

## ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 620.9; 532.529.5

А. Р. Богомолов, Н. А. Прибатурина, Е. Ю. Темникова

### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА

В связи со сложной экологической ситуацией современная технология совершенствуется в направлении новых решений химических, энергетических проблем, проблем добычи природных ископаемых. Одним из таких технологических решений является широкомасштабная, охватывающая различные способы газификация твердого топлива, направленная на получение газа необходимого состава для использования в производстве продуктов или энергии. Особенности последнего 10-летия характеризуются большим количеством исследований процессов газификации твердого топлива в присутствии высокотемпературного (до 1800 К) водяного пара при давлениях, близких к атмосферному. Кроме того, высокотемпературный пар может найти применение в производстве электрической энергии на комплексе турбогенератор. Вопросами получения водяного пара высокой температуры с использованием теплоты сгорания водород-кислородной смеси начали заниматься сравнительно недавно.

Существует достаточно много работ по исследованию процессов горения в пограничном слое потока воздуха [1-3], влиянию горения на гидродинамическое сопротивление, устойчивости горения в воздушном потоке. Эти исследования были направлены на разработку основ ракетной техники и разработку основ охлаждения стенок сопловых аппаратов. Работы, связанные с изучением влияния потока пара на скорость сгорания, устойчивость пламени, полноту сжигания горючей смеси, практически не проводились из-за отсутствия технологической и технической необходимости. Горение водорода в паре изучалось применительно к проблеме взрывобезопасности ядерных реакторов, где достигнуты успехи в определении критических концентраций водорода в объеме пара, при которых происходит инициирование горения и детонации. Применительно к задаче получения пара высокой температуры (1500 К) для создания высокоэффективной паровой конденсационной турбины, либо термохимических превращений органического материала в водяном паре высоких температур, такие исследования не проводились.

В начале 90-х годов XX века в нескольких исследовательских центрах мира задумались о

проблеме существенного повышения КПД энергетических установок с паровой турбиной. С этой целью были предприняты усилия по организации исследований по получению водяного пара высокой температуры с использованием теплоты сгорания водород-кислородной смеси. В Японии в 1993 году началась реализация крупного проекта WE-NET (World Energy Network) в области водородной энергетики. В этом проекте для генерации электроэнергии предусматривалось сжигание водорода с последующим получением высокотемпературного потока водяного пара и его использования в паровой турбине. С этой целью в лаборатории Hitachi Ltd. было разработано устройство для сжигания водород-кислородной смеси в их стехиометрической пропорции и предусмотрено смешение продуктов сгорания с водяным паром температурой 770 К. На выходе из устройства предполагалось получать только водяной пар с температурой до 2000–2400 К и давлением 5 МПа. Этот водяной пар поступал потом на турбину для производства электрической энергии. Было разработано два типа сжигающего устройства, в которых область горения водород-кислородной смеси была отделена от зоны смешения продукта сгорания с поступающим водяным паром. Для тестовых испытаний была создана лабораторная модель, охлаждаемая проточной водой, процесс горения контролировался через оптические стекла. Во время испытаний, время которых не превышало 100 с, был зафиксирован устойчивый режим горения водород-кислородной смеси в потоке водяного пара, температура и давление водяного пара на выходе из устройства изменялись в диапазоне 500–1700 К и 0,8–6,0 МПа в зависимости от доли водород-кислородной смеси в потоке исходного водяного пара. Авторы проекта столкнулись с проблемами тепловой изоляции устройства горения, контроля потоков водорода и кислорода, контроля пламени. К сожалению, о дальнейшей судьбе проекта ничего не известно.

Несколько раньше стал разрабатываться аналогичный проект в Германии в лаборатории DLR. Открытая информация об этом проекте появилась в 1993 году. Проект получения водяного пара высокой температуры основывался на испарении капель воды в высокотемпературном потоке

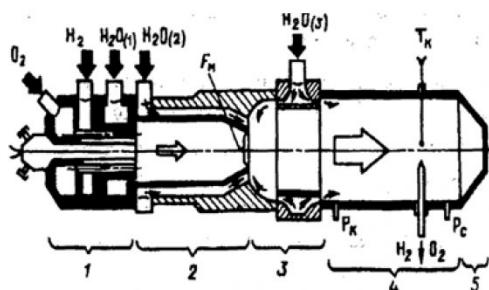


Рис. 1. Схема экспериментального водородо-кислородного парогенератора модели 10М [5]:  
1 – смесительная головка и запальное устройство; 2 – камера сгорания; 3 – узел впрыска воды; 4 – камера смешения; 5 – выходное сопло; 3-5 – блок испарения и смешения

продуктов горения водородо-кислородной смеси. Вследствие использования воды с низкой темпе-

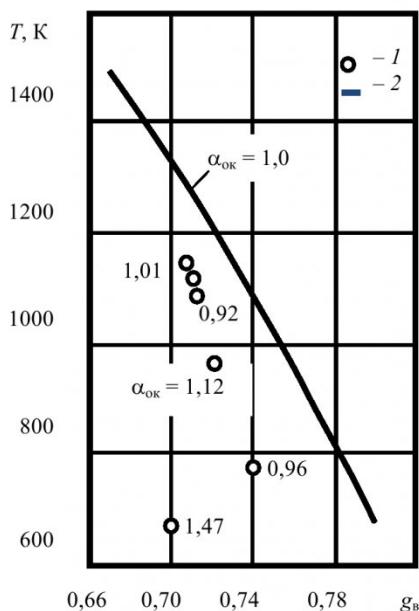


Рис. 2. Зависимость температуры пара от массовой доли воды [5]:

1 – экспериментальные значения;  
2 – равновесный термодинамический рас-

татуруй температура и давление получаемого водяного пара составляли всего 770 К и 4 МПа, соответственно. Например, работа [4] посвящена экспериментальному и модельному исследованию воспламенения и факела при горении водородо-кислородной инжектируемой смеси.

Проект с подобным подходом развивается в Объединенном институте высоких температур РАН. Выполняемые работы под руководством С.П. Малышенко направлены на разработку высокотемпературных водородных парогенерирующих агрегатов многоцелевого назначения, исследования водородных парогенерирующих систем и областей их применения [5-9].

В работе [5] представлены результаты разработки и исследования экспериментального водо-

родо-кислородного парогенератора модели 10М мощностью 10 МВт (рис. 1), на основе которых запатентован ряд изобретений [6-9]. На рис. 2 [5] приведены результаты измерения температуры полученного пара в зависимости от массовой доли воды, а также расчетная линия температуры пара при равновесном протекании процессов. В расчет следует принимать значения температур

пара, которые получены при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha_{ok}$ , близком к единице, т.е. вблизи стехиометрического состава.

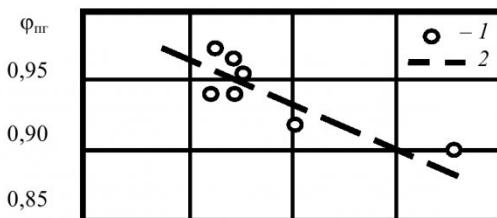


Рис. 3. Интегральная эффективность процесса генерации пара в зависимости от массовой доли воды [5]: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Из рис. 2 видно, что экспериментальные значения температур пара лежат ниже теоретической кривой. На рис. 3 [5] представлены результаты определения эффективности парогенерации  $\Phi_{pg}$  в зависимости от массовой доли воды. Очевидна тенденция снижения эффективности парогенерации с 0,95 до 0,9 с увеличением доли воды с 0,71 до 0,8. Результаты испытаний показали, что со средоточенный впрыск воды может применяться при массовой доли воды меньше 0,7, что соответствует температуре пара на выходе выше 1300–1400 К. Серия испытаний [5] парогенератора показала работоспособность конструкции и возможность получения расхода рабочего тела на уровне 5–6 кг/с с изменением температуры в диапазоне от 700 до 1200 К и давления от 5,8 до 7,2 МПа, при этих параметрах интегральная эффективность процесса генерации пара составила 94,5 %, общая наработка 160 с.

В [8] сказано, что в результате использования парогенератора на выходе в камере смешения пар может иметь следующие параметры: температуру от 400 до 1200 К при давлении от 0,1 до 5 МПа, а температура в камере сгорания составит 3600 К. В работах [5, 7-9] для получения высокотемпературного водяного пара используется сжигание водородо-кислородной смеси в дисперсном потоке воды. Основной недостаток такой схемы получения высокотемпературного водяного пара это использование части теплоты сгорания водородо-кислородной смеси на нагрев и испарение капель воды, вследствие чего не удается иметь на выходе водяной пар высоких параметров. Помимо этого существуют проблемы, связанные с получением сухого пара, неустойчивостью и перегревом парогенератора.

Интересны работы [10-12], касающиеся раз-

работки вихревого водород-кислородного пароперегревателя (рис. 4), в котором при взаимодействии водяного пара с высокотемпературным потоком продуктов сгорания водорода в кислороде (пара) реализуется эффект Ранка. На рис. 5 [12] представлена зависимость температуры высокотемпературного и традиционного перегрева пара от его относительного расхода, определяемого отношением расхода основного пара к расходу водород-кислородной смеси. Из рис. 5 видно, что при увеличении расхода низкоэнталпийного пара температура пара на выходе снижается. Следует отметить сложное конструктивное оформление вихревого пароперегревателя, в том числе и использование многократной (4-кратной) подачи пара, что совместно с эффектом Ранка приводит к сложной гидродинамике в парогенераторе.



Рис. 4. Водород-кислородный пароперегреватель:  
1 – подача охлаждающего пара; 2 – выходное сопло; 3 – подача основного пара; 4 – подача водород-кислородной смеси; 5 – подача вторичного пара

Из зарубежных патентов следует обратить внимание на следующие. В [13] описан метод получения сверхчистого пара и парогенератор с паровой чистотой более чем 99,9 % (вес.) в диапазоне температур от 500 до 2000 К и давления от 0,1 до 3 МПа, основными недостатками которого являются сложный разжиг, применение катализатора в камере дожигания горючего.

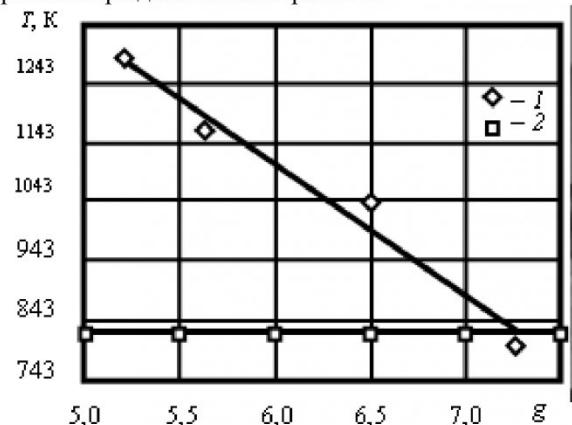


Рис. 5. Зависимость температуры перегрева пара от его относительного расхода [12]: 1 – высокотемпературного; 2 – традиционного

Также интересными являются конструкции парогенераторов, описанные в [14, 15]. В [15] описан парогенератор, представленный на рис. 6. Окислитель 1, предпочтительно кислород, и горючее 2, водород, поступают в головную часть 3 (конструкция раскрыта непосредственно в патенте) парогенератора, где происходит воспламенение от свечи зажигания (не показано). В камере сгорания 4 происходит смешение и горение смеси. На корпусе 6 расположен кольцевой канал для инъекции воды 16.

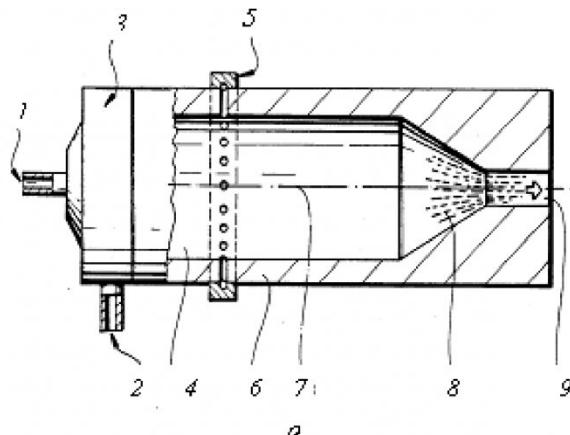


Рис. 6. Парогенератор [15]: 1 – подача кислорода; 2 – подача водорода; 3 – головная часть парогенератора; 4 – камера сгорания; 5 – подача воды; 6 – корпус; 7 – зона циркуляции; 8 – поток полученного пара; 9 – выход пар

Внутренней часть парогенератора находится циркуляционная область 7, в которой получают перегретый пар 8, проходящий через выход 9. Преимущество конструкции состоит в ее относительной простоте, к недостаткам можно отнести инъекцию воды, а не водяного пара. Авторы [14, 15] не указывают значений расходных и выходных термодинамических параметров пара, не приводят данных исследований, испытаний парогенераторов.

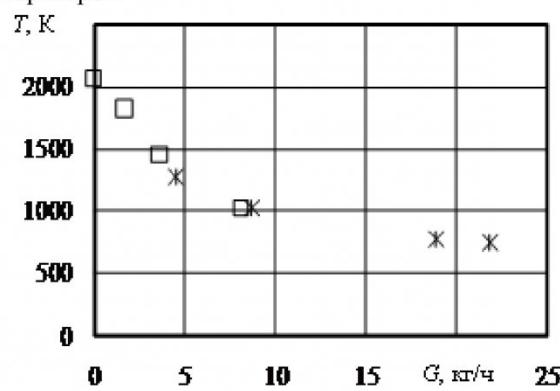


Рис. 7. Зависимость температуры пара на выходе от расхода низкоэнталпийного пара [16]:  $\square$  – численное моделирование;  $\times$  – эксперимент

ладзе СО РАН в 2005 году независимо от работ Hitachi Ltd. было предложено использовать сжигание водород-кислородной смеси стехиометрического состава в потоке водяного пара для получения высокотемпературного водяного пара [16]. Это предложение основывалось на результатах экспериментов по поджогу ударной волной пузырьков водород-кислородной смеси свободно всплывающих в воде. Если состав водород-кислородной смеси, заполняющей пузырек был стехиометрический, то за фронтом ударной волны, проходящей по такой двухфазной среде, происходило полное исчезновение пузырьков, т.е. их конденсация. Это доказывало известный факт, что при сжигании стехиометрической водород-кислородной смеси образуется водяной пар. Таким образом, если организовать сгорание стехиометрического состава водород-кислородной смеси в водяном паре, то на выходе получается смешение двух потоков: водяного пара исходного низкотемпературного и получаемого в результате сгорания высокотемпературного водяного пара. Основная проблема заключается в понимании механизмов разжига и горения водород-кислородной смеси в водяном паре и достижения полного сгорания. Авторами [16] были разработаны пять моделей высокотемпературного водородного пароперегревателя и проведены модельные эксперименты в лабораторных условиях по сгоранию водород-кислородной смеси в потоке водяного пара при атмосферном давлении. На рис. 7

[16] представлена зависимость температуры пара на выходе от расхода низкотемпературного пара для одного из типов пароперегревателей при расходе горючей смеси  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Видно, что при малых расходах низкотемпературного пара, менее 6 кг/ч, температура выходного пара приближается к 1300 К, при увеличении расхода до 24 кг/ч температура падает до 750 К. Авторами [16] показано, что во всех тестируемых конструкциях пароперегревателей устойчиво достигается диапазон значений температуры перегретого пара 1300-1500 К. Испытания пароперегревателей [16] показали, что эффективность их работы зависит от множества факторов таких, как расход водяного пара и горючей смеси, конструктивные особенности горелочного устройства, камеры смешения, способ подачи пара.

Системная интеграция водородных парогенераторов с энергетическими ГТУ и ПГУ с мощностью единичных агрегатов до 20-25 МВт позволит создать компактные, экологически чистые и высокоэффективные энергоустановки для автономного энергообеспечения предприятий ТЭК, химической, нефтехимической, углехимической и других отраслей. Опыт создания водородосжигающих устройств, для применения в этих областях, является уникальным, поскольку данные технологии ещё недостаточно разработаны в мире.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК № 14.740.11.0101.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчков, Э. П. Сравнение различных методов моделирования турбулентного горения в пограничном слое / Э. П. Волчков, Н. А. Дворников, Л. Н. Перепечко // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, №4. – С. 37-42.
2. Волчков, Э. П. Математическое моделирование турбулентного горения водорода в пограничном слое / Э. П. Волчков, Н. А. Дворников, Л. Н. Перепечко // Инж.-физ. журн. – 1998. – Т. 71, №1. – С. 86-91.
3. Волчков, Э. П. Структура пограничного слоя с горением водорода при различных интенсивностях вдува/ Э. Л. Волчков, В. В. Терехов, В. И. Терехов // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, №3. – С. 20-29.
4. Schmidt, V. Experimental investigation and modeling of the ignition transient of a coaxial H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-injector / V. Schmidt, D. Klimenko, O. Haidn, M. Oschwald, A. Nicole, G. Ordoneau, M. Habiballah // 5th International Symposium on Space Propulsion. – Chattanooga, USA, October 27-30. 2003. – 28 p.
5. Бебелин, И. Н. Разработка и исследование экспериментального водород-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) / И. Н. Бебелин, А. Г. Волков, А. Н. Грязнов, С. П. Малышенко // Теплоэнергетика. – 1997, № 8. – С. 48-52.
6. Пат. 2309325 Российская Федерация, МПК F 22 B 1/26. Парогенератор / Грязнов А. Н., Малышенко С. П.; заявитель и патентообладатель Грязнов А. Н., Малышенко С. П. – № 2005139564/06; заявл. 19.12.05; опубл. 27.10.07. – 6 с.
7. Пат. 2300049 Российская Федерация, МПК F 22 B 1/26. Мини-парогенератор / Грязнов А. Н., Малышенко С. П.; заявитель и патентообладатель Грязнов А. Н., Малышенко С. П. – № 2005139563/06; заявл. 19.12.05; опубл. 27.05.07. – 5 с.
8. Пат. 2358190 Российская Федерация, МПК F 22 B 1/26. Водородный высокотемпературный парогенератор с комбинированным испарительным охлаждением камеры смешения / Грязнов А. Н., Малышенко С. П.; заявитель и патентообладатель ОИВТ РАН, Грязнов А. Н., Малышенко С. П. – № 2007132542/06; заявл. 29.08.07; опубл. 10.06.09. – 4 с.
9. Пат. 2358191 Российская Федерация, МПК F 22 B 1/26. Водородный высокотемпературный пароген-

нератор с комбинированным охлаждением камеры сгорания / Грязнов А. Н., Малышенко С. П.; заявитель и патентообладатель ОИВТ РАН, Грязнов А. Н., Малышенко С. П. – № 2007132543/06; заявл. 29.08.07; опубл. 10.06.09. – 3 с.

10. Пат. 2361146 Российская Федерация, МПК F 22 G 1/16. Вихревой водород-кислородный пароперегреватель / Пириалишвили Ш. А., Гурьянов А. И., Федоров В. А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Рыбинская гос. авиационная технолог. академия им. П. А. Соловьева. – № 2007147083/06; заявл. 17.12.07; опубл. 10.07.09. – 3 с.

11. Гурьянов, А. И. Стабилизация пламени в потоке радиально-вдуваемыми высокотемпературными закрученными струями / А. И. Гурьянов, А. А. Модина // тр. 5 Росс. национ.. конф. по теплообмену. В 8 т. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях, 25-29 окт. 2010 г. – М.: МЭИ, 2010.–С. 176-179.

12. Гурьянов, А. И. Теплофизика водород-кислородных пароперегревателей высокотемпературных турбин комбинированных ПГУ / А. И. Гурьянов, Г. Ш. Пириалишвили, И. М. Верещагин // тр. 5 Росс. национ.. конф. по теплообмену. В 8 т. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях, 25-29 окт. 2010 г. – М.: МЭИ, 2010. – С. 180-183.

13. Pat. US 20040069245A1, Int. Cl. F 22 G 3/00. Metod for generating steam, in particular ultrapure steam, and steam generator / Griffin T., Schlegel A., Winkler D.; applicant and patentee Griffin T., Schlegel A., Winkler D., Alstom Technology Ltd. – № 10/662,376; appl. Sep. 16, 2003; pub. Apr. 15, 2004. – 5 p.

14. Pat. US 20020100678A1, Int. Cl. C 10 B 1/00. Oxyhydrogen steam generator / Primlani I. J.; applicant and patentee Primlani I. J. – № 09/771,341; appl. Jan. 26, 2001; pub. Aug. 1, 2002. – 2 p.

15. Pat. US 005088450A, Int. Cl. F 22 B 1/02. Steam generator / Sternfeld H., Wolfmueller K., Brunn A.; applicant and patentee Deutsche forsch luft raumfahrt. – № 605,802; appl. Oct. 30, 1990; pub. Feb. 18, 1992. – 3 p.

16. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в обеспечение создания энергокомплекса с ВПТУ: Отчет о НИР / Институт теплофизики СО РАН (ИТ СО РАН); Руководитель С. В. Алексеенко. – Изв. № 959/6.1-2007; № ГК 02.526.11.6003 шифр «2007-6-2.6-19-01-001», Новосибирск, 2008. – 116 с.

□ Авторы статьи:

Богомолов  
Александр Романович,  
докт. техн. наук, ст. научн. сотр.  
ИТ СО РАН, доц. каф. процессов,  
машин и аппаратов химических производств КузГТУ,  
e-mail: barom@kuzstu.ru

Прибатурина  
Николай Алексеевич,  
докт. техн. наук,  
гл. научн. сотр. ИТ СО РАН,  
e-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Темникова  
Елена Юрьевна,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
процессов, машин и  
аппаратов химических  
производств КузГТУ,  
e-mail: teu.pmahp@kuzstu.ru  
тел. (+7-384-2)39-63-32

**УДК 622.61; 662.93**

**М.И.Шиляев, Ю.О. Афанасьев, А.Р.Богомолов**

**МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ТОПЛИВА**

Проанализированы три модели горения угольных частиц во второй ступени циклонного реактора, состоящего из четырех цилиндрических ступеней. Из первой ступени во вторую топливо поступает подсущенным с температурой  $T_{bx}$  и концентрацией  $c_{bx}$ . Установлено удовлетворительное согласование результатов расчетов и опытных данных профилей температур газа при сжигании измельченного угля.

С целью оптимизации конструкции циклонного реактора, предназначенного для сжигания низкосортного топлива [1], предлагается следующая физико-математическая модель процесса горения, происходящего в этом аппарате. Топливная смесь подогретого воздуха с сухими частицами из первой ступени реактора поступает во вторую (рис.

1). В результате проведенных аэродинамических опытов на “холодной” модели циклонного реактора отмечено, что траектории частиц топлива имеют весьма сложный характер. Наиболее крупные фракции топлива, вращаясь, отбрасываются на стенки второй ступени, а мелкие циркулируют в центре ступени и, выгорая, движутся в аксиальном направлении к третьей ступени, где осуществляется их после дующее сжигание. Четвертая ступень предназначается для дожигания, улавливания и отвода золы в бункер, и вывода продуктов сгорания. В целом в модели аэродинамика газа с частицами рассчитывается на основе приближенных аналитических зависимостей для прямоточных циклонов [2]. В модели горения частиц топлива предполагается, что продукты пиролиза полно-