

выходе диффузора), а осредненные по расходу газа величины давлений – в таблице 1.

Таблица 1

Результаты математического моделирования течения газа в диффузоре

Вариант диффузора (№)	Повышение статического давления в диффузоре, Па	Потери полного давления в диффузоре, Па	Максимальное статическое (полное) давление на выходе, Па	Минимальное статическое (полное) давление на выходе, Па
1 (без дефлектора)	2198	1840	1789 (7998)	-2475 (-2676)
2	1351	3153	65 (9325)	-1557 (-1460)
3	2411	1808	20 (9557)	-1404 (-1383)
4	2347	1942	10 (9363)	-1072 (-1033)
5	2452	2002	78 (9333)	-1022 (-965)
6	-2338	26	11 (8944)	-548 (-541)

Как видно из таблицы лучшие результаты показал диффузор № 6. Он имеет весьма малые потери полного давления (26 Па) и наименьшую (по сравнению с другими диффузорами) неравномерность на выходе. Также в выходном сечении диффузора № 6 было получено существенное снижение зоны обратных токов.

Выводы

1. Применение сверхвысокой регенерации тепла выхлопных газов поднимает эффективность малоразмерных газотурбинных двигателей до и выше уровня лучших поршневых двигателей.
2. Разработанная многотопливная экологически чистая микротурбина является перспективным двигателем для транспорта и распределенной энергетики.
3. Разработанная микротурбина позволят занять российским производителям передовые позиции по экологически чистым энергетическим установкам и транспортным средствам.

Литература

1. Костюков А.В., Кустарев Ю.С. и др. Исследование роторного теплообменника малоразмерного регенеративного газотурбинного двигателя. Общероссийский н/т журнал «Полёт», № 1, 2005, с. 38-42.
2. Костюков А.В., Елисеев С.Ю. и др.. Способ охлаждения каркаса вращающегося дискового теплообменника и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2296930, 2007 г.
3. Костюков А.В., Кустарев Ю.С., и др. Исследование системы охлаждения каркаса роторного теплообменника. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2007, с. 61-65.
4. Костюков А.В. Микротурбина с эффективным КПД более 43%. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012, т. 1, № 2(14), с. 179-182.

УДК: 621.438

Энергоаккумулирующие вещества как альтернативное топливо для стационарных и транспортных энергоустановок

доц. Кузнецов В.В., Лоик А.В.
 Университет машиностроения
 8(967)0285325, kuznetsov@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности использования энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) как альтернативного топлива для транспортных и стационарных энергоустановок.

нарных газотурбинных двигателей и установок. В качестве промышленных ЭАВ исследуются трёхкомпонентные сплавы Si, Al и Fe. Определены теплоты сгорания и адиабатные температуры горения ЭАВ в среде перегретого водяного пара при различных значениях коэффициента избытка окислителя. Определён состав конденсированных продуктов сгорания при различном фракционном составе ЭАВ. Определена полнота сгорания ЭАВ.

Ключевые слова: водород, энергоаккумулирующие вещества, энергоустановки.

Одним из перспективных направлений в развитии водородной энергетики является использование энергоаккумулирующих веществ для получения водорода из воды непосредственно в составе энергоустановки.

Под так называемыми "энергоаккумулирующими веществами" понимаются многократно регенерируемые вещества, восстанавливаемые из природных окислов. В качестве таких энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) в первую очередь рассматриваются такие вещества, как кремний, алюминий и сплавы на их основе. Это объясняется относительно высокой теплотворной способностью этих веществ, вполне сравнимой с теплотворной способностью каменного угля, большим распространением этих элементов в природе, а также тем, что исходным сырьём для их получения – первоначального восстановления из природных окислов – могут служить естественные и многочисленные отходы при сжигании угля, например, на тепловых электростанциях. Таким образом, применение энергоаккумулирующих веществ дает возможность использовать располагаемые в произвольные периоды времени и дешёвые виды энергии и вместе с тем способствует утилизации угольных отходов и улучшает экологическую обстановку.

В нашей стране научные работы по исследованию энергоаккумулирующих веществ и их техническому использованию ведутся с 50-х годов прошлого столетия (проф. И.Л. Варшавский и др.) [1]. За истекшее время подробно изучены свойства многочисленного ряда энергоаккумулирующих веществ, разработаны промышленные способы производства ЭАВ из природных окислов, предложены технические решения применения ЭАВ в энергетике и на транспорте. Полученные результаты свидетельствуют о высоких экономических и экологических достоинствах энергоаккумулирующих веществ и о технической целесообразности их применения. Результаты исследований приводятся в ряде статей и монографий.

Особенно много работ посвящено использованию в качестве ЭАВ алюминия. Подобные работы с начала 80-х годов прошлого века проводятся в Швейцарии. Институт им. Пауля Шерера (г. Вюренлинген) совместно с Базельским университетом проводит опыты по углеродотермическому восстановлению алюминия из окислов с помощью солнечной энергии и по сжиганию полученного алюминия в воздушной камере сгорания с целью получения тепловой энергии для теплофикации небольших зданий. По опубликованным данным, создана работающая экспериментальная установка мощностью 30 кВт. Полученные положительные результаты позволили наметить направления дальнейших научных исследований [2].

Ученые Purdue University (США) создали новый сплав металлов на основе алюминия, который может быть весьма эффективен в процессе выработки водорода [3; 4]. Использование этого сплава, кроме прочего, экономически оправдано, и такой метод может уже в скором времени составить конкуренцию современным видам топлива, используемым в транспортной и энергетической индустрии. Этот сплав на 95% состоит из алюминия, а остальное – сложный сплав галлия, индия и олова. Следует отметить, что галлий – редкий и дорогой материал, но его количество в сплаве невелико и, кроме того, возможна его регенерация в рассматриваемом технологическом процессе, что может сделать его эксплуатацию приемлемой.

В настоящее время канадская компания «Global Hydro fuel» разработала технологию получения водорода из воды с помощью активированного алюминия в качестве ЭАВ. Активация алюминия осуществляется с помощью галлия. Эта работа направлена на создание силовой водородной установки для автомобиля [5].

Как перспективное изучается двухстадийное сжигание порошков ЭАВ: сначала – в пе-

регретом водяном паре с выделением водорода и большого количества тепловой энергии (примерно, половина от общей теплотворной способности ЭАВ), а затем – сжигание полученного водорода в камере сгорания газотурбинных установок, приводящего в действие электрогенератор для выработки электрической энергии. В МАМИ ведутся опыты по изучению сжигания порошков алюминия, кремния и их сплавов в водяном паре и в паровоздушных смесях. Преимуществом двухстадийного сжигания порошков ЭАВ является повышенная экологическая чистота энергоустановки, а также возможность получения не только тепловой, но и электрической (или механической) энергии, что делает установку полностью автономной.

Исходным сырьем для получения ЭАВ являются бросовые зольно-шлаковые отходы угольной промышленности и теплоэнергетики. Выполненные экономические расчеты показывают вполне удовлетворительную стоимость ЭАВ и получаемого с их помощью водорода. К тому же рассматриваемый технологический процесс способствует улучшению экологической обстановки в угольных районах страны, а отработанные отходы ЭАВ могут использоваться как ценный строительный материал. Примером таких веществ могут служить кремний, алюминий и другие элементы, соединения которых широко распространены в природе. В частности, окислы этих элементов в больших количествах содержатся и в зольно-шлаковых отвалах угольных ТЭЦ. По разработанной промышленной технологии такие окислы могут быть восстановлены и получен сплав алюминия и кремния, т.е. ЭАВ.

Значительными преимуществами обладает двухстадийная схема использования ЭАВ. В этой схеме в качестве топлива используются порошок ЭАВ и вода. На первой стадии в водородном реакторе при определенных условиях происходит сжигание порошкообразного ЭАВ в потоке перегретого водяного пара с получением высокотемпературной взвеси конденсированных оксидов ЭАВ в пароводородной смеси:

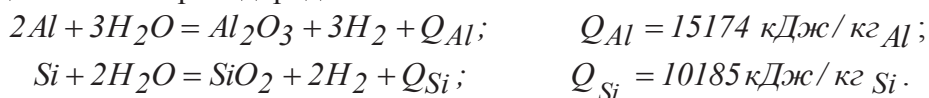
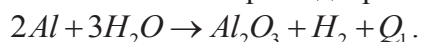
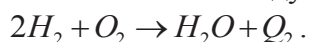


Схема дальнейшего применения ЭАВ на примере алюминия следующая.

Вначале алюминий при наличии катализатора подвергают реакции с водой:



Реакция идет с большим выделением тепла $Q_1 = 15174 \text{ кДж/кг}_{Al}$ и образованием 0,111 кг водорода на 1 кг исходного алюминия. Затем полученный водород поступает в камеру сгорания теплового двигателя и сжигается в потоке воздуха:



При этой реакции вода образуется в виде пара с выделением $Q_2 = 121112 \text{ кДж/кг}_{H_2}$. В пересчете на 1 кг исходного алюминия выделяется $Q_2 = 13457 \text{ кДж/кг}_{Al}$.

Таким образом, общая теплотворная способность ЭАВ в форме алюминия составляет $Q = Q_1 + Q_2 = 28631 \text{ кДж/кг}_{Al}$, причем при первой реакции выделяется примерно половина предполагаемого тепла (~ 53%).

Здесь проявляется особенность технического применения ЭАВ в качестве топлива, заключающаяся в необходимости иметь два энергетически примерно равноценных последовательных устройства: реактор для получения водорода из воды с помощью ЭАВ и собственно камеру сгорания, работающую на полученном водороде. Для таких условий использования топлива наиболее приспособленными оказываются струйные машины – газотурбинные двигатели, в которых относительно просто можно осуществить непрерывное протекание рабочего тела через последовательно расположенные реактор и камеру сгорания.

Однако большие тепловыделения в зоне реакции ЭАВ с водой сопровождаются значительным ростом температуры (до 3000 К [1]), не допустимым для конструкционных материалов реактора. Реактор требует интенсивного охлаждения. В ряде работ рассматривалось охлаждение реактора избыточной водой, «балластной водой». Расчеты показывают, что для обеспечения приемлемой температуры (до 1000 К) количество балластной воды должно превышать стехиометрическое (необходимое для реакции ЭАВ с водой) количество воды в не-

сколько раз (и даже в десятки раз). При этом из реактора в камеру сгорания поступает уже не только водород, но смесь водорода с большим количеством перегретого водяного пара. Причем и далее в проточную часть двигателя поступает большое количество водяного пара.

Эта идея использования ЭАВ в качестве альтернативного топлива для ГТД негласно предполагает, что сам газотурбинный двигатель относительно просто конвертируется с обычного углеводородного топлива на энергоаккумулирующие вещества. К сожалению, это не так. Выполненное расчетное проектирование показало, что в условиях использования для охлаждения реактора балластной воды проточная часть ГТД существенно изменяется, т.е. по существу требуется заново проектировать газотурбинный двигатель. Большая разница в количестве и составе рабочего тела, проходящего через компрессор и ступени турбин, требует больших изменений проточной части компрессора, турбин, чисел оборотов валов, замены редуктора. Учитывая, что необходимы также новая камера сгорания, система питания, ясно, что речь идет по существу о проектировании нового газотурбинного двигателя специально для работы на энергоаккумулирующих веществах.

Поскольку главной причиной изменений является использование балластной воды, естественно возникает вопрос о замене ее другим охлаждающим агентом – воздухом, т.е. рабочим телом обычного ГТД.

Для решения этой задачи необходимо разработать водородный реактор с воздушным охлаждением и его системы.

Рабочий процесс в паро-водородном реакторе отличается исключительной сложностью и многообразием протекающих в нем физико-химических процессов. На основе упрощенной математической модели равновесной термодинамической системы и с использованием методов расчета были выполнены термодинамические расчеты и анализ горения ЭАВ в среде перегретого водяного пара. В качестве модельного ЭАВ задавался сплав следующего состава: Si – 60 %, Al – 35 %, Fe – 5 %, примерно соответствующий ЭАВ из отходов Канско-Ачинских углей.

На выходе из реактора размещаются конденсационный промыватель газа и камера сгорания, в которой очищенный водород сжигается в воздушном потоке. В дальнейшем в качестве схемы рабочего процесса выбрана именно двухстадийная схема использования ЭАВ. Эта схема в качестве исходных расходных рабочих материалов требует энергоаккумулирующее вещество и воду.

Центральную задачу в разработке технологии использования ЭАВ для получения водорода представляет расчет, проектирование и создание водородного реактора. Выполненный расчетный анализ химико-технологических процессов взаимодействия ЭАВ с водой и производства водорода показывает, что значительное, около половины теплотворной способности ЭАВ, количество теплоты выделяется при реакции получения водорода, а оставшаяся часть – при сжигании водорода. Двухстадийность использования ЭАВ является характерной особенностью рассматриваемого процесса и требует выполнения определенных условий для обеспечения проведения экзотермической реакции взаимодействия ЭАВ с водой. Эти условия касаются как двигателя, так и собственно ЭАВ.

Двухстадийная схема использования ЭАВ предъявляет специфичные требования к тепловому двигателю, заключающиеся в том, что для сохранения экономичности двигателя необходимо каким-то образом использовать тепло реакции получения водорода.

Этим требованиям отвечают газотурбинные двигатели и энергоустановки на их основе. Современные транспортные ГТД могут быть выполнены регенеративными, что позволяет включить в схему ГТД еще одно теплообменное устройство, передающее тепло первой стадии, окисления ЭАВ, рабочему телу ГТД перед камерой сгорания.

Важным является выбор условий, при которых осуществляется реакция получения водорода из воды. Возможна организация реакции в присутствии так называемых активаторов, которые обеспечивают ход реакции в холодных условиях. Однако применение активаторов усложняет и удорожает процесс, поскольку в качестве активаторов используются такие материалы как литий, галлий и т.п. К тому же скорость выделения водорода по этой схеме явно

недостаточна для использования его в качестве горючего для теплового двигателя.

Более приемлемым является создание условий для осуществления реакции без применения активаторов. Эти условия определяются в первую очередь относительно высокими адиабатическими температурами горения ЭАВ различного состава в водяном паре – до 2500 – 2700°C и необходимостью обеспечения чистоты получаемого водородного горючего.

Разработка и создание технического устройства для организации требуемых условий реакции ЭАВ с водой является достаточно сложной научно-технической задачей, в решении которой уже достигнуты определенные успехи. Исходным сырьем для получения ЭАВ являются бросовые зольно-шлаковые отходы угольной промышленности и теплоэнергетики.

Поэтому для их обеспечения требуются специальные технические устройства – высокотемпературные реакторы.

В результате на выходе из реактора получается высокотемпературная газовзвесь окислов ЭАВ в водороде, что требует очистки водородного топлива для получения технического водорода. В этом случае целесообразно выбрать такую модель реактора, которая бы давала максимально возможную степень очистки уже в самом реакторе, до специальных фильтров. Этому требованию в наилучшей степени отвечает реактор циклонного типа – циклонная камера-реактор – ЦКР.

Химическая реакция окисления порошкообразного ЭАВ в перегретом водяном паре происходит в закрученном потоке. При этом с целью подготовки достаточно перегретого водяного пара, до 1200°C, перед входом в циклонную камеру устанавливается форкамера. Получающиеся в циклонной камере частицы окислов отбрасываются на стенку камеры и в условиях высоких температур образуют вязкую жидкотекучую пленку, стекающую в сборник окислов. Исходя из компоновочно-конструктивных требований, используем схему вертикальной циклонной камеры-реактора (ЦКР) с центральным верхним выводом очищенных газообразных продуктов реакции (водорода). Ввод порошкообразных ЭАВ производится через питательный канал в верхней крышке ЦКР, расположенный у центральной газовыводящей трубы.

Безопасность рассматриваемого альтернативного топлива (ЭАВ) и двухстадийного способа его использования обеспечивается тем, что водород, полученный из воды с помощью ЭАВ, не накапливается на борту автомобиля, а сразу же направляется для сжигания в камеру сгорания газовой турбины.

В качестве порошкообразных энергоаккумулирующих веществ лучше применять крупку, например, алюминиевую крупку марки АПК, обладающую лучшими характеристиками сыпучести. К такой форме порошка следует стремиться и при изготовлении промышленных энергоаккумулирующих порошкообразных веществ на основе сплавов кремния, алюминия, железа, кальция и прочих. Это требование должно входить в технические условия на изготовление порошкообразных ЭАВ. Возможно также применение поверхностно-активных веществ.

Полученные расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о целесообразности проведения дальнейших работ в освоении энергоаккумулирующих веществ как топлива для транспортных газотурбинных двигателей и стационарных энергоустановок с экологически чистым выхлопом.

Успешное освоение энергоаккумулирующих веществ в качестве регенерируемого альтернативного топлива для теплоэлектрических энергоустановок поможет снять сезонную и пиковую напряженность в энергоснабжении, позволит использовать доступные, но еще малоиспользуемые виды энергии, как например солнечную, уменьшит зависимость энергетики от нефти и газа, увеличит экологическую чистоту энергоустановок.

Ожидаемым результатом предлагаемого исследования по получению и использованию порошкообразных энергоаккумулирующих веществ в энергетике является разработка и создание экологически чистой теплосиловой энергоустановки, работающей на альтернативном топливе – энергоаккумулирующих веществах, получаемых с помощью располагаемых дешевых видов энергии.

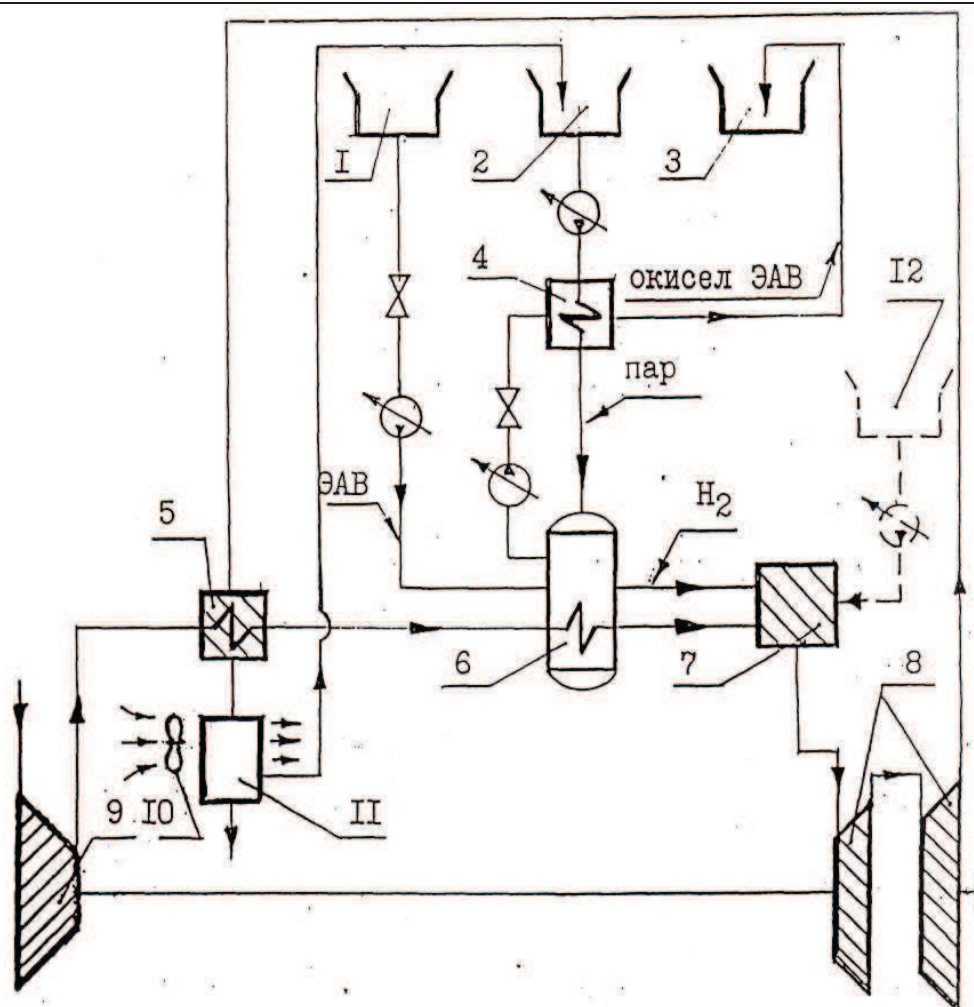


Схема регенеративного транспортного ГТД, работающего на ЗАВ:

1 – бак с ЗАВ; 2 – бак с водой; 3 – бак для отработанных конденсированных окислов ЗАВ; 4 – теплообменник (парогенератор), в котором конденсированные окислы, удаляемые из реактора, нагревают и испаряют воду, поступающую в реактор; 5 – штатный теплообменник ГТД; 6 – реактор; 7 – водородная камера сгорания; 8 – турбины двигателя; 9 – компрессор двигателя; 10 – вентилятор; 11 – конденсатор для возврата рабочей воды; 12 – возможный бак с дизтопливом (резервное топливо)

Литература

1. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование. – Киев: Наук. думка, 1980. – 240 с.
2. Wochele J., Marti T. Verbrennen von Aluminium als Entladevorgang eines Langzeit-Energiespeicher-Systems // Interner Bericht TM-51-88-26. – P. Scherrer Institut, Schwitterland. – 1988. – 4 s.
3. Woodall J.M. The Science and Technology of Aluminum-Gallium Alloys as a Material for Hydrogen Storage, Transport and Splitting of Water. Keynote Address, ECHI-2 Conference, April 12, 2007, Purdue University.
4. Reaction of Aluminum with Water to Produce Hydrogen. A Study of Issues Related to the Use of Aluminum for On-Board Vehicular Hydrogen Storage. – U.S. Department of Energy. Version 1.0 – 2008. pp. 26.
5. Global Hydro fuel Technologies Inc. Company Information, 2008.