не требует значительных изменений в оборудовании для конечного использования.

Лучшее понимание соотношения затрат и выгод для смешивания в системе трубопроводов природного газа Казахстана по сравнению с европейской оценкой потребует значительного дополнительного анализа и исследования.

Почти 100% магистральных трубопроводов в стране изготовлены из стали диаметром 12–120 сантиметров. Обычно они работают при давлении 1,2–1,6 Мпа. Сеть трубопроводов изготовлены из стали, покрыты катодной оболочкой и защищены от коррозии.

Сталь и полиэтилен (ПЭ) являются преобладающими материалами в системе распределения природного газа. Главные распределительные трубы обычно имеют ширину 12–120 сантиметров и изготавливаются либо из полиэтилена, либо из стали. Размеры распределительных линий обычно имеют

ширину 6–40 сантиметров и изготавливаются либо из полиэтилена, либо из стали. Давление в распределительных трубопроводах составляет 0,005–1,2 МПа, а иногда до 1,6 Мпа. Распределительные объекты в основном расположены в населенных пунктах. Распределительные линии не соответствуют местоположениям класса, но большинство линий попадают в местоположения класса 3 и класса 4 в соответствии с определениями местоположения класса передачи. Распределительные трубопроводы часто располагаются в густонаселенных городских районах, как правило, под мощеными улицами, автомагистралями и другими общественными зонами.

4.1 Природный газ и смесь водорода/природного газа (H₂NG)

В жилом и коммерческом секторе природный газ используется исключительно в качестве топлива для получения низкотемпературного тепла, которое затем используется для отопления помещений, приготовления пищи или для производства горячей воды, и это наиболее распространенные области применения. За исключением ТЭЦ на топливных элементах, газ сжигается непосредственно в горелках для получения горячего дымового газа. Следовательно, изменение свойств топлива из-за примеси водорода в природный газ необходимо учитывать при оценке того, как бытовые и коммерческие газовые приборы могут реагировать на более высокие уровни H₂ в природном газе.

Природный газ (который в основном состоит из метана, CH₄) и водород существенно различаются по своим физическим свойствам. Следовательно, во многих отношениях вопрос о том, какой уровень содержания водорода в природном газе приемлем как для устаревших, так и для новых приборов, является вопросом качества газа.

Качество газа и его влияние на газовые приборы и оборудование в различных отраслях давно исследуются как газовой промышленностью, так и производителями и операторами оборудования [16–19]. Во многих странах действуют правила, определяющие ряд критериев, которым должен соответствовать газ, чтобы его можно было подавать в общественные газовые сети. Общими критериями качества газа являются относительная плотность d , (объемная) высшая теплотворная способность (GCV) и индекс Воббе (WI), критерий взаимозаменяемости топливного газа.

Если два газа имеют одинаковый индекс Воббе и сжигаются с одним и тем же соплом горелки и с одинаковым давлением в сопле, они выделяют одинаковое количество тепла [20]. Это означает, что прибор может выполнять свою задачу, т. е. Удовлетворять заданную потребность в тепле обоими газами без необходимости физической модификации оборудования.

Хотя это очень упрощенный способ решения сложной темы, таким образом удобно количественно определять взаимозаменяемость топлива, по крайней мере, для химически сходных видов топлива.

На рисунке 1 показано, как изменяется относительная плотность, представляющая собой отношение стандартной плотности топлива и стандартной плотности воздуха, высшая теплотворная способность и индекс Воббе, когда водород смешивается с метаном, представляя в данном случае природный газ. В то время как d и GCV снижаются линейно с более высокими уровнями H_2 , снижение индекса Воббе гораздо менее выражено и также нелинейно. Например, чистый метан и чистый водород различаются примерно на 70% по ВТС, но только примерно на 10% по показателю Воббе.

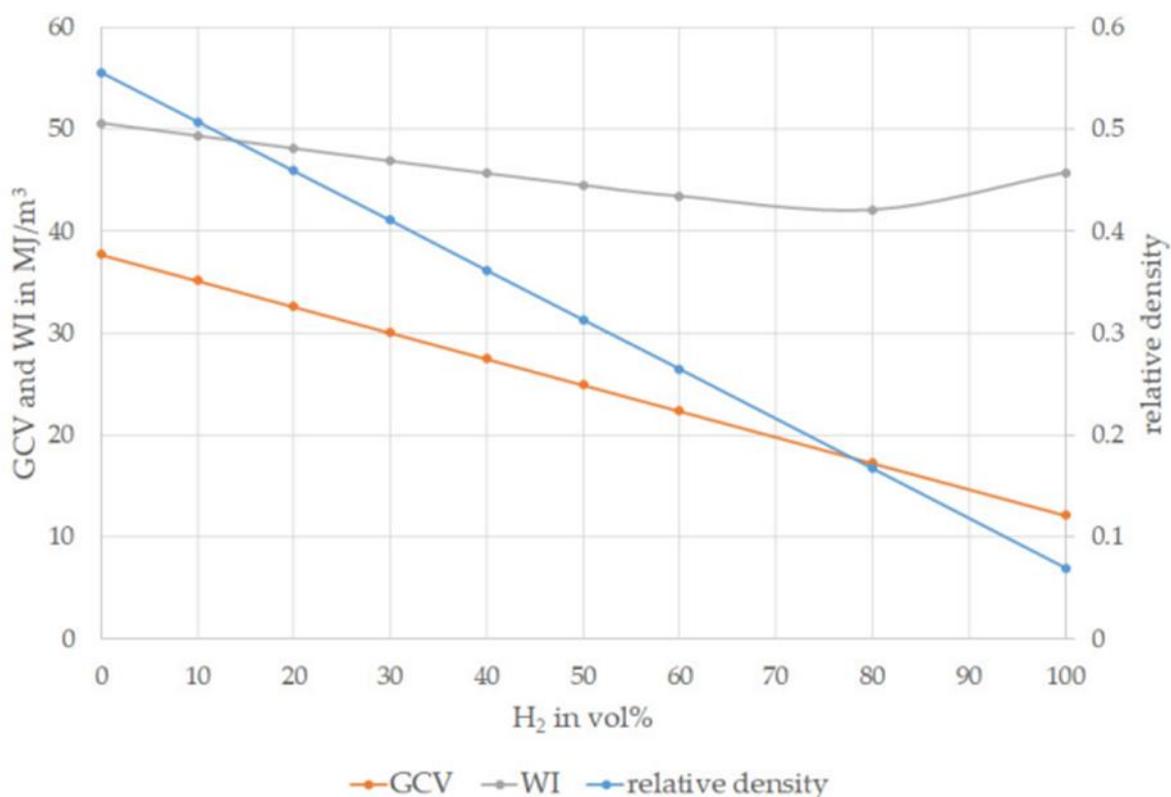


Рисунок 1 – Относительная плотность, высшая теплотворная способность и индекс Воббе для смесей CH_4/H_2

До сих пор рассматривалась только бинарная смесь метана и водорода. Однако природный газ состоит не только из метана, но также содержит высшие углеводороды (например, этан и пропан) или инертные вещества, такие как двуокись углерода или азот. Состав газа различается в зависимости от того, где он был добыт, как он был переработан и смешивался ли он с другими природными газами в газовой инфраструктуре. В любом заданном месте в пределах газовой сети местный состав газа может меняться со временем.

Поэтому важно, чтобы все партнеры по рынку указывали, какой газ транспортируется и используется. Поскольку нецелесообразно предписывать составы газа для работы сети, общепринятой практикой является указание качества газа с использованием небольшого числа соответствующих критериев. В европейском стандарте качества газа EN 16726 [15], например, указан диапазон

относительной плотности, а также минимальное метановое число, а в Общей деловой практике EASEE-gas от 2005 г. [21] добровольное соглашение в рамках Европейская газовая промышленность для облегчения трансграничной торговли газом в ЕС также устанавливает диапазон допустимых индексов Воббе для H-газов.

На рисунке 2 показаны три типичных природных газа (российский H-газ и H-газ Северного моря, два наиболее важных качества H-газа в ЕС, а также CH₄ в качестве эталона) на диаграмме качества газа вместе с ограничениями, налагаемыми на относительные плотности и индекса Воббе согласно EN 16726 и общепринятой деловой практике EASEE-gas соответственно. Очевидно, что наиболее строгим ограничением для примеси водорода, по крайней мере, с точки зрения регулирования, является критерий плотности, и что диапазон индекса Воббе в этом контексте гораздо менее важен. Примесь водорода выше 30 об.% на этой диаграмме не учитывалась, так как большинство публичных дискуссий о примеси H₂ в сети природного газа сосредоточено на концентрациях до 20–30 об.%. На диаграмме также подчеркивается, что допустимые пределы содержания водорода должны учитывать качество и состав природного газа, к которому примешивается водород.

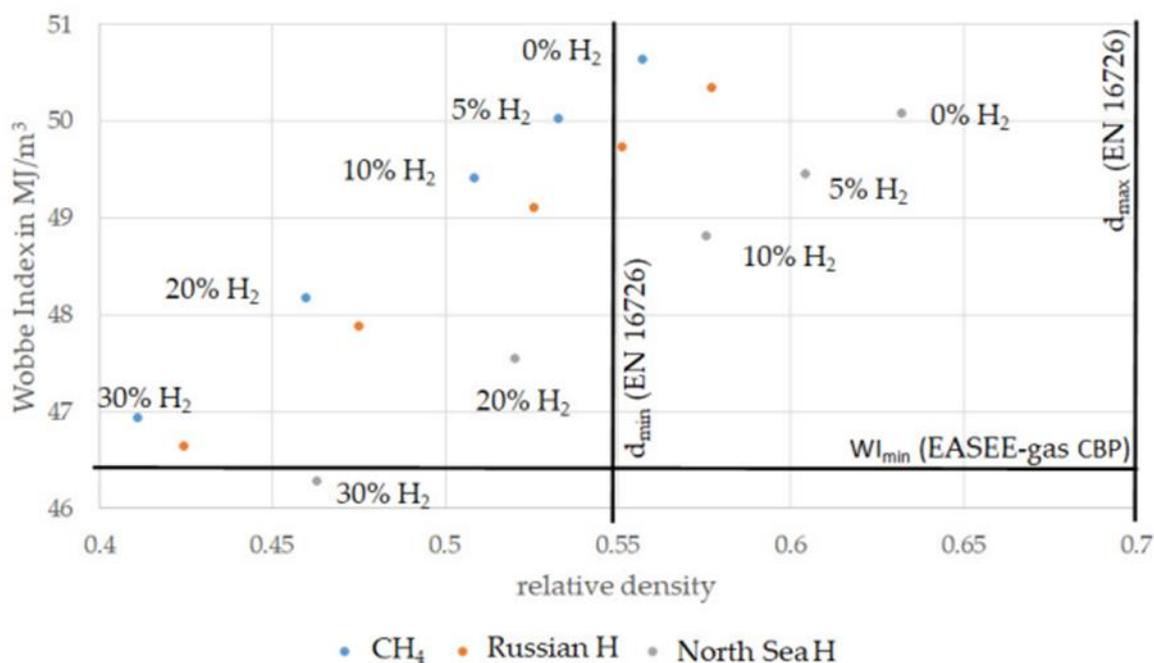


Рисунок 2 – Примесь водорода к природным газам на диаграмме качества газа

Однако следует учитывать и другие аспекты, связанные с горением. Одна из основных проблем в контексте примеси H₂ к природному газу и его воздействия на конечное оборудование связана с ожидаемыми более высокими температурами сгорания. При более высоких уровнях водорода адиабатическая температура горения топливной смеси увеличивается (смотрите рисунок 3), пока

другие рабочие параметры, такие как коэффициент избытка воздуха λ , остаются постоянными. Температуры важны, поскольку они влияют на множество различных аспектов процесса горения. Они могут вызвать локальный перегрев компонентов, но также могут привести к увеличению выбросов оксидов азота (NOX).

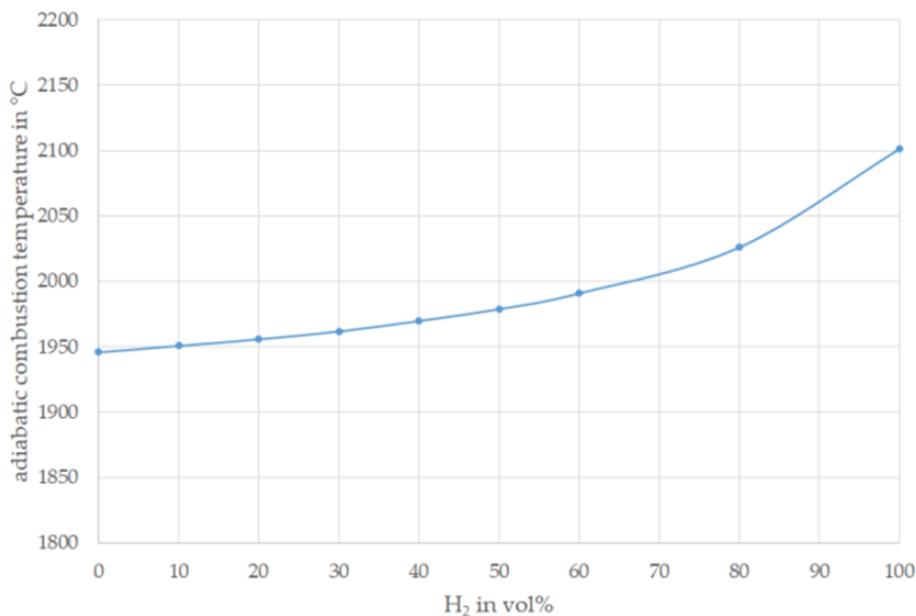


Рисунок 3 – Адиабатическая температура горения смесей CH₄/H₂ при стехиометрических условиях ($p = 1,01325$ бар)

Еще один вопрос, который необходимо учитывать, — это увеличение скорости ламинарного горения SL . Скорость горения имеет решающее значение для стабилизации пламени в горелках с предварительным смешиванием. В большинстве бытовых и коммерческих приборов используются горелки с предварительным смешиванием (отопительные приборы) или частично с предварительным смешиванием (газовые плиты и духовки), в отличие от систем промышленных горелок, где более распространены системы без предварительного смешивания [12]. Поскольку процессы горения в бытовых приборах обычно являются ламинарными [13], ламинарная скорость горения является важным свойством для этого приложения. В ламинарной горелке с предварительным смешиванием пламя стабилизируется там, где существует равновесие между локальными ламинарными скоростями горения и локальной скоростью потока.

На рисунке 4 показан график SL в зависимости от отношения эквивалентности ϕ ($=1/\lambda$), рассчитанного для атмосферного давления $p = 1,01325$ бар. Модель свободно распространяющегося одномерного пламени использовалась в сочетании с механизмом реакции GRI 3.0 [15] для расчета скоростей ламинарного горения, и значения хорошо согласуются с данными как моделирования, так и измерений, найденных в литературе [14].

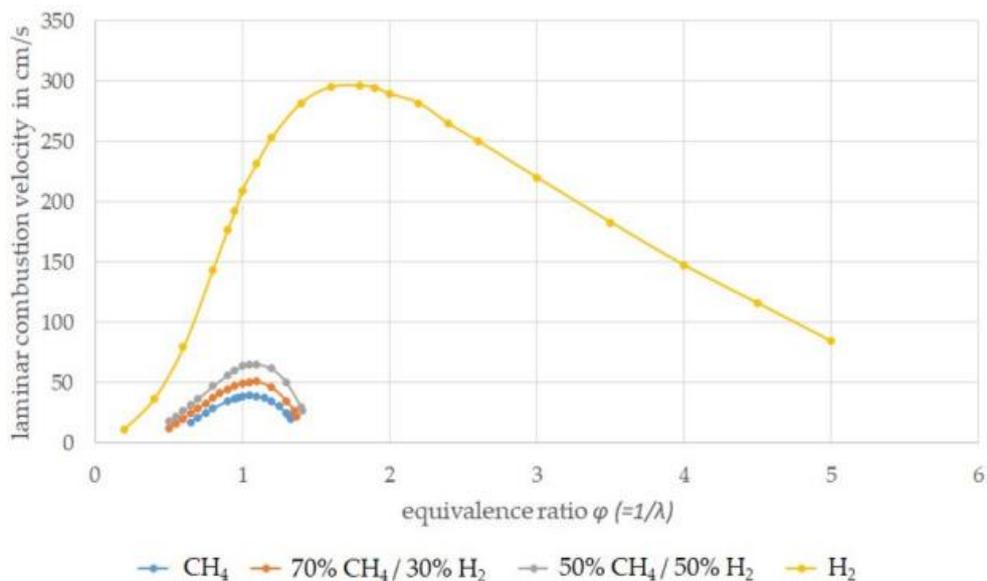


Рисунок 4 – Ламинарная скорость горения CH_4 , смесей CH_4/H_2 и H_2 в зависимости от отношения эквивалентности ($=1/\lambda$)

Можно видеть, что SL значительно увеличивается, когда H_2 примешивается к CH_4 . Как следствие, есть опасения, что более высокие уровни H_2 в природном газе могут вызвать обратные вспышки в приборах, которые не предназначены для этого, особенно при частичной нагрузке, когда скорость потока в любом случае ниже. При обратном воспламенении пламя перемещается вверх по потоку в саму горелку, потому что локальная скорость горения выше, чем локальная скорость потока, что приводит к аварийному отключению или, в худшем случае, к повреждению горелки. Учитывая сильное влияние примеси H_2 на скорость ламинарного горения смеси природного газа/водорода и последствия, связанные с безопасностью, этот аспект, очевидно, следует учитывать.

Как указывалось ранее, индекс Воббе часто используется в качестве основного критерия для оценки воздействия различных составов топливного газа на оборудование для сжигания, особенно для бытовых и коммерческих приборов, или для определения допустимого качества газа.

В таблице 1 показано, почему рассмотрение только индекса Воббе недостаточно при обсуждении влияния примеси водорода на конечное оборудование. В этой таблице сравниваются свойства топлива для чистого метана (CH_4 , представляющего собой природный газ (Н-газ)), чистого водорода и двух смесей CH_4 с инертным газом (азот (N_2) и диоксид углерода (CO_2) соответственно). Смесей метана подбирались таким образом, чтобы они имели почти такие же индексы Воббе, как и чистый водород. Можно видеть, что, несмотря на почти идентичные индексы Воббе, все остальные заданные свойства топлива сильно различаются при сравнении H_2 со смесями. Таким образом, в то время как индекс Воббе является полезным критерием взаимозаменяемости

топливного газа, пока выполняются определенные допущения (что обычно имеет место для жилых и коммерческих применений, в меньшей степени для промышленного оборудования [12, 13]), он становится гораздо менее значимым, когда обсуждение химически очень разных топливных газов или более сложных приложений горения.

Таблица 1 – Свойства топлива

	Ед. изм	100% CH ₄	94% CH ₄ / 6% CO ₂	92% CH ₄ / 8% N ₂	100 % H ₂
Индекс Воббе	МДж/м ³	50,64	45,28	45,27	45,78
высшая теплотворная способность	МДж/м ³	37,80	35,53	34,78	12,1
относительная плотность	-	0,5571	0,6157	0,5901	0,0698
Температура горения	°С	1982	1971	1974	2096
Скорость ламинарного горения	см/сек	38,57	36,79	37,52	209

Важно понимать, что изменения свойств топлива из-за примеси водорода в природный газ являются лишь одним аспектом при оценке воздействия водорода как на устаревшие, так и на новые приборы. Фактическая технологическая реализация процесса горения в данном устройстве не менее важна и оказывает глубокое влияние на то, как устройство будет реагировать на изменения в топливе. Две системы сгорания могут реагировать очень по-разному несмотря на то, что сталкиваются с одним и тем же изменением состава топливного газа.

По этой причине обширные измерения репрезентативного оборудования необходимы при обсуждении примеси водорода и ее влияния на приборы в жилом и коммерческом секторах, а также в других секторах конечного использования.

4.2 Коэффициент избытка воздуха и влияние систем управления горением

Коэффициент избытка воздуха λ является важным рабочим параметром для всех видов процессов горения. Изменения коэффициента избытка воздуха могут повлиять на температуру, эффективность, теплопередачу и образование загрязняющих веществ, а также повлиять на аспекты, связанные с

безопасностью, такие как стабильность пламени. Бытовые и коммерческие приборы обычно регулируются на месте [9,12] до коэффициента избытка воздуха, указанного производителем (на основе заданных концентраций O₂ или CO₂ в дымовых газах) с локально распределенным газом во время регулировки. При изменении состава топливного газа может измениться и фактический коэффициент избытка воздуха в системе. Это может иметь место в неуправляемых приборах. Современные приборы часто оснащены системой управления горением, которая адаптирует подачу воздуха к процессу горения на основе входного сигнала. Таким образом, эти приборы всегда работают с заданным коэффициентом избытка воздуха, даже если изменяется состав топливного газа [28]. Однако все еще существует много приборов, не имеющих такого контроля горения [8, 19].

Одним из следствий примеси водорода к природному газу является то, что минимальная потребность в воздухе, т. е. минимальное количество воздуха, необходимое для достижения полного сгорания, снижается. В приборе с контролем горения этому теоретически противодействует соответствующее уменьшение объемного расхода воздуха, но в нерегулируемой системе, где объемный расход воздуха остается постоянным, повышенная концентрация H₂ приведет к увеличению избытка воздуха. отношение λ .

Так, если прибор был настроен на газ с заданным числом Воббе, а затем питается топливным газом с более низким WI (например, за счет примеси водорода), то коэффициент избытка воздуха будет увеличиваться, и наоборот. Это означает, что, если нерегулируемый прибор изначально был отрегулирован на природный газ, а затем снабжается смесью природного газа и водорода, он будет работать при более высоком коэффициенте избытка воздуха и, таким образом, с еще меньшей вероятностью будет производить окись углерода (CO). Однако верно и обратное: если в полевых условиях устройство будет отрегулировано на смесь водорода и природного газа, а местный состав топливного газа изменится в сторону более низких концентраций водорода, коэффициент избытка воздуха в устройстве уменьшится, что может привести к увеличению выбросы CO. Учитывая, что сегодня подавляющее большинство газовых приборов настраивается в полевых условиях на неизвестное местное качество газа [15, 17], общие методы установки и ввода в эксплуатацию, возможно, придется пересмотреть, если широко распространенная закачка водорода в сети природного газа будет состояться в ближайшее время.

Большинство горелок в бытовых и коммерческих приборах полностью предварительно смешаны. Следовательно, любое изменение коэффициента избытка воздуха в горелочной системе будет иметь непосредственное влияние на химические процессы во фронте пламени при горении. Это может иметь серьезные последствия, например, в контексте стабилизации пламени. На рисунке 4 показано, что скорость ламинарного горения будет увеличиваться с более высоким содержанием водорода в природном газе, пока коэффициент избытка воздуха λ остается постоянным. Коэффициент эквивалентности ϕ ($= 1 / \lambda$) используется здесь по оси x на этой диаграмме для лучшей наглядности.

В неконтролируемой системе этому увеличению SL из-за присутствия водорода будет противодействовать сдвиг λ , так что чистое изменение SL (и, следовательно, склонность к обратному воспламенению) значительно снижается, если прибор работает с избытком воздуха. Коэффициенты выше единицы (или, соответственно, коэффициенты эквивалентности ниже 1). Для большинства бытовых приборов это обычная практика: бытовые отопительные приборы обычно настраиваются на значения λ от 1,2 до 1,4 [16], чтобы свести к минимуму выбросы окиси углерода. Газовые плиты или другие устройства для приготовления пищи могут быть здесь исключением, поскольку они часто проектируются с системами горелок с частичным предварительным смешиванием, где могут существовать области с субстехиометрической топливно-воздушной смесью, хотя процесс горения в целом будет безопасно сверхстехиометрическим. Таким образом, такие системы более чувствительны к обратному воспламенению из-за примеси водорода, поскольку в этом случае изменение скорости горения из-за смещения коэффициента избытка воздуха и изменения состава топлива будет суммироваться, что приведет к значительному увеличению фактической скорости горения.

На температуру горения в нерегулируемых устройствах также влияет изменение коэффициента избытка воздуха: хотя примесь водорода приводит к более высоким температурам горения топливной смеси, это будет в значительной степени компенсировано, если коэффициент избытка воздуха активно не контролируется. Таким образом, выбросы NOX в нерегулируемых приборах с предварительным смешиванием имеют тенденцию к снижению, поскольку они очень сильно зависят от местных температур.

Эти соображения также указывают на то, что система управления горением, обеспечивающая постоянный коэффициент избытка воздуха, может быть неэффективной, когда речь идет о примеси водорода, по крайней мере, не для приборов в жилом и коммерческом секторе, где обычно используется предварительное сгорание. Это отличается от горелок без предварительного смешивания, где контроль горения обычно помогает уменьшить повышенное образование NOX из-за водорода [18,19].

Различное поведение этих двух форм горения также можно объяснить коэффициентом избытка воздуха λ . В горелке предварительного смешивания, в которой топливо и окислитель тщательно перемешиваются перед впрыском в камеру сгорания, коэффициент избытка воздуха равномерно распределяется в зоне реакции, локальных различий λ нет. Это означает, что реальный процесс горения будет происходить при заданном значении λ горелки, а любое изменение коэффициента избытка воздуха (например, из-за примеси водорода в природный газ и отсутствия системы управления) будет напрямую влиять на химические процессы. во фронте пламени.

Горелка с предварительным смешиванием в приборе с регулированием горения в этом отношении будет вести себя аналогично горелке без предварительного смешивания, хотя и при выбранном коэффициенте избытка воздуха, а не единице. Эти эффекты показаны на рисунках 5 и 6 для систем

сгорания без и с контролем соотношения избытка воздуха, соответственно, где состав подаваемого топливного газа меняется с чистого метана на смесь CH₄ и 30 об.% H₂, и был подтверждено[33].

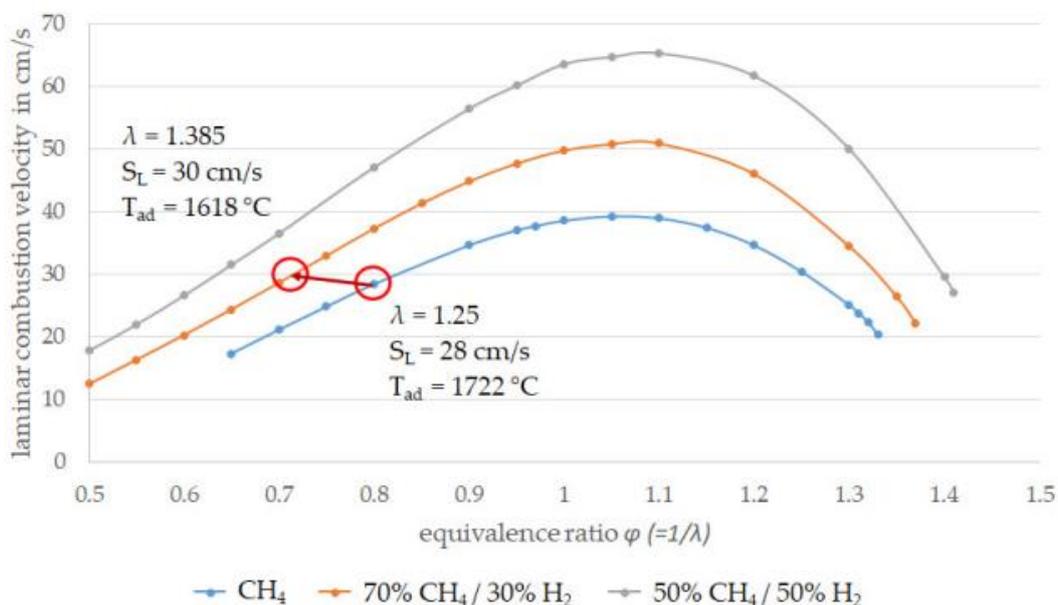


Рисунок 5 – Влияние добавки 30 об. % H₂ на скорость ламинарного горения и адиабатическое горение температура для прибора без контроля горения

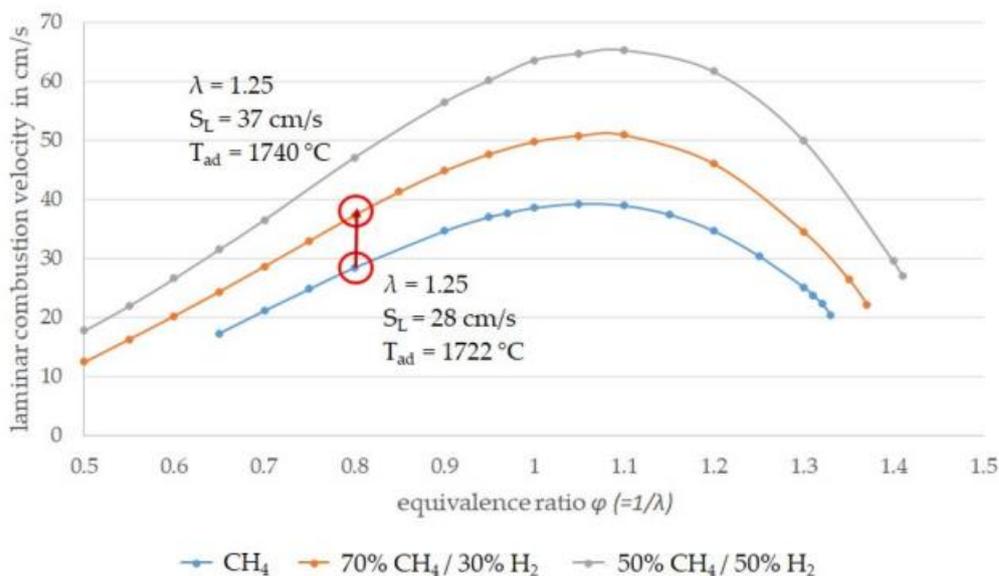


Рисунок 6 – Влияние добавки 30 об.% H₂ на скорость ламинарного горения и температуру адиабатического горения для прибора с регулированием горения

Однако в горелке без предварительного смешивания топливо и окислитель впрыскиваются в камеру сгорания отдельно, а за горелкой потоки смешиваются,

так что внутри камеры сгорания происходит неравномерное распределение локальной λ . Пламя без предварительного смещения стабилизируется там, где локальный λ равен единице, и там будет происходить большая часть процессов тепловыделения и химического превращения, всегда в примерно стехиометрических условиях. Таким образом, любое изменение состава топлива за счет примеси водорода (и, соответственно, температуры пламени) будет непосредственно влиять на основные процессы горения, а также на образование NOX в такой горелочной системе, в то время как в нерегулируемой горелочной системе с предварительным смешиванием эти эффекты в значительной степени смягчаются, поскольку локальное λ также смещается.

Еще один вопрос в контексте управления горением заключается в том, будут ли системы управления, изначально разработанные для компенсации разного состава природного газа, надежно работать со смесями водорода и природного газа. Основной целью системы управления горением в бытовом приборе является поддержание заданного значения λ независимо от топливного газа, которым питается прибор, и его первоначальной настройки. По большей части это функция безопасности для предотвращения чрезмерного образования CO.

Многие системы управления в жилом и коммерческом секторе основаны на измерении тока пламенной ионизации. Этот ток будет иметь максимум при стехиометрических условиях, и система управления может использовать эту информацию для повторной настройки устройства, если изменится состав газа (и, следовательно, минимальное требование воздуха для топлива). Однако измерения, проведенные в рамках проекта THyGA, показывают, что этот подход может не подходить для смесей природного газа и водорода, как показано на рисунке 7. На этой диаграмме показаны измерения того, как устройство с контролем горения реагирует на изменение состава топливного газа, минимальная (Q_{min}) и максимальная нагрузка (Q_{max}). Для обеих загрузок концентрацию водорода увеличивали ступенчато от 0 до 40 об. %, остальное составлял метан (CH₄). Также показаны объемные потоки топливного газа и результирующие коэффициенты избытка воздуха (рассчитанные на основе измеренной концентрации O₂ в дымовых газах). График показывает, что система управления способна поддерживать постоянный коэффициент избытка воздуха при минимальной нагрузке, но не может этого сделать при максимальной нагрузке, что приводит к более высокому коэффициенту избытка воздуха при более высоких концентрациях H₂.

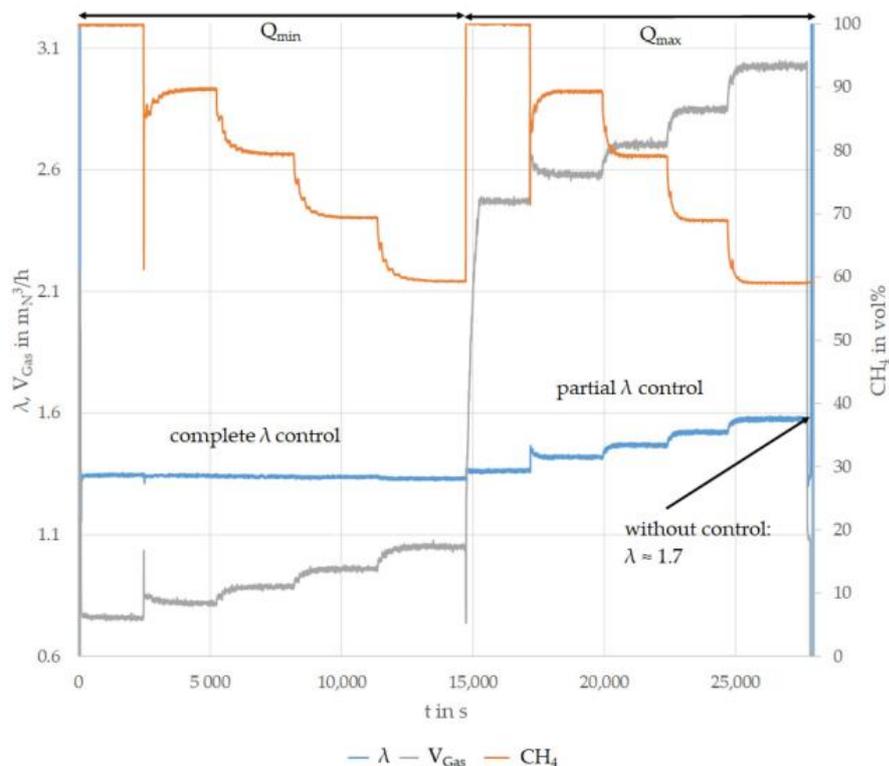


Рисунок 7 – Реакция устройства с регулируемым горением на различные уровни содержания водорода в метане при минимальной и полной нагрузке

Тем не менее, система управления имеет хоть какой-то эффект. Например, в полностью неуправляемой системе концентрация водорода 40 об. % должна была сместить коэффициент избытка воздуха до значения около 1,7. Вместо этого было обнаружено, что в эксперименте он стабилизировался на уровне 1,6.

Неисправность системы управления, вероятно, связана с тем, что примесь водорода изменяет не только химические процессы при горении, но и форму и длину пламени, особенно в горелках предварительного смешения. Однако сигнал тока пламенной ионизации зависит как от процессов во фронте пламени, в частности от концентрации определенных ионов в зоне реакции, так и от положения электродов относительно пламени. Если положение и форма пламени изменяются (например, из-за замены топлива или тепловой нагрузки прибора), это может повлиять на сигнал ионизации [21] и, следовательно, привести к неадекватной реакции системы управления, т. к. накладываются эффекты как относительного изменения положения пламени, так и химических эффектов во фронте пламени.

В то время как приборы могли поддерживать почти постоянные коэффициенты избытка воздуха, несмотря на различные индексы Воббе, это изменилось, когда изменение индекса Воббе было вызвано примесью водорода (выделенные точки данных). Опять же, системы отреагировали переключением на более высокие коэффициенты избытка воздуха, указывая на то, что системы

измерения и контроля не смогли обнаружить присутствие водорода и отреагировать соответствующим образом.

Стоит отметить, что переход к более высоким коэффициентам избытка воздуха, как правило, не имеет отношения к безопасности, поскольку более высокое значение λ обычно приводит к снижению выбросов CO, если только коэффициент избытка воздуха не является чрезвычайно высоким. Однако, исходя из первых измерений как в рамках проекта THyGA, так и других исследований (например, [28]), примесь водорода может сильно снизить эффективность систем контроля горения в бытовых и коммерческих приборах, по крайней мере, для систем, работающих с пламенно-ионизационными измерениями. Системы управления, основанные на измерении компонентов дымовых газов, например, путем измерения содержания O₂ в выхлопных газах, должны работать лучше в этом отношении. Это уже было продемонстрировано на промышленных системах горелок [31,35], где такой подход к управлению очень распространен.

Основная проблема заключается в том, что, если коэффициент избытка воздуха фактически поддерживается на заданном уровне, несмотря на различные уровни содержания H₂ в природном газе, смягчающее влияние сдвига λ на скорость и температуру горения (и, следовательно, также на образование NO_x, которое в газе сгорание, в первую очередь зависит от температуры) не могут быть использованы.

4.3 Влияние на системы конечного использования

Адаптация систем конечного использования требуется при более высоких уровнях водородной смеси. NREL проанализировал исследования NaturalHy о воздействии на конечного пользователя, которое может быть вызвано добавлением водорода в трубопроводы природного газа (De Vries 2009). Исследование включало оценку максимальных концентраций водорода, которые не требовали или требовали незначительных регулировок прибора. Исследование привело к выводу, что концентрации водорода до 28% могут безопасно использоваться с существующими бытовыми приборами, которые должным образом обслуживаются. Долгосрочная (более 15 лет) совместимость материалов бытовых приборов со смесями водорода и природного газа является неопределенной. Для плохо отрегулированных приборов водородные смеси неприемлемы (Florisson 2010). Состав природного газа в конкретном трубопроводе является важным фактором (Захария-Вольф и др., 2007 г.).

Хейнс и др. (2003) оценили стоимость модернизаций — в Великобритании, Нидерландах и Франции — в отношении модификаций датчиков, необходимых для 3-процентной смеси (от 430 000 до 470 000 долл. США для каждой страны), а затем стоимость модификации органов управления двигателем (5,6 млн долл. США). в Соединенном Королевстве, 30 миллионов долларов в Нидерландах и

бесплатно во Франции), линий электропередач среднего давления (500–850 миллионов долларов в каждой стране) и бытовой техники (170–470 миллионов долларов в каждой стране) для внедрения 12 % смешивать.

NaturalHy рекомендовала рассматривать последствия смешивания водорода с природным газом для промышленного сжигания в каждом конкретном случае. Для стационарных двигателей, работающих на природном газе, и современных газовых турбин могут применяться некоторые ограничения. Предпочтительный режим работы стационарных газовых двигателей не способствует изменению концентрации водорода. Эти устройства должны быть модифицированы или отрегулированы в соответствии со спецификациями производителя. Современные газовые турбины имеют строгие требования к топливу. Эксплуатация за пределами этих спецификаций потребует модификации или повторной настройки систем управления с разрешения производителя. Кроме того, для газовых турбин неприемлемы неожиданные колебания концентрации водорода (Florisson 2010).

5 Безопасность

Существующие сети газопроводов спроектированы, построены и эксплуатируются для транспортировки природного газа. Безопасность трубопроводной системы и риск для населения в связи с поставкой и использованием природного газа хорошо известны и считаются приемлемыми. Водород имеет различные химические и физические свойства, которые могут неблагоприятно повлиять на риск, представляемый населению. Основные проблемы, связанные с влиянием на безопасность добавления водорода в существующие системы трубопроводов природного газа, включают потенциальный разрыв трубопровода водородом и повышенную вероятность возгорания газа, а также риск пожара и взрыва при случайной утечке газа. смесь водород/природный газ.

GTI проанализировала публикации проекта NaturalHy и программы исследований и разработок по парниковым газам, спонсируемой Международным энергетическим агентством (МЭА). Результаты вышеуказанных исследований используются в качестве основы для ранжирования степени опасности пожаров и взрывов в системах распределения природного газа при различных уровнях содержания водорода.

Кроме того, GTI провела количественную оценку риска на основе существующей системы распределения природного газа для транспортировки природного газа, содержащего водород. Факторы риска для существующих распределительных систем, работающих на природном газе, были определены с помощью: (а) статистических данных о несчастных случаях со смертельным исходом, произошедших в распределительных системах США с 1990 по 2002 г., а также (б) результатов исследования значительных угроз при распределении системы, предоставляемые коммунальными службами. Общие риски для обслуживания природного газа используются в качестве исходных данных для сравнения рисков при добавлении водорода в системы распределения природного газа. Общий риск в системах распределения оценивается по трем уровням содержания водорода, которые были исследованы в рамках проекта NaturalHy и других связанных исследовательских программ.

Потенциальные риски транспортировки водорода с использованием существующей сети газопроводов были исследованы в рамках «Проекта NaturalHy в рабочем пакете 2». Эту работу возглавил Университет Лафборо, а также приняли участие Университет Лидса, CEA, Shell Hydrogen, UK HSE и National Grid.

Риск представляет собой сочетание вероятности и последствия (опасности) инцидента. Данные и результаты рабочих пакетов 3 и 4 проекта NaturalHy по долговечности и целостности трубопровода природного газа для транспортировки водорода/природных смесей были использованы для переоценки частоты отказов трубопроводов, работающих с водородом. Лабораторные и крупномасштабные эксперименты были разработаны для

изучения последствий пожаров и взрывов, связанных со смесями водорода и природного газа. Простые и вычислительные гидродинамические (CFD) модели были разработаны и проверены с использованием экспериментальных данных, и модели использовались для оценки влияния различных уровней содержания водорода на серьезность опасностей, которые могут возникнуть в результате широкого спектра сценариев аварий.

Влияние добавления водорода на вероятность инцидента на частоты отказов трубопроводов не изменилась по сравнению с частотой отказов трубопроводов природного газа с добавлением до 50% водорода при наличии соответствующей системы управления целостностью. Вероятность воспламенения выше для смесей водорода и природного газа из-за значительного снижения минимальной энергии, необходимой для воспламенения, и увеличения верхнего предела воспламеняемости.

Влияние добавления водорода на последствия инцидента на газообразование по своей природе аналогично природному газу. Концентрация газообразования немного выше при добавлении водорода до 50% в природный газ, но концентрация газообразования значительно увеличивается при уровне водорода выше 50%, особенно когда добавление водорода превышает 70%.

При вентилируемом взрыве добавление 20% водорода мало повлияло на серьезность взрыва, но добавление водорода на 50% или выше увеличивает серьезность.

При скоплении газа в замкнутом пространстве сила взрыва умеренно увеличивается до 30 % добавки водорода, но значительно увеличивается при добавке 40 % и более водорода. Пожароопасность несколько снижается при добавлении водорода.

Оценка риска: на основе анализа вероятности и последствий был разработан инструмент оценки риска (LURAP) для расчета риска при различных уровнях содержания водорода в природном газе. Было обнаружено, что добавление водорода в трубопровод природного газа увеличивает риск для человека вблизи трубопровода, но уменьшает протяженность опасной зоны.

Кроме того, оценка риска ожидаемых фоновых утечек из трубопроводной сети показывает, что общий уровень утечек очень мал и не представляет опасности с точки зрения безопасности.

Общий эффект безопасности при добавлении водорода в сеть природного газа (Программа по парниковым газам, МЭА [11])

Потенциальное изменение свойств газа при добавлении водорода до 25 % в природный газ и последующее воздействие на опасности были оценены относительно использования стандартных природных газов в этом исследовании. На основании этой оценки добавление водорода до 25% увеличивает риск взрыва в закрытом помещении и вероятность возникновения пожара. В этом исследовании сделан вывод о том, что использование природного газа, смешанного с водородом, в хорошо регулируемых условиях не должно увеличивать риск взрывов по сравнению с использованием несмешанного природного газа.

Потенциальные риски, связанные с газораспределительными трубопроводами для населения, обычно оцениваются по вероятности отказа трубопровода и последствиям отказа.

Основным видом отказа в газораспределительных трубопроводах является утечка, и статистические данные, опубликованные DOT в годовом отчете за 2007 год, подразделяются на восемь видов отказа в отношении случаев утечки:

1) Коррозия. Утечка в результате коррозии является одним из видов отказа в распределительной системе. Сюда входит внешняя коррозия стальных труб без покрытия, стальных труб с покрытием/оболочкой и чугунных труб, а также внутренняя коррозия. Утечка из-за коррозии в распределительной системе может привести к скоплению газа в замкнутом пространстве и создать опасность пожара или взрыва.

2) Дефект материала. Дефекты, связанные с производством, являются одним из типов дефектов материала труб. К ним относятся дефектные материалы, трубы, швы труб или компоненты трубопроводов и т. д. Другие типы дефектов связаны с конструкцией, например, дефекты кольцевых сварных швов труб, дефекты сварных швов при изготовлении, сорванная резьба, сломанные трубы или муфты для стальных труб и дефекты сплавления, ошибка установки и неправильная засыпка пластиковых труб.

Этот тип отказа может привести к медленному выделению газа и создать опасность возгорания или взрыва, если утечка произойдет в замкнутом пространстве.

3) Природная сила. К естественным силам относятся силы, действующие на трубопровод от движения грунта в случае оползней/размывов, оседаний грунта, морозного пучения, землетрясений и т. д. Естественные силы могут привести к серьезному повреждению трубопровода и значительному выделению газа.

4) Ущерб от раскопок. Это повреждение труб во время раскопок, которое обычно приводит к утечке или разрыву трубопровода.

5) Другая внешняя сила. Это повреждение от внешней силы, отличной от естественной силы или земляных работ.

6) Неисправность оборудования. Этот отказ возникает из-за неисправности оборудования, такой как выход из строя прокладки или уплотнительного кольца, неисправности контрольно-разгрузочного оборудования, выхода из строя уплотнения, выхода из строя компонентов трубопровода и т. д.

7) Операция. Это отказ из-за неправильных операций, например, оператор не следует правильному рабочему процессу.

8) Другое. Сюда входят режимы отказа, которые не попадают ни в одну из вышеперечисленных категорий.

В распределительных сетях большинство трубопроводов считаются вентилируемыми. Добавление водорода в природный газ увеличит скопление газа вблизи трубопровода, но изменение поведения скопления газа незначительно для водорода до 50%. Опасность, связанная с медленным выделением газа, например, утечка газа из-за коррозии или производственных

дефектов, существенно не увеличивается при добавлении до 20 % водорода в природный газ, но значительно увеличивается при более высоком уровне водорода, особенно при содержании водорода выше 50 %. В случае повреждения трубопровода внешними силами, такими как повреждение грунта или стихийное бедствие, опасность взрыва увеличивается в присутствии водорода, а фактор риска значительно увеличивается при уровне водорода выше 50%. Увеличение риска является умеренным при добавлении до 50% водорода, но увеличение становится значительным при добавлении более 50% водорода.

В отличие от распределительных сетей, многие трубопроводы в распределительных службах находятся в замкнутом пространстве, например, на территории здания. Утечка газа не может быть быстро удалена, а скопление газа в замкнутом пространстве увеличивает вероятность возгорания или взрыва. Добавление водорода в природный газ увеличивает факторы риска для всех режимов отказа в трубопроводах. Общий риск значительно возрастает при всех уровнях содержания водорода и становится серьезным при содержании водорода выше 20%.

Компания GTI провела количественную оценку риска для систем распределения природного газа для транспортировки природный газ. Анализ риска основан на результатах исследования NaturalHy и других исследований, связанных с влиянием водорода на потенциальные риски, связанные с транспортировкой водорода в существующей сети природного газа. Статистические данные о несчастных случаях со смертельным исходом, произошедших в распределительных системах ЕС с 1990 по 2002 г., вместе с результатами исследования значительных угроз в распределительных системах были использованы для определения базового фактора риска для каждого режима отказа при обслуживании природного газа. Влияние водорода оценивалось на основе результатов исследований NaturalHy и других исследований, а также факторов риска, определенных для каждого режима отказа при трех уровнях содержания водорода, которые были исследованы в литературе.

По сравнению с текущей ситуацией с природным газом риски, присутствующие в системах распределения природного газа, увеличиваются за счет добавления в систему водорода. Воздействие зависит от концентрации водорода в газовых смесях. Если в распределительную систему вводится менее 20% водорода, общий риск незначителен. Но сервисные линии более критичны, чем распределительные сети, потому что они в основном устанавливаются в ограниченном пространстве. В этом случае добавление водорода в газ увеличивает опасность взрыва в случае утечки газа. Если уровень водорода в природном газе превысит 20 %, общий риск в инженерных сетях может значительно возрасти, а потенциальные опасности могут стать серьезными, в то время как общий риск в распределительных сетях все еще может быть умеренным до 50 %. При содержании водорода в природном газе выше 50% риски как в распределительных сетях, так и в коммуникациях значительно

возрастают по сравнению с ситуацией с природным газом, и общий риск в системе распределения становится неприемлемым.

Из-за меньшего молекулярного размера водорода скорость утечки водорода через стенку трубы и соединения может быть больше, чем у метана, что приводит к экономическим проблемам и проблемам безопасности из-за полной потери газа. GTI рассмотрела публикации проекта NaturalHy, которые в основном посвящены проницаемости пластиковых материалов для труб, включая полиэтилен (ПЭ) и поливинилхлорид (ПВХ). GTI также рассмотрела отчет Программы исследований и разработок по парниковым газам МЭА и другую соответствующую информацию об утечке газа в распределительном трубопроводе природного газа в рамках водородных услуг.

Долговечность некоторых металлических труб может ухудшиться, когда они подвергаются воздействию водорода в течение длительного времени, особенно с водородом в высоких концентрациях и при высоком давлении. Этот эффект может вызывать озабоченность в случаях, когда водород в высоких концентрациях впрыскивается в существующие линии передачи природного газа под высоким давлением. Эффект сильно зависит от типа стали и должен оцениваться в каждом конкретном случае. Однако металлические трубы в распределительных сетях в основном изготавливаются из низкопрочной стали, и они, как правило, не подвержены водородному охрупчиванию при нормальных условиях эксплуатации. При давлениях и уровнях напряжения, возникающих в системе распределения природного газа, отказы, вызванные водородом, не представляют серьезной проблемы для целостности стальных труб. Для других металлических труб, включая трубы из ковкого чугуна, литого и кованого чугуна, а также медные трубы, водородное повреждение при общих условиях эксплуатации в системах распределения природного газа не вызывает беспокойства. Также не вызывает серьезного беспокойства эффект старения водородом материалов труб из полиэтилена (ПЭ) или поливинилхлорида (ПВХ). Большинство эластомерных материалов, используемых в распределительных системах, также совместимы с водородом.

Смеси водорода могут влиять на точность существующих счетчиков газа. Отклонение газового счетчика с водородными смесями зависит от конструкции счетчика. Это отклонение было признано приемлемым на основании требования повторной калибровки (менее 4 %), когда измеряется газовая смесь, содержащая менее 50 % водорода. Предполагается, что счетчики не нужно будет настраивать при низком уровне содержания водорода (менее 50%) в природном газе. Одним из остающихся пробелов в исследованиях долговечности является необходимость изучения потенциального воздействия загрязняющих веществ в газообразном водороде, которые могут попасть в сеть. Это может быть проблемой в тех случаях, когда система производства водорода не производит чистый водород.

В большинстве исследовательских программ управление целостностью было сосредоточено на магистральных трубопроводах из-за опасений, связанных с высокими рабочими давлениями, до 139 бар, и сталью

трубопроводов, которая подвержена водородному растрескиванию. Водород может транспортироваться по существующим трубопроводам для транспортировки природного газа лишь с незначительными адаптациями к действующей. Необходимые адаптации зависят от концентрации водорода и условий эксплуатации отдельных трубопроводов. Они, как правило, незначительны при концентрации водорода до 50 %, но подробное исследование для каждого случая является обязательным и может привести к снижению предела концентрации водорода.

Системы распределения природного газа сильно отличаются от магистральных трубопроводов, и программа обеспечения целостности магистральных трубопроводов не распространяется на распределительные системы. Одним из важных различий между распределительными системами и магистральными трубопроводами является расположение по отношению к населенным пунктам. Уровень водорода, приемлемый для магистральных трубопроводов, возможно, потребуется переоценить для распределительных систем с точки зрения частоты и серьезности пожаров или взрывов в густонаселенных районах. Кроме того, опасности, связанные с утечкой газа в системе распределения, могут быть более серьезными, чем в магистральных трубопроводах, особенно в ограниченной зоне обслуживания. Для управления целостностью распределительных систем при водородных услугах может потребоваться детектор утечек, устройство или датчик контроля. Затраты на техническое обслуживание распределительных систем, использующих водород, вероятно, увеличатся, поскольку эти системы необходимо будет проверять чаще и, вероятно, потребуются дополнительные системы обнаружения утечек. Флориссон и другие ученые ЕС излагают общие выводы подробных исследований как долговечности, так и целостности, и они оценивают, что модификации существующих методов управления целостностью могут привести к дополнительному увеличению затрат на 10% из-за водородных смесей.

6 Утечка водорода

В этом исследовании реальные трубы и узлы были испытаны при рабочих температурах и давлениях со смесью водорода и метана, чтобы более точно оценить проникновение водорода через пластиковую трубу в распределительную сеть природного газа. Чистый метан и смесь водорода/метана, содержащая 10% водорода, использовались в тестах для исследования характеристик проникновения смеси водорода/природного газа по сравнению с природным газом. Результаты этого исследования суммированы в следующем [18]:

- Для диффузии метана через трубу существует инкубационный период, в то время как инкубационный период для водорода близок к нулю;

- Скорость проникновения метана и водорода увеличивается с увеличением внутреннего давления;

- Коэффициент проникновения водорода в 4—5 раз выше, чем у метана в водородно-метановой смеси, даже если парциальное давление водорода на порядок меньше, чем у метана в смеси;

- Абсолютные значения потерь метана, рассчитанные для трех типов полиэтиленовых трубных материалов, намного ниже экстраполированных данных;

- Старение труб, по-видимому, не оказывает существенного влияния на коэффициенты проницаемости в этих экспериментальных условиях;

- Скорость утечки метана и водорода, рассчитанная из полиэтиленовых дисков в смеси 80 % природного газа и 20 % водорода при давлении 58 фунтов на кв. дюйм (4 бар), составляет [8]:

- Метан: 1,1 л/км/день;

- Водород: 2,3 литра/км/день.

В дополнение к исследованию утечки газа в рамках проекта NaturalHy, GTI также рассмотрел отчет Программы исследований и разработок парниковых газов МЭА [11] и другую соответствующую информацию [13, 29] об утечке водорода в системах распределения природного газа.

1) Утечка газа из систем из стали или ковкого чугуна [19]:

Утечка в системах из стали и ковкого чугуна в основном проходит через резьбу или механические соединения. Измерения утечек, проведенные GTI в газораспределительных системах, показали, что объемная скорость утечки для водорода примерно в три раза выше, чем для природного газа.

2) Утечка газа из пластиковых труб и эластомеров:

Коэффициент проникновения водорода в нескольких пластиковых трубах был определен экспериментальными измерениями в этом исследовании [11]. В этом исследовании был выполнен расчет общей потери водорода на основе экспериментальных данных репрезентативного материала из голландской сетки. Расчетная потеря газа составляет 26×10^3 м³ (918 182 фута³) в год при

добавлении 17% водорода в эту газораспределительную систему. Это количество потери газа составляет только 0,0005% транспортируемого водорода. Таким образом, потеря газа из-за проникновения водорода считается незначительной и не создаст значительных проблем.

3) Оценка потерь газа в газораспределительной сети:

Большинство пластиковых труб, используемых в газораспределительных сетях, представляют собой полиэтиленовые трубы, включая полиэтилен средней плотности (MDPE) и полиэтилен высокой плотности (HDPE). Существуют также трубы из поливинилхлорида с малым процентным содержанием. Эти материалы аналогичны материалам, используемым в европейской газораспределительной системе, но имеют другую систему обозначения материалов.

Коэффициенты проникновения водорода и метана в типичные пластиковые трубы и эластомерные материалы, которые использовались в распределительных системах [13, 29]. Коэффициент проникновения водорода в пластиковых материалах для труб, очень близок к коэффициенту, опубликованному в исследовании МЭА [11]. Оказывается, коэффициент проникновения водорода примерно в 5–6 раз выше, чем у метана в пластиковых трубах. Коэффициент проникновения водорода еще выше у эластомеров, особенно у натурального каучука и Buna S, которые в 26 и 21 раз выше, чем у HDPE.

Исследования и литературные данные показали, что водород более подвижен, чем метан, во многих полимерных материалах, включая пластиковые трубы и эластомерные уплотнения, используемые в системах распределения природного газа. Водород проникает через стенку трубы практически без задержки, а скорость проникновения водорода в 4–5 раз выше, чем у метана через обычные трубы, используемые для распределения природного газа.

Коэффициент проникновения водорода даже выше через большинство эластомерных уплотнительных материалов, которые используются в системах распределения природного газа. Натуральный каучук и Buna S (SBR) обладают меньшей герметизирующей способностью по отношению к водороду по сравнению с другими эластомерами.

Поскольку пластиковые трубы имеют гораздо большую площадь поверхности по сравнению с уплотнениями, типичная полиэтиленовая труба, используемая в системе распределения природного газа, используется для оценки потерь газа через стенку трубы при обычном рабочем давлении. Расчет, основанный на литературных данных коэффициента проникновения водорода и метана в полиэтиленовой трубе (PE 3608 или PE 4710), показывает, что большая часть потерь газа происходит из труб в распределительных сетях, работающих под давлением 60 фунтов на кв. дюйм (4,1 бар) или выше. Потери газа из 414 830 миль полиэтиленовых труб размером менее 2 во всей распределительной магистрали составляют около 40 миллионов кубических футов в год при добавлении 20% водорода в систему газопровода. Хотя эти потери газа почти вдвое превышают общие потери газа, когда системы подают только природный газ, с экономической точки зрения они все же считаются незначительными.

Кроме того, добавление водорода в природный газ может немного уменьшить утечку метана в окружающую среду, что способствует сокращению выбросов парниковых газов.

Коэффициент проникновения водорода по литературным данным выше, чем по экспериментальным измерениям в проекте NaturalHy, особенно при более низком давлении. Это явление объяснимо, так как литературные данные измеряются в чистом водороде и тонких полимерных пленках. Наиболее вероятно, что водород менее подвижен в смеси водорода с метаном низкой концентрации, поскольку активность водорода значительно ниже по сравнению с чистым водородом. Кроме того, пластиковая труба имеет гораздо более толстую стенку и более плотную структуру, чем тонкая пленка, что увеличивает сопротивление проникновению водорода. Таким образом, потери газа, основанные на литературных данных, могут преувеличивать потери газа из трубопроводной системы, содержащей низкую концентрацию водорода, особенно при низких рабочих давлениях, т.е. 3 фунта на кв. дюйм (210 мбар) или 0,25 фунта на кв. дюйм (17,2 мбар). Чтобы получить более точную оценку потерь газа в распределительной системе, необходимо провести дальнейшие исследования, испытав трубы при общих рабочих давлениях распределения и концентрациях водорода, которые будут использоваться для смешивания водорода в трубопроводных системах природного газа.

Величина потерь газа из инженерных сетей с экономической точки зрения незначительна, но утечка газа в замкнутом пространстве может увеличить концентрацию водорода до уровней, которые могут стать угрозой с точки зрения безопасности. То же самое относится и к эластомерным уплотнениям, которые имеют более высокие скорости проникновения водорода. Накопление утечек газа с течением времени может представлять угрозу безопасности в замкнутом пространстве с множеством герметичных соединений.

Этот вопрос не был хорошо изучен в NaturalHy и других исследованиях и остается пробелом для оценки риска. Важно получить более полное представление о поведении проникновения водорода в пластиковые трубы и эластомерные материалы в ожидаемых условиях эксплуатации водородных систем. Следует провести дальнейшее исследование существующих материалов для труб и уплотнений, а также новых разработанных материалов, которые можно использовать в качестве замены существующих материалов. Это послужит основой для точной оценки утечки газа через трубы и уплотнения и, в частности, для определения того, будет ли утечка в замкнутом пространстве с течением времени представлять угрозу безопасности и требуется ли внедрение устройства обнаружения/мониторинга утечки.

Учитывая существенные различия между физическими и химическими свойствами природного газа и водорода, переход с природного газа на смеси водород/природный газ или даже на чистый водород может повлиять на процессы горения в бытовых и коммерческих приборах с точки зрения производительности, а также с точки зрения безопасности. Очевидно, что последствия станут более выраженными при более высоком содержании

водорода в топливном газе. Во многом вопрос о том, как приборы и оборудование реагируют на повышенное содержание водорода в природном газе, является вопросом качества газа. Примесь водорода влияет на критерии качества газа, такие как относительная плотность, теплотворная способность или индекс Воббе, а также на другие аспекты горения, такие как адиабатические температуры горения и ламинарные скорости горения. Можно показать, что индекс Воббе сам по себе не подходит для оценки воздействия присутствия водорода в топливе на электроприбор.

Однако важно смотреть не только на изменяющиеся свойства топлива, но и на то, как процессы горения реализуются в приборах и оборудовании во всех секторах конечного использования.

Различные технологии сжигания будут вести себя совершенно по-разному при подаче смесей водорода и природного газа. Поскольку большинство эксплуатируемых сегодня газовых приборов никогда не проектировались с расчетом на водород, поэтому важно выявить потенциальные проблемы, связанные с примесью водорода в природный газ, определить допустимые пределы концентрации H_2 и при необходимости разработать варианты смягчения последствий.

В рамках европейского проекта «ТНУГА» такие исследования проводятся для приборов в жилом и коммерческом секторе, самом большом секторе конечного использования природного газа в ЕС, как с точки зрения потребления газа, так и с точки зрения количество установленных устройств.

Теоретические соображения и первые измерения показывают, что влияние примеси водорода на температуру горения (относится к потенциальному тепловому перегреву компонентов и выбросам NO_X) и скорости ламинарного горения (важно для стабилизации пламени) часто в значительной степени смягчается сдвигом в сторону более высоких коэффициентов избытка воздуха. , по крайней мере, в бытовых приборах с предварительно смешанным газом. Этот сдвиг происходит, когда процесс горения был отрегулирован для топливного газа, а затем подается другой топливный газ с более низким индексом Воббе, и он неизбежен в устройстве без контроля горения (за исключением ручной перенастройки), но также может происходить в регулируемых системах.

Текущая измерительная техника, установленная в бытовых приборах, часто не может должным образом обнаружить изменения, вызванные примесью водорода, поэтому системы управления не могут адекватно реагировать. Однако возникает вопрос, действительно ли поддержание постоянного коэффициента избытка воздуха полезно в этом случае. Приборы с частичным предварительным смешиванием (например, газовые плиты или духовки), вероятно, будут более чувствительны к присутствию водорода в природном газе, чем системы с полным предварительным смешиванием (например, бойлеры и отопительные приборы), поскольку горелки с частичным предварительным смешиванием подвержены большему риску обратного воспламенения.

Представленные здесь в основном теоретические исследования являются лишь первым шагом в проекте ТНУГА, и за ними последуют обширные кампании по измерению различных технологий сжигания и газовых приборов, типичных для бытового и коммерческого использования газа. Однако они дают первое указание на то, что многие существующие типы приборов можно безопасно эксплуатировать с более высоким уровнем содержания водорода. Эти исследования также указывают на другие важные аспекты, например эффективность систем контроля горения и вопрос о том, как правильно регулировать приборы в будущем, когда в газовых сетях могут быть обнаружены более высокие и колеблющиеся уровни водорода.

Относительно низкие концентрации водорода, 5–15% по объему, кажутся возможными с очень небольшими модификациями существующих трубопроводных систем или устройств конечного использования. Однако эта оценка осуществимости будет варьироваться от места к месту. Более высокие концентрации создают дополнительные проблемы и требуют модификаций. Предварительные оценки затрат предполагают, что водород можно было бы экономично извлекать на станциях регулирования давления. Для станции с перепадом давления от 2 до 20 бар мы оцениваем стоимость извлечения в диапазоне от 0,3 до 1,3 доллара США за кг водорода для смеси с 10% водорода, в зависимости от производительности и степени извлечения.

7 Проект внедрения водородной энергии в домашние инженерные сети

В моей исследовательской работе рассмотрю способ получения водорода методом электролиза. Поскольку, этот метод является самым экологическим, и водород производимый таким путем называют «зеленым». К тому же зеленый водород имеет самую высокую энергоэффективность. Проблемой такого метода – высокая энергозатратность, так как используется электрическая энергия. В итоге получается, что наш водород будет стоит дороже электричества, что само собой экономический не выгоден. Решением проблемы является использования альтернативных источников энергии, в частности солнечную энергию [4].

Чтобы разработать организационно-экономические основы, мы берем на исследование жилой дом, среднестатистическими показателями по региону Алматинской области. Общая площадь составляет – 100 м², где проживает 4 человека. Общая мощность нагрузки равна 7500Вт. Идея состоит в том, чтобы установить солнечные панели, мощностью равную к одной трети. Выработанную энергию пустить на электролизер для получения водорода. Рассчитать, насколько будет выгоден водород, при домашнем генерировании и использовании. Математическим путем рассчитаем количество панелей необходимых для нашей исследовательской работы (формула 1):

$$n = \frac{P_{уст}}{P_{ном}} \quad (1)$$

$$P_{уст} > \eta P_{наг} \quad (2)$$

$$n = 1,81 \cdot \frac{2500}{330} = 14,$$

Нам понадобится 14 солнечных панелей мощностью 330 Вт, при среднем КПД 18%. Ниже на таблице (Таблица 2) можем наблюдать КПД солнечных панелей в разные времена года.

Таблица 2 – КПД солнечных панелей и вырабатываемая мощность

Времена года	КПД, %	P _{вм} , Вт	Солнечные часы	∑ P _{вм} , Вт	H ₂ , м ³
Зима	11	508,2	9	4573,8	1,3
Весна	20	924	13,5	12474	3,6
Лето	27	1247,4	15	18711	5,3
Осень	15	693	11	7623	2,1

Когда нам известно количество генерируемой электрической энергии, можем рассчитать сколько водорода можно получить посредством электролиза воды. На сегодняшний день, самым доступным и выгодным методом является

электролиз воды с использованием в качестве электролита твердого полимера (ТП - электролиз). При расплавнощелочном электролизе в электролите концентрация воды по массе составляет 0,5–2,0 %. На ячейке электролизера, без увеличения напряжения, плотность тока в несколько раз повышается, потому что при использовании твердых электролитов расстояние между электродами значительно сокращается в ячейке. Достижимый КПД электролизера 85%, тем самым расход электроэнергии на получение 1 м³ водорода тратится 3,5 кВт·ч. Таким образом, за один год можно выработать 948 м³ водорода.

Весь водород, который добыли, собираем в водородный ресивер. Таким образом, мы можем хранить, аккумулировать, использовать, транспортировать энергию. Более того, водород является удобным энергоносителем [2].

Теперь, рассчитаем мощность нагрузок, и внедряем водородную энергию домашнюю электрическую и отопительную сеть. Идея в том, что в ночное время обеспечивать весь дом электричеством из водородного топливного элемента. Самым подходящим для нас является топливный элемент с протонообменной мембраной. КПД этих мембран 65%. Получается, с помощью полимерно-электролитных мембран (РЕМ), из 1 м³ водорода, можно получить 2275 Вт чистой электрической энергии. Из 948 м³ водорода получается 1400,6 кВт энергии в год генерирует топливный элемент. С учетом коэффициентов использования и коэффициента одновременности можно посчитать мощность нагрузки в час (3).

$$P_{\text{НВ}} = k_s \cdot k_{\text{и}} \cdot P_{\text{НОМ}} \quad (3)$$

$$P_{\text{НВ}} = 0,3 * 0,25 * 7500 = 562,5 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{НВ}} = 562,5 * 24 = 13,5 \text{ кВт потребляет за день.}$$

$$\frac{1400,6}{13,5} = 103,7 \text{ дней}$$

Получается, водородная энергетика может полностью обеспечивать дом электричеством в течение 103,7 дней. В эквиваленте валюты эта выгода составляет – 1400,6*0,041\$ = 57.41\$ в год. При использовании водородных топливных элементов мы сэкономим 29% бюджета.

Следующий этап исследования, добавление водорода к традиционному топливу в домашних условиях. По химическим свойствам, водород имеет более высокую энергоемкость, чем природный газ. Удельная теплота сгорания водорода составляет примерно 144 МДж/кг, а природного газа составляет всего – 54 МДж/кг. 1 м³ водорода вырабатывает 3,56 кВт тепловой энергии в час. Для нашего дома с площадью 100 м² понадобится 10 кВт тепловой энергии в час в зимнее время. Получается, 948 м³ водорода вырабатывает 3375 кВт тепловой энергии, при КПД 90% отопительного котла.

На основании этих выборок — выполнены расчеты физических параметров газов при добавлении в них водорода. Если добавлять водород в

количестве 20% от общего необходимого тепловой мощности, то добытый нами водород хватит на 70,7 дней отопительного сезона. Это если 24 часа включит газовый котел на мощность 240 кВт в сутки. В свою очередь, эта величина равна 13,4 м³ водорода в день. (Таблица 3). В финансовом плане выгода составляет 13,5% в год.

Таблица 3 – Выгода при использовании водородной энергии

	Добыча водорода	Генерируемые величины	Выгода в процентах
электричество	948 м ³ за год	1400,6 кВт электрической энергии за год	Обеспечивает 29% электричеством
отопление		3375 кВт тепловой энергии за год	Обеспечивает 20% тепловой энергии в течение 71 дней

Посчитаем, сколько выбросов углекислого газа в атмосферу мы предотвратим в таком случае. При сжигании 1 м³ природного газа, в воздух выделяется 1705 грамма углекислого газа (СО₂) [3]. Чтобы получить 3375 кВт тепловую мощность мы израсходуем 321,7 м³ природного газа. Получается, за этот период, мы сократим выбросы углекислого газа в атмосферу в 547 килограмм [5].

Результаты моделирования и расчетов, проведенные в данной статье, показали, что в домашних условиях прибыльно добывать, хранить, аккумулировать и использовать водород в гибридной системе инженерных сетей жилого дома (рисунок 8).



Рисунок 8 – Общая концепция использования водородной энергии в домашних условиях

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вполне вероятно, что водород будет играть важную роль в будущих энергетических системах, для крупномасштабного хранения и передачи энергии, а также в качестве средства, помогающего обезуглероживать приложения, которые трудно сократить, например, в мобильности и промышленности. Есть также планы по продвижению прямого впрыска водорода в существующую газовую инфраструктуру. Как следствие, в ближайшем будущем бытовая техника и оборудование в ЕС могут снабжаться смесью водорода и природного газа во всех секторах конечного использования.

В данной диссертационной работе расчеты проводились с использованием пакета программ COSILAB. В качестве модели реакции было выбрано адиабатическое химическое равновесие для определения адиабатических температур горения, а модель свободно распространяющегося одномерного предварительно перемешанного пламени использовалась для определения скоростей ламинарного горения с использованием механизма реакции GRI 3.0, включающего 53 вида и 325 уравнения реакции.

Все значения приведены в системе отсчета ISO 15 °C/15 °C при эталонном давлении 1,01325 бар (1 атм), которая используется в европейском стандарте качества газа EN 16726.

В ходе исследования были выдвинуты конкретные меры, которые мы должны учитывать при смешивании водорода с природным газом, это:

- состав природного газа;
- индекс Воббе;
- высшая теплотворная способность;
- относительная плотность;
- адиабатическое горение;
- скорость ламинарного горения;
- коэффициент избытка воздуха.

Основными целями «водородной энергетики» являются снижение экологически вредных выбросов и переход к возобновляемой энергетике. Однако доминирующие в настоящий момент технологии производства водорода из органического топлива не позволяют «водородную энергетику» относить к разряду экологически чистой и возобновляемой энергетики.

На современном этапе «водородная энергетика» находится на стадии интенсивных научно технологических исследований, которые ведутся во всех развитых странах, однако промышленно востребованных результатов пока мало.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Новоселов С. В. Возможности использования водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. — М. 2007. -145с.
- 2 Гриб Н. Водородная энергетика: мифы и реальность. — Спб. 2020. - 15с.
- 3 Глинка Н. Л. Общая химия: Учебное пособие для вузов / Под ред. Ермакова А. И. Изд. 28-с, переработанное и дополненное. — М.: Интеграл-Пресс, 2000. 728 с.
- 4 Обраен Дж., Высокотемпературный электролиз для эффективного производства водорода в энергетике. — Техас.: Цех водорода, 2014. -154 с.
- 5 Синяк Ю.В. Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения. - 2007. - N 3. - С.42-59. - Библиогр.: 20 назв.
- 6 Потявин, Д.А. Силовые преобразователи в возобновляемой энергетике. Национальный исследовательский томский политехнический университет, -2010.- С30.
- 7 Меузелаар, Д.Дж. Качество газа: сирота газовой промышленности? Энергетическая Дельта Инст. Q. 2012, 4, 9–11.
- 8 Лантуан, Л.; Урлиак, М. ; Buchet, P. Измерение и контроль индекса Воббе для промышленности: зрелая технология, сталкивающаяся с новыми проблемами. В материалах исследовательской конференции Международного газового союза (IGRC), Рио-де-Жанейро, Бразилия, 24–26 мая 2017 г.
- 9 Wobbe, G. La Definizione Della Qualita Del Gas. d'Industria Gas Degli Acquadotti 1926, XV, 165–172.
- 10 EASEE-Газ. Общая деловая практика: гармонизация качества природного газа; Европейская ассоциация по оптимизации энергетического обмена-газ (EASEE-Gas): Париж, Франция, 2009 г.
- 11 Драйцлер, А.; Питч, Х. ; Шерер, В.; Шульц, К.; Яника, Дж. Роль науки и технологии сжигания в процессах преобразования энергии с низким и нулевым воздействием. заявл. Энергетическое сгорание. науч. 2021, 7, 100040. [CrossRef]
- 12 Jones, H.R.N. Применение принципов горения к конструкции бытовых горелок; Taylor & Francis: Abingdon, UK, 1989.
- 13 BP Plc. Статистический обзор мировой энергетике 2020; BP Plc: Лондон, Великобритания, 2020 г.
- 14 Дженс, Дж.; Ван, А. ; ван дер Леун, К.; Питерс, Д.; Бусман, М. Расширение европейской водородной магистрали — концепция европейской водородной инфраструктуры, охватывающая 21 страну; Путеводитель: Утрехт, Нидерланды, 2021 г.
- 15 DVGW. Wasserstoff — Schlüssel für das Gelingen der Energiewende in Allen Sektoren; Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e.V. (DVGW): Бонн, Германия, 2019 г.

16 Департамент бизнеса, энергетики и промышленной стратегии. водородная стратегия Великобритании; Департамент бизнеса, энергетики и промышленной стратегии: Лондон, Великобритания, 2021 г.

17 Правительство Франции. Национальная стратегия развития гидрогенезавода во Франции; Правительство Франции: Париж, Франция, 2020 г.

18 Европейская комиссия. Водородная стратегия для климатически нейтральной Европы; Европейская комиссия: Брюссель, Бельгия, 2020 г.

19 Eurogas. Статистический отчет EUROGAS за 2015 г.; Еврогаз: Брюссель, Бельгия, 2016 г.

20 Флайих, М.; Шафферт, Дж.; Бурмейстер, Ф.; Альбус, Р.; Гёрнер, К.; Милин, П.; Карпентье, С.; Кришнарамануджам, К.; Эндиш, Дж.; де Вит, К.; и другие. Сегментация рынка бытовых и коммерческих газовых приборов; Испытание водородной примеси для газовых применений; GWI, ENGIE, EBI, gas.be, DGC: Эссен, Германия, 2020 г.

21 THyGA — Тестирование водородной добавки для газовых применений. Доступно в Интернете: Thyga-project.eu (по состоянию на 15 ноября 2021 г.).

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева

ОТЗЫВ

Научного руководителя на магистерскую диссертацию (проект)

магистрант Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы
специальность 7М0711300 – Энергетика и электротехника;

Диссертационная работа на тему:

«Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана»

Актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке промышленности актуальны задачи снижения углеродного следа, снижение парниковых газов, поддержать альтернативные источники энергии.

Цель данной научной работы – Выбрать самый оптимальный и экологичный способ получения водорода. Определить какой уровень водорода в составе топлива относительно безопасен для реализации проекта. Также исследовать безопасность использования водорода, его влияние на пользователя.

Рассчитана организационно-экономические основы возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана; проверено в ходе опытно-поисковой работы возможность добавления водорода к традиционному топливу с уже имеющимися сетями трубопровода и аппаратов.

Достоверность полученных магистрантом результатов подтверждена использованием стандартных справочных методик, которые согласуются с выбранным методом теории электроэнергетических систем и достоверных авторских исходных данных с рамочных программ Европейского Союза.

Автор провел обзор существующих методов, их возможности, достоинства и недостатки, установлено, что существующие модели позволяют выполнить лишь сравнительную оценку надежности различных схемных решений и выбрать наилучшую, они практически не дают возможности с необходимой для практики точностью получить ответ в виде числа.

Работа выполнена с учётом всех поставленных задач исследования. Диссертация имеет четкую логическую структуру, прослеживается поэтапность и логическая последовательность выполнения задач исследования, анализа результатов, выводов, рекомендаций и предложений по практическому их применению. Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов, полученных соискателем достаточная.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что дано теоретическое обоснование на использования водорода в качестве добавки к традиционному топливу; раскрыто содержания понятий альтернативной энергетики в условиях Казахстана.

Практическая значимость исследования: рассчитана организационно-экономические основы возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана; проверено в ходе опытно-поисковой работы возможность добавления водорода к традиционному топливу с уже имеющимися генераторами и турбогенераторами.

Содержание работы полностью соответствует заявленному направлению.

В диссертационной работе имеется расчетная часть, выполненная на основе справочных данных, из содержания магистерской диссертации видно, что собран и проанализирован впечатляющий объем справочных данных, получены конкретные научно-обоснованные результаты. Замечание по диссертационной работе нет.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

В целом работа обладает достаточной теоретической и практической значимостью, изложена в логической последовательности, грамотно и аккуратно оформлена. В заключении работы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Считаю, что автор данной работы, Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы, заслуживает присуждения академической степени магистра технических наук по специальности 7М0711300 – Энергетика и электротехника

Оценка по балльно-рейтинговой буквенной системе 95 баллов,

Рецензент
Доктор PhD, ассоц.проф.

 Д.Р. Умышев

" 09 " 06 2022 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева

РЕЦЕНЗИЯ на магистерскую диссертацию (проект)

магистрант Сагынбай Еркебулан Галымұлы
специальность 7М0711300 – Энергетика и электротехника;

Диссертационная работа на тему:

«Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана»

1. Характеристика актуальности работы

Работа актуальна, Актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке промышленности актуальны задачи снижения расхода электроэнергии, повышения качества продукции, сокращения экологической нагрузки и приведения показателей качества электроэнергии к нормируемым величинам.

2. Характеристика самостоятельности подхода автора

Автор самостоятельно провел обзор существующих методов, их возможности, достоинства и недостатки, установлено, что существующие модели позволяют выполнить лишь сравнительную оценку надежности различных схемных решений и выбрать наилучшую, они практически не дают возможности с необходимой для практики точностью получить ответ в виде числа;

3. Анализ точки зрения автора магистерской диссертации

Актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке промышленности актуальны задачи снижения углеродного следа, снижение парниковых газов, поддержать альтернативные источники энергии.

Цель данной научной работы – Выбрать самый оптимальный и экологичный способ получения водорода. Определить какой уровень водорода в составе топлива относительно безопасен для реализации проекта. Также исследовать безопасность использования водорода, его влияние на пользователя.

Содержание работы полностью соответствует заявленному направлению.

4. Анализ умения магистранта пользоваться методами научного исследования

Работа выполнена с учётом всех поставленных задач исследования. Диссертация имеет четкую логическую структуру, прослеживается поэтапность и логическая последовательность выполнения задач исследования, анализа результатов, выводов, рекомендаций и предложений по практическому их применению. Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов, полученных соискателем достаточная.

5. Степень обоснованности выводов и рекомендаций магистранта

Определен алгоритм проектирования и экономический расчет энергетической

среды, с добавлением водорода к имеющимся инженерным сетям; детально показан влияние добавления различного уровня водорода в природный газ и безопасность использования компонентного топлива.

6. Анализ достоверности полученных магистрантом результатов

Достоверность полученных магистрантом результатов подтверждена

1. использованием стандартных справочных методик, которые согласуются с выбранным методом теории электроэнергетических систем;
2. использованием достоверных авторских исходных данных с рамочных программ Европейского Союза.

7. Анализ новизны и практической значимости работы

Практическая значимость работы в том, что результаты научных исследований по смешиванию водорода с природным газом в РК могут быть использованы в проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организациях.

8. Анализ недостатков диссертации

В диссертационной работе имеется расчетная часть, выполненная на основе справочных данных, из содержания магистерской диссертации видно, что собран и проанализирован впечатляющий объем справочных данных, получены конкретные научно-обоснованные результаты. Замечание по диссертационной работе нет.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

В целом работа обладает достаточной теоретической и практической значимостью, изложена в логической последовательности, грамотно и аккуратно оформлена. В заключении работы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Считаю, что автор данной работы, Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы, заслуживает присуждения академической степени магистра технических наук по специальности 7M0711300 – Энергетика и электротехника

Оценка по балльно-рейтинговой буквенной системе 90 баллов,

Рецензент

Доктор PhD, ассист.проф.

кафедры «Электроэнергетика»

«Академия логистики и транспорта»

Калиев Ж.Ж.

06 _____ 2022 г.



М.А. Исмаилова и.р.с.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сағынбай Еркебұлан Ғалымұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана

Научный руководитель: Диас Умышев

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 9

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

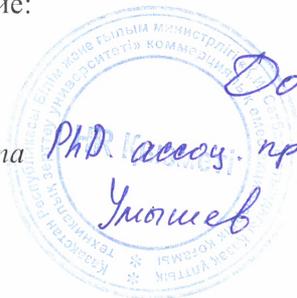
Обоснование:

2022-06-08

Дата

PhD. ассоц. проф.

Умышев Д.Р.



Допущен к защите

Нуржан Балгаев

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сағынбай Еркебулан Ғалымұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Анализ возможности перехода на использование водорода в качестве добавок к традиционному топливу в условиях Казахстана

Научный руководитель: Диас Умышев

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 9

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2022-06-08

Дата

Допущен к защите



Заведующий кафедрой "Технетика"

Серсембаев Е.А.