
ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АММИАК КАК ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

© 2025 г. Д. И. Пашченко^{a, b, *}

^a Гуандунский Технион — Израильский институт технологий, ул. Дасюэ, 241, Шаньтоу, Гуандун, 515063 Китай

^b Самарский государственный технический университет, Молодогвардейская ул., д. 244, г. Самара, 443100 Россия

*e-mail: dmitry.pashchenko@gtiit.edu.cn

Поступила в редакцию 10.07.2024 г.

После доработки 13.08.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Рассмотрены перспективы использования газотурбинных установок (ГТУ), в которых в качестве топлива применяется аммиак, с термохимической рекуперацией тепла отходящих газов. Приведены примеры действующих газотурбинных установок, работающих на аммиаке, и указаны основные эксплуатационные ограничения применения существующих ГТУ. Выполнен термодинамический анализ простой газотурбинной установки с термохимической рекуперацией (ТХР) тепла в широком диапазоне рабочих параметров: температура газов на входе в турбину варьировалась от 700 до 1300°C, степень сжатия — от 5 до 20. Установлено, что при термохимической рекуперации тепла увеличение КПД газотурбинной установки может достигать 9%. Показано, что эффективность применения ТХР зависит от таких рабочих параметров, как температура и давление. При температуре выше 500°C энтальпия реакции разложения аммиака достигает значения близкого к максимальному — примерно 3.0 МДж/кг NH₃. Термохимическая рекуперация приводит к разложению аммиака с получением богатого водородом газа [до 75% (по объему)], который сжигается в камере сгорания, в результате чего изменяются характеристики процесса горения. В модуле Chemkin-Pro на основе механизма GRI-Mech 3.0 выполнен расчет скорости распространения пламени газовой смеси, состоящей из водорода, азота и аммиака, с различным их содержанием. Определено, что продукты полного термохимического разложения аммиака имеют скорость распространения пламени, примерно в 2 раза превышающую этот показатель для метана и более чем в 10 раз для аммиака. Таким образом, ожидается, что использование термохимической рекуперации тепла в газотурбинных установках, работающих на аммиаке, приведет к увеличению энергетической эффективности и более стабильному процессу горения.

Ключевые слова: аммиак, водород, газотурбинная установка, скорость распространения пламени, термодинамический анализ, термохимическая рекуперация, эффективность

DOI: 10.56304/S0040363624700607

Прогресс в науке и технологиях связан с непрерывным поиском направлений устойчивого развития общества и промышленности. Одним из главных вызовов XXI в. является повышение средней глобальной температуры на Земле, приводящее к необратимым последствиям в биосфере. Среди потенциальных причин, вызывающих такие изменения, по оценкам специалистов и различных международных организаций, — выбросы парниковых газов, в том числе CO₂, промышленными предприятиями [1], в частности энергетическими. Несмотря на активное развитие возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной и др.), их доля в общем энергетическом балансе большинства развитых и развивающихся стран не является доминирующей [2].

В настоящее время во многих странах значительная доля генерации электроэнергии приходится на тепловые электростанции [3].

Зачастую критика различных экологических организаций в адрес современной теплоэнергетики является необоснованной, так как современные образцы газотурбинных и парогазовых установок способны достигать термического КПД 44 и 64% [4, 5] соответственно. В этой связи ведущими производителями газовых турбин (ГТ), как одних из наиболее эффективных тепловых двигателей, принято решение по разработке подходов, связанных с использованием безуглеродных топлив. Одним из таких топлив является аммиак. В настоящее время в мире

имеется несколько действующих газотурбинных установок, работающих на аммиаке [6].

Специалисты из Mitsubishi Power разработали ГТУ мощностью 40 МВт, способную напрямую сжигать аммиак. Эта газовая турбина создана на основе серии турбин H-25.

Газотурбинная установка от Turboden мощностью 15 МВт, установленная на когенерационной электростанции в Германии в 2018 г., предназначена для работы на чистом аммиаке или смеси аммиака и природного газа.

Инженеры Kawasaki Heavy Industries разработали газовую турбину мощностью 1 МВт, работающую на аммиаке, которая в настоящее время проходит испытания в Японии.

Основные ограничения применения существующих газовых турбин для сжигания аммиака следующие [7]:

увеличенный объем камеры сгорания по сравнению с газовыми турбинами, работающими на метане. Следовательно, изменение размеров камеры сгорания для эффективного сжигания аммиака приводит к существенной модификации газовых турбин, работающих на природном газе;

нестабильное горение аммиака из-за низкой скорости распространения его пламени. Газовые турбины часто работают в переменном режиме при различных нагрузках, что приводит к изменению характеристик процесса горения и, как следствие, его нестабильности.

Поэтому, чтобы решить эксплуатационные проблемы, обусловленные этими ограничениями, основное внимание в настоящее время уделяется применению аммиака в качестве топлива для газовых турбин, прежде всего путем его комбинирования с другими газами, такими как водород, метан или синтез-газ [8]. Благодаря смешиванию аммиака с водородом или метаном становится возможным использовать существующую инфраструктуру газовых турбин и повысить общую эффективность процесса горения аммиака.

Водород также является перспективным безуглеродным топливом, и, чтобы добиться стабильного и эффективного горения, его можно смешивать с аммиаком [9]. В отличие от аммиака, у водорода высокая скорость распространения пламени и он горит более стабильно даже при больших коэффициентах избытка воздуха [10]. С одной стороны, для применения водорода в качестве вторичного компонента топлива (аммиачно-водородных смесей) требуется модификация инфраструктуры топливоснабжения при всех тех проблемах, которые связаны с использованием водорода в качестве топлива. С другой стороны, аммиак можно рассматривать как носитель водо-

рода [11] – при его термохимическом разложении образуется богатый водородом газ с объемным содержанием H_2 до 75%:



где ΔH_{298} – энтальпия реакции разложения при стандартных условиях.

В современных образцах газовых турбин температура отходящих газов составляет от 500 до 800°C [12]. Этот температурный диапазон подходит для термохимического разложения аммиака по реакции (1). Следовательно, тепло отходящих газов может быть использовано для производства обогащенного водородом газа перед его непосредственным сжиганием в ГТУ. Этот подход известен как термохимическая рекуперация тепла отходящих газов [13, 14], а газовые турбины с ТХР называются газовыми турбинами с химической рекуперацией (chemically recuperated gas turbine – CRGT) [15, 16].

В настоящей статье выполнен термодинамический анализ простой газотурбинной установки с термохимической рекуперацией тепла отходящих газов, работающей на аммиаке, а также произведен расчет скорости распространения пламени для различных составов смесей, в которые входят водород, азот и аммиак.

КОНЦЕПЦИЯ ГТУ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Принципиальная схема газотурбинной установки, работающей на аммиаке, с термохимической рекуперацией тепла показана на рис. 1. В этой схеме тепло отходящих дымовых газов газовой турбины используется в системе для термохимического разложения аммиака, который последовательно проходит через регазификатор, подогреватель и риформер. В результате разложения на выходе из риформера получается водородно-азотная смесь с объемной долей водорода до 75%. Стоит отметить, что при этом, согласно принципу Ле Шателье – Брауна, состав продуктов разложения аммиака зависит от технологических параметров, таких как температура и давление.

Термодинамический анализ цикла газотурбинной установки, работающей на аммиаке, с термохимической рекуперацией тепла выполнен в программном продукте Aspen HYSYS [17]. Параметры термодинамического цикла ГТУ рассчитаны с учетом внутренних относительных КПД отдельных элементов. Характеристики процесса горения продуктов термохимического разложения определены на основе энтальпии реакции горения отдельных компонентов газового топлива. Термодинамический анализ процесса

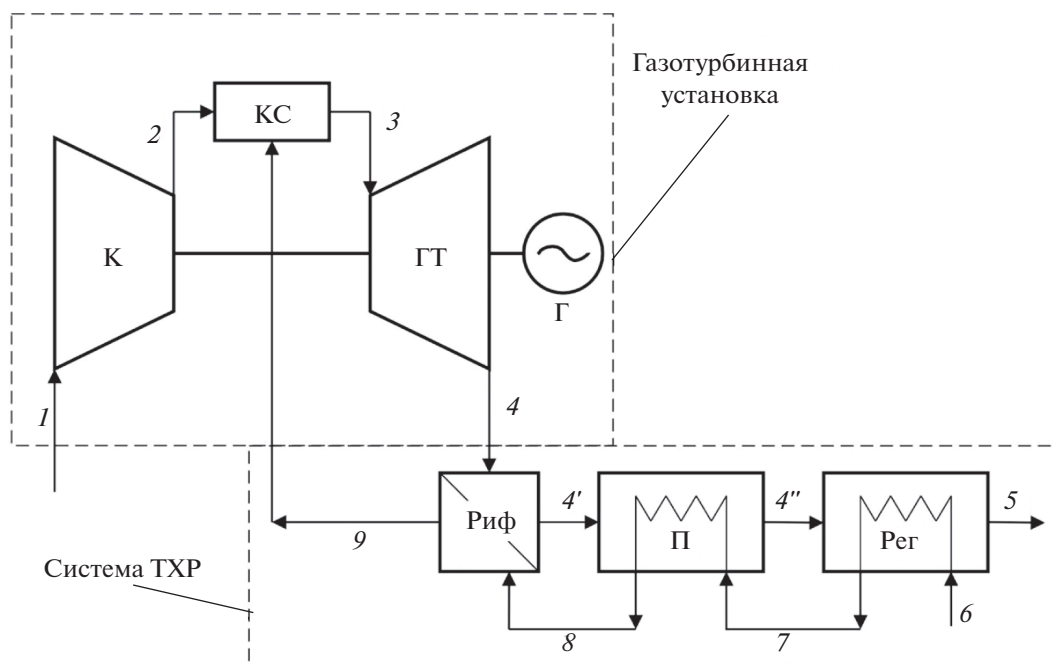


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ, работающей на аммиаке, с термохимической рекуперацией тепла отходящих дымовых газов.

К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; Г – генератор; Риф – риформер; П – подогреватель; Рег – регазификатор.

1 – воздух; 2 – сжатый воздух; 3 – продукты сгорания; 4, 4', 4'' – отходящие газы; 5 – уходящие газы (например, в паросиловой цикл); 6 – жидкий аммиак; 7, 8 – газообразный аммиак; 9 – продукты разложения аммиака

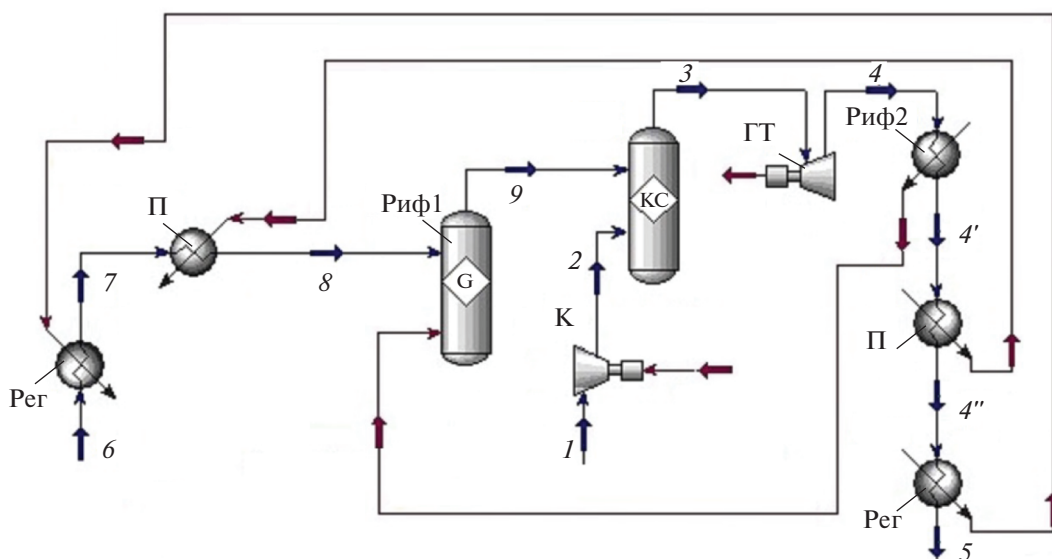


Рис. 2. Расчетная схема для термодинамического анализа газотурбинной установки с термохимической рекуперацией тепла отходящих газов.

Риф1 – идеальный реактор Гиббса (G); Риф2 – теплообменник, в котором происходит теплообмен между дымовыми газами и реакционной смесью. Остальные обозначения см. рис. 1

термохимического разложения аммиака выполнен методом минимизации свободной энергии Гиббса, позволяющим определить равновесные концентрации продуктов реакции в зависимости от давления и температуры [18]. В качестве урав-

нения состояния выбрано уравнение Пенга – Робинсона [19], так как процесс термохимического разложения аммиака протекает при давлениях до 2.0 МПа. Расчетная схема для термодинамического анализа ГТУ с ТХР показана на рис. 2.

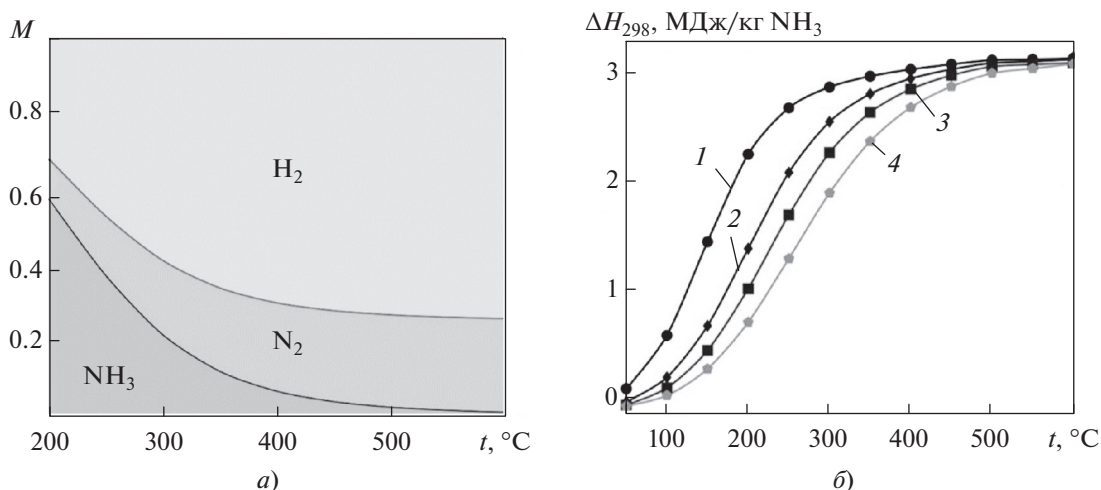


Рис. 3. Молярный состав M продуктов термохимического разложения аммиака при $p = 1.0$ МПа (а) и зависимость энтальпии реакции ΔH_{298} от температуры t при различных давлениях (б).
Давление, МПа: 1 – 0.1; 2 – 0.5; 3 – 1.0; 4 – 2.0

Исходные значения рабочих параметров ГТУ, использованные для термодинамического анализа, приведены далее:

Массовый расход аммиака, кг/ч	50
Температура, °C:	
рабочего газа	
на входе в ГТ	700; 900; 1100; 1300
атмосферного воздуха и аммиака	20
продуктов разложения аммиака	$t_4 - 50$
Степень сжатия в компрессоре/	
степень расширения в ГТ	5; 10; 15; 20
КПД, %:	
газовой и паровой турбин	90
компрессора	85

Примечание. t_4 – температура после ГТ (см. рис. 1).

Термодинамический анализ проведен для постоянного массового расхода аммиака, что обуславливает разную мощность ГТУ при различных рабочих параметрах. В реальности для их изменения в столь широких диапазонах требуется переход от газовой турбины одного типа к газовой турбине другого типа. Однако при постоянном заданном массовом расходе аммиака становится возможным построить зависимости КПД ГТУ при условно одинаковых значениях параметров для различных температур и давлений. При выполнении термодинамического анализа температура для определения состава продуктов разложения аммиака была принята на 50 °C ниже температуры отходящих газов газовой турбины.

Более точный расчет как температуры продуктов реакции, так и их состава возможно провести на основе моделирования процессов теплообмена в риформере с учетом химической кинетики реакции (1) [20].

Эффективность системы термохимической рекуперации определяется количеством тепла отходящих дымовых газов, трансформировавшегося в химическую энергию продуктов разложения аммиака. При этом состав продуктов разложения аммиака зависит от температуры и давления. От этих параметров зависит также энтальпия реакции (1). Стоит отметить, что согласно закону сохранения энергии теплота сгорания продуктов разложения аммиака больше теплоты сгорания аммиака на значение энтальпии реакции (в пересчете на единицу массы исходного аммиака).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показаны зависимости молярного состава продуктов термохимического разложения аммиака при давлении 1.0 МПа и энтальпии реакции (1) от температуры при различных давлениях.

При температуре выше 500 °C продукты разложения аммиака состоят, в основном, из водорода, при этом доля остаточного аммиака не превышает 5% (см. рис. 3, а). Поэтому можно ожидать, что при использовании отходящих газов ГТУ для термохимического разложения аммиака продукты реакции будут состоять главным образом из водорода и азота в соотношении приблизительно 3 : 1.

На рис. 3, б приведена зависимость энтальпии реакции термохимического разложения аммиака

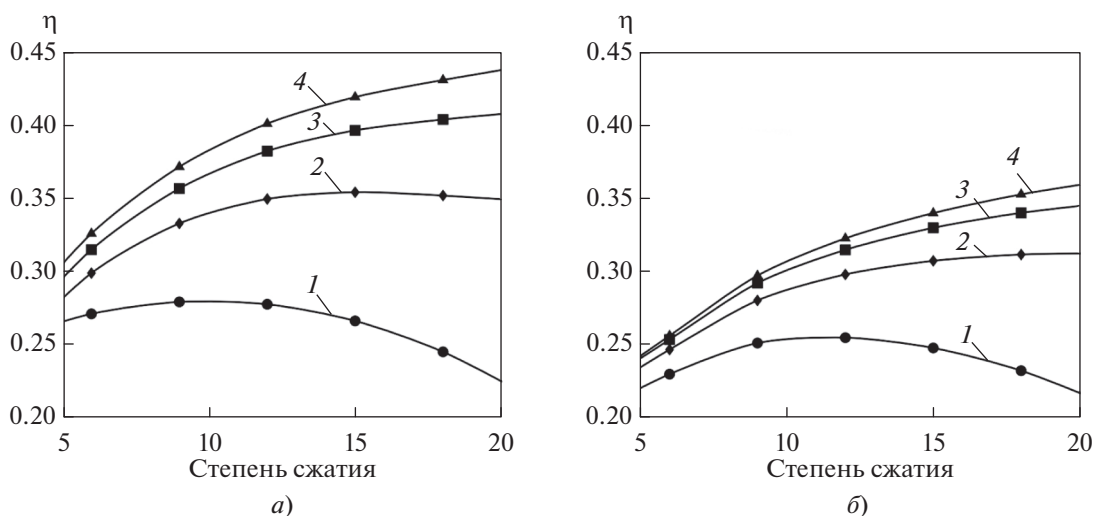


Рис. 4. Зависимость КПД газотурбинной установки η с термохимической рекуперацией тепла отходящих газов (а) и без термохимической рекуперации (б) от степени сжатия при различной температуре газов на входе в турбину. Температура, °С: 1 – 700; 2 – 900; 3 – 1100; 4 – 1300

от температуры при различных давлениях. На этом рисунке видно, что при температуре выше 500°C энтальпия реакции (1) достигает значения близкого к максимальному – примерно 3.0 МДж/кг NH_3 . Таким образом, можно утверждать, что при полном разложении аммиака теплота сгорания продуктов реакции (1) приблизительно на 3.0 МДж выше теплоты сгорания аммиака (в пересчете на 1 кг исходного аммиака). Также стоит отметить, что, если продукты разложения аммиака используются в ГТУ согласно схеме, показанной на рис. 1, в камеру сгорания помимо химически связанного тепла ($\Delta Q_{\text{хим}}$) отходящих газов (выраженного в виде возросшей теплоты сгорания) также вносится физическое тепло ($Q_{\text{ф.г.}}$) подогретых продуктов разложения аммиака. Таким образом, суммарную рекуперацию тепла отходящих газов $Q_{\text{рек}}$ в ГТУ можно представить в виде следующего выражения:

$$Q_{\text{рек}} = \Delta Q_{\text{хим}} + Q_{\text{ф.г.}} = \Delta H_{298} + Q_{\text{ф.г.}} \quad (2)$$

Влияние термохимической рекуперации тепла на эффективность ГТУ можно определить, если сравнить КПД ГТУ с термохимической рекуперацией тепла отходящих газов и без таковой. На рис. 4 показана зависимость КПД ГТУ с ТХР и без нее при различной температуре газов на входе в турбину и разной степени сжатия. На этом рисунке видно, что использование ТХР позволяет увеличить КПД ГТУ на 8–9% при температуре газов на входе 1300°C и степени сжатия 20. Стоит отметить, что минимальный эффект ТХР наблюдается при температуре газов на входе в турбину

700°C. В этом случае температура отходящих газов после ГТ минимальная и недостаточная для полного разложения аммиака. При температуре газов на входе в турбину от 900 до 1300°C увеличение КПД ГТУ с ТХР может достигать 9%.

Следует также отметить, что, поскольку тепло отходящих газов газовой турбины имеет больший потенциал, использование его в цикле с ТХР более эффективно, чем в цикле паротурбинной установки (ПТУ) [21]. Это связано с тем, что большее количество тепла используется в цикле ГТУ, эффективность которого значительно превышает эффективность паротурбинного цикла вследствие разных температурных уровней [22]. При этом доля полезной работы, производимой в цикле ГТУ, увеличивается, а доля таковой в цикле ПТУ снижается.

Из принципиальной схемы на рис. 1 видно, что в ГТУ с ТХР в качестве топлива используются продукты термохимического разложения аммиака, состоящие, главным образом, из водорода и азота. Известно, что скорость распространения пламени водорода значительно превышает этот показатель аммиака. Для определения влияния изменения состава топлива, подаваемого в камеру сгорания ГТУ, на скорость распространения пламени, был выполнен анализ процесса горения. Для расчета этой скорости применялся модуль Chemkin-Pro с механизмом GRI-Mech 3.0 [23]. Несмотря на то что механизм GRI-Mech 3.0 был разработан специалистами Калифорнийского университета в Беркли для моделирования основных свойств горения природного газа, он может быть применен с большой точностью

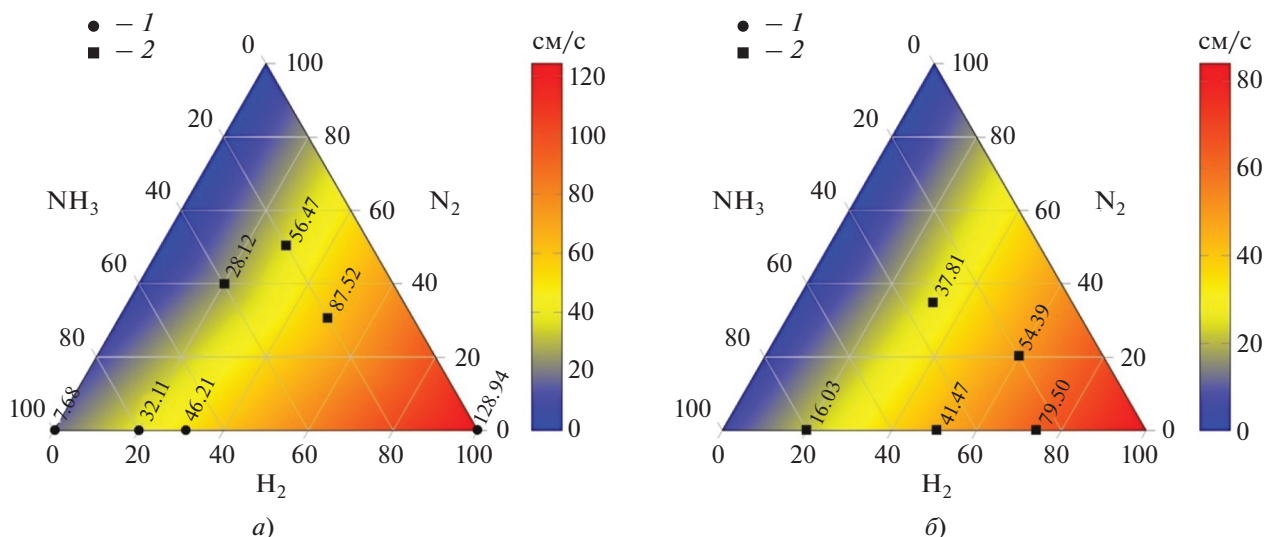


Рис. 5. Скорость распространения пламени газовой смеси, в состав которой входят водород, азот, аммиак в различном соотношении, при $p = 1.0$ МПа (а) и $p = 2.0$ МПа (б). Экспериментальные данные: 1 – [24]; 2 – [25]

для моделирования горения продуктов термохимического разложения. Это связано с тем, что механизм GRI-Mech 3.0 состоит из 325 элементарных химических реакций, в том числе химических реакций горения водорода.

Скорость распространения пламени зависит от различных факторов, таких как давление в камере сгорания, начальная температура компонентов горения, состав топлива, коэффициент избытка воздуха. На рис. 5 показана зависимость скорости распространения пламени для газовой смеси, в состав которой входят азот, водород и аммиак в различном соотношении, при давлении 1.0 и 2.0 МПа.

Результаты расчета были сопоставлены с данными, полученными другими исследователями [24, 25], и показали хорошую сходимость. Рисунок 5 иллюстрирует, что повышение концентрации водорода в газовой смеси значительно увеличивает скорость распространения пламени. При составе газовой смеси $H_2 : N_2 = 3 : 1$ скорость распространения пламени составляет 78 см/с, что практически в 2 раза превышает этот показатель для метана и более чем в 10 раз для аммиака.

Данные, приведенные на рис. 5, позволяют предположить, что термохимическая трансформация аммиака благодаря использованию тепла отходящих газов положительно влияет не только на энергетический КПД ГТУ, но и на эффективность процесса горения. Более детальную информацию о характеристиках процесса горения водородно-азотно-аммиачной газовой смеси можно получить, проанализировав влияние начальной темпе-

ратуры газовой смеси и коэффициента избытка воздуха на характеристики процесса горения.

На основе результатов исследований можно сделать вывод, что термохимическая рекуперация тепла отходящих газов в газотурбинных установках, работающих на аммиаке, оказывает положительное влияние на их энергетическую эффективность и улучшает процесс горения. Следовательно, можно полагать, что для организации ТХР можно использовать существующие камеры сгорания ГТУ, работающие на природном газе, без значительной их модификации [26]. Стоит также отметить, что согласно результатам проведенных исследований в современных ГТУ возможно задействовать те же горелочные устройства камер сгорания при содержании водорода до 30% в газовой смеси [27, 28]. Однако дальнейшее увеличение объемной доли водорода в топливном газе потребует модификации горелочных узлов [29].

Наряду с очевидными преимуществами термохимической трансформации аммиака в ГТУ, имеется немало задач, которые необходимо решить, прежде чем такие установки будут внедрены в реальную энергетику. Например, частичная загрузка газотурбинных установок обусловлена изменением расхода топлива, что приводит к повышению или снижению коэффициента избытка воздуха в камере сгорания. Это, в свою очередь, влияет на стабильность и эмиссионные характеристики процесса горения.

Кроме того, ГТУ нередко работают циклично, к примеру по несколько часов несколько раз в

сутки, чтобы покрыть пиковые потребления электроэнергии. Это связано с коротким временем отклика ГТУ в сравнении с ПТУ. Однако при включении в схему ГТУ системы ТХР время отклика увеличивается, кроме того, в начальный момент времени требуется использовать в качестве топлива аммиак, что также приводит к повышению нестабильности процесса горения. Частично решить эту проблему можно, установив ресивер/накопитель для водородсодержащего газа после риформера. В этом случае такой накопитель будет выполнять роль термохимического аккумулятора, работающего на принципах термохимического аккумулирования тепловой энергии [30].

Необходимо отметить, что процесс термохимической трансформации аммиака является каталитическим. Несмотря на то что химическая реакция (1) не сопровождается побочными реакциями, в результате которых образуются отравляющие катализатор компоненты, каталитическая активность реакционного пространства с течением времени снижается. Это обуславливает необходимость резервирования риформера, а также учета изменяющихся каталитических свойств. В дополнение следует отметить, что реакционное пространство представляет собой заполненный частицами катализатора неподвижный слой, для которого характерно значительное аэродинамическое сопротивление. Связанные с этим дополнительные энергетические затраты также могут оказывать влияние на общую энергетическую эффективность ГТУ.

Несмотря на эффективность предложенного подхода, необходимо выполнить большое количество исследований, прежде чем он будет промышленно реализован. К числу перспективных направлений исследований можно отнести технико-экономический анализ ГТУ с ТХР, определение параметров системы ТХР с учетом химической кинетики реакции разложения аммиака, анализ эмиссионных характеристик процесса горения и др. Также представляется весьма важным провести анализ парогазовой установки с ТХР, работающей на аммиаке, так как в этом случае часть тепла отходящих газов используется в цикле ГТУ, тем самым доля отходящего тепла, применяемого в ПТУ, снижается. Это, в свою очередь, может привести к изменению структуры капитальных затрат на газотурбинный и паротурбинный циклы.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенного термодинамического анализа простой ГТУ с ТХР установлено,

что использование тепла отходящих газов для термохимического разложения аммиака с последующим сжиганием продуктов его разложения в камере сгорания приводит к тому, что увеличение КПД ГТУ может достигать 9%.

2. При температуре выше 500°C продукты термохимического разложения аммиака содержат до 75% водорода, а энтальпия реакции составляет около 3 кДж/кг.

3. Повышение концентрации водорода в газовой смеси значительно увеличивает скорость распространения пламени. При составе газовой смеси $H_2 : N_2 = 3 : 1$ скорость распространения пламени составляет 78 см/с, что практически в 2 раза превышает скорость распространения пламени метана и более чем в 10 раз скорость распространения пламени аммиака.

4. Необходимо решить сформулированные в данной работе задачи, прежде чем ГТУ с ТХР, работающие на аммиаке, будет возможно использовать в промышленном масштабе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рамочная** конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1992. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf>
2. **Yolcan O.O.** World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation // *Innovation Green Devt.* 2023. V. 2. Is. 4. P. 100070. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>
3. **Cost** increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China / Z. Zhuo, E. Du, N. Zhang, C.P. Nielsen, X. Lu, J. Xiao, J. Wu, C. Kang // *Nat. Comm.* 2022. V. 13. P. 3172. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30747-0>
4. **Ольховский Г.Г.** Наиболее мощные энергетические ГТУ (обзор) // *Теплоэнергетика.* 2021. № 6. С. 87–93. <https://doi.org/10.1134/S0040363621060060>
5. **Development** of next generation gas turbine combined cycle system / H. Yamazaki, Y. Nishimura., M. Abe, K. Takata, S. Hada, J. Masada // *Proc. ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, Air.* Seoul, South Korea, 13–17 June 2016. P. 49743. <https://doi.org/10.1115/GT2016-56322>
6. **Pashchenko D.** Ammonia fired gas turbines: Recent advances and future perspectives // *Energy.* 2024. V. 290. Is. 1. P. 130275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130275>
7. **Ammonia** for power / A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P.J. Bowen // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2018. V. 69. P. 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
8. **A review** on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels / W. Chai, Y. Bao, P. Jin, G. Tang,

- L. Zhou // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2021. V. 147. P. 111254.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111254>
9. **Pashchenko D.** Hydrogen-rich gas as a fuel for the gas turbines: A pathway to lower CO₂ emission // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2023. V. 173. P. 113117.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113117>
10. **Ammonia/hydrogen** laminar flame speed measurements at elevated temperatures / M. Figueroa-Labastida, L. Zheng, J.W. Streicher, R.K. Hanson // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2024. V. 63. P. 1137–1146.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.255>
11. **Ammonia** as an effective hydrogen carrier and a clean fuel for solid oxide fuel cells / Z. Wan, Y. Tao, J. Shao, Y. Zhang, H. You // *Energy Convers. Manage.* 2021. V. 228. P. 113729.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113729>
12. **Ольховский Г.Г.** Парогазовые установки для отечественных ТЭС // *Электрические станции.* 2020. № 1 (1062). С. 21–28.
<https://doi.org/10.34831/EP.2020.1062.1.003>
13. **The use** of thermochemical recuperation in an industrial plant / S.K. Popov, I.N. Svistunov, A.B. Garyaev, E.A. Serikov, E.K. Temyrkanova // *Energy.* 2017. V. 127. P. 44–51.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.091>
14. **К опытно-промышленным** испытаниям стекловаренной печи с химической регенерацией теплоты / И.И. Перелетов, В.Н. Новосельцев, М.Ф. Шопшин, Е.А. Чуланов, В.А. Волков, А.И. Тюрин, И.И. Левер // *Энергетика высокотемпературной теплотехнологии: Сб. науч. трудов. М.: МЭИ, 1980. Вып. 476. С. 26–32.*
15. **Carapellucci R., Milazzo A.** Thermodynamic optimization of a reheat chemically recuperated gas turbine // *Energy Convers. Manage.* 2005. V. 46. Is. 18–19. P. 2936–2953.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.02.007>
16. **Pashchenko D., Mustafin R., Karpilov I.** Efficiency of chemically recuperated gas turbine fired with methane: Effect of operating parameters // *Appl. Therm. Eng.* 2022. V. 212. P. 118578.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118578>
17. **Liu Z., Karimi I.A.** Simulating combined cycle gas turbine power plants in Aspen HYSYS // *Energy Convers. Manage.* 2018. V. 171. P. 1213–1225.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.049>
18. **Ojelade O.A., Zaman S.F.** Ammonia decomposition for hydrogen production: a thermodynamic study // *Chemical Pap.* 2021. V. 75. P. 57–65.
<https://doi.org/10.1007/s11696-020-01278-z>
19. **Peng D.Y., Robinson D.B.** A new two-constant equation of state // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1976. V. 15. No. 1. P. 59–64.
20. **Techno-economic** evaluation of a thermochemical waste-heat recuperation system for industrial furnace application: Operating cost analysis / D. Pashchenko, I. Karpilov, M. Polyakov, S.K. Popov // *Energy.* 2024. V. 295. P. 131040.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131040>
21. **Пашенко Д.И.** Термохимическая рекуперация тепла отходящих дымовых газов в парогазовых установках: термодинамический анализ // *Теплоэнергетика.* 2023. № 1. С. 58–65.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623010058>
22. **Андрющенко А.И.** Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: учеб. пособие для теплоэнергет. спец. вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985.
23. **GRI-Mech 3.0.** Reaction mechanism / G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.Th. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner, Jr., V.V. Lissianski, Z. Qin. Berkeley, 2021.
http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
24. **Data-driven** prediction of laminar burning velocity for ternary ammonia/hydrogen/methane/air premixed flames / C.E. Üstün, S. Eckart, A. Valera-Medina, A. Paykani // *Fuel.* 2024. V. 368. P. 131581.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131581>
25. **Laminar** flame speed correlations of ammonia/hydrogen mixtures at high pressure and temperature for combustion modeling applications / V. Pessina, F. Berni, S. Fontanesi, A. Stagni, M. Mehl // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2022. V. 47. Is. 61. P. 25780–25794.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.007>
26. **Development** and testing of a 100 kW fuel-flexible micro gas turbine running on 100% hydrogen / R. Banihabib, T. Lingstädt, M. Wersland, P. Kutne, M. Assadi // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2024. V. 49. Part B. P. 92–111.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.317>
27. **York W.D., Ziminsky W.S., Yilmaz E.** Development and testing of a low NO_x hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines // *J. Eng. Gas Turbines Power.* 2013. V. 135. Is. 2. P. 022001.
<https://doi.org/10.1115/1.4007733>
28. **Оценка** возможностей снижения выбросов парниковых газов при сжигании топлив в котлах ТЭС и котельных / П.В. Росляков, Б.А. Рыбаков, М.А. Савитенко, И.Л. Ионкин, Б. Лунинг // *Теплоэнергетика.* 2022. № 9. С. 97–106.
<https://doi.org/10.56304/S0040363622090041>
29. **Combustion** characteristics of a multiple-injection combustor for dry low-NO_x combustion of hydrogen-rich fuels under medium pressure / S. Dodo, T. Asai, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida // *Proc. ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, Air. Vancouver, British Columbia, Canada, 6–10 June 2011. Paper No. GT2011-4545954624.* P. 467–476.
<https://doi.org/10.1115/GT2011-45459>
30. **Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г.** Введение в водородную энергетику / под ред. В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Ammonia as a Fuel for Gas-Turbine Units with Thermochemical Recuperation of Exhaust Gas Heat

D. I. Pashchenko^{a, b, *}

^a *Guangdong Technion—Israel Institute of Technology, Shantou, 515063 China*

^b *Samara State Technical University, Samara, 443100 Russia*

^{*}*e-mail: dmitry.pashchenko@gtit.edu.cn*

Abstract—The prospects are examined for application of ammonia-fired gas turbine units (GTUs) with thermochemical recuperation of the exhaust gas heat. Examples of operating ammonia-fired gas turbine units are given, and the main operating restrictions for the use of existing gas turbine units are specified. A thermodynamic analysis of a simple gas turbine unit with thermochemical heat recuperation (TCR) was performed in a wide range of operating conditions: the gas temperature at the turbine inlet varied from 700 to 1300°C and the compressor pressure ratio from 5 to 20. It has been established that the thermochemical heat recuperation can increase the GTU efficiency by as much as 9%. The effectiveness of TCR application has been demonstrated to depend on such operating parameters as pressure and temperature. At a temperature above 500°C, the enthalpy of the ammonia decomposition reaction reaches a value close to the maximum of approximately 3.0 MJ/kg NH₃. Thermochemical recuperation leads to the decomposition of ammonia with production of a hydrogen-rich gas (up to 75% (by volume)), which is burned in the combustion chamber, thereby changing the combustion process characteristics. The flame propagation velocity in a gas mixture consisting of hydrogen, nitrogen, and ammonia in different proportions was calculated on the basis of the GRI-Mech 3.0 list of elementary reactions in the Chemkin-Pro module. It has been found that the products of complete thermochemical decomposition of ammonia have a flame propagation velocity that is approximately two times higher than that for methane and more than ten times higher than that for ammonia. Thus, the implementation of the thermochemical heat recuperation in ammonia-fired gas turbine units is expected to increase the energy efficiency and improve the combustion process stability.

Keywords: ammonia, hydrogen, gas turbine unit, flame propagation velocity, thermodynamic analysis, thermochemical recuperation, effectiveness