# СОДЕРЖАНИЕ

Расчет себестоимости производства водорода, получаемого по алюмоводной технологии	2
Э. П. ВОЛКОВ	3
Моделирование детонации в установках крупного масштаба с помощью прецизионного вихреразрешающего кода CABARET-COMBUSTION <i>А. И. Гавриков, А. Данилин, А. А. Канаев, А. Е. Киселев</i>	11
Моделирование водородной пожар-струи с помощью методики КАБАРЕ В. Ю. Глотов, А. А. Канаев, А. В. Данилин, В. Г. Кондаков	25
Моделирование работы пассивного автокаталитического рекомбинатора в вихреразрешающем приближении <i>А. А. Канаев, В. Ю. Глотов, А. Е. Киселев</i>	43
Лучшие мировые практики низкоуглеродного развития ключевых инфраструктурных отраслей С. К. Аношина, В. Л. Лихачев, А. А. Аношин	60
Возможность создания передвижных плазменных установок на базе автономных источников питания А. А. Сафронов, В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева	70

Calculation of the Cost of Production of Hydrogen Produced by Aluminum-Water Technology	2
E. P. Volkov	3
Detonation Modelling in a Large-Scale Facilities with Precision Eddy-Resolving Code Cabare-Combustion	
A. I. Gavrikov, A. V. Danilin, A. A. Kanaev, and A. E. Kiselev	11
Simulation of a Hydrogen Jet Fire Using the Cabaret Technique V. Yu. Glotov, A. A. Kanaev, A. V. Danilin, and V. G. Kondakov	25
Numerical Eddy-Resolving Modeling of Passive Autocatalytic Recombiner Operation A. A. Kanaev, V. Yu. Glotov, and E. A. Kiselev	43
The World's Best Practices of Low-Carbon Development of Key Infrastructure Industries S. K. Anoshina, V. L. Likhachev, and A. A. Anoshin	60
Possibility of Creation of Mobile Plasma Installations Based on Autonomous Power Sources	
A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, Yu. D. Dudnik,	
V. N. Shiryaev, and O. B. Vasilieva	70

УДК 620.97

# РАСЧЕТ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА, ПОЛУЧАЕМОГО ПО АЛЮМОВОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

#### © 2022 г. Э. П. Волков\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: volkov\_ep@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г. После доработки 14.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

Настоящий период развития электроэнергетики мира характеризуется стремлением научной общественности и руководства многих промышленно развитых стран осуществлять, в связи с происходящими климатическими изменениями, переход к так называемой низкоуглеродной энергетике. Определенную роль при этом играют решения отдельных крупных энергетических компаний, связанных с созданием нового сектора энергетики — водородной энергетики. Для этого последние 3—4 года широко разворачиваются работы по созданию безуглеродных технологий получения водорода. Среди последних находится и алюмоводная технология его производства. При этом важнейшей характеристикой любой технологии является себестоимость производимой продукции. В настоящей статье приводятся расчеты по определению себестоимости производства водорода, получаемого по алюмоводной технологии.

*Ключевые слова:* алюмоводная технология, гидротермальное окисление алюминия, компримирование водорода, капитальные и эксплуатационные затраты, стоимость электроэнергии, себестоимость производства водорода

DOI: 10.31857/S0002331022040082

#### МОДЕЛЬ РАСЧЕТА

При расчете стоимости водорода учитываются составляющие капитальных и текущих (эксплуатационных) затрат по всей технологической цепочке его производства: восстановление алюминия методом электролиза из окиси алюминия с его последующим диспергированием и производством рабочего порошка, окисление порошка алюминия водой и получение водорода, компримирование водорода до рабочих параметров (20–90 МПа) и при необходимости использование остаточного низкопотенциального тепла для различных целей.

Технологическая схема получения водорода приведена на рис. 1.

Важно отметить, что конечным продуктом является водород высокой чистоты (99.99%) с давлением в зависимости от требований заказчика — 20—40 или 90 МПа без углеродного следа.

Стоимость водорода рассчитывалась применительно к параметрам работы предлагаемой нами для сооружения пилотной установки производительностью по водороду 72000 кг/год (хотя данное обстоятельство не принципиально, поскольку все расчеты проводятся на производительность 1 кг/час получаемого водорода в течение годового функционирования производства).



**Рис. 1.** Схема производства "безуглеродного" водорода на основе реакции гидротермального окисления алюминия.

Стоимость водорода рассчитывается по известной методике, основанной на использовании коэффициента возврата капитала CRF, учитывающего среднюю стоимость капитала и номинальную продолжительность жизненного цикла актива в течение годовой эксплуатации оборудования.

Для расчета себестоимости С (USD/кг) используется выражение

 $C = CAPEX \cdot CRF + OPEX,$ 

где CAPEX – капитальные затраты, USD/кг/год; CRF – коэффициент возврата капитала, безразмерная величина; OPEX – эксплуатационные затраты, USD/кг/год.

Капитальные затраты оцениваются по их удельной годовой величине на оборудование по всей технологической цепочке с учетом коммуникаций и оборудования собственных нужд.

Основным оборудованием комплекса являются:

1. Электролизеры алюминия с коммуникациями;

2. Печь для кальцинации гидроокиси алюминия с коммуникациями;

3. Установка для диспергирования жидкого алюминия и получения исходного продукта (порошка) для реактора-окислителя;

4. Модуль гидроокисления алюминия и производства высокочистого водорода (99.99%);

5. Термосорбционный компрессор для сжатия водорода до его рабочего состояния (20–90 МПа);

6. Кроме того, необходимо учесть капитальные затраты на здания и сооружения технологического комплекса.

Основными эксплуатационными затратами в алюмоводной технологии являются затраты на используемую электроэнергию. Вторым источником затрат (малых по величине) являются затраты на расходуемую обычную (умягченную) воду, добавляемую в цикл для компенсации потерь при оборотном водоснабжении.

Эксплуатационные затраты состоят из шести основных компонентов:

1. Расход и стоимость электроэнергии на электролиз алюминия;

2. Расход и стоимость электроэнергии на кальцинацию гидроокиси алюминия, а также расход и стоимость природного газа и воды на эти цели;

3. Расход электроэнергии на диспергирование алюминия и производство порошка;

4. Эксплуатационные расходы на восполнение потерь алюминия при длительной эксплуатации контура его воспроизводства;

5. Эксплуатационные затраты на установки по окислению алюминия водой, выделения из пароводородной смеси водорода и повышения давления водорода до требуемых величин, в зависимости от целей его использования;

6. Кроме этого, необходимо учесть затраты на оплату эксплуатационного персонала, проведение ремонта, обслуживания оборудования и закупку необходимых для функционирования комплекса расходных материалов.

С учетом перечисленных затрат (капитальных и эксплуатационных) производится расчет стоимости 1 кг водорода в условиях годового функционирования производства.

Конкретные значения капитальных и эксплуатационных расходов взяты из данных реальной и многолетней эксплуатации установок по производству алюминия и алюминиевого порошка на Красноярском и Тайшетском алюминиевых заводах (компания "РУСАЛ") и опыта работы большой стендовой установки ОИВТ РАН по непосредственно алюмоводной технологии и стендовой установки термосорбционного компримирования водорода.

# СТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Стоимость электроэнергии зависит от генерирующего источника, от которого она поступает на энергетический комплекс, вырабатывающий водород.

При поступлении электроэнергии от действующих атомных электростанций (с шин АЭС) стоимость электроэнергии будет около 0.01 USD/кВт ч.

Электроэнергия, вырабатываемая ГЭС в первой и второй ценовых зонах, отпускается по цене от 0.01 до 0.02 USD/кВтч (перерасчет по курсу 64 руб./USD – 2019 г.) [1].

Поставка электроэнергии может осуществляться в рамках долгосрочных соглашений о закупке электроэнергии, производимой энергоустановками на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). В этом случае стоимость электроэнергии оценивается в интервале 0.09–0.22 USD/кВт ч [2].

Цены на оптовых рынках на электроэнергию в РФ (вне зависимости от типа генератора) лежат в интервале 0.03–0.035 USD/кВт ч (данные на октябрь 2019 г.) [3].

В дальнейших расчетах будем принимать, что электроэнергия поставляется производителям водорода по ценам 0.01 USD/кВт ч и 0.03 USD/кВт ч.

В будущем, в случае создания атомно-водородного энергетического комплекса (АВЭК), имеющего технологическую цепь АЭС + водородопроизводящий комплекс и выпускающим товарный водород, стоимость электроэнергии для производства водорода может быть около 0.01USD/кВт ч.

# РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

Расчеты выполняются с учетом данных, приведенных при производстве алюминия с использованием инертных анодов [4].

Использование инертных анодов для электролиза алюминия безусловно не является новой идеей. Впервые она была сформулирована Чарльзом Мартином Холлом в его знаменитом патенте 1886 г. В текущих условиях основным преимуществом инертных анодов является их экологичность. Предполагается, что использование в электролизе алюминия инертных анодов устранит выбросы окиси углерода и перфторуглеродных газов (CF<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>). Кроме того, будут исключены выбросы фтора и пыли во время замены анодов. В идеале исчезают все затраты, напрямую связанные с производством угольных анодов. Эта экономия может быть значительной, достигая 25–30% [5, 6]. ОК "РУСАЛ" в настоящее время является единственной в мире компанией, которая имеет опыт промышленного производства алюминия с использованием инертных анодов [7]. По информации, полученной от "РУСАЛа", затраты на производство инертных анодов выше, чем затраты на производство углеродных анодов. Расход электроэнергии на электролиз с использованием инертных анодов также несколько выше, чем в процессе Холла–Эру. С другой стороны, ресурс инертных анодов существенно больше, чем ресурс их угольных аналогов. Утверждается, что в целом суммарные затраты электроэнергии и текущие расходы при эксплуатации анодов в обоих процессах оказываются примерно одинаковыми. Исходя из этого утверждения и в виду отсутствия детальной информации о технико-экономических характеристиках электролиза с инертными анодами, в последующих расчетах мы будем использовать хорошо известные данные для процесса Холла–Эру.

#### РАСЧЕТ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА

Они состоят из суммы затрат на оборудование и коммуникации технологической цепочки:

1) Капитальные затраты на электролизеры с коммуникациями.

Известны удельные капитальные затраты в целом по различным алюминиевым заводам.

Удельные затраты для Тайшетского алюминиевого завода, как наиболее современного, построенного в РФ компанией "РУСАЛ" в 2019 г., составляют 2 USD/кг Al/год [8, 9]. Период эксплуатации алюминиевого завода оценивается величиной не менее 40 лет. В этих капитальных затратах присутствует и составляющая по зданиям. С учетом того, что в алюмоводной технологии окись алюминия циркулирует по замкнутому контуру, многие помещения и сооружения, связанные с приемом бокситов, их разгрузкой, транспортировкой внутри алюминиевого завода будут отсутствовать. Поэтому снижение удельных капитальных затрат из-за отсутствия этих зданий и сооружений можно отнести на капитальные затраты по зданиям установок окисления алюминия и компримирования водорода.

В этом случае удельные капитальные затраты на здания и сооружения отделений окисления алюминия и компримирования водорода входят в общие капвложения контура электролиза алюминия.

Тогда:

1) CAPEX · CRF установок по электролизу алюминия будет равным 0.05 USD/кг Al/год (с учетом затрат на здания и сооружения установок по окислению алюминия и компримирования водорода).

2) Капитальные затраты на установку по кальцинации гидроокиси с коммуникациями [10].

Удельные капитальные затраты на печь CAPEX = 0.006 USD/кг Al/год.

Срок эксплуатации 30 лет.

#### $CAPEX \cdot CRF = 0.0002.$

 Капитальные затраты на установку диспергирования алюминия с коммуникациями. Удельные капитальные расходы на установку диспергирования равны 0.06 USD/кг Al/год [11].

Срок эксплуатации 20 лет.

#### $CAPEX \cdot CRF = 0.003.$

4) На установку гидроокисления алюминия.

Удельные капитальные затраты равны 2.4 USD/кг H<sub>2</sub> (данные ОИВТ РАН).

Срок службы 40 лет.

$$CAPEX \cdot CRF = 0.06.$$

5) На термосорбционный компрессор водорода удельные капитальные затраты равны 2.0 USD/кг  $H_2$  (данные OИBT PAH).

Срок службы 30 лет.

#### $CAPEX \cdot CRF = 0.07.$

6) Капитальные затраты на здания и сооружения установок по окислению алюминия и компримированию водорода учтены в CAPEX электролизного отделения.

Всего удельные капитальные затраты на блок установок, связанных с воспроизводством алюминия, равны

$$K_{Al} = 0.05 + 0.0002 + 0.003 = 0.0532 \text{ USD/kr Al/rog},$$

или в пересчете на 1 кг водорода: 0.48 USD/кг H<sub>2</sub>/год, где

 первое слагаемое – удельные годовые амортизационные отчисления на 1 кг Al на электролизное отделение;

 второе слагаемое — удельные годовые амортизационные отчисления на 1 кг Al на установку кальцинации;

– третье слагаемое – удельные годовые амортизационные отчисления на 1 кг Al на установку диспергирования алюминия.

Капитальные расходы по установкам всего комплекса производства водорода равны:

$$K_{\rm H_2} = 0.48 + 0.06 + 0.07 = 0.61 \text{ USD/kr}$$
 Al/rog,

где

 первое слагаемое — удельные капитальные затраты на блок установок, связанных с воспроизводством алюминия в перерасчете на 1 кг H<sub>2</sub>;

 второе слагаемое — удельные капитальные затраты на установку гидроокисления алюминия;

 третье слагаемое — удельные капитальные затраты на установку компримирования водорода.

# РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА

Учитывались следующие эксплуатационные затраты:

1. Расход и стоимость электроэнергии на электролиз алюминия.

Расход электроэнергии на электролиз алюминия колеблется в пределах 12– 14 кВтч/кг Al (нами расход принимался равным 14 кВт ч/кг Al) или 126 кВт ч/кг H<sub>2</sub> [5, 6, 9].

В зависимости от стоимости потребляемой электроэнергии ее стоимость на электролиз 1 кг алюминия оценивалась по двум вариантам:

а) потребляемая электроэнергия берется с шин генераторов атомной электростанции и ее стоимость равна 0.01 USD/кВт ч, в этом случае рассматривается атомно-водородный энергетический комплекс (АВЭК) – АЭС + технологические установки по производству и компримированию водорода. Конечным продуктом данного комплекса является водород;

b) электроэнергия поступает с оптового рынка, и в этом случае стоимость электроэнергии равна 0.03 USD/кВт ч.

В зависимости от вышеназванных вариантов стоимости электроэнергии, ее стоимость на электролиз 1 кг алюминия будет равна соответственно 0.14 USD/кг Al и 0.42 USD/кг Al.

2. Расход и стоимость электроэнергии на кальцинацию гидроокиси алюминия, а также расход и стоимость природного газа и воды для этой цели брались по данным эксплуатации установок на Красноярском алюминиевом заводе и рассчитывались также при двух вариантах стоимости электроэнергии (0.01 и 0.03 USD/кВт ч):

а) стоимость электроэнергии на кальцинацию гидроокиси алюминия на 1 кг алюминия, при удельной стоимости электроэнергии – 0.01 USD/кВтч равна 0.00033 USD и при 0.03 USD/кВт ч равна 0.001USD; б) стоимость природного газа, расходуемого на кальцинацию 1 кг гидроксида алюминия равна 0.006 USD/кг Al;

в) стоимость воды 0.003 USD/кг Al.

Общая стоимость эксплуатационных затрат на кальцинацию гидроокиси алюминия равна – 0.01 USD/кг Al.

3. Расход электроэнергии на диспергирование алюминия и производство порошка.

По данным Красноярского алюминиевого завода расход электроэнергии на диспергирование алюминия равен 0.4 кВт ч/кг Al [11] и при стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВт ч эксплуатационные затраты составят — 0.004 USD/кВт ч, а при стоимости 0.03 USD/кВт ч стоимость расходуемой на диспергирование 1 кг алюминия электроэнергии будет равна 0.012 USD/кВт ч.

4. Эксплуатационные расходы на восполнение потерь алюминия при длительной эксплуатации контура его воспроизводства.

Для поддержания материального баланса работы технологической установки в течение длительного периода времени придется компенсировать незначительные потери алюминия в замкнутом контуре установки. Такие потери нами оцениваются в 1% в год. Стоимость компенсации данных потерь оценивается величиной потерь – 0.004 USD/кг Al.

В целом эксплуатационные затраты в контуре воспроизводства алюминия при цене электроэнергии 0.01 USD/кВт ч равны:

 $\Theta_{A1}^{K} = 0.14 + 0.01 + 0.004 + 0.004 = 0.158 \text{ USD/kg} \text{ Al},$ 

и при цене электроэнергии 0.03 USD/кBt = 0.442 USD/кг Al.

5. Эксплуатационные затраты на установки по окислению алюминия водой, выделения из пароводородной смеси водорода и повышения давления водорода до требуемых величин в зависимости от целей его использования.

Эти процессы происходят в двух модулях:

непосредственно в алюмоводном реакторе с конденсатором пароводородной смеси и термосорбционном компрессоре водорода (ТСКВ).

Собственно расход электроэнергии на функционирование этих модулей составляет, по данным опытных (стендовых) установок ОИВТ РАН, соответственно: 0.365 кВт ч/кг H<sub>2</sub> и 0.12 кВт ч/кг H<sub>2</sub>.

Стоимость эксплуатационных расходов на два модуля при цене электроэнергии 0.01 USD/кВт ч составит 0.005 USD/кг  $H_2$ , при цене 0.03 USD/кВт ч – 0.015 USD/кг  $H_2$ .

6. Ежегодные затраты на оплату эксплуатационного персонала, расходы на аноды и покупку расходных материалов (криолит, фторид алюминия и т.д.).

По данным компании "РУСАЛ" с учетом только воспроизводства в цикле алюминия, т.е. отсутствием по сравнению с заводом цепочки завоза, разгрузки и доставки по заводу глинозема, данные расходы приняты равными 0.16 USD/кг Al [4, 9].

Тогда эксплуатационные затраты на воспроизводство алюминия с учетом затрат на ремонт, персонал и покупку расходных материалов при цене электроэнергии 0.01 USD/кВт ч будут равны:

$$\Theta_{a1} = 0.14 + 0.01 + 0.004 + 0.004 + 0.16 = 0.318 \text{ USD/kr}$$
 Al

первое слагаемое — затраты электроэнергии на электролиз алюминия;

- второе слагаемое - затраты на кальцинацию окиси алюминия;

- третье слагаемое - затраты на диспергирование жидкого алюминия;

– четвертое слагаемое – затраты на возмещение потерь алюминия в цикле (1% от общих затрат);

– пятое слагаемое – затраты на аноды, персонал и закупку расходуемых материалов.

При цене электроэнергии 0.03 USD/кВт ч эти затраты соответственно равны:

$$\Theta_{a1} = 0.42 + 0.01 + 0.012 + 0.004 + 0.16 = 0.606 \text{ USD/kg Al}.$$

Учитывая, что из 1 кг алюминия получается 0.11 кг  $H_2$ , в пересчете на водород эксплуатационные затраты по циклу воспроизводства алюминия, при стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВт ч, равны: 0.318 × 9 = 2.86 USD/кг  $H_2$ .

При стоимости электроэнергии 0.03 USD/кВт ч эксплуатационные затраты равны 0.606 × 9 = 5.45 USD/кг H<sub>2</sub>.

# ПОЛНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА ВЕСЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

В этом случае они равны эксплуатационным затратам по установкам воспроизводства алюминия, пересчитанным на производство водорода и затратам на установки производства водорода и его компримирования, т.е.

 $Э^{\text{полные}} = 2.86 \text{ USD/кг H}_2 + 0.005 \text{ USD/кг H}_2 = 2.87 \text{ USD/кг H}_2,$ 

при цене электроэнергии 0.01 USD/кВт ч и

$$\Im^{\text{полные}} = 5.45 \text{ USD/kr H}_2 + 0.0015 \text{ USD/kr H}_2 = 5.47 \text{ USD/kr H}_2$$

при цене электроэнергии 0.03 USD/кВт ч

#### СТОИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ТОВАРНОГО ВОДОРОДА

В итоге стоимость производства товарного водорода (чистотой 99.99% и давлением до 90 МПа) будет равна при себестоимости электроэнергии 0.01 USD/кВт ч

2.87 USD/KΓ H<sub>2</sub> + 0.58 ≈ 3.45 USD/KΓ H<sub>2</sub>,

при себестоимости электроэнергии 0,03 USD/кВтч

5.47 USD/κΓ H<sub>2</sub> + 0.58 ≈ 6.05 USD/κΓ H<sub>2</sub>.

Таким образом, значение стоимости водорода, получаемого по алюмоводной технологии с учетом его компримирования, равны 3.45 USD/кг  $H_2$  при стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВт ч и 6.05 USD/кг  $H_2$  при стоимости электроэнергии 0.03 USD/кВт ч.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Русгидро. Годовой отчет за 2019 год. URL: http://ar2019.rusgydro.ru/sections/indwx.html
- Dashboard for energy prices in the EU and main trading partners. URL: http://ec.europa.eu/ energy/data-analysis/energy prices-and-costs/energy-prices-eu-member-states-and-main-tradingpertners.eu (дата обращения 24.05.2021).
- 3. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 11 декабря 2019 г. № 1625/19 "Об утверждении цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), поставляемую в ценовых зонах оптового рынка субъектами оптового рынка. http://publication.pravo.gov.ru/Document/ vien/0001201912260062
- Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V. Progress of Inert Anodes in Aluminium Industry: Review. Journal of Siberian Federal University Chemistry 1(2018) p. 18–30.
- 5. *Kvande H., Drablos P.A.* The Aluminium Smetling Process and Innovativ Alternative Technologies. JOEM 56 (2014) p. 523–532.
- 6. Thonstad J., Feellner P., Haarberg G.M. et al. Aluminium Electrolysis Fundamentals of the Hall-Heroult Process. 3rd ed.- Dusseldorf, Germany: Aluminium – Verlag. MarKeting and Kommunikation GmbH. 2001. – 359 p.
- 7. РУСАЛ начал испытания электролизера с инертными анодами нового поколения. Apryменты и факты: Красноярск. 10.06.2020. URL: https://krsk.aif.ru/money/rusal\_nacal\_ ispytaniya\_electrolizera\_s\_inertnymi\_anodami\_novogo\_pokoleniya (дата обращения 24.05.2021).

- Обухова Е. За секунду до алюминия // Интернет-издание "Эксперт". URL: https://expert.ru/ expert/2021/13/za-sekundu-do-alyuminiya/
- 9. UC Rusal Financial Results Presentation. 1H2020.13.08.2020 URL: https://rusal.ru/en/investors/ financial-stat/presentations.
- 10. Шишкин С.Ф. Циклонная печь кальцинации // Новые огнеупоры. 2015. № 4. С. 12–15.
- 11. Волочко А., Овчинников В., Садоха М. Технологии и оборудование переработки алюминиевых отходов // Наука и инновации. 2012. № 9 (115). С. 28–37.

#### Calculation of the Cost of Production of Hydrogen Produced by Aluminum-Water Technology

#### E. P. Volkov\*

Federal State Budgetary Institution of Science Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia \*e-mail: volkov ep@ihed.ras.ru

Currently, most economically developed countries are actively implementing programs for the widespread introduction of hydrogen energy technologies into the economy. At the same time, one of the most urgent tasks is the organization of cost-effective mass production of high-quality, chemically pure hydrogen, not accompanied by massive emissions of greenhouse gases into the atmosphere. From this point of view, the technology of hydrothermal oxidation of aluminum (GTOA) is very promising. In the process of hydrothermal oxidation, aluminum interacts with water or steam. At the same time, hydrogen is released without admixture of carbon or its compounds and thermal energy. The product of aluminum oxidation is hydroxide or aluminum oxide (depending on the temperature of the process). The resulting aluminum hydroxide is reduced to metal during electrolysis and is returned to the cycle again to recover hydrogen from water in a hydrothermal oxidation reaction. Such a technology for producing hydrogen will be called aluminum-water, according to the main working substances involved in the process. At the same time, the most important characteristic of any technology is the cost of production. This article presents calculations to determine the cost of production of hydrogen produced by aluminum-water technology.

*Keywords:* aluminum-water technology, hydrothermal oxidation of aluminum, compression of hydrogen, capital and operating costs, cost of electricity, cost of hydrogen production

УДК 519.6

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В УСТАНОВКАХ КРУПНОГО МАСШТАБА С ПОМОЩЬЮ ПРЕЦИЗИОННОГО ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО КОДА CABARET-COMBUSTION

© 2022 г. А. И. Гавриков<sup>1, \*</sup>, А. Данилин<sup>1</sup>, А. А. Канаев<sup>1</sup>, А. Е. Киселев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия \*e-mail: gavrikovandrey@yandex.ru

> Поступила в редакцию 16.03.2022 г. После доработки 14.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

В работе проведена верификация расчетного кода CABARET-COMBUSTION, основанного на численной вихреразрешающей методике КАБАРЕ и предназначенного для расчета, в том числе детонации перемешанных однородных и неоднородных водородно-воздушных смесей. В качестве материала для верификации используются экспериментальные данные, полученные на серии крупномасштабных экспериментов по детонации водородовоздушных смесей в открытой полусфере и в замкнутом объеме сложной геометрии. Проведенные верификационные исследования кода CABARET-COMBUSTION на данных экспериментов, направленных на изучение процессов, связанных с детонацией водорода, и результаты кросс-верификации показывают высокую точность соответствия расчетных и измеренных данных при условии учета определяющих процессов и использования достаточно подробной сеточной модели.

Ключевые слова: детонация, CFD код, верификация, крупномасштабные эксперименты, кросс-верификация

DOI: 10.31857/S0002331022040057

#### введение

Водородная энергетика (ВЭ) представляется перспективным альтернативным направлением развития топливно-энергетического комплекса России вследствие экологичности используемого топлива и продукта реакции окисления в воздухе, лежащей в основе получения энергии, высокой теплоты, выделяющейся в ходе этой реакции, а также широкого распространения этого химического элемента. В октябре 2020 г. Правительством РФ был утвержден План мероприятий по теме "Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года", направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, а также вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Водород, однако, является легко воспламеняемым газом, высокая удельная теплота сгорания водорода в воздухе обусловливает опасность водородных взрывов при аварийных утечках водорода в воздух. Данные особенности топлива требуют, в том числе, вычислительных инструментов для численной оценки последствий возможных аварий, связанных с ускоренным горением в газовой среде, так и экспериментальных данных для верификации разработанных численных моделей. Разработка перспективных моделей и инструментов на основе CFD и их валидация на современных экспериментальных данных, полученных с высококачественной диагностикой, позволит увеличить прогнозные возможности численного моделирования и проводить анализ гипотетических аварий на качественно новом уровне. Применение вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности для обоснования безопасности ВЭ позволяет устранить неопределенности, возникающие при использовании полуэмпирических RANS-моделей турбулентности, основанных на решении осредненных по времени уравнений Навье-Стокса, и за счет этого повысить прогнозные возможности в части распространения водорода.

Цель настоящей работы — верификация расчетного кода CABARET-COMBUSTION, основанного на численной вихреразрешающей методике КАБАРЕ [1] и предназначенного для расчета, в том числе, детонации перемешанных однородных и неоднородных водородно-воздушных смесей. В качестве материала для верификации используются экспериментальные данные, полученные на серии крупномасштабных экспериментов по детонации водородовоздушных смесей в открытой полусфере и в замкнутом объеме сложной геометрии.

Данная работа является продолжением верификации серии расчетных кодов, основанных на численной методике КАБАРЕ. Ранее верификация версии кода CABARET-SC1, основанного на данной методике, была проведена в работе [2] на экспериментах по распространению струй в газовых средах.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Модель движения газовой смеси. Движение газовой смеси определяется системой уравнений

$$\partial_{t} \rho + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0;$$
  

$$\partial_{t}(\rho u_{i}) + \operatorname{div}(\rho u_{i}\mathbf{u}) = -\nabla_{i}p + \nabla_{j}\tau_{ij} + \rho g_{i}, \quad i, j = 1, 2, 3;$$
  

$$\partial_{t}(\rho E) + \operatorname{div}((\rho E + p)\mathbf{u}) = \nabla \mathbf{q} + \nabla_{j}(u_{i}\tau_{ij});$$
  

$$\partial_{t}(\rho \xi_{k}) + \operatorname{div}(\rho \xi_{k}\mathbf{u}) = \rho \xi_{k}, \quad k = 1, N;$$
(1)

где  $\rho$ , **u**, *p*, *E* — плотность, скорость, давление, полная внутренняя энергия;  $\xi_k$ ,  $\xi_k$  — массовая доля и скорость химических превращений *k*-го компонента газовой смеси. Система (1) дополняется уравнением состояния газовой смеси

$$p = \rho RT \sum_{k=1}^{N} \frac{\xi_k}{\mathbf{M}_k};$$
(2)

где R — универсальная газовая постоянная; T — температура;  $M_k$  — молярная масса k-го компонента газовой смеси. Далее в качестве компонентов смеси рассматриваются водород (H<sub>2</sub>), кислород (O<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>), водяной пар (H<sub>2</sub>O). Соотношение долей кислорода и азота соответствует воздуху.

Диффузионный перенос представлен в системе (1) тензором вязких напряжений  $\tau_{ij}$  и плотностью теплового потока **q**, определяемого законом Фурье. Соответствующие коэффициенты вязкости и теплопроводности газовых смесей вычисляются в соответствии с зависимостями, приведенными в [3]. Действие внешних сил представлено гравитацией **g**.

Термодинамические параметры газов — теплоемкости при постоянном объеме и давлении, энтальпия и внутренняя энергия определяются полиномиальными зависимостями [4], соответствующим термодинамической базе данных [5].

# Одностадийная модель химической кинетики

В рамках рассматриваемой модели горения химическая кинетика описывается одностадийной необратимой реакцией, то есть топливо (водород) и окислитель (кисло-

Объемная доля водорода	$A_0$	$T_A, \mathbf{K}$	а	b
<20%	$6 \times 10^{13}$	19855	1	0.5
>20%	$2.6 \times 10^{10}$	8665	0.2	1.2

**Таблица 1.** Параметры одностадийной модели химической кинетики для водородно-воздушных смесей из работы [6]

род) преобразуются сразу в продукт реакции, минуя стадии накопления и рекомбинации радикалов:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O. \tag{3}$$

Данное предположение допустимо, поскольку в рамках используемой модели распространения пламени скорость горения определяется соответствующими эмпирическими или аналитическими корреляциями, а не механизмом детальной химической кинетики, а массовые доли химических радикалов кроме топлива, окислителя и продуктов реакции, участвующих в ней, мала, что оказывает малое влияние на термодинамику процесса.

В работе используется выражение для кинетики горения водорода в водородно-воздушных смесях, предложенное в работе [6]:

$$S = A[H_2]^a [O_2]^b \exp(-T_A/T),$$
(4)

где A — предэкспоненциальный фактор; [H<sub>2</sub>], [O<sub>2</sub>] — молярные концентрации водорода и кислорода; a, b — степенные показатели;  $\exp(-T_A/T)$  — множитель Аррениуса;  $T_A$  — температура активации.

В [6] предполагается использовать два набора коэффициентов модели для различных концентраций водорода, данные зависимости приведены в табл. 1.

#### Численный алгоритм

В основу кода ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION положен численный алгоритм (схема) КАБАРЕ, основы которого в работе [7]. В настоящий момент алгоритм обладает следующими свойствами:

- консервативность;
- второй порядок аппроксимации по времени и пространству;
- имеет компактный вычислительный шаблон, ограниченный одной ячейкой;
- используется на сетках с ячейками в виде скошенных кубов;
- поддерживает трансзвуковые и сверхзвуковые течения;

- разрешает ударные волны двумя расчетными ячейками.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ КОДА CABARET-COMBUSTION

#### Эксперимент по детонации стехиометрической водородно-воздушной смеси в полусферическом объеме

Эксперименты по детонации водородно-воздушных смесей в полусферических объемах были проведены в институте Фраунгофера в 1991 году [8]. В эксперименте проводится прямая инициализация детонации стехиометрической водородно-воздушной смеси в полусфере, ограниченной пленкой, с последующим выходом детонационной волны в открытое пространство с последующим ее затуханием. В эксперименте измеряется динамика давления на датчиках, расположенных на различном рас-



**Рис. 1.** Схема эксперимента с прямой инициализацией детонации. Полусфера, заполненная стехиометрической водородно-воздушной смесью, и схема расположения датчиков давления [8].

стоянии от точки инициализации детонации. Численное моделирование данного эксперимента, в силу ударно-волнового механизма распространения детонационных волн, не требует специальных моделей распространения фронта пламени, необходима лишь модель химической кинетики, отвечающая реагирующей смеси. Также в нем не требуется моделирования лучистого теплообмена в силу слабого излучения водородных пламен и плавучести в силу скоротечности процесса. Таким образом, результаты эксперимента можно использовать для проверки газодинамического алгоритма и заложенных в него термодинамических свойств реагирующих веществ.

Радиус полусферического объема с водородно-воздушной смесью составляет 2.95 метра. Объем был наполнен смесью водорода (29.05% по объему) и воздуха (70.95%) при давлении в 1 атмосферу и температуре 304 К. Общая масса водорода в установке при этом составляет 1.32 кг водорода. Смесь была перемешана при помощи вентилятора. Для прямой инициализации детонации в центре круглой площади соприкосновения объема с землей было заложено взрывчатое вещество. Для фиксации хода эксперимента использовались датчики давления и высокоскоростная камера. Датчики давления были установлены в плоскости земли вдоль радиуса, проходящего от точки инициализации детонации, на расстояниях 0.75, 1, 1.5, 2.25, 2.75, 3.25, 4.0, 5.0, 6.25 метров от нее. Схема эксперимента с расположением датчиков давления представлена на рисунке 1.

На рис. 2 показаны кадры высокоскоростной съемки. Инициализация детонации взрывчатым веществом массой 50 граммов (тип взрывчатого вещества не уточняется) хорошо видна на кадре 10.0 мс рис. 2. Вклад данного взрыва в скачок давления был оценен в другом эксперименте, в котором проводился подрыв такого же количества взрывчатки в воздухе, максимальное давление на датчике, расположенном на расстоянии 1.5 метра, составляло 1.82 атмосфер, на датчике на расстоянии 2.75 метра – 1.28 атмосфер. Данный вклад мал в сравнении с параметрами детонации Чепмена– Жуге в стехиометрической водородно-воздушной смеси и быстро релаксирует при отходе от точки взрыва. Энергия, высвобожденная взрывчатым веществом, составляет примерно 0.2% от общей энергии, полученной при взрыве всего объема с водородно-воздушной смесью.

Яркое свечение продуктов горения взрывчатого вещества наблюдается на всех кадрах на рис. 2. Полусферический фронт детонации начинает быть различим на кадрах от 10.2 до 13.2 мс, граница объема с горючей смесью достигается в момент времени 11.2 мс, после чего горячие продукты реакции расширяются радиально, приводя к раз-



**Рис. 2.** Фотосъемка эксперимента по прямой инициализации детонации при помощи высокоскоростной камеры. Кадры с шагом 0.2 миллисекунды [8].

рушению полиэтиленовой оболочки объема. Визуально измеренная скорость детонации составляет 1940 м/с, что соответствует теоретическим оценкам в 1955 м/с.

### Верификация ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION на задаче о детонации в сферической области

В расчете используется одна четверть от геометрии исходного эксперимента, что допустимо в силу осевой симметрии данной задачи. Для расчета используется кубическая расчетная область с размерами  $8 \times 8 \times 8$  метров, на расчетной области введена равномерная сетка  $250 \times 250 \times 250$ , что составляет 15.625 млн расчетных ячеек, размер стороны каждой ячейки составляет 3.2 см. Начальные данные задаются в соответствии со спецификацией эксперимента [8]. Для инициализации детонации в области подрыва, находящейся в углу расчетной области и имеющей размеры  $9.6 \times 9.6 \times 9.6$  см, задаются повышенное давление 50 атм и температура 3000 К.

На рис. 3 приведено поле плотности на различные моменты времени. На рисунке видны движение детонационной волны по водородно-воздушной смеси, ее выход в область, заполненную воздухом с переходом в ударную волну с дальнейшим затухани-ем последней.



**Рис. 3.** Поле плотности в расчете по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION на моменты времени 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 мс.

На рис. 4 сопоставлены показания датчиков давления, расположенных внутри области, заполненной водородно-воздушной смесью. Расстояния от точки подрыва до датчиков составляют 0.75, 1.00, 1.50, 2.25, 2.75 метра. Схема расположения датчиков представлена на рис. 1. Также на рис. 4 показана траектория движения детонационной волны, построенная по точкам первого всплеска давления, соответствующим прохождению детонационной волны датчиков. По данной траектории вычислена скорость распространения детонационной волны в расчете — 1963 м/с, скорость детонационной волны, полученная в эксперименте составляет 1940 м/с, то есть скорость в расчете превышает экспериментальную менее чем на 1.5%.

На рис. 5 сопоставлены показания датчиков давления, расположенных снаружи области, заполненной водородно-воздушной смесью. Расстояния от точки подрыва до датчиков составляют 3.25, 4.00, 5.00 метра. Схема расположения датчиков представлена на рис. 1. Рис. 5 демонстрирует затухание ударной волны, созданной взрывом, по мере ее удаления от точки подрыва. Из рисунка видно, что на больших временах ударная волна в расчете заметно опережает экспериментально наблюдаемую, что объясняется различными скоростями волны детонации.



**Рис. 4.** Сравнение показаний датчиков давления в эксперименте и в расчете по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION для датчиков, расположенных внутри области, заполненной стехиометрической водородно-воздушной смесью.



**Рис. 5.** Сравнение показаний датчиков давления в эксперименте и в расчете по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION для датчиков, расположенных вне области, заполненной стехиометричсекой водородновоздушной смеси.

#### Описание кода CREBCOM, предназначенного для расчета горения и детонации топливо-воздушных смесей

Для описания различных режимов горения и соответствующих нагрузок разработан ряд компьютерных кодов и моделей. Разработанные в конце 20-го века компьютерные модели, такие как CREBCOM, DET3D, TONUS и другие, позволяют надежно рассчитывать нагрузки, возникающие в результате полностью развитой детонации.

Код CREBCOM [9] разработан для моделирования механических нагрузок, возникающих при различных режимах горения, включая медленное горение, быструю дефлаграцию и детонацию газовых смесей в замкнутых и частично открытых объемах сложной геометрии. Код создан для консервативной оценки нагрузок, которые могут возникать при горении в помещениях. Таким образом, CREBCOM предназначен для оценки максимального уровня нагрузок при горении в заданной конфигурации помещений и для заданных начальных условий (начальное давление и распределения температуры и концентраций компонентов смеси).

В 2000 г. код CREBCOM был верифицирован для расчета нагрузок на гермооболочку, элементы конструкции и оборудование внутри защитной оболочки АЭС при горении и взрыве водородсодержащих смесей. Код может использоваться при анализе безопасности АЭС в случае тяжелой аварии на стадии выделения значительных количеств водорода.



Рис. 6. Схема и габариты установки РУТ [10].

# Кросс-верификационный расчет эксперимента KI-RUT-HYD09 с использованием кодов CABARET-COMBUSTION и CREBCOM

Установка РУТ представляет собой канал длиной 27.55 метра прямоугольного сечения с  $2.5 \times 2.25$  метра, конец которого загибается под 90 градусов. В канале есть углубление, называемое каньоном, имеющим длину 10.6 метра и прямоугольное сечение  $2.5 \times 4$  метра. Общий объем установки при этом составляет 263 м<sup>3</sup>. Схема установки представлена на рис. 6. На стенах канала и каньона расположены 12 датчиков давления, схема их установки представлена на рис. 7.

Для моделирования выбран эксперимент с детонацией однородной водородно-воздушной смеси KI-RUT-HYD9 [10]. В данном эксперименте объем установки заполняется 25.5% водородно-воздушной смесью при температуре 293 К и давлении 101 325 Па. Общая масса водорода в установке при этом составляет 5.579 кг.

Для расчета по коду CREBCOM используется равномерная расчетная сетка, состоящая из 3832192 кубических ячеек со стороной 6.66667 см, для расчета по коду CABARET-COMBUSTION используется неравномерная расчетная сетка, состоящая из 682728 шестигранных ячеек с характерным размером от 10 до 20 см, данная сетка представлена на рис. 8. В расчетах детонация инициируется путем задания высокого давления и температуры в точке В (рис. 6).

На рис. 9 показана эволюция поля давления в ходе расчета по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION. После инициализации в завернутом конце туннеля детонационная волна выходит в его основную часть, где распространяется в виде плоского фронта. Далее, по достижении каньона, детонационная волна начинает распространяться по нему в виде цилиндрической поверхности. Далее детонационная волна проходит оставшуюся часть тоннеля и каньона, отражается от стены и идет в противоположном



Рис. 7. Схема размещения датчиков давления на установке РУТ [10].



Рис. 8. Расчетная сетка, использованная при расчете по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION.



Рис. 9. Поле давления на различный моменты времени в расчете по ПрЭВМ CABARET-COMBUSTION.



**Рис. 10.** Сравнение показаний датчиков давления 7, 8, 9, 10, 11 для эксперимента и расчетов по CABARET-COMBUSTION и CREBCOM.

направлении в виде ударной волны. На рис. 10 сопоставлены показания датчиков давления 7, 8, 9, 10, 11 для экспериментальных данных и для результатов расчетов по кодам CABARET и CREBCOM. Из рисунка видно хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными, некоторые расхождения обусловлены несколько разными скоростями распространения детонационной волны в используемых кодах. На рис. 11 сопоставлены скорости распространения детонационной волны вдоль канала. Максимальное относительное отклонение скорости детонационной волны составляет 2.5% для кода CABARET и 8% для кода CREBCOM. В целом оба расчетных алгоритма показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежное определение механических нагрузок, возникающих при горении водорода, является одной из наиболее важных проблем при анализе водородной безопасности и безопасности атомных электростанций (АЭС). В зависимости от состава образующейся смеси, ее размеров и геометрии, в защитной оболочке (ЗО) АЭС могут реализовываться различные режимы горения — от медленной дефлаграции, когда состав смеси близок к пределу воспламенимости, до перехода горения в детонацию (ПГД) и детонации.

Для описания различных режимов горения и соответствующих нагрузок был разработан ряд компьютерных кодов и моделей. Разработанные в последнее время компью-



**Рис. 11.** Сравнение скорости распространения детонационной волны вдоль длины установки РУТ для эксперимента и расчетов по CABARET-COMBUSTION и CREBCOM.

терные модели, такие как B02, DET3D, TONUS и другие, позволяют надежно рассчитывать нагрузки, возникающие в результате полностью развитой детонации.

Однако, разработка перспективных моделей и инструментов на основе CFD и их валидация на современных экспериментальных данных, полученных с высококачественной диагностикой, позволит увеличить прогнозные возможности численного моделирования и проводить анализ гипотетических аварий на качественно новом уровне. Применение вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности для обоснования безопасности ВЭ позволяет устранить неопределенности, возникающие при использовании полуэмпирических RANS-моделей турбулентности, основанных на решении осредненных по времени уравнений Навье-Стокса, и за счет этого повысить прогнозные возможности в части распространения водорода.

В работе проведена верификация расчетного кода CABARET-COMBUSTION, основанного на численной вихреразрешающей методике КАБАРЕ и предназначенного для расчета в том числе детонации перемешанных однородных и неоднородных водородно-воздушных смесей. В качестве материала для верификации используются экспериментальные данные, полученные на серии крупномасштабных экспериментов по детонации водородно-воздушных смесей в открытой полусфере и в замкнутом объеме сложной геометрии. Кроме того, проведена кросс-верификация расчетов по кодам CABARET-COMBUSTION и CREBCOM, являющимся одним из первых многомерных CFD-кодов для расчета процесса детонации. Проведенные верификационные исследования кода CABARET-COMBUSTION на данных экспериментов, направленных на изучение процессов, связанных с детонацией водорода и результаты кросс-верификации, показывают высокую точность соответствия расчетных и измеренных данных при условии учета определяющих процессов и использования достаточно подробной сеточной модели.

Данная работа является продолжением верификационных исследований серии расчетных кодов, основанных на численной методике КАБАРЕ.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А. и др. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. – 472 с.
- Большов Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Киселев А.Е., Юдина Т.А. Валидация кода CABARET-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС // Атомная энергия. 2019. Т. 217(4). С. 198–203.
- 3. Варнати Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
- 4. *McBride B.J., Gordon S., Reno M.A.* Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species. National Aeronautics and Space Administration, 1993. NASA Technical Memorandum 4513.
- 5. JANAF Thermochemical Tables, 3rd Ed., J. Phys. Chem. Ref Data 14 (1985).
- 6. *Zhang Y., Liu Y.* Numerical simulation of hydrogen combustion: global reaction model and validation // Frontiers in energy research. 2017. V. 5. № 31. P. 1–12.
- 7. *Karabasov S., Goloviznin V.* Compact Accurately Boundary-Adjusting high-REsolution Technique for fluid dynamics // Journal of Computational Physics. 2009. V. 228. P. 7426–7451.
- Pfoertner H. Ausbreitungsfunktionen detonierender Wasserstoff-Luft Gemische, FhG-Projekt Nr. 102555, Fraunhofer-Institut fur Chemische Technologie, PfinztalBerghausen, Germany. December 1991.
- 9. Система кодов "СREBCOM". Верификационный отчет, РНЦ "Курчатовский институт", 2000.
- Yanez J. et al. A comparison exercise on the CFD detonation simulation in large scale confined volumes. International Journal of Hydrogen Energy. 2011. V. 36. P. 2613–2619.
- Воеводин Вл. В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин В.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", N 7, 2012. С. 36–39.

#### Detonation Modelling in a Large-Scale Facilities with Precision Eddy-Resolving Code Cabare-Combustion

# A. I. Gavrikov<sup>a</sup>, \*, A. V. Danilin<sup>a</sup>, A. A. Kanaev<sup>a</sup>, and A. E. Kiselev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*e-mail: gavrikovandrev@vandex.ru

Verification of the CABARET-COMBUSTION code based on the CABARET numerical eddy-resolving technique and designed to calculate, among other things, the detonation of mixed homogeneous and inhomogeneous hydrogen-air mixtures, was carried out in this work. Experimental data obtained in a series of large-scale experiments on the detonation of hydrogen-air mixtures in an open hemisphere and in a closed volume of complex geometry are used as a verification base. Verification studies of the CABARET-COMBUSTION code on the experimental data focused at studying the processes associated with the detonation of hydrogen and the results of cross-verification show a high accuracy of agreement between the calculated and measured data, provided that the determining processes are taken into account and a sufficiently detailed grid is used.

Keywords: detonation, CFD code, verification, large scale experiments, cross verification

УДК 519.6

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ ПОЖАР-СТРУИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ КАБАРЕ

© 2022 г. В. Ю. Глотов<sup>1, \*</sup>, А. А. Канаев<sup>1</sup>, А. В. Данилин<sup>1</sup>, В. Г. Кондаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия \*e-mail: glotov-v@yandex.ru

> Поступила в редакцию 16.02.2022 г. После доработки 14.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

В настоящей работе проведено численное моделирование водородной пожарструи в вихреразрешающем приближении с помощью беспараметрической методики КАБАРЕ. В статье представлено описание математических моделей термического излучения и реакций горения водородной пожар-струи, предложен способ аппроксимации уравнений переноса излучения. Получено хорошее соответствие результатов расчета с экспериментом по основным характеристикам пожар-струи (видимая длина пламени, доля излучаемого тепла, профиль радиационного теплового потока).

*Ключевые слова:* методика КАБАРЕ, пожар струя, тепловое излучение, диффузионное горение

DOI: 10.31857/S0002331022040069

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика (ВЭ) представляется перспективным альтернативным направлением развития топливно-энергетического комплекса России вследствие экологичности используемого топлива и продукта реакции горения в воздухе, а также широкого распространения этого химического элемента. В России в августе 2021 г. утверждена Концепция развития ВЭ, предполагающая использование водородных энергоносителей на внутреннем рынке уже к 2021-2024 гг. Технологии транспортировки и хранения водорода рассматриваются как один из наиболее значимых сдерживающих факторов развития ВЭ. Поскольку водород является воспламеняемым газом, а высокая удельная теплота сгорания водорода в воздухе обусловливает высокие поражающие характеристики при его взрывах, то задачи обоснования водородной безопасности являются неотъемлемой частью развития данных технологий. В настоящее время в России расчетные средства для обоснования водородной взрывобезопасности технологий транспортировки и хранения водорода и водородной энергетики в целом отсутствуют. Разработка перспективных моделей и инструментов на основе CFD и их валидация на современных экспериментальных данных позволит проводить анализ гипотетических аварий на качественно новом уровне.

В ИБРАЭ РАН для проведения численного анализа задач водородной безопасности разрабатывается программа для ЭВМ (ПрЭВМ) CABARET-SC1. Схема аппроксимации уравнений гидродинамики в ПрЭВМ CABARET-SC1 основана на методике КАБАРЕ [7], позволяющей проводить расчеты турбулентных течений в вихреразрешающем приближении на сетках с неполным разрешением масштабов турбулентности

без использования настроечных параметров. Применение вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности для обоснования безопасности ВЭ позволяет устранить неопределенности, возникающие при использовании полуэмпирических RANS-моделей турбулентности, основанных на решении осредненных по времени уравнений Навье-Стокса, и за счет этого повысить прогнозные возможности в части распространения водорода.

Существенной угрозой и уязвимостью объектов инфраструктуры водородной энергетики при авариях является возгорание водорода при его истечении из резервуаров высокого давления с образованием турбулентного газового факела (пожар-струи). Горение пожар-струй обладает рядом существенных отличий от горения перемешанных горючих смесей, поэтому для его моделирования требуется применение специальных методов. Определение безопасных расстояний от водородной пожар-струи требует анализа процессов термического излучения пожар-струи. Таким образом, для выполнения расчетного анализа горения пожар-струи с помощью основанного на методике КАБАРЕ вихреразрешающего подхода к моделированию турбулентности требуется адаптация расчетной модели термического излучения и реакций диффузионного горения.

В настоящей работе представлено описание математических моделей термического излучения и реакций горения водородной пожар-струи, реализованных в ПрЭВМ CABARET-SC1, а также приведены результаты верификации программы на эксперименте по изучению характеристик турбулентного диффузионного водородного пламени, проведенного сотрудниками Национальной лаборатории Сандия [8].

#### 2. МОДЕЛЬ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПОЖАР-СТРУИ

Диффузионное горение, частным примером которого является горение затопленных струй, имеет значительные отличия от горения перемешанных горючих смесей. В частности, в диффузионном горении топливо и окислитель поступают в зону горения отдельно друг от друга, при этом химические реакции преимущественно происходят вблизи поверхности, образуемой газовой смесью со стехиометрическим концентрационным соотношением топлива и окислителя. Диффузионное горение не может существовать в неподвижной среде, поскольку для его поддержания требуется постоянный отток продуктов реакции, накопление которых привело бы к погасанию пламени. Диффузионное горение, в отличие от горения перемешанных смесей, не имеет характерной скорости распространения. Диффузионное горение не имеет характерной толщины фронта горения. Фактически, данная толщина зависит от степени возмущенности поля скорости. Описанные выше свойства показывают серьезные отличия горения перемешанных смесей от диффузионного горения, что говорит о необходимости применения специальных методов для моделирования последних.

Одним из распространенных подходов к моделированию турбулентных диффузионных пламен является модель диссипации вихрей (eddy dissipation model, EDM), предложенная в 1977 году в работе [1]. В этой модели скорость расхода топлива и окислителя, кг/( $M^3$  с), не зависит от кинетики химических реакций, а определяется скоростью турбулентного перемешивания реагентов по формуле:

$$\dot{r}_F = -A\rho \tau_t^{-1} \min(Y_F, Y_O/s, BY_P/(1+s)),$$
(1)

где A, B — модельные константы;  $Y_F$ ,  $Y_O$ ,  $Y_P$  — массовые доли топлива, окислителя и продуктов горения; s — стехиометрический коэффициент реакции;  $\tau_t$  — временной масштаб турбулентного смешения, с.

Типичные значения модельных констант составляют A = 4, B = 0.5 [1].

Изначально данная модель разрабатывалась для моделирования турбулентного горения в рамках RANS подходов, где характерный временной масштаб, с, оценивается по формуле:

$$\tau_t = k/\varepsilon, \tag{2}$$

где k — кинетическая энергия турбулентности, Дж/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, Дж/м<sup>3</sup>/с.

Для применения рассматриваемой модели горения в LES подходах (в том числе в методике КАБАРЕ) временной масштаб турбулентных пульсаций, с, можно оценить по формуле:

$$\tau_t = \left(\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}\right)^{-1},\tag{3}$$

где  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – тензор сдвиговых скоростей, с<sup>-1</sup>.

#### 3. МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПОЖАР-СТРУИ

# 3.1. Уравнения динамики излучающего газа

Для описания динамики излучающего газа уравнения Навье-Стокса дополняются интегро-дифференциальным уравнением переноса излучения [2]

$$\frac{1}{c}\frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + \left(\vec{s}, \vec{\nabla}I_{\nu}\right) = -\left(\chi_{\nu} + \sigma_{s}\right)I_{\nu} + \chi_{\nu}I_{\nu p} + \frac{\sigma_{s}}{4\pi}\int_{4\pi}I_{\nu}\left(\vec{r}, \vec{s}'\right)\Phi_{\nu}\left(\vec{s}', \vec{s}\right)d\Omega',\tag{4}$$

где  $I_v$  – спектральная интенсивность излучения и направления движения фотонов  $\vec{s}$  и

частоты фотонов v, Bт/(м<sup>2</sup>Гц);  $I_{vp} = 2hv^3/c^2 \left( \exp\left\{\frac{hv}{kT}\right\} - 1 \right)^{-1}$  – спектральная интенсивность равновесного излучения при температуре *T* (формула Планка), Bт/(м<sup>2</sup> Гц);  $\chi_v$ ,  $\sigma_s$  – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния среды, м<sup>-1</sup>.

При низких температурах (<0.5 кэВ) излучение влияет только на перераспределение энергии в веществе [2]. В этом случае в правую часть уравнении закона сохранения энергии добавляется плотность потока энергии излучения  $\vec{W}$ :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}\left((\rho E + P)\vec{u}\right) = -\operatorname{div}\left(\vec{q} + \vec{W}\right),\tag{5}$$

где  $\vec{W} = \int_0^{4\pi} \left( \int_0^{\infty} I_v dv \right) \vec{s} d\Omega$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Для задач радиационной газовой динамики характерна исключительная трудоемкость решаемых уравнений, вызванная многомерностью уравнения переноса излучения. Интенсивность излучения  $I_v = I_v(\vec{r}, \vec{s}, v, t)$  зависит не только от пространственных переменных  $\vec{r}$  и времени t, но и от направления движения фотонов  $\vec{s}$  и их частоты v. На практике обычно используются различные приближения, позволяющие существенно упростить математическую модель. Например, для достаточно широкого класса задач можно пренебречь рассеянием фотонов, т.к. оно становится сопоставимым с поглощением либо при высоких температурах (>1 кэВ) и низких плотностях среды, либо при прохождении света через замутненные среды [2], в которых рассеяние фотонов происходит на оптических неоднородностях (аэрозолях).

Другим приближением является упрощенное моделирование спектра поглощения газа. Общее число линий в спектре поглощения может достигать десятки и сотни тысяч, поэтому для решения прикладных задач прямая модель, разрешающая отдельные спектральные линии (line-by-line model), не применима. В расчетах обычно используются интегральные модели, в которых коэффициенты поглощения усредняются по всему

спектру. Одной из наиболее простых интегральных моделей, но и наименее точной, является модель "серого" газа. В ней используются планковские средние коэффициенты поглощения, полученные экспериментальным путем или теоретически на основе баз данных HITRAN, HITEMP со спектрами поглощения высокого разрешения [3]. Более точной интегральной моделью расчета поглощательной способности газов является модель взвешенной суммы "серых" газов (WSGG), предложенная Хоттелем [4]. В модели WSGG реальный газ представляется в виде совокупности небольшого количества эффективных "серых" газов с постоянным коэффициентом поглощения. Для каждого "серого" газа расчет переноса энергии излучения выполняется независимо, после чего интенсивность и радиационные потоки для исходного газа вычисляются путем суммирования вкладов каждого "серого" газа с надлежащими весовыми коэффициентами [5]. Недостатком модели WSGG, очевидно, является пропорциональное увеличение вычислительной сложности задачи от количества "серых" газов в модели.

В настоящей работе рассматривается упрощенная модель переноса излучения в приближении "серого" газа и при отсутствии рассеяния фотонов. В этом случае уравнение переноса излучения (4) примет вид

$$\frac{1}{c}\frac{\partial I}{\partial t} + \left(\vec{s}, \vec{\nabla}I\right) = \chi \left(I_p - I\right),\tag{6}$$

где  $I = \int_0^\infty I_v dv$  – интегральная интенсивность излучения,  $BT/M^2$ ;  $I_p = \frac{\sigma}{\pi}T^4$  – интегральная интенсивность равновесного излучения при температуре T,  $BT/M^2$ ;  $\chi$  – средний коэффициент поглощения газа,  $M^{-1}$ .

Вычисление среднего коэффициента поглощения газовой смеси производится по формуле

$$\chi = \sum_{i} a_i P_i,\tag{7}$$

где  $a_i$  – осредненный по Планку коэффициент поглощения *i*-ой компоненты, бар<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>;  $P_i$  – парциальное давление *i*-ой компоненты, бар.

Для аппроксимации температурной зависимости осредненных по Планку коэффициентов поглощения газов используются полиномы высокой степени [6]. В водородной пожар-струе единственной оптически непрозрачной компонентной является водяной пар, образующийся при сгорании водорода в окружающем воздухе. Для водяного пара полином имеет вид [6]

$$a_{\rm H_{2}O} = -0.23093 - 1.1239\theta + 9.4153\theta^2 - 2.9988\theta^3 + 0.51382\theta^4 - 1.8684 \times 10^{-5}\theta^5,$$
 (8)  
где  $\theta = 1000/T$ ;  $T$  — температура в Кельвинах.

#### 3.2. Метод дискретных ординат

Решение уравнения (6) будем искать с помощью конечно-объемного метода дискретных ординат (FVDOM) [5]. В методах дискретных ординат все угловое пространство разбивается на ряд дискретных телесных углов  $\Delta\Omega_i$ , в каждом из которых интенсивность излучения равна среднему значению по этому углу  $I_i$ . Наиболее простым способом дискретизации углового пространства является прямоугольная сетка с постоянным шагом по углам  $\varphi$  и  $\theta$  (рис. 1).

Внутри *i*-го телесного угла  $\Delta \Omega_i$  вектор направлений может принимать значения

$$\vec{s} = (\cos\varphi\sin\theta, \sin\varphi\sin\theta, \cos\theta), \tag{9}$$

где  $\varphi \in (\varphi_i - \Delta \varphi/2, \varphi_i + \Delta \varphi/2), \theta \in (\theta_i - \Delta \theta/2, \theta_i + \Delta \theta/2),$  углы  $\varphi_i$  и  $\theta_i$  определяют положение центра  $\vec{s}_i$  телесного угла  $\Delta \Omega_i$ .



Рис. 1. Сфера направлений.

Для дискретизации уравнение переноса излучения (6) на сфере направлений проинтегрируем его по контрольному телесному углу  $\Delta \Omega_i$ . Получим

$$\frac{1}{c}\frac{\partial I_i}{\partial t} + \frac{1}{\Delta\Omega_i}\operatorname{div}(I_i\vec{S}_i) = \chi(I_p - I_i), \qquad (10)$$

где геометрические коэффициенты  $\vec{S}_i$  и  $\Delta\Omega_i$  определяются по формулам

$$\vec{S}_{i} = \int_{\Delta\Omega_{i}} \vec{s}d\Omega = \int_{\Delta\theta} \int_{\phi} \vec{s}\sin\theta d\theta d\phi = \begin{pmatrix} \cos\varphi_{i}\sin(\Delta\varphi/2)(\Delta\theta - \cos(2\theta_{i})\sin\Delta\theta)\\ \sin\varphi_{i}\sin(\Delta\varphi/2)(\Delta\theta - \cos(2\theta_{i})\sin\Delta\theta)\\ 0.5\Delta\varphi\sin(2\theta_{i})\sin\Delta\theta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\Delta \Omega_i = \int_{\Delta \theta} \int_{\Delta \phi} \sin \theta d\theta d\phi = 2 \sin (\theta_i) \sin (\Delta \theta/2) \Delta \phi.$$
(12)

В качестве граничных условий обычно используются диффузионные отражающие и испускающие поверхности. Излучение от границы в этом случае является изотропным.

$$I\left(\vec{s}\right) = \varepsilon I_p + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{\left(\vec{s}',\vec{n}\right)>0} I\left(\vec{s}'\right) \left(\vec{s}',\vec{n}\right) d\Omega, \quad \left(\vec{s},\vec{n}\right)<0, \tag{13}$$

где  $\epsilon$  – степень черноты стенки.

При аппроксимации уравнения (13) из-за несогласованного задания сеток в физическом пространстве и в пространстве направлений возникает т.н. проблема перекры-



**Рис. 2.** Падающие и испускаемые лучи на границе области (слева) и перекрытие телесного угла с границей (справа).

тия дискретных телесных углов с границей области. Проблема перекрытия приводит к нарушению закона сохранения энергии.

Рассмотрим плотность потока энергии,  $BT/M^2$ , падающего  $E^{(+)}$  и испускаемого излучения  $E^{(-)}$  на границе области (рис. 2)

$$E^{(+)} = \int_{(\vec{s},\vec{n})>0} I^{(+)}(\vec{s},\vec{n}) d\Omega = \overline{I}^{(+)} \int_{(\vec{s},\vec{n})>0} (\vec{s},\vec{n}) d\Omega = \pi \overline{I}^{(+)},$$
  

$$E^{(-)} = \int_{(\vec{s},\vec{n})<0} I^{(-)}(\vec{s},\vec{n}) d\Omega = I^{(-)} \int_{(\vec{s},\vec{n})<0} (\vec{s},\vec{n}) d\Omega = \pi I^{(-)},$$
(14)

где  $\overline{I}^{(+)}$  – средняя проекция на нормаль интенсивность падающего излучения  $I^{(+)}$ ; для испускаемого излучения в силу его изотропности справедливо  $\overline{I}^{(-)} \equiv I^{(-)}$ .

На дискретном уровне соотношения (14) не выполняются. Действительно, для контрольных углов с  $(\vec{S}_i, \vec{n}) > 0$ , но пересекающих границу области, интегрирование  $\int_{(\vec{s}, \vec{n}) > 0} (\vec{s}, \vec{n}) d\Omega$  должно проводится только по части контрольного телесного угла, для ко-

торой выполняется соотношение  $(\vec{s}, \vec{n}) > 0$ , иначе  $\left[ \int_{(\vec{s}, \vec{n}) > 0} (\vec{s}, \vec{n}) d\Omega \right]_h = \sum_{i: (\vec{S}_i, \vec{n}) > 0} (\vec{S}_i, \vec{n}) \neq \pi.$ 

Для устранения проблемы перекрытия контрольных углов на границе области будем аппроксимировать плотности потоков энергии по формулам

$$E_{h}^{(+)} = \pi \overline{I}_{h}^{(+)} = \pi \sum_{i:(\vec{S}_{i},\vec{n})>0} I_{i}^{(+)}(\vec{S}_{i},\vec{n}) / \sum_{i:(\vec{S}_{i},\vec{n})>0} (\vec{S}_{i},\vec{n}),$$

$$E_{h}^{(-)} = \pi I_{h}^{(-)} = \pi \sum_{i:(\vec{S}_{i},\vec{n})>0} I_{i}^{(-)}(\vec{S}_{i},\vec{n}) / \sum_{i:(\vec{S}_{i},\vec{n})>0} (\vec{S}_{i},\vec{n}) = \pi I_{i}^{(-)}.$$
(15)

Тогда аппроксимация уравнения (13) будет иметь вид

$$I_{i}^{(-)} = \varepsilon I_{p} + (1 - \varepsilon) \sum_{j: (\vec{S}_{j}, \vec{n}) > 0} I_{j}^{(+)} (\vec{S}_{j}, \vec{n}) / \sum_{j: (\vec{S}_{j}, \vec{n}) > 0} (\vec{S}_{j}, \vec{n}), \quad i: (\vec{S}_{i}, \vec{n}) \le 0.$$
(16)

#### 3.3. Применение методики КАБАРЕ для решения уравнения переноса излучения

Уравнения переноса излучения (10) относится к уравнениям гиперболического типа, поэтому для их аппроксимации можно воспользоваться методикой КАБАРЕ [7]. Однако, из-за явной аппроксимации уравнений по времени, интегрирование должно проводится с чрезвычайно малым шагом по времени  $\tau \sim c^{-1}$  (где  $c \approx 3 \times 10^8$  м/с – скорость распространения света). Поэтому для применения методики КАБАРЕ потребуется использовать искусственную скорость распространения света  $c_a \ll c$ . Искусственная скорость света должна выбираться из условия, чтобы время установления радиационного теплового потока было много меньше характерного времени в задаче. Например, в газовой динамике изменение полей температуры и концентрации компонент смеси определяется конвективными потоками, следовательно критерием выбора для искусственной скорости света будет  $c_a \gg u_{\rm max}$ , где  $u_{\rm max}$  – максимальная скорость течения газа.

В схеме КАБАРЕ используются два типа переменных – консервативные переменные в центрах контрольных объемов и потоковые переменные в центрах граней. Для вычисления консервативных переменных используется дивергентная форма уравнений (10)

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} + \operatorname{div}(I_i \vec{v}_i) = Q_i, \ i = 1 - N,$$
(17)

где  $\vec{v}_i = \frac{c_a}{\Delta \Omega_i} \vec{S}_i$  – потоковая скорость, м/с;  $Q_i = c_a \chi (I_p - I_i)$  – источник в правой части уравнения, Вт/(м<sup>2</sup> с).

Для вычисления потоковых переменных уравнение (10) записывается в форме переноса инвариантов Римана по характеристическим направлениям

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} + \lambda_i \frac{\partial I_i}{\partial n} = F_i, \tag{18}$$

где  $\lambda_i = (\vec{v}_i, \vec{n})$  – характеристическая скорость, м/с;  $\vec{n}$  – нормаль к грани, направленная из задней ячейки в переднюю;  $F_i$  – правая часть, не используется в явном виде.

Алгоритм схемы КАБАРЕ можно разбить на три фазы. На первой фазе вычисляются консервативные переменные на промежуточном (полуцелом) временном слое  $\tilde{\varphi}_C$ . На второй фазе вычисляются потоковые переменные на новом слое по времени  $\hat{\varphi}_S$ . На третьей фазе вычисляются консервативные переменные на новом слое по времени  $\hat{\varphi}_C$ .

# <u>Фаза 1.</u>

Для вычисления консервативных переменных в ячейках на полуцелом временном слое  $\tilde{\varphi}_C$  записывается аппроксимация дивергентной формы уравнений с первым порядком точности по времени и со вторым по пространству:

$$\Delta V \frac{I_C - I_C}{\tau/2} + \sum_f I_f \left( \vec{v}_f, \vec{n}_f \right) S_f = Q.$$
<sup>(19)</sup>

Здесь  $\Delta V$  — объем ячейки;  $S_f$  — площадь грани;  $\vec{n}_f$  — внешней к ячейке вектор нормали к грани. Индекс *i* опущен.

Введем обозначения  $\Phi = \sum_{f} I_f (\vec{v}_f, \vec{n}_f) S_f$  и  $d = \tau / \Delta V$ , тогда уравнение (19) примет компактный вид:

$$\tilde{I}_C = I_C - 0.5d \, (\Phi - Q). \tag{20}$$

<u>Фаза 3.</u>

Пусть потоковые переменные на новом временном слое  $\hat{\phi}_S$  вычислены. Для вычисления консервативных переменных в ячейках на новом временном слое  $\hat{\phi}_C$  записыва-

ется аппроксимация дивергентной формы уравнений со вторым порядком по времени и пространству:

$$\hat{I}_C = I_C - d\left(\bar{\Phi} - \tilde{Q}\right),\tag{21}$$

где  $\overline{\Phi} = (\hat{\Phi} + \Phi)/2.$ 

<u>Фаза 2.</u>

На первом шаге (предиктор) инварианты Римана экстраполируются со вторым порядком точности по значениям в ячейке, из которой приходит характеристика

$$\hat{I}_f = 2\tilde{I}_C - I_{OP},\tag{22}$$

где индекс *OP* указывает на противоположную грань к грани *f* в ячейке *C*.

На втором шаге (корректор) производится нелинейная коррекция инвариантов Римана по принципу максимума [7], необходимая для монотонизации решения

$$\hat{I}_f = \min\left(I_{\max}, \max\left(I_{\min}, \hat{I}_f\right)\right) + \tau F,$$
(23)

где  $I_{\text{max}} = \max(I_f, I_C, I_{OP})$  и  $I_{\min} = \min(I_f, I_C, I_{OP})$  – оценки для минимального и максимального значения инварианта Римана в ячейке *C* на старом временном слое.

Величина F в уравнении (23) – это аппроксимация правой части уравнения (18)

$$F = \frac{\tilde{I}_{C} - I_{C}}{\tau/2} + \tilde{\lambda}_{C} \frac{I_{f} - I_{OP}}{|\vec{r}_{f} - \vec{r}_{OP}|}.$$
 (24)

На границе области по формулам (22), (23) и (24) вычисляется интенсивность падающего излучения на новом слое по времени  $\hat{I}^{(+)}$ . Интенсивность испускаемого излучения на новом слое по времени  $\hat{I}^{(-)}$  определяется по формуле (16).

Условие устойчивости схемы КАБАРЕ записывается в виде

$$\tau = CFL \frac{h_{\min}}{\lambda_{\max}} \sim \frac{h_{\min}}{c_a},\tag{25}$$

где CFL < 0.5 - число Куранта;  $h_{min}$  - минимальный размер ячеек в сеточной модели;  $\lambda_{max}$  - максимальная характеристическая скорость по всем дискретным направлениям.

#### 3.4. Источник тепла от излучения

Выражение для источника тепла от излучения  $Q_{rad} = -\text{div}\vec{W}$  в уравнении (5) можно получить из уравнения (10)

$$Q_{rad} = -\operatorname{div}\left(\sum_{i} I_{i} \vec{S}_{i}\right) = -\sum_{i} \chi \left(I_{p} - I_{i}\right) \Delta \Omega_{i} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i} I_{i} \Delta \Omega_{i} =$$
  
$$= -4 \chi \sigma T^{4} + \left(\chi + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) \sum_{i} I_{i} \Delta \Omega_{i}.$$
(26)

Из уравнения (26) следует интересный факт, что даже в оптически прозрачной среде ( $\chi = 0$ ) источник тепла может отличаться от нуля на величину  $Q_{rad}^0 = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_i I_i \Delta \Omega_i$ . Однако из-за высокой скорости распространения света величина  $Q_{rad}^0$  мала и проявляется лишь на временах  $\delta t \sim L/c \sim 10^{-8}c$  (L – размер области), поэтому обычно данной



**Рис. 3.** Фотография видимой светимости пламени (слева) и длина видимого пламени в различные моменты времени (справа) [8].

составляющей пренебрегают, полагая, что скорость света бесконечно большая. Тогда уравнение для источника тепла примет вид

$$Q_{rad} = \chi \left( \sum_{i} I_i \Delta \Omega_i - 4\sigma T^4 \right).$$
<sup>(27)</sup>

В модели с конечной искусственной скоростью света  $c_a \ll c$  применение формулы (27) в нестационарных задачах может приводить к ошибкам ~  $O(L/c_a)$ , тогда как применение формулы (26) может привести к существенным "паразитным" флуктуациям температуры даже для оптически прозрачных газов. Для достижения заданной точности необходимо использовать дополнительные ограничения при выборе параметра  $c_a$ .

#### 4. ОПИСАНИЕ ВЕРИФИКАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для верификации расчетной модели термического излучения и реакций диффузионного горения с использованием основанного на методике КАБАРЕ вихреразрешающего подхода к моделированию турбулентности были использованы данные эксперимента [8], в котором исследовались водородные струйные пламена, образующиеся при нестационарном истечении водорода из двух напорных резервуаров под давлением 431 бар через сопло диаметра 5.08 мм. Объем каждого резервуара составлял 617 л.

Для получения информации о структуре и длине пламени проводилась цифровая видеосъемка пламени. Из-за относительно слабой светимости водородного пламени все эксперименты проводились ночью, чтобы устранить фоновый свет и улучшить видимость пламени. Длина пламени  $L_{vis}$ , основанная на видеоизображениях видимого пламени, использовалась для определения усредненной по времени длины пламени (рис. 3). Средняя длина пламени уменьшается со временем вследствие уменьшения массового расхода по мере снижения давления в резервуаре.

Измерение потока лучистого тепла от пожар-струи производилось в момент времени 20 секунд с помощью радиометров, расположенных по вертикали на расстоянии



**Рис. 4.** Система координат (*x*,*r*) и расположение радиометров в эксперименте [8] (слева) и профили нормированного лучистого теплового потока для турбулентных пожар-струй (справа). Сплошные треугольники соответствуют данным эксперимента [8].

 $L_{vis}/2$  от оси струи (рис. 4). Доля тепла, излучаемого зоной горения пожар-струи  $X_{rad}$  определяется как отношение общего лучистого тепла, выделяемого  $Q_{rad}$  струйным пламенем, к общей скорости тепловыделения Q, равной произведению массового расхода топлива  $\dot{m}$  на энтальпию реакции горения топлива  $\Delta H$ 

$$X_{rad} = Q_{rad} / (\dot{m} \Delta H). \tag{28}$$

В работе [9] авторы предложили определять лучистый поток тепла  $q_{rad}$  от пожарструи, приходящий в точку (x, R), расположенной на фиксированном расстоянии от оси струи  $R = L_{vis}/2$ , как  $q_{rad}(x, R) = C^* Q_{rad}/4\pi R^2$ , где  $C^* = C^* (x/L_{vis})$  – универсальный для всех пожар-струй профиль нормированного лучистого теплового потока. Экспериментальные исследования вертикальных турбулентных водородных пожарструй, проведенных в Национальной лаборатории Сандия [8], [10], подтвердили выводы о том, что графики значений безразмерной величины

$$C^* = \frac{4\pi R^2 q_{rad}(x/L_{vis}, R/L_{vis})}{Q_{rad}},$$
(29)

относительно нормированной на длину факела координаты  $x/L_{vis}$  для разных газов и условий истечения ложатся на одну кривую (рис. 4).

Формулы (28) и (29) позволяют определить долю излучаемого тепла  $X_{rad}$  по результатам измерений лучистого потока тепла в точке  $(x, R) = (L_{vis}/2, L_{vis}/2)$ 

$$X_{rad} = \frac{4\pi R^2 q_{rad}(1/2, 1/2)}{C^*(1/2) \,\dot{m} \Delta H}.$$
(30)

Анализ экспериментальных данных [11] показал, что величина  $X_{rad}$  коррелирует с т.н. временем жизни пламени  $\tau_f$ 

$$X_{rad} = a \log_{10}\left(\tau_f\right) - b,\tag{31}$$

Давление, бар	Температура, К	Диаметр, мм	Скорость, м/с
1	231.4	31.5	1795

Таблица 1. Параметры в эффективном сечении, полученные с помощью модели Birch (1987) с уравнением состояния реального газа Abel-Noble [12]

где  $\tau_f = f_s \rho_f V_f / \dot{m}$  – время жизни пламени, с;  $V_f = \pi / 3 W_{vis}^2 L_{vis}$  – объем видимой части пламени (в модели конуса), м<sup>3</sup>;  $W_{vis} \approx 0.17 L_{vis}$  – видимая ширина пламени, м;  $\rho_f = P_a M_{mix} / RT_{ad}$  – плотность стехиометрической смеси в пламени, кг/м<sup>3</sup>;  $f_s$  – массовая доля топлива в стехиометрической смеси; a и b – константы, зависящие от газа.

Экспериментальные данные для водородных струй в воздухе хорошо ложатся на прямую [8]

$$X_{rad} = 0.07105\log_{10}(\tau_f) - 0.06049.$$
(32)

#### 5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

#### 5.1. Начальные и граничные условия

По аналогии с работой [12] для моделирования квазистационарного факела были выбраны условия в момент времени 93 секунды от начала эксперимента. Давление и температура водорода в баллоне в данный момент времени составляют P = 104.8 бар и T = 231.4 К. Давление и температура в окружающей среде составляют  $P_a = 1$  бар и T = 293 К.

Для моделирования начального ударно-волнового участка недорасширенной струи в работе [12] использовалась модель эффективного сечения Birch (1987) [13] с уравнением состояния реального газа Abel-Noble [14]. Без учета уравнения состояния реального газа авторы статьи наблюдали завышение видимой длины пламени на 50% по сравнению с экспериментом. Параметры в эффективном сечении приведены в табл. 1. В настоящей работе эти параметры были использованы для моделирования эффективного сечения.

#### 5.2. Геометрия и сетка

Геометрия расчетной области представляет собой цилиндр высотой 16 м переменного диаметра от 7 м в нижней части до 10.5 м на высоте больше 6 м (рис. 5). В нижней части диаметр цилиндра меньше для уменьшения аспектного отношения ячеек в области сгущения сетки. На нижнем торце цилиндра по центру располагается инжекционная трубка длиной 1 м и диаметром, равным диаметру эффективного сечения. На стенках трубки задаются условия прилипания. На верхнем торце трубки граничное условие входа (поток газа через трубку не моделируется). На внешних границах расчетной области задается условие свободного выхода.

В расчетной модели используется блочно-структурированная гексаэдральная сетка (рис. 6). Размер сеточной модели составляет 1093496 ячеек. Число ячеек на входе составляет 12 с характерным линейным размером около 7.875 мм. В окрестности входа сетка близка к равномерной. При отдалении от входа сетка растягивается по всем направлениям. На правом торце характерные размеры ячеек составляют 5–30 см.



Рис. 5. Геометрия расчетной области.



Рис. 6. Сеточная модель.

# 6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

6.1. Лучевой эффект

Главным недостатком метода дискретных ординат является т.н. эффект луча (ray effect), который заключается в сильной пространственной неоднородности расчетного радиационного потока на большом расстоянии от источника [5]. Лучевой эффект осо-


**Рис. 7.** Модуль теплового потока излучения в центральных сечениях расчетной области в момент времени 0.2 с в расчетах с излучением с числом лучей 8, 32 и 128.

бенно сильно выражен, если размер источника излучения меньше расстояния, на котором определяется радиационный поток. Действительно, поскольку число дискретных направлений (лучей) в методе DOM конечно, расстояние между лучами увеличивается по мере удаления от источника. Излучение диффузионного пламени также существенно неоднородно распределено в пространстве. На рис. 7 показаны поля модуля теплового потока в расчетах с числом лучей 8, 32 и 128. Лучевой эффект ослабевает при увеличении дискретных направлений, однако при этом сильно снижается вычислительная эффективность кода.

#### 6.2. Проверка закона сохранения энергии

Другим недостатком метода дискретных ординат являются проблемы с выполнением закона сохранения энергии из-за перекрытия контрольных углов с гранями контрольных объемов [5]. В методе конечных объемов данная проблема решается специальной процедурой согласования пространственной и угловой дискретизации. В схеме КАБАРЕ используется дивергентная форма уравнений переноса излучения, а потоковые переменные на гранях являются независимыми, поэтому проблемы с консервативностью алгоритма исключены.

Однако, для исключения паразитных осцилляций температуры (из-за введения искусственной скорости света) источник тепла в ячейках вычислялся по формуле (27). Для проверки закона сохранения энергии вычислим суммарный поток лучистой энергии, Вт, двумя способами

$$Q_{rad}^{(Vol)} \triangleq \int_{V} Q_{rad} dV = -\int_{V} \operatorname{div}\left(\vec{q}\right) dV = -\int_{S} \left(\vec{q}, \vec{n}\right) dS \triangleq Q_{rad}^{(Surf)}.$$
(33)

На рис. 8 слева приведены графики суммарных тепловых потоков, вычисленных двумя способами. Как видно, обе кривые практически совпадают друг с другом, отклонения связаны с конечной скоростью распространения света. Относительная ошибка  $\varepsilon = \left(1 - Q_{rad}^{(Surf)} / Q_{rad}^{(Vol)}\right) \times 100\%$  показана на рис. 8 справа.



**Рис. 8.** Суммарный радиационный тепловой поток, вычисленный двумя способами, (слева) и относительная ошибка (справа).



**Рис. 9.** Видимая длина факела по границе фронта горения (слева) и профиль температуры вдоль оси *X* (справа).

#### 6.3. Видимая длина пламени

В работе [12] для определения видимой длины пламени в CFD расчете используется формула

$$L_{vis} = \max\left(Z_{cell}\right)\Big|_{\Delta Y \ge 0}, \quad \Delta Y = Y_F - Y_O/s, \tag{34}$$

где  $Z_{cell}$  — координата центра ячейки по оси Z, м;  $Y_F$  — массовая доля топлива;  $Y_O$  — массовая доля окислителя; s — массовый стехиометрический коэффициент (s = 8 для водородной струи).

Условие  $\Delta Y = Y_F - Y_O/s = 0$  выполняется на фронте горения, поэтому критерий (34) определяет границу фронта горения.

В работе [15] видимая длина пламени определялась по температуре смеси. Основываясь на экспериментальных данных [16], для определения видимой длины пламени в водородной струе использовался интервал температур от 1300 К до 1500 К. Очевидно, на фронте горения температура смеси выше 1500 К, поэтому первый способ будет давать более низкие значения видимой длины пламени по сравнению со вторым.

На рис. 9 слева представлены результаты расчета видимой длины пламени по формуле (34), а справа осредненный по времени (от 0.4 с до 0.9 с) профиль температуры вдоль оси симметрии струи в расчетах без излучения и с излучением с числом лучей 8 и 32. В табл. 2 приведены средние значения видимой длины пламени в интервале, вычисленные двумя способами. Экспериментальное значение составляет 6.7 м [12]

Число лучей	1 способ	2 способ
0	6.17 м	7.4—7.9 м
8	5.80 м	5.6—6.6 м
32	5.92 м	5.9—7.2 м

Таблица 2. Видимая длина пламени

(рис. 3). Как видно из таблицы, второй способ дает близкие значения видимой длины пламени к измеренному значению, тогда как первый способ приводит к занижению данной величины на 8–13%.

#### 6.4. Доля излучаемой энергии

Доля энергии, рассеиваемой за счет излучения (radiant fraction), вычисляется по формуле

$$X_{rad} = \frac{\int \operatorname{div}\left(\vec{q}_{rad}\right) dV}{\int\limits_{V} \dot{r}_{\mathrm{H}_{2}} \Delta H dV},$$
(35)

где  $\dot{r}_{\rm H_2}$  – скорость сгорания топлива, кг/с.

В формуле (35) учитывается не только излучение от фронта горения пламени, но и от горячего шлейфа продуктов горения, поднимающегося над факелом. В работе [12] при вычислении коэффициента  $X_{rad}$  использовалось дополнительное ограничение  $\Delta Y = Y_F - Y_O/s \ge 0$  на концентрацию топлива и окислителя в ячейках, позволяющее исключить излучение шлейфа:

$$\tilde{X}_{rad} = \left(\frac{\int\limits_{V} \operatorname{div}\left(\vec{q}_{rad}\right) dV}{\int\limits_{V} \dot{r}_{\mathrm{H}_{2}} \Delta H dV}\right)_{\Delta Y \ge 0} = \frac{\int\limits_{V} \operatorname{div}\left(\vec{q}_{rad}\right) \theta(\Delta Y) dV}{\int\limits_{V} \dot{r}_{\mathrm{H}_{2}} \Delta H \theta(\Delta Y) dV},$$
(36)

где  $\theta(x)$  – функция Хевисайда.

На рис. 10 представлены результаты вычисления коэффициента  $X_{rad}$  в расчетах с числом лучей 8 и 32. Синяя и зеленая кривая соответствуют расчету коэффициента  $X_{rad}$  по формуле (35), красная кривая — по формуле (36). В табл. 3 приведены осредненные значения коэффициента  $X_{rad}$  по интервалу от 0.2 до 1 с. Как видно из таблицы, при расчете по формуле (35) осредненные значения коэффициента оказываются выше эмпирической корреляции (9.5% в работе [12] или 9.8% по формуле (32)) на 6–7% (по абсолютной величине), а при расчете  $X_{rad}$  без учета излучения шлейфа (формула (36)) результаты близки к эмпирическому значению.

#### 6.5. Профиль радиационного теплового потока

Из-за лучевого эффекта в методе дискретных ординат распределение радиационного потока тепла в пространстве на некотором отдалении от факела существенно неоднородно. На рис. 11 приведен график зависимости радиационного потока от угла  $\phi$  на высоте Z = 3 м от сопла в расчете с числом лучей 32. В точках, попадающих в лучи значения радиационного теплового потока завышены, а в областях между лучами, наоборот, занижены. Среднее по углу значение радиационного потока на расстоянии R от оси струи и на высоте Z от сопла характеризует реальный тепловой поток в точке (R, Z).



**Рис. 10.** Доля излучаемого факелом тепла от выделяемого тепла при сгорании водорода (radiant fraction) в зависимости от времени в расчетах с числом лучей 8 и 32.



**Рис. 11.** Распределение радиационного теплового потока по углу на высоте *Z* = 3 м от сопла в расчете с числом лучей 32.

**Таблица 3.** Доля излучаемого факелом тепла от выделяемого тепла при сгорании водорода (radiant fraction) (осредненное значение по интервалу 0.4–1с) в сравнении с эмпирической корреляцией

Число лучей	Расчет $X_{rad}$ , %	Эмпирическая корреляция $X_{\rm rad}, \%$	Отклонение расчета от эксперимента, %
8 лучей (1)	16.21	9.5/9.8	70.63/65.41
32 луча (1)	16.54	9.5/9.8	74.11/68.78
32 луча (2)	10.65	9.5/9.8	12.11/8.67



**Рис. 12.** Безразмерный профиль радиационного теплового потока в зависимости от безразмерной координаты *Z*/*L*<sub>vic</sub>.

На рис. 12 показан безразмерный профиль радиационного теплового потока  $C^*$  (29) в зависимости от безразмерной координаты  $Z/L_{vis}$  в расчетах с числом лучей 8 и 32. Результаты расчетов сравниваются с эмпирической зависимостью для  $C^*$  (черная пунктирная линия) и экспериментальными данными (маркеры).

В расчете с 8-ю лучами кривая для  $C^*$  (синяя линия) имеет минимум в окрестности  $Z/L_{vis} \approx 0.5$ , где располагается область с наиболее интенсивным горением водорода. Это связано с тем, что лучи из данной области расходятся под углом 45° к горизонтальной плоскости и не попадают в исследуемую зону ( $R = L_{vis}/2$ ,  $Z/L_{vis} \approx 0.5$ ). В расчете с 32-мя лучами (красная линия) лучевой эффект выражен заметно меньше. Из-за расхождения лучей от «горячей» области факела значения  $C^*$  в центре кривой занижены.

В обоих расчетах профиль кривой  $C^*$  шире, чем в экспериментах. Это напрямую связано с выбором значения для видимой длины факела ( $L_{vis} = 6$  м). По всей видимости, это значение характеризует верхнюю границу фронта горения, а не видимую длину факела. Если по оси абсцисс подставить обезразмеренную на экспериментальное значение  $L_{vis} = 6.7$  м координату, то профиль  $C^*$  будет заметно лучше соответствовать эмпирической кривой (красная пунктирная линия).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена верификация расчетных моделей термического излучения и реакций горения для водородной пожар-струи в открытом пространстве при использовании вихреразрешающей методики КАБАРЕ. Для верификации модели были использованы данные эксперимента по изучению характеристик турбулентного диффузионного водородного пламени, проведенного сотрудниками Национальной лаборатории Сандия. Эти данные релевантны относительно сценария непреднамеренной утечки водорода из напорного резервуара хранения под высоким давлением. В результате верификации получено хорошее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными и эмпирическими корреляциями по видимой длине факела, доли тепла, рассеиваемой излучением, профилю нормированного теплового потока.

Верификация моделей может быть продолжена как на экспериментах по исследованию теплопереноса излучением (из проекта OECD\NEA HYMERES-2), так и на экспериментах с пожар-струями (эксперименты Studer, Ekoto, Schefer).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Magnussen B.F., Hjertager Bjørn. (1977). On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion. Symposium (International) on Combustion. 16. 719–729. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4.
- Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 304с.
- 3. *Chmielewski M., Gieras M.* Planck Mean Absorption Coefficients of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO and NO for radiation numerical modeling in combusting flows. Journal of Power Technologies, 95 (2) 2015 97–104.
- 4. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative Transfer. McGraw-Hill, New York, 1967. 520 p.
- 5. *Снегирёв А.Ю*. Тепловое излучение. Основы теории и методы расчета: учеб. пособие / А. Ю. Снегирев. Спб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 177с.
- 6. International Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Flames. (https://tnfworkshop.org/radiation/).
- 7. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А. и др. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. М.: Из-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013, 472 с.
- Schefer R.W., Houf W.G., Williams T.C., Bourne B., Colton J. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flame // Int. J. Hydrog. Energy. 2007. V. 32. P. 2081–2093.
- Sivathanu Y.R., Gore J.P. Total radiative heat loss in jet flames from single point radiative flux measurements. Combust Flame 94:265–270, 1993.
- Houf W.G., Schefer R. Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 2007 INT J HYDROGEN ENERG. 32. 136–151.
   101. (10.1016/1711) 2006/04.000

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.04.009

- 11. Turns S.R., Myhr F.H. Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: Part II-Fuel effects and flame radiation. Combust Flame 1991; 87:319e35.
- Wang C.J., Wen J.X., Chen Z.B., Dembele S. Predicting radiative characteristics of hydrogen and hydrogen/methane jet fires using FireFOAM // International Journal of Hydrogen Energy 39 – (2014) 20560–20569.
- 13. Birch A.D., Hughes D.J., Swaffield F. Velocity decay of high pressure jets. Combust Sci Technol 1987;52:161e71.
- 14. Molkov V. Fundamentals of hydrogen safety engineering I. 2012, 216 p.
- Brennan S.L., Makarov D.V., Molkov V. LES of high pressure hydrogen jet fire // Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, 2009 – 353–359.
- 16. Schefer R., Houf B., Colton J. Experimental measurements to characterize the thermal and radiation properties of an open-flame hydrogen plume // In Proceedings of the 15th annual hydrogen conference and hydrogen expo, 26–30 April 2004 Los Angeles, CA, USA.

#### Simulation of a Hydrogen Jet Fire Using the Cabaret Technique

## V. Yu. Glotov<sup>a</sup>, \*, A. A. Kanaev<sup>a</sup>, A. V. Danilin<sup>a</sup>, and V. G. Kondakov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*e-mail: glotov-v@yandex.ru

In the present work, a hydrogen jet fire was simulated in the eddy-resolving approximation using the parameter-free CABARET technique. The article presents a description of mathematical models of thermal radiation and combustion reactions of a hydrogen jet fire and a method for approximating the equations of radiative transfer. A good agreement between the calculation results and experiment was obtained in terms of the main characteristics of the jet fire (visible flame length, radiant fraction, radiant heat flux profile).

Keywords: CABARET technique, jet fire, thermal radiation, diffusion combustion

УДК 621.039,519.6

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПАССИВНОГО АВТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА В ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕМ ПРИБЛИЖЕНИИ

© 2022 г. А. А. Канаев<sup>1, \*</sup>, В. Ю. Глотов<sup>1</sup>, А. Е. Киселев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия \*e-mail: kanaev@ibrae.ac.ru

> Поступила в редакцию 16.02.2022 г. После доработки 14.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

В работе представлены результаты численного моделирования эксперимента OECD/NEA HYMERES HP2\_1 на установке PANDA, направленного на изучение теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание атмосферы в объеме установки с использованием ПрЭВМ CABARET\_SC1. В основе программного комплекса лежит одноименная численная методика КАБАРЕ, позволяющая проводить расчеты турбулентных течений на сетках с неполным разрешением спектра турбулентных пульсаций без использования настроечных параметров (Implicit LES-приближение). Течение внутри имитатора ПКРВ рассчитывалось в явном виде с использованием упрощенной модели нагревательного модуля и корпуса. Получено хорошее совпадение результатов расчета переходного процесса с экспериментальными данными, что свидетельствует об эффективности такого подхода. Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций. С помощью обновленной модели ПКРВ был проведен расчетный анализ эксперимента OECD/NEA THAI с ПКРВ на установке THAI (THAI HR-1).

*Ключевые слова:* ILES, схема КАБАРЕ, вычислительная гидродинамика, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, ПКРВ **DOI:** 10.31857/S0002331022040070

### введение

Для обеспечения водородной безопасности на большинстве АЭС с водо-водяным реактором предусмотрены системы аварийного удаления водорода. К таким системам относятся пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ), работающие по принципу беспламенной рекомбинации водорода с кислородом на катализаторе без дополнительного подвода энергии и без управляющих сигналов на включение.

Запуск ПКРВ происходит, когда локальная концентрация водорода на входном торце устройства превысит некоторое пороговое значение. Реакция рекомбинации сопровождается выделением тепла и продолжается до тех пор, пока в атмосфере имеется достаточное количество водорода и кислорода. Локальный нагрев газа в результате рекомбинации водорода вызывает естественную конвекцию, которая способствует перемешиванию атмосферы (тепловой эффект).

Условия, в которых ПКРВ функционирует, могут различаться в зависимости от сценария и этапа тяжелой аварии. Для исследования характеристик работы ПКРВ в разных условиях необходимы комплексные испытания в крупномасштабных экспериментальных установках и теоретический анализ с помощью современных вычислительных инструментов CFD-класса.

В ИБРАЭ РАН для проведения расчетного анализа задач водородной безопасности разрабатывается ПрЭВМ CABARET-SC1, предназначенная для детального трехмерного моделирования задач нестационарной газовой динамики в вихреразрешающем приближении. В основе программного комплекса лежит одноименная методика КАБАРЕ [1], позволяющая проводить расчеты турбулентных течений на сетках с неполным разрешением спектра турбулентных пульсаций без использования настроечных параметров и эмпирических корреляций.

Значительный объем валидационной базы для кода CABARET-SC1 представлен экспериментами международных проектов АЯЭ ОЭСР ERCOSAM-SAMARA, HYMERES, HYMERES-2 [2–4]. Эти проекты представляют собой исследования, частично направленные на изучение формирования и разрушения стратификации водорода, в том числе при работе систем безопасности.

В работе представлены результаты численного моделирования эксперимента АЯЭ ОЭСР НҮМЕRES HP2\_1 [5] на установке PANDA, направленного на изучение теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание атмосферы в объеме установки с использованием ПрЭВМ CABARET\_SC1. Течение внутри имитатора ПКРВ рассчитывалось в явном виде с использованием упрощенных моделей нагревательного модуля и корпуса. Получено хорошее совпадение результатов расчета переходного процесса с экспериментальными данными, что свидетельствует об эффективности такого подхода. Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций. С помощью обновленной модели ПКРВ был проведен расчетный анализ эксперимента OECD/NEA THAI с ПКРВ на установке THAI (THAI HR-1) [6].

### ПОСТАНОВКА И СЦЕНАРИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

Эксперимент HP2\_1\_2 проекта АЯЭ ОЭСР HYMERES, проведенный на швейцарской экспериментальной установке PANDA, направлен на исследование влияния теплового эффекта работы ПКРВ на динамику создания и разрушения обогащенного гелием слоя струей пара в присутствии пристеночной конденсации [5].

Экспериментальная установка PANDA представлена двумя герметичными теплоизолированными емкостями высокого давления, соединенными трубопроводом, общим объемом 184 м<sup>3</sup>, высотой 8 м каждый и диаметром цилиндрической части 4 м. В центре Емкости 1 установки расположена инжекционная трубка диаметром 0.2 м. через которую пар и гелий поступают в установку. Инжектируемая струя попадает на горизонтальный круглый диск для предотвращения разрушения образующейся стратификации легкого газа свободной струей пара. Вертикальный конденсатор (ВК), состоящий из трех вертикальных труб длиной 6 м, установленных вблизи стенки Емкости 1, служит для имитации конденсации пара на стенках защитной оболочки в постулируемой аварии на АЭС. Конденсация пара на ВК индуцирует конвекцию, которая может влиять на распределение гелия в установке и усиливать перемешивание атмосферы, вызванное восходящими из имитаторов ПКРВ газовыми шлейфами. В Емкости 1 размещены два идентичных имитатора ПКРВ на высоте 2.09 м и 5 м над дном емкости выходными отверстиями в сторону оси емкости. Конструкция имитаторов ПКРВ основана на реальной модели ПКРВ Areva Framatome FR90/1-150. Имитатор ПКРВ представляет собой корпус из нержавеющей стали с установленным в нижней части корпуса нагревательным модулем. Этот модуль имитирует зону нагрева в области каталитического модуля в реальном ПКРВ.

Сценарий основного этапа эксперимента состоял из четырех этапов:

- Этап 1: инжекция пара с расходом 30 г/с при температуре 150°С в течение 500 с;



**Рис. 1.** Геометрия расчетной модели эксперимента HP2\_1\_2 (слева); Сеточная модель имитатора ПКРВ. Выходное сечение выделено желтым цветом (справа).

 – Этап 2: инжекция смеси пара при расходе 30 г/с и гелия при расходе 3.2 г/с, при температуре смеси 150°С в течение 500 с. Верхний имитатор ПКРВ был активирован с мощностью 6 кВт;

 – Этап 3: инжекция гелия была прекращена, в то время как инжекция пара продолжилась с расходом 30 г/с при температуре инжекции 150°С в течение 1000 с. Верхний имитатор ПКРВ продолжил работу с мощностью 6 кВт;

— Этап 4: инжекция пара была прекращена, мощность верхнего имитатора ПКРВ линейно уменьшалась до значения 1 кВт на момент окончания эксперимента.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

В расчетах использовалась гексаэдральная блочно-структурированная сетка с числом ячеек 3.2 млн (рис. 1, слева). Имитатор ПКРВ моделировался в виде прямоугольного блока с входным и выходным окнами (рис. 1, справа). Число ячеек в имитаторе ПКРВ составляло 7920.

В начальный момент времени Емкости заполнены смесью воздуха и пара при давлении 1.317 бар. Температура и состав смеси задавались путем аппроксимации экспериментальных данных.

Теплоизоляция экспериментальной установки не моделировалась. На внешних границах стальных стен Емкостей задавалось условие 3-его рода  $q = h(T - T_{ref})$  с коэффициентом теплоотдачи, полученным по результатам измерений теплопотерь установки [11]  $h = 5.77 \times 10^{-3} T[K] - 1.66$ , и референтной температурой  $T_{ref} = 20^{\circ}$ С.

Для моделирования конденсации пара на ВК использовались экспериментальные данные по массе конденсата, поступающего в конденсатосборник, и температурам трубок ВК.

Как показал опыт моделирования экспериментов на установке PANDA [2–4], теплообмен излучением оказывает значительное влияние на температуру газовой смеси и на формирование/разрушение концентрационной стратификации. В условиях высокого паросодержания (50 мол. %) атмосфера установки является оптически плотной, поэтому для моделирования переноса тепла излучением использовалась диффузионная модель лучистой теплопроводности Росселанда. Средний по Росселанду коэффициент поглощения водяного пара был выбран равным 120 атм<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup> [12], для коэффициента черноты стен использовалось табличное значение 0.8 для нержавеющей стали.



Рис. 2. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 1000 сек.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИМИТАТОРА ПКРВ

Течение газовой среды внутри имитатора ПКРВ вычисляется явно и представляет собой течение, вызванное естественной конвекцией через нагревательный модуль, моделируемый как пористая среда с заданным гидравлическим сопротивлением. Изменение давления на участке нагревательного модуля можно представить в виде

$$\partial_z P = 0.5 K_{loss} \rho u^2, \tag{1}$$

где  $K_{loss}$ , м<sup>1</sup> – коэффициент гидравлических потерь; u, м/с – среднемассовая скорость в поперечном сечении имитатора ПКРВ. Коэффициент гидравлических потерь для аналогичного имитатора ПКРВ был оценен численно ( $\approx 20 \text{ м}^{-1}$ ) в экспериментах MERCO-3/4 на установке MISTRA [7].

На стенках корпуса имитатора ПКРВ задается условие прилипания. Часть тепла, выделяемого в нагревательном модуле, поступает на корпус имитатора ПКРВ путем конвективного и лучистого теплообмена. Тепловая инерция корпуса и теплопотери с его поверхности влияют на нагрев газа и режим конвекции внутри ПКРВ. Т.к. толщина корпуса составляет всего 2 мм, то для повышения эффективности расчетной модели корпус ПКРВ моделировался без сеточного разрешения. На гранях сетки, попадающих на корпус ПКРВ, задавалось условие прилипания. Этим граням присваивались эффективная масса  $\delta m_{St}$  и теплоемкость  $C_{St}$ , соответствующие стальным стенкам корпуса, и задавались двойные тепловые потоки  $Q_{in}$  и  $Q_{out}$  для моделирования теплообмена на внутренней и внешней поверхности корпуса. Локальная температура корпуса вычислялась из балансного уравнения

$$\delta m_{St} d_t \left( C_{St} T \right) = Q_{in} - Q_{out}. \tag{2}$$



Рис. 3. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 2000 сек.



Рис. 4. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 3000 сек.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

На рис. 2—5 показано рассчитанное распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в моменты времени 1000 сек, 2000 сек, 3000 сек и 8000 сек в сравнении с экспериментальными данными. Поступающая горячая смесь пара с гелием из-за вы-



Рис. 5. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 8000 сек.

сокой плавучести аккумулируется в верхней половине Емкости 1, вытесняя холодный газ в нижнюю половину Емкости 1 и Емкости 2. В Емкости 1 формируется концентрационная и температурная стратификация. Граница стратификации опускается до уровня соединительной трубы, в результате чего обогащенный гелием газ поступает в верхнюю половину Емкости 2. После прекращения инжекции (t = 3000 сек) температура газа в верхней половине Емкости 1 медленно падает из-за тепловых потерь на стенках, граница стратификации немного поднимается и переток гелия в Емкость 2 прекращается.

В результате численного анализа было подтверждено, что тепловой эффект имитатора ПКРВ, расположенного в верхней части Емкости 1 в области стратификации, не приводит к разрушению стратификации и гомогенизации атмосферы установки, а лишь обеспечивает эффективное перемешивание газовой смеси внутри стратифицированного слоя.

На рис. 6 показано сравнение температуры газа на входе и выходе имитатора ПКРВ. Как видно из рисунка, упрощенная модель имитатора ПКРВ хорошо воспроизводит нагрев газа, что подтверждает перспективность ее использования для моделирования реального ПКРВ.

Предлагаемый комбинированный подход с вихреразрешающим моделированием турбулентных течений в атмосфере экспериментальной установки в совокупности с упрощенной моделью имитатора ПКРВ продемонстрировал свою эффективность — распределение газовой смеси по составу с высокой точностью совпало с экспериментом. Небольшие локальные отклонения объясняются упрощенной моделью ВК и отмечаемыми экспериментаторами завышенными теплопотерями в области люка.

### ПОСТАНОВКА И СЦЕНАРИЙ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

Эксперименты с ПКРВ, проведенные на немецкой экспериментальной установке ТНАІ в рамках проекта АЯЭ ОЭСР ТНАІ [6], были направлены на получение данных



Рис. 6. Температура газа на входе и выходе из имитатора ПКРВ.

для валидации и разработки моделей ПКРВ для CFD и LP кодов, используемых для анализа теплогидравлики защитной оболочки АЭС.

В эксперименте THAI HR-2 исследовалась работа ПКРВ Areva Framatome FR-380 с уменьшенной вдвое шириной металлического корпуса и с 19 каталитическими пластинами вместо 38. ПКРВ был закреплен на внешней стенке внутреннего металлического цилиндра, установленного по центру в нижней части Емкости установки THAI объемом 60 м<sup>3</sup>. В начале испытаний Емкость заполнялся сухим воздухом при атмосферном давлении (1 бар) и комнатной температуре (27.9°С). Затем водород поступал через кольцевую линию подачи, установленную под внутренним цилиндром, со средним расходом 0.157 г/с. В течение первых 20 минут концентрация водорода на входе ПКРВ постепенно увеличивалась от 0 до 6 мол. %. ПКРВ начал работать через 7 минут, когда концентрация на входе достигла значения 1.15 мол. %. В момент старта ПКРВ расход подаваемого водорода был увеличен вдвое (до 0.306 г/с). Когда содержание водорода в атмосфере установки снизилось до < 0.8 мол. %, начался второй этап эксперимента. Накачка водорода была возобновлена и продолжалась до момента, пока не произошло воспламенение водорода внутри ПКРВ. В настоящей работе обсуждаются результаты моделирования первого этапа эксперимента.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

В расчетах использовалась гексаэдральная блочно-структурированная сетка с числом ячеек 1.715 млн (рис. 7). ПКРВ моделировался в виде прямоугольного блока с входным и выходными окнами. Число ячеек в ПКРВ составляло 11220.

На стенках Емкости задавалось условие 3-го рода  $q = h(T - T_{ref})$  с коэффициентом теплоотдачи 50 Вт/(м<sup>2</sup>К) [13] и референтной температурой, равной начальной температуре стенок 27.9°С.

Подача водорода в эксперименте осуществлялась через кольцо с 56 отверстиями  $\emptyset$  3 мм. В расчетах использовалась упрощенная модель кольцевой линии подачи водо-

рода. Кольцо было поднято на уровень перехода струи в факел  $\Delta z = M^{3/4} / B^{1/2} = 0.15$  м, что позволило увеличить эффективный диаметр струи в несколько раз. При моделировании инжекция происходила через кольцевую поверхность толщиной 1 см с задан-



Рис. 7. Геометрическая и сеточная модель установки ТНАІ.

ным расходом. Сравнение концентраций водорода до старта ПКРВ с экспериментом показало, что такое упрощение допустимо.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПКРВ

Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций.

Изменение средней температуры каталитических элементов  $\overline{T}_{cat}$  описывается дифференциальным уравнением

$$m_{cat} \frac{d\left(C_{cat}\overline{T}_{cat}\right)}{dt} = Q_{heat} - Q_{fluid} - Q_{rad},\tag{3}$$

где  $C_{cat} = C_{cat}(\overline{T}_{cat})$  — удельная теплоемкость материала каталитических элементов;  $m_{cat}$  — суммарная масса каталитических элементов.

Теплота, выделяющаяся в ходе поверхностной реакции рекомбинации водорода, приводит к увеличению температуры каталитических элементов

$$Q_{heat} = \dot{r}_{\rm H_2} \Delta H_{\rm H_2},\tag{4}$$

где  $\dot{r}_{\rm H_2}$  – скорость рекомбинации водорода, кг/с;  $\Delta H_{\rm H_2} = 1.41 \times 10^8 \, \text{Дж/кг}$  – удельная теплота сгорания водорода.

Теплоотвод в каталитическом блоке осуществляется путем конвективного теплообмена с газом

$$Q_{fluid} = \overline{h}_{cat} \cdot A_{cat}^{(sum)} \cdot \left(\overline{T}_{cat} - \overline{T}_{g}\right)$$
(5)

и переноса тепла излучением с поверхности каталитических элементов на корпус рекомбинатора

$$Q_{rad} = \overline{\varepsilon} \sigma A_{cat}^{(out)} \left( \overline{T}_{cat}^4 - \overline{T}_{box}^4 \right).$$
(6)



**Рис. 8.** Производительность ПКРВ FR-380 и концентрация водорода на входе ПКРВ в эксперименте THAI HR-2.

Здесь  $\bar{h}_{cat}$  — средний коэффициент теплоотдачи с поверхности каталитических элементов к газу;  $A_{cat}^{(sum)}$  — суммарная площадь поверхности каталитических элементов;  $\bar{T}_g$  — средняя температура газа в каталитическом блоке;  $A_{cat}^{(out)}$  — внешняя поверхность каталитического блока;  $\bar{T}_{box}$  — средняя температура корпуса рекомбинатора. Приведенная степень черноты при лучистом теплообмене в системе двух серых тел вычисляется по формуле

$$\overline{\varepsilon} = \left(1/\varepsilon_{cat} + (1/\varepsilon_{box} - 1) A_{cat}^{(out)} / A_{box}\right)^{-1},$$
(7)

где  $\varepsilon_{cat} = 0.8$  [8] и  $\varepsilon_{box} = 0.25$  [8] – степень черноты катализатора (платины) и корпуса рекомбинатора (нержавеющая сталь);  $A_{box}$  – площадь поверхности корпуса рекомбинатора.

Коэффициент гидравлического сопротивления в области каталитических пластин и коэффициент теплоотдачи взяты из работы [9].

Производительность рекомбинаторов AREVA Framatome (модель FR-380) описывается эмпирической корреляцией [10]

$$\dot{x}_{\rm H_2} = \eta (k_1 P + k_2) \min \left( X_{\rm H_2}, 2X_{\rm O_2}, 8 \right) \tanh \left( X_{\rm H_2} - X_{\rm H_2, \rm off} \right), \tag{8}$$

где  $X_{\rm H_2}$  и  $X_{\rm O_2}$  – объемные доли водорода и кислорода на входе рекомбинатора,  $k_1 = 3.1 \times 10^{-10} \, {\rm kr/(c \ \Pi a)}, k_2 = 3.7 \times 10^{-5} \, {\rm kr/c}.$  С уменьшением концентрации водорода до  $X_{\rm H_2,off} = 0.5\%$  (что ниже стартового порога) процесс рекомбинации останавливается.

В экспериментах на установке THAI измеренная скорость рекомбинации водорода существенно отличалась от вычисленной по эмпирической корреляции (8) (рис. 8). На стадии накачки водорода (с 7 мин до 20 мин) объемная доля водорода на входе рекомбинатора монотонно возрастает до 6%. В соответствии с эмпирической зависимостью (4), скорость рекомбинации должна пропорционально возрастать  $\dot{r}_{\rm H_2} \sim X_{\rm H_2}$ , од-



**Рис. 9.** Температурный коэффициент  $C_T$  в эксперименте THAI HR-2.

нако в эксперименте кривая скорости рекомбинации водорода более пологая. Отклонение эмпирической корреляции от экспериментальных данных может быть связано с инерционным характером работы рекомбинатора. При изменении концентрации водорода на входе ПКРВ скорость рекомбинации не может измениться мгновенно она ограничена скоростью диффузии водорода к поверхности каталитических пластин. Эмпирическая корреляция для производительности ПКРВ, по всей видимости, получена для стационарного режима (при постоянном расходе и концентрации водорода на входе ПКРВ).

Для применения эмпирической корреляции (8) в расчетах предлагается ввести поправочный температурный коэффициент

$$\dot{r}_{\rm H_2}^{(\rm mod)} = C_T \dot{r}_{\rm H_2},$$
(9)

где

$$C_T = \alpha \left( \overline{T}_{out} - \overline{T}_{in} \right) / \left( \overline{T}_{cat} - \overline{T}_{out} \right). \tag{10}$$

Здесь вместо  $\overline{T}_g$  используется  $\overline{T}_{out}$ , т.к. в упрощенной модели ПКРВ каталитические пластины явно не разрешаются, и при вычислении средней температуры газа между пластинами могут возникнуть достаточно большие ошибки. Безразмерный коэффициент  $\alpha = 2$  подбирается из условия наилучшего соответствия скорости рекомбинации экспериментальным данным (рис. 8).

Модифицированная эмпирическая корреляция для скорости рекомбинации достаточно хорошо соответствует экспериментальной кривой, однако на поздней стадии (t > 60 мин) при низкой концентрации водорода (<1%) скорость рекомбинации занижается. Это хорошо видно на рис. 9, где показано сравнение коэффициента  $C_T$  и величины  $C_T^{(exp)} = \dot{r}_{H_2}^{(exp)} / \dot{r}_{H_2}$ .



**Рис. 10.** Сравнение рассчитанной с использованием оригинальной и модифицированной корреляций производительности ПКРВ FR-380 с экспериментом.

Введенный температурный коэффициент  $C_T$  позволяет уточнить эмпирическую корреляцию для переходных режимов конвекции газа внутри ПКРВ. При этом, судя по рис. 9, область применения данной поправки ограничена.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

Старт ПКРВ в расчетах происходил на 2 минуты раньше, чем в эксперименте THAI HR-2. Заметим, что в эксперименте THAI HR-1, выполненном в схожих условиях, старт ПКРВ происходил на 16-й минуте при концентрации водорода 2.8 мол. %. Это можно объяснить низкой активностью катализатора. Чтобы согласовать модель с результатами эксперимента, начало рекомбинации было отложено до момента, когда концентрация водорода на входе ПКРВ достигнет 1.15 мол. %.

Расчеты были выполнены с использованием 2-х корреляций для скорости рекомбинации водорода – эмпирической корреляции для AREVA Framatome FR-380 (8) и модифицированной корреляции с температурным множителем (9)–(10), позволяющем учесть инерционность ПКРВ. Как видно из рис. 10, применение эмпирической корреляции (8) приводит к завышению скорости рекомбинации (на 10–40%) на стадии накачки водорода. В результате повышенного тепловыделения в ПКРВ происходит увеличение температурной стратификации, что способствует запиранию водорода в нижней части установки. Повышенная концентрация водорода на входе ПКРВ способствует поддержанию высокой скорости рекомбинации. Из-за более быстрого сгорания водорода после прекращения инжекции скорость рекомбинации быстро падает. Применение модифицированной корреляции (9)–(10) позволило существенно приблизить результаты расчета к эксперименту, однако в пике скорость рекомбинации также оказалась ниже на 12.5%. После прекращения инжекции скорость рекомбинации также оказалась заниженной.

Отклонение расчетной кривой от эксперимента связано с неправильной динамикой изменения температурного множителя  $C_T$  во времени (рис. 11). До 17 мин значе-



Рис. 11. Сравнение значений рассчитанного температурного коэффициента С<sub>Т</sub> с экспериментом.

ния  $C_T$  близки к эксперименту, однако далее скорость роста  $C_T$  примерно в 2.5 раза ниже, чем в эксперименте, что говорит об отклонениях по температурам каталитических пластин и газа внутри ПКРВ. Сравнение с экспериментом (рис. 12) показало, что по мере увеличения температуры скорость роста температуры катализатора и газа существенно замедляются.

Одновременное занижение температур катализатора и газа нельзя объяснить повышенным конвективным теплосъемом, связанным с ошибками в эмпирической корреляции для коэффициента теплоотдачи. Также это не объясняется увеличением теплосъема из более высокого массового расхода через ПКРВ. Значения скорости на входе ПКРВ близки к эксперименту, причем на 20-ой минуте ошибка меняет знак (рис. 13).

Источником ошибок может быть упрощенная модель переноса тепла излучением от каталитических пластин на корпус ПКРВ. Действительно, доля тепла рассеиваемая излучением быстро возрастает с ростом температуры  $q_{rad} \sim T^4$ , что приводит к снижению скорости роста катализатора, а значит и температуры газа. Неопределенность в задании внешней поверхности каталитического блока  $A_{cat}^{(out)}$  может привести к завышению лучистого теплового потока.

Помимо этого из-за наличия водяного пара среда внутри ПКРВ не является оптически прозрачной, а значит применение "wall-to-wall heat transfer model", вообще говоря, не совсем обосновано. В данной работе детальное изучение влияния переноса тепла излучением на характеристики работы ПКРВ не проводилось.

Тепловая инерция ПКРВ приводит к возникновению гистерезиса в зависимости скорости рекомбинации от концентрации водорода на входе ПКРВ (рис. 14). В расчете с модифицированной корреляцией для производительности рекомбинатора результаты значительно ближе к экспериментальной кривой на стадии роста концентрации водорода. При уменьшении концентрации водорода петля гистерезиса выражена хуже, чем в эксперименте, из-за медленного роста коэффициента  $C_T$ .



**Рис. 12.** Сравнение значений температуры каталитических пластин ПКРВ, температуры на входе и выходе ПКРВ с экспериментом.



Рис. 13. Сравнение значений скорости на входе ПКРВ с экспериментом.

На рис. 15 показано распределение водорода в объеме экспериментальной установки в расчете с модифицированной корреляцией для производительности ПКРВ. В верхней половине Емкости и на уровне входа ПКРВ результаты расчета близки к экспериментальным данным. Однако в центре внутреннего цилиндра концентрация существенно занижена, а в области приямка, наоборот, завышена по сравнению с экспериментом.



Рис. 14. Производительность ПКРВ относительно концентрации водорода на входе ПКРВ.



Рис. 15. Сравнение значений концентрации водорода в разных точках установки с экспериментом.

Распределение водорода напрямую связано с температурной стратификацией. В эксперименте горячий поток газа из рекомбинатора поступает в верхнюю часть установки, тогда как холодный обогащенный водородом газ из-за отрицательной плавучести аккумулируется во внутреннем цилиндре. В расчете (рис. 16) температура газа в верхней части установки существенно завышена (на  $10-15^{\circ}$ C), что приводит к опусканию границы температурной стратификации в область внутреннего цилиндра и вытеснению обогащенной водородом смеси в область приямка.

В статье [14] также наблюдалось значительное завышение температуры газа в объеме установки, причем на выходе из ПКРВ температура газа совпадала с экспериментом.



Рис. 16. Сравнение значений температуры в разных точках установки и давления с экспериментом.



Рис. 17. Распределение водяного пара в объеме установки на моменты времени 16 и 32 мин.

Завышение средней температуры газа в объеме установки после старта ПКРВ можно объяснить недостаточно интенсивным теплообменом газа со стенками Емкости. Однако при увеличении коэффициента теплоотдачи в 2 раза наблюдалось лишь незначительное уменьшение средней температуры газа (около 1°С). По всей видимости, причина связана с влиянием переноса тепла излучением. Действительно, после старта ПКРВ средняя концентрация пара в объеме установки непрерывно повышается (рис. 17) и достигает нескольких процентов к 30 минуте. Как показали эксперименты из проекта АЯЭ ОЭСР HYMERES-2 [15], даже малое содержание пара (около 2%) в схожих условиях по давлению и температуре оказывает значительное влияние на теплообмен в экспериментальной установке. Учет переноса тепла излучением приведет к перераспределению температуры газа в объеме установки, а также к интенсификации теплообмена с внутренним цилиндром, что снизит температурную стратификацию и среднюю температуру газа в объеме установки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной работе математическая модель ПКРВ, основанная на подходе пористой среды и эмпирических корреляциях для производительности, позволяет моделировать некоторые аспекты работы этого устройства с помощью CFD подхода.

По результатам расчета эксперимента HYMERES HP2\_1 показана высокая точность моделирования теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание стратифицированной атмосферы. Данные результаты подтвердили эффективность использования такого подхода для моделирования тепловой конвекции в ПКРВ в вихреразрешающем приближении с помощью ПрЭВМ CABARET-SC1.

Для моделирования эксперимента THAI HR-2 с ПКРВ AREVA FR-380 предложена модификация эмпирической корреляции для скорости рекомбинации, позволяющая учесть инерционный характер работы рекомбинаторов. Модифицированные корреляции для скорости рекомбинации приводят к значительному улучшению результатов по сравнению с моделированием с использованием исходных корреляций AREVA. Тем не менее в расчетах наблюдалось существенное отклонение по температуре катализатора и газа на выходе из ПКРВ, что привело к занижению скорости рекомбинации после прекращения инжекции водорода. Отклонения по температурам, вероятнее всего, связаны с упрощенным моделированием переноса тепла излучением с поверхности катализатора на корпус ПКРВ в предположении, что среда является прозрачной для тепловых лучей. Однако, наличие небольшого количества пара может повлиять на прозрачность среды и теплообмен в установке. На это также указывает завышение температуры газа в объеме установки.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. — М.: Издательство Московского университета, 2013, 472.
- 2. Большов Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Киселев А.А., Юдина Т.А. Валидация кода CABARET-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС. Атомная энергия, 127, стр. 216–222 (2020).
- 3. *Kanaev A. et al.* "Mathematical modelling of hydrogen safety problems with CABARET scheme" Journal of Physics: Conference Series, 1392(1), 012039, (2019).
- 4. *Glotov V. et al.* "Cabaret scheme for modelling the stratification erosion in gas mixtures in hydrogen mitigation experiments for reactor safety" Journal of Physics: Conference Series, 1359, 012013, (2019).

- 5. *Paranjape S. et. al.*, OECD/NEA HYMERES project: PANDA Test HP2\_1\_2 Quick-Look Report TM-42-17-08, Rev-0, HYMERES-P-17-39, Paul Scherrer Institute (2017).
- 6. *Kanzleiter T*. OECD-NEA THAI Project: Hydrogen Recombiner Tests HR-1 to HR-5, HR-27 and HR-28. Quick Look Report No. 150 1326–HR-QLR-1, Becker Technologies GmbH (2009).
- 7. Kelm S. et al., JUELICH Post-test analysis report, ERCOSAM/WP2/P2.18/2014-12 (2014)
- Rozen A. Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner, Nukleonika -Original Edition-, 63(2) (2018).
- 9. *Rozen A*. A Mechanistic Model of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner, Chemical and Process Engineering, 36 (1), pp. 3–19 (2015).
- Gupta S. OECD-NEA THAI-2 Project: Onset of PAR operation in case of low oxygen concentration Quick Look Report No. 150 1420–HR33/34-QLR. Becker Technologies GmbH, (2012).
- Paranjape S. et. al. OECD-NEA/HYMERES-2 project: PANDA test facility description and geometrical specifications. Tech. Rep. TM-41-18-02, Rev-0, HYMERES-2-18-02 Paul Scherrer Institute (2018).
- 12. Ozicik M. Heat Transfer, A Basic Approach. 800 p., McGraw-Hill Book Company, (1985).
- Halouane Y., Dehbi A. "CFD simulation of hydrogen mitigation by a passive autocatalytic recombiner". Nuclear Engineering and Design, 330, pp. 488–496 (2018).
- 14. Kelm S. et al. "Passive auto-catalytic recombiner operation validation of a CFD approach against OECD-THAI HR2-test". Proceedings of Organisation for Economic Co-operation and Development/NEA & IAEA Workshop on Experiments and CFD Codes Application to Nuclear safety (Experiment and CFD for Nuclear Reactor Safety; XCFD4NRS), Organisation for Economic Co-operation and Development, Deajon, South Korea (2012).
- 15. *Kapulla R. et al.* OECD/NEA HYMERES-2 Series H2P2 Thermal Radiation effects. Results, PRG7/MB7 Meeting of the HYMERES phase 2 project, PSI, Switzerland (2021).
- 16. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", N 7, 2012. С. 36–39.

#### Numerical Eddy-Resolving Modeling of Passive Autocatalytic Recombiner Operation

#### A. A. Kanaev<sup>a</sup>, \*, V. Yu. Glotov<sup>a</sup>, and E. A. Kiselev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*e-mail: kanaev@ibrae.ac.ru

The paper presents the results of numerical simulation of OECD/NEA HYMERES HP2\_1 experiment in the PANDA facility, aimed at studying the thermal effect of Passive Autocatalytic Re-combiners (PARs) operation on containment atmosphere mixing, using CABA-RET\_SC1 CFD code. The code is based on the eddy-resolving CABARET technique, which allows implicit modeling of the subgrid turbulence scales without using tuning parameters (Implicit LES approximation). The flow inside the PAR imitator was calculated explicitly using a simplified model of the heating section and the housing. Good agreement of calculated transient with experimental data was obtained, which indicated the effectiveness of such approach. To simulate the operation of a real PAR in complex experiments, PAR imitator model was updated with a simple model of hydrogen recombination in the PAR catalyst section based on empirical correlations. The updated PAR model was used for numerical modeling of OECD/NEA THAI experiment with real PAR (THAI HR-2).

Keywords: ILES, CABARET scheme, CFD for NPP safety, passive autocatalytic recombiners

УДК 339,327,34

## ЛУЧШИЕ МИРОВЫЕ ПРАКТИКИ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ КЛЮЧЕВЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОТРАСЛЕЙ

© 2022 г. С. К. Аношина<sup>1, \*</sup>, В. Л. Лихачев<sup>1, \*\*</sup>, А. А. Аношин<sup>2, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Центр института экономики и регулирования инфраструктурных отраслей НИУ ВШЭ, Москва, Россия <sup>2</sup>Министерство экономического развития Российской Федерации, Москва, Россия \*e-mail: sanoshina@hse.ru \*\*e-mail: vl.likhachev@hse.ru \*\*\*e-mail: anoshinaa@economy.gov.ru

> Поступила в редакцию 15.02.2022 г. После доработки 08.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

В связи с подписанием Парижского соглашения об изменении климата в 2015 году страны мира вынуждены формировать новые планы развития энергетического сектора с учетом принятых обязательств. В настоящей статье рассмотрены и систематизированы лучшие зарубежные практики формирования и реализации подходов к решению задач низкоуглеродного развития, приводится оценка возможности их применения для российских условий. Рассмотрен вопрос трансформации энергобаланса и как следствие формирование развитие новых нетрадиционных отраслей возобновляемой энергетики. Процессы изучены как на уровне отдельных стран лидеров в данной области с разбивкой по основным отраслям инфраструктуры, так и на международном уровне с учетом финансовых, регуляторных и политических аспектов данного вопроса.

*Ключевые слова:* низкоуглеродное развитие, вопросы декарбонизации, энергетическая политика, зеленая таксономия, меры государственной поддержки, нетрадиционная возобновляемая электроэнергетика, экологически чистые процессы производства

DOI: 10.31857/S0002331022040033

В соответствии с решениями руководства Российской Федерации и принятыми обязательствами страны в рамках межгосударственных соглашений в стране взят курс на обеспечение низкоуглеродного развития экономики и энергетики. В настоящее время ощущается необходимость в создании и развитии необходимых условий и механизмов для достижения целей низкоуглеродного развития, а руководство страны проводит активную работу по их формированию. Сегодня остро стоит вопрос недостаточной методической проработке проблем в энергетическом комплексе в целом с системной точки зрения. Зачастую важные составные части государственных программ (стратегий) низкоуглеродного развития. Быстрая трансформация технологий, появление новых требований к принятию долгосрочных решений вызывают острую необходимость формирования систем энергетики в соответствии с поставленными целями низкоуглеродного развития. Еще острее нестыковки общенациональных, отраслевых и корпоративных программ "зеленого" развития проявляются на региональном уровне.

При данной постановке задачи формирования системы регулирования и стратегического управления низкоуглеродное развитие переходит из теоретической в практическую и прикладную плоскость (как это происходит в настоящее время в странах ЕС, США, Китая и других странах, заявивших о переходе на низкоуглеродный путь развития), а ответственность за результат делится между национальным, отраслевым, региональными уровнями и корпоративным сектором. Изучение зарубежного опыта и использование системного подхода к анализу результативности применяемых в разных странах и разных условиях механизмов создает основы для успешного решения поставленных задач по низкоуглеродному развитию в России. В настоящей статье делается попытка систематизировать лучшие зарубежные практики формирования и реализации подходов к решению задач низкоуглеродного развития и оценивается возможность их применения для российских условий.

## ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРЕНД – ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГОБАЛАНСА

Мировая энергетическая система сегодня находится на пороге фундаментальных изменений, что обычно называют "энергетическим переходом" (Energy Transition). Настоящий энергопереход – это уже четвертая существенная трансформация мирового энергетического сектора. Если взглянуть на количественную оценку энергоперехода, то обычно он подразумевает 10% сокращение потребления определенного ресурса за десять лет. В настоящее время основной вектор изменений уже отчетливо виден благодаря корректировкам государственных энергетических политик, развитию новых и совершенствованию уже существующих технологий. Сегодня мир переходит к использованию ВИЭ<sup>1</sup>. Среди драйверов трансформации можно отметить: климатическую повестку и цели декарбонизации, стремление к повышению энергобезопасности и диверсификации источников энергии, технологический прогресс и разработку решений, направленных на повышение эффективности энергетического сектора и изменение его функционирования<sup>2</sup>.

В ВР Energy Outlook 2020 выделено три прогнозных сценария развития мировой энергетики до 2050 г.<sup>3</sup> Первый – The Rapid Transition Scenario (Rapid), предполагающий сокращение выбросов  $CO_2$  на 70% к 2050 году в результате имплементации государственных политик с целью достижения, показателей, указанных в Парижском соглашении, которое было принято 12 декабря 2015 года 21-й сессией Конференции Сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций (ООН) об изменении климата<sup>4</sup>. Второй – The Net Zero Scenario (Net Zero), согласно которому помимо государственных мер, указанных в Rapid, произойдет изменение общественного сознания в потреблении энергии, что приведет к 95% сокращению выбросов СО<sub>2</sub>. Третий сценарий, The Business-as-usual Scenario (BAU), предполагает, что тенденция на развитие технологий и использования энергии сохранится, а сокращение выбросов достигнет лишь 10%. Важно отметить, что несмотря на то, что все три сценария базируются на разных предпосылках о развитии государственных энергетических политик, а также на социальных предпочтениях, все они отмечают рост доли ветряной и солнечной энергии и значимое место уделяется водороду как новому источнику чистой энергии. Например, согласно сценариям Rapid и Net Zero ожидается рост цен на

 <sup>2</sup> Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулаги-на; ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО. М.: 2019. 210 с.
 3 ВР (2020) World Energy Outlook 2020. Вытегия СКОЛКОВО. М.: 2019. 210 с. <sup>1</sup> BP. (2019). World Energy Outlook 2019. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-eco-

BP. (2020). World Energy Outlook 2020. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html (дата обращения: 12.10.2020).

United Nations. (2015). The Paris Agreement. Retrieved from https://unfccc.int/process-and-meetings/the-parisagreement/the-paris-agreement (дата обращения: 12.12.2021).

углероды (до 250 долл. за тонну  $CO_2$  в развитых странах)<sup>5</sup>. Подобное изменение вероятнее всего спровоцирует переход к низкоуглеродным источникам энергии и сделает еще больший акцент на повышении энергоэффективности.

В целом реструктуризация глобальной энергетической системы включает в себя несколько аспектов. Во-первых, в ближайшие 30 лет ожидается существенный переход от нефти, природного газа и угля к возобновляемым источникам энергии. Во-вторых, энергобаланс станет более диверсифицированным, а также усилится конкуренция между различными источниками энергии<sup>6</sup>. Если говорить о переходе к ВИЭ, то стоит обратить внимание на ожидаемые изменения в структуре спроса на энергоресурсы в разных странах. Так, например, если сегодня энергобаланс стран ЕС и США смещен в сторону природного газа и нефти, то в Индии и Китае наблюдается значительное использование угля (55–60% первичной энергии). Подобные отличия обусловлены многими факторами, такими как уровень экономического развития той или иной страны, стоимость и доступность источников энергии. По прогнозам ВР к 2050 г. ожидается переход к низкоуглеродной энергетической системе. Таким образом, доля природного газа в энергобалансе ЕС, США, Индии и Китае составит от 15 до 25%, доля нефти сократится во всех рассматриваемых странах до примерно 18%, а ВИЭ станут крупнейшими поставщиками энергии, обеспечивая от 45 до 55% энергии<sup>7</sup>.

Таким образом, последнее десятилетие ознаменовано переориентацией государственных политик в области энергетики на низкоуглеродный путь развития, а после принятия Парижского соглашения по климату<sup>8</sup> в 2015 г. практически все страны мира поставили амбициозные цели по достижению углеродной нейтральности к 2050 г. В рамках данного исследования проведен анализ практик стран-лидеров Европы по инвестированию в низкоуглеродные технологии и их внедрению (а именно – Германия, Франция, Великобритания и Норвегия), а также практик Канады и Китая. Китай интересен как лидер по объемам выбросов  $CO_2$ , которому удалось добиться значительного сокращения загрязнения атмосферы в результате реализации государственной политики, а Канада рассмотрена с точки зрения принятия решений на уровне провинций.

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ ФИНАНСОВЫЕ И РЕГУЛЯТОРНЫЕ УСИЛИЯ

В целях достижения климатической нейтральности в перечисленных странах основные изменения наблюдаются в области финансовой поддержки мер, направленных на борьбу с изменением климата, в налоговой и ценовой политике, законодательстве и научно-исследовательских программах. Был проведен анализ основных отраслей инфраструктуры, и выделены как общие тенденции, так и страновые особенности, которые можно объяснить с точки зрения геоэкономики.

С точки зрения общих международных тенденций отмечается вектор финансирования **проектов по повышению энергоэффективности и использованию ВИЭ**. Например, Всемирный банк, организация, созданная в целях финансовой и технической поддержки развивающихся стран, активно поддерживает проекты, связанные с изменением климата, причем большинство из них приходится на регион Юго-восточной Азии и Индию (доля проектов, направленных на борьбу с изменением климата, составляет 16.7% от общего числа проектов в энергетическом секторе)<sup>9</sup>. Помимо этого,

важнейшим драйвером климатической повестки на международном уровне является ООН,

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> BP. (2020). World Energy Outlook 2020. Opt. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>o</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> United Nations. (2015). The Paris Agreement. Opt. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> World Bank. Projects. Retrieved from: https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/projects-summary? mjsectorcode\_exact=LX (дата обращения: 12.12.2021).

в рамках которой проводятся регулярные диалоги высокого уровня, саммиты и региональные климатические недели. Согласно положениям Парижского соглашения необходимо привести финансовые потоки в соответствии с траекторией развития, характеризующейся низким уровнем выбросов СО<sub>2</sub>, таким образом страны, ратифицировавшие Парижское соглашение, признали необходимость дополнительных инвестиций в низкоуглеродные технологии. Сегодня же данный вектор находит отражение в инвестиционной политике на национальном уровне. По словам Марка Карни, бывшего управляющего Банка Англии, постепенно формируется новая финансовая система, построенная на инвестирование в устойчивые проекты. Это в свою очередь, а также ввиду неразвитости государственного регулирования в области раскрытия финансовой информации, связанной с изменением климата, усиливает активности некоммерческих организаций и механизмов, таких как TCFD (The FSB Task Force on Climate-related Financial Disclosures)<sup>10</sup>. Они разрабатывают рекомендации по раскрытию информации о финансовых рисках, которые возникают в связи с глобальным изменением климата, что в дальнейшем оказывает влияние на решение банков о предоставлении или непредставлении финансовой поддержки компаний. При этом активная совместная работа финансовых регулирующих органов продолжает развиваться, а Сеть по экологизации финансовой системы (NGFS) сегодня в этих целях объединяет центральные банки, финансовые регулирующие органы и органы власти<sup>11</sup>.

## ПОЛИТИКА НА ОБЩЕЕВРОПЕЙСКОМ УРОВНЕ

Рассматривая общеевропейские меры, следует констатировать, что в ЕС на данный момент сформировалась более зрелая экосистема низкоуглеродной энергетики, чем в Российской Федерации. Это обусловлено не только гораздо большим количеством пилотных проектов с использованием технологий на основе ВИЭ, объемами инвестирования и поддержкой зеленых движений со стороны правительств, но и активно формирующимся регуляторным режимом, что, как отмечается во всех низкоуглеродных стратегиях стран Европы, является ключевым элементом для успешного функционирования отрасли. Например, благодаря работе Еврокомиссии на уровне ЕС была создана общая система классификации устойчивой экономической деятельности компаний, получившая название "*таксономия EC*"<sup>12</sup>. Она является важным фактором, способствующим расширению устойчивых инвестиций и реализации Европейской зеленой сделки через четкое определение критериев, на основании которых экономическая деятельность может считаться экологически устойчивой.

С точки зрения воздействия ценовой политики на рынок нельзя не отметить *Европейскую систему торговли квотами на выбросы (EU Emissions Trading System – EU ETS)*, первая фаза которой началась еще в 2005 г. и с тех пор охватила все страны ЕС, Лихтенштейн и Норвегию<sup>13</sup>. Сегодня EU ETS охватывает выбросы примерно от 10 тыс. установок в энергетическом секторе, обрабатывающей промышленности и авиации, что составляет порядка 40% выбросов CO<sub>2</sub> в EC. Сейчас функционирует четвертая фаза (2021–2030 гг.), при подготовке которой в 2018 г. были приняты реформы по кор-

 <sup>&</sup>lt;sup>10</sup> TCFD Implementation Guide. Sustainability Accounting Standards Board, Climate Disclosure Standards Board. 12.12.2021. Retrieved from: https://www.cdsb.net/task-force/901/cdsb-and-sasb-release-tcfd-implementation-guide (дата обращения: 12.12.2021).
 <sup>11</sup> The Central Banks and Supervisors Network for Greening the Financial System (NGFS). Origin of the Network

 <sup>&</sup>lt;sup>11</sup> The Central Banks and Supervisors Network for Greening the Financial System (NGFS). Origin of the Network for Greening the Financial System. Retrieved from: https://www.ngfs.net/en/about-us/governance/origin-and-purpose (дата обращения: 12.12.2021).
 <sup>12</sup> Цит. по: European Commission. EU Taxonomy foe sustainable activities. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Цит. по: European Commission. EU Taxonomy foe sustainable activities. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/ business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities\_en (дата обращения: 13.12.2021).

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Kruger J., Pizer W. A. (2004). The EU emissions trading directive: Opportunities and potential pitfalls. Washington, DC: Resources for the Future.

ректировке целевых показателей сокращения выбросов к 2030 г. EU ETS работает по принципу торговли в рамках установленных ограничений, т.е. сначала устанавливается годовой объем допустимых выбросов, который распределяется между компаниями различных отраслей. В случае, если предприятие нуждается в дополнительных квотах,

оно может приобрести их на вторичном рынке<sup>14</sup>. Наиболее развитым аналогом европейской системы, согласно отчету МЭА, является Национальная система торговли выбросами Китая, которая начала функционировать в июле 2021 года и с тех пор является крупнейшей в мире системой. На ее долю приходится почти 50% всех выбросов, регулируемых ETS по всему миру. Программа разработана на основе функционирования 8 региональных пилотных схем. Эти региональные ETS, которые сегодня продолжают действовать параллельно с национальной ETS, добились успехов в поощрении мер по снижению выбросов и развитии опыта в области управления выбросами. Цены были установлены в диапазоне от 1.5 до 14.5 долларов США за тонну  $CO_2$  (10–100 юаней за тонну). На текущий момент нормы выбросов в национальных ETS распределяются для электростанций, работающих на угле и газе в соответствии с их производительностью в 2019 и 2020 гг. и заранее определенными контрольными показателями интенсивности выбросов (в тоннах СО<sub>2</sub>/т СО<sub>2</sub>/МВтч для электроэнергии и СО<sub>2</sub>/ГДж для выработки тепла) для каждого вида топлива и типа установки. Таким образом, ЕТ требует доработки и процесс ее совершенствования продолжается.

## НАШИОНАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ПО ОСНОВНЫМ ОТРАСЛЯМ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рассматривая практики низкоуглеродного развития, применяемые государствами на национальном уровне, для систематизации информации меры были сгруппированы по основным отраслям инфраструктуры, а именно – транспортный сектор, промышленность, электроэнергетика, ядерная энергия и жилой сектор. Как было отмечено ранее, рассмотрены лидеры низкоуглеродного развития Европы (Германия, Великобритания, Норвегия и Франция), а также Китай и Канада.

Наибольший прогресс на текущий момент наблюдается в *транспортном секторе*. В рассматриваемых странах уже введены в эксплуатацию электромобили, активно развивается транспорт на водороде, расширяется инфраструктура водородных заправок. Наряду с этим правительства оказывают финансовую поддержку переходу на низкоуглеродные виды транспорта, субсидируя в том числе авиацию и морские перевозки. Так, например, в Китае происходит модернизация городского планирования с целью сокращения продолжительности поездок. В новых городах специальным образом проектируется транспортная среда, а наиболее востребованные маршруты модернизируются за счет высокоскоростных железнодорожных путей и внедрения электробусов, грузовиков и локомотивов на топливных элементах, что создает предпосылки для более быстрой декарбонизации.

В электроэнергетике наблюдается рост солнечной фотоэлектрической и ветровой энергии, существует потребность в 385 ГВт установленной фотоэлектрической мощности и 145 и 70 ГВт ветра на суше и на море соответственно к 2045 г. Эти объемы обуславливают активное развитие солнечных и ветровых парков в регионах, пригодных для развертывания подобных технологий. Так, например, частная британская компания по инвестициям и управлению активами "Low Carbon" имеет внушительный список проектов по выработке более 2.7 ГВт солнечной энергии, которые могут компенсировать более 600000 тонн CO<sub>2</sub> ежегодно<sup>15</sup>. Одновременно с этим поставщикам элек-

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS). Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/euaction/eu-emissions-trading-system-eu-ets\_en (дата обращения: 13.12.2021). <sup>15</sup> Low Carbon Investment Management Ltd. UK Solar. Retrieved from: https://www.lowcarbon.com/development/

case-studies/solar-energy/ (дата обращения: 23.11.2021).

троэнергии Великобритании предоставляют льготные тарифы (FITs), поддерживая солнечную фотоэлектрическую энергию, энергию ветра, гидроэнергетику и установки микро-когенерации мощностью менее 2 киловатт.

Функционирует система контрактов на разницу (CFD), что в настоящее время является основным механизмом поддержки новых крупномасштабных проектов по производству низкоуглеродной энергии. Контракты заключаются между генератором электроэнергии и государственной компанией по низкоуглеродным контрактам. Генераторам-победителям гарантируется определенная цена на электроэнергию на протяжении всего долгосрочного контракта.

Также отмечается система так называемых "Сертификатов происхождения", заключающаяся в обеспечении прозрачности для потребителей в отношении доли электроэнергии, которую поставщики получают из ВИЭ. Основное требование к лицензированным поставщикам электроэнергии раскрывать потребителям смесь видов топлива (уголь, газ, ядерное, возобновляемое и др.), используемых для производства поставляемой электроэнергии.

В качестве еще одного направления трансформации отмечается развертывание новых ядерных мощностей. Ядерная энергетика является одним из источников электроэнергии с низким содержанием углерода, однако в текущих условиях мощность АЭС в мире к 2040 г. составит 582 ГВт, что на 148 ГВт меньше необходимого уровня, установленного в "Net Zero Emissions by 2050 Scenario" (NZE), подготовленного МЭА<sup>16</sup>. Для достижения необходимого уровня одной из мер является разработка малых модульных реакторов высокой мощности (SMR) и принятие политических мер поддержки. Сегодня в мире существует около 50 проектов и концепций малых модульных реакторов. Наибольшая заинтересованность в разработке технологий среди стран Европы наблюдается во Франции. Летом 2021 г. Эмманюэль Макрон объявил о планах инвестирования в развитие ядерных мини-реакторов. По его словам, эта мера поможет Франции производить большее энергии, при этом не увеличивая объемы выбросов. С 2019 г. ведется работа над проектом малого модульного реактора NUWARD, которым занимается French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), EDF, Naval Group и TechnicAtome. Также французское Правительство поддерживает разработки государственно контролируемому предприятию Electricite de France SA, а разработанная к 2030 г. технология будет впоследствии проецироваться на регионы.

**Промышленные объекты,** работающие на основе традиционных источников энергии, к 2030 г. на 50% будут переведены на использование ВИЭ. А в Германии доменные печи, у которых завершается срок эксплуатации, заменят установками прямого восстановления, работающими в преимущественно на водороде<sup>17</sup>. Также в промышленном секторе активно развивается использование технологий улавливания и хранения углерода (CCS) и вводится налогообложение выбросов CO<sub>2</sub>. В данном контексте система торговли выбросами EC (ETS) является наиболее развитым примером подобной практики. Однако в Китае с июля 2021 г. уже функционируют собственный общенациональный и 8 региональных аналогов. Цены установлены в диапазоне от 1.5 до 14.5 долларов США за тонну CO<sub>2</sub><sup>18</sup>.

В жилом секторе основной упор сделан на модернизацию строительства и использование более энергоемких материалов, ужесточение стандартов энергоэффективности зданий. Так, например, в Китае новые технологии строительства позволят сокра-

 <sup>&</sup>lt;sup>16</sup> International Energy Agency (IEA). Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Retrieved from: https://www.iea.org/re-ports/world-energy-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze (дата обращения: 23.11.2021).
 <sup>17</sup> International Energy Agency (IEA). Germany 2020. Energy Policy Review. February 2020. Retrieved from:

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> International Energy Agency (IEA). Germany 2020. Energy Policy Review. February 2020. Retrieved from: https://www.iea.org/reports/renewables-2020 (дата обращения: 23.11.2021).

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> International Energy Agency (IEA). An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. September 2021. Retrieved from: https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china (дата обращения: 23.11.2021).

тить потребление энергии на 5% к 2030 г. Более того, происходит пересмотр стандарта оценки зеленых зданий GB/T 50378-2019<sup>19</sup> и переход на технологии отопления с низким содержанием углерода (увеличивается доля тепловых насосов, основанных на прямых ВИЭ, т.е. котлов на биомассе, солнечных тепловых и геотермальных). Средняя энергоэффективность нового теплового оборудования возрастет со 120% до 245% к 2030 г. К тому же такие технологии позволяют продлевать срок службы зданий, что снижает потребность в повторном более материалоемком строительстве. Также в рассмотренных странах особое внимание уделяется сокращению объемов отопления природным газом. В Нидерландах, например, меры, поддерживающие переход на низкоуглеродное отопление, включают создание "Программы районов, свободных от природного газа", целью которой является отключение 1.5 млн домов от газового отопления к 2030 г. Также с 2015 г. в стране существует требование о наличии у зданий Сертификатов энергоэффективности (EPCS), которые застройщик получает при строительстве, продаже или аренде. EPCS предоставляют информацию об энергоэффективности строения здания и выдаются сертифицированным консультантом, при этом некоторые категории зданий, такие как исторические и религиозные постройки, освобождаются от данного требования. Аналогичные меры принимаются и в Великобритании, где государство финансирует расширение тепловых сетей и разработку новых энергоэффективных и отопительных технологий через "Heat Networks Delivery Unit"<sup>20</sup>.

Отдельно стоит отметить принцип формирования низкоуглеродной политики в Канаде, так как здесь меры принимаются преимущественно не на национальном уровне, а на уровне провинций. Примечательно, что Канада обладает одной из самых чистых систем электроснабжения в мире, так как 80% электроэнергии поступает из источников с нулевым уровнем выбросов. Отличительной особенностью политики Канады является то, что существует общий главный документ на федеральном уровне, так, например, в стране действует Пан-канадская рамочная программа по чистому росту и изменению климата (Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change), опубликованная в 2017 г.<sup>21</sup> А в соответствии с федеральными актами провинции принимают собственные меры в зависимости от уровня готовности к трансформации. Рассмотрим некоторые из функционирующих мер. Три провинции Канады (Альберта, Британская Колумбия и Квебек), на территории которых сконцентрировано около половины населения страны, уже имеют свой аналог торговли углеродными единицами. Например, в Альберте с 2017 г. действует углеродный налог на потребление ископаемого топлива, изначально установленный на уровне 20 долл. США за метрическую тонну двуокиси углерода, и в 2018 г. достиг уровня 30 долл. США за тонну<sup>22</sup>. Британская Колумбия ввела аналогичный налог в 2018 г., первоначально он составлял 10 долл. США за тонну двуокиси углерода и каждый год сумма увеличивается на 5 долл. США. На рынке электроэнергии в Канаде четыре провинции – Альберта, Британская Колумбия, Нью-Брансуик и Саскачеван – требуют от электроэнергетических компаний поставлять определенную долю электроэнергии, полученной из ВИЭ (доля разнится от 30 до 93% к 2030 г.)<sup>23</sup>. Также после обновления правил федеральным Правительством Канады в 2018 г. все провинции обязуются отказаться от традиционных

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> International Energy Agency (IEA). GB/T 50378-2019 Assessment standard for green buildings. Retrieved from: https://www.iea.org/policies/8507-gbt-50378-2019-assessment-standard-for-green-buildings-revision (gara ofpaщения: 23.11.2021).

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> GOV.UK. Heat Networks Delivery Unit. Guidance. Retrieved from: https://www.gov.uk/guidance/heat-networksdelivery-unit (arta ofpamehus: 15.12.2021). <sup>21</sup> Government of Canada. Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change. Retrieved from:

https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/pan-canadian-framework.html (дата обращения: 12.12.2021).

Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Там же.

установок, работающих на угле, к 2030 г. Согласно обновленным правилам требуют, угольные установки должны соответствовать стандарту производительности в 420 метрических тонн углекислого газа на ГВтч и быть выведены из эксплуатации по истечении 50 лет службы. Провинция Онтарио еще в 2014 г. прекратила работу угольных электростанций, а Альберта планирует постепенно завершить использование к 2030 г. Однако не всегда законодательные инициативы спускаются от федерального правительства к провинциям, в транспортном секторе стандарт на возобновляемое топливо (CFS)<sup>24</sup>, принятый на федеральном уровне в 2017 г., был основан на опыте пяти провинций (Альберты, Британской Колумбии, Манитобы, Онтарио и Саскачевана).

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ И НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ РАЗВИТИЕ

Распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р "Во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 "О сокращении выбросов парниковых газов" была утверждена Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (далее – Стратегия).

Стратегия намного амбициознее представленных ранее — в частности, предполагает достижение углеродной нейтральности страны к 2060 г., выбирает приоритетом интенсивный сценарий, предполагающий снижение выбросов парниковых газов на 79% к 2050 г., и впервые связывает низкоуглеродную трансформацию в РФ с экономическим ростом. Эта версия (уже третья) — самая амбициозная из всех, а из четырех сценариев прежних проектов в ней осталось только два: инерционный и целевой (интенсивный), который и предлагается как основной.

Интенсивный сценарий предполагает рост выбросов до 2030 г. лишь на 0.6% и их снижение на 79% от нынешнего уровня (и на 89% от уровня 1990 г.) к 2050 г. Одновременно учтен и сильный рост поглощающей способности экосистем в 2.2 раза (за счет мер в лесном и сельском хозяйстве), что, впрочем, ниже, чем в прежних версиях стратегии. Падение нефтегазового экспорта на уровне 2% в год в реальном выражении с 2030 г. будет сопровождать рост ненефтегазовых поставок на 4.3% в год, а темпы роста экономики в 2030–2050 годах составят 3% и замедлятся до 2.7% к концу 2040-х годов. Достижение углеродной нейтральности РФ предполагается к 2060 г., но, возможно, и ранее. Среди мер снижения выбросов упомянуты углеродное ценообразование (система квотирования, внедрение нормативов, стимулирование низкоуглеродных технологий, корректировка НДПИ), развитие зеленого финансирования и поддержка распространения сертификатов происхождения энергии, а также развитие системы публичной нефинансовой отчетности. Реализация такого сценария потребует совокупных инвестиций в снижение выбросов в размере 1% ВВП в 2022–2030 годах и 1.5–2% ВВП в 2031–2050 гг.

В инерционном сценарии выбросы, напротив, растут на 8% к 2030 г. и на 25% к 2050 г. (от нынешнего) при неизменной поглощающей способности лесов. Совокупная чистая эмиссия парниковых газов в 2021–2050 гг. в этом сценарии окажется выше, чем в ЕС (что противоречит президентскому поручению), углеродоемкость экономики РФ превысит среднемировые показатели к 2050 г., а углеродная нейтральность достигнута не будет. С 2027 г. российскую экономику ожидает падение нефтегазовых доходов на 2.7% в год, не компенсированное расширением ненефтегазового экспорта, а рост ВВП в 2030–2050 гг. составит 1.5% и к 2050 году замедлится до 1%.

Обращает на себя внимание достаточно осторожное отношение разработчиков российских государственных программ "зеленого" развития к постановке амбициозных

67

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Government of Canada. The Clean Fuel Standard (CFS). Retrieved from: https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-pollution/energy-production/fuel-regulations/clean-fuel-standard.html (дата обращения: 12.12.2021).

целей и их замедленное (по сравнению с большинством стран COP26) достижение. Очевидно, что имеет место низкая мотивация органов управления российской энергетикой в борьбе за изменение климата и стремление к реализации конкурентных преимуществ России в сфере реализации потенциала торговли углеводородами на мировых рынках по крайней мере в обозримой перспективе.

Тем не менее глобальные тенденции, прежде всего Европейский "зеленый курс", уже оказывают серьезное влияние на принятие решений в российском законодательстве, стимулируют рост заинтересованности в адаптации к новым правилам игры и использованию лучших практик зарубежного опыта в области низкоуглеродного развития на федеральном, отраслевом, региональном и корпоративном уровнях.

### выводы

Сегодня в Российской Федерации растет интерес к изучению и применению практик зарубежных стран в области низкоуглеродного развития. Опираясь на полученные в ходе исследования данные о степени и условиях реализации различного рода мер поддержек финансового и нефинансового характера в странах Европы, Китае и Канаде, можно выделить направления деятельности наиболее перспективные для Российской Федерации в настоящее время и в ближайшей перспективе. В первую очередь, необходимо уделить особое внимание развитию "зеленой" таксономии, и, несмотря на то что в Российской Федерации уже принимаются попытки по формированию зеленой таксономии, эта работа нуждается в более комплексных и системных подходах. В энергетическом секторе продолжают оставаться актуальными проблемы интенсификации программ энергоэффективности и ускорения перехода на низкоулеродные технологии. Это может быть реализовано за счет оказания финансовых стимулов и предоставления льготных условий для предприятий, реализующих подобные программы. В свою очередь финансовые инструменты регулирования "зеленого" развития также нуждаются в постоянной доработке, модернизации и могут быть переняты у стран, которые уже успешно вводят подобные меры. Более того, необходима адаптация к идеологии и целям "устойчивого развития" и ESG на национальном, региональном и корпоративном уровнях. Эта политика должна проходить сквозной линией от федерального уровня до отдельных предприятий посредством различного рода стимулов и мероприятий, показывающих, почему приверженность устойчивому тренду может быть выгодна как для отдельных компаний, так и для государства в целом. Наряду с перечисленными мерами Российская Федерация может использовать свой технологический потенциал, совершенствовать системы учета и мониторинга выбросов различными источниками, делать их более технологичными, включая в работу IT-специалистов, которые сегодня успешно демонстрируют свои компетенции в разных направлениях. Наконец. еше одной особенностью России в условиях низкоуглеродного развития является огромный потенциал поглощения парниковых газов, их улавливания и хранения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- BP. (2019). World Energy Outlook 2019. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/ energy-economics/energy-outlook.html (дата обращения: 12.12.2021).
- BP. (2020). World Energy Outlook 2020. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/ energy-economics/energy-outlook.html (дата обращения: 12.10.2020).
- 3. European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS). Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\_en (дата обращения: 13.12.2021)
- 4. European Commission. EU Taxonomy foe sustainable activities. Retrieved from https://ec.europa. eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities en (дата обращения: 13.12.2021).
- GOV.UK. Heat Networks Delivery Unit. Guidance. Retrieved from: https://www.gov.uk/guidance/ heat-networks-delivery-unit (дата обращения: 15.12.2021).

- Government of Canada. Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change. Retrieved from: https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/pan-canadian-framework. html (дата обращения: 12.12.2021).
- Government of Canada. The Clean Fuel Standard (CFS). Retrieved from: https://www.canada.ca/ en/environment-climate-change/services/managing-pollution/energy-production/fuel-regulations/ clean-fuel-standard.html (дата обращения: 12.12.2021).
- International Energy Agency (IEA). An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. September 2021. Retrieved from: https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbonneutrality-in-china (дата обращения: 23.11.2021).
- 9. International Energy Agency (IEA). GB/T 50378-2019 Assessment standard for green buildings. Retrieved from: https://www.iea.org/policies/8507-gbt-50378-2019-assessment-standard-forgreen-buildings-revision (дата обращения: 23.11.2021).
- 10. International Energy Agency (IEA). Germany 2020. Energy Policy Review. February 2020. Retrieved from: https://www.iea.org/reports/renewables-2020 (дата обращения: 23.11.2021).
- International Energy Agency (IEA). Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Retrieved from: https://www.iea.org/reports/world-energy-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze (дата обращения: 23.11.2021).
- 12. *Kruger J., Pizer W.A.* (2004). The EU emissions trading directive: Opportunities and potential pitfalls. Washington, DC: Resources for the Future.
- 13. Low Carbon Investment Management Ltd. UK Solar. Retrieved from: https://www.lowcarbon. com/development/case-studies/solar-energy/ (дата обращения: 23.11.2021).
- TCFD Implementation Guide. Sustainability Accounting Standards Board, Climate Disclosure Standards Board. 12.12.2021. Retrieved from: https://www.cdsb.net/task-force/901/cdsb-andsasb-release-tcfd-implementation-guide (дата обращения: 12.12.2021).
- 15. The Central Banks and Supervisors Network for Greening the Financial System (NGFS). Origin of the Network for Greening the Financial System. Retrieved from: https://www.ngfs.net/en/about-us/governance/origin-and-purpose (дата обращения: 12.12.2021).
- United Nations. (2015). The Paris Agreement. Retrieved from https://unfccc.int/process-andmeetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement (дата обращения: 12.12.2021).
- World Bank. Projects. Retrieved from: https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/ projects-summary?mjsectorcode\_exact=LX (дата обращения: 12.12.2021).
- Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО. М.: 2019. 210 с.

## The World's Best Practices of Low-Carbon Development of Key Infrastructure Industries

# S. K. Anoshina<sup>a</sup>, \*, V. L. Likhachev<sup>a</sup>, \*\*, and A. A. Anoshin<sup>b</sup>, \*\*\*

<sup>a</sup> Institute of Economics and Regulation of Infrastructure Industries of the HSE, Moscow, Russia <sup>b</sup> Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Moscow, Russia

> \*e-mail: sanoshina@hse.ru \*\*e-mail: vl.likhachev@hse.ru \*\*\*e-mail: anoshinaa@economy.gov.ru

In connection with the signing of the Paris Agreement on Climate Change in 2015, the countries of the world are forced to form new plans for the development of the energy sector, considering the commitments made. This article examines and systematizes the best foreign practices of formation and implementation of approaches to solving problems of low-carbon development, provides an assessment of the possibility of their application for Russian conditions. The issue of transformation of the energy balance and, as a consequence, the formation and development of new non-traditional renewable energy industries is considered. The processes have been studied both at the level of individual leading countries in this area, broken down by major infrastructure sectors, and at the international level, taking into account the financial, regulatory and political aspects of this issue.

*Keywords:* low-carbon development, decarbonization issues, energy policy, green taxonomy, government support measures, unconventional renewable electricity, environmentally friendly production processes

УДК 621.313.1533.9

## ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ПЕРЕДВИЖНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

© 2022 г. А. А. Сафронов<sup>1</sup>, В. Е. Кузнецов<sup>1</sup>, Ю. Д. Дудник<sup>1</sup>, \*, В. Н. Ширяев<sup>1</sup>, О. Б. Васильева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия \*e-mail: julia\_dudnik-s@mail.ru

> Поступила в редакцию 09.12.2021 г. После доработки 02.02.2022 г. Принята к публикации 15.02.2022 г.

В работе рассматриваются вопросы электропитания плазменной установки от мобильной дизель электрической станции с синхронным генератором. Приведено описание плазмохимической установки. Получены основные соотношения параметров источника питания плазмотрона и параметров синхронного генератора. Рассмотрены физические процессы в плазменном реакторе. Приведены результаты ряда экспериментов, полученных в процессе отладки работоспособности плазмохимической установки.

*Ключевые слова:* плазмотрон, источник питания, автономная энергетическая установка, синхронный генератор

DOI: 10.31857/S0002331022030050

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Плазменные установки на основе плазмотронов переменного тока [1–4] с рельсовыми электродами нашли широкое применение в технологиях для переработки фторхлор содержащих веществ.

Как правило, для сокращения эксплуатационных затрат и обеспечения безопасности процесса, установки создаются в районе складирования данных веществ [5–8]. Технологические площадки не всегда могут обеспечить плазменную установку электропитанием, поэтому требуются автономные источники, где в качестве привода используются дизели, газопоршневые двигатели и микротурбины.

## ОПИСАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ

ИЭЭ РАН была разработана и построена установка для комплексной переработки и утилизации фтор-хлор содержащих веществ. На рис. 1 приведена фотография установки с плазменным реактором печного типа и тройной системой очистки с нейтрализацией отходящих газов.

Как указано выше, установка включает в себя плазмохимический реактор, выполненный в виде стального цилиндра футерованного внутри высокотемпературной керамикой на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Максимальная температура на стенках реактора может достигать ~1600°С. В нижней части реактора вертикально расположен плазмотрон переменного тока с рельсовыми электродами мощностью до 300 кВт, рас-



Рис. 1. Внешний вид установки по переработке токсичных веществ.

ход плазмообразующего газа до 30 г/с. В качестве рабочего газа может использоваться воздух или азот. В струе плазмы среднемассовая температура варьировалась от 1500 до 4000 K, смесь рабочего газа с частицами перерабатываемого вещества, средний размер которых составлял ~150 мм, подавалась тангенциально к вертикальной оси реактора. При необходимости в реактор дополнительно подавался воздух. Органическая часть подаваемого материала подвергалась высокотемпературному окислению, а тяжелая, неорганическая часть нейтрализовалась в струе плазмы, выносилась в периферическую зону реактора и опускалась в его нижнюю часть, в объем, наполненный водой. Образовавшиеся газы поступали из реактора через газоотвод в скруббер Вентури и через фильтры в дымовую трубу, орошающие щелочные растворы собирались в скруб-берный бак.

Плазмотрон переменного тока с рельсовыми электродами [9, 10], используемый в данной плазменной установке, представлен на рис. 2. Основные составляющие части конструкции: корпус, электроды, выходной фланец с соплом и инжектор.

Корпус с водяным охлаждением изготовлен из нержавеющей стали и представляет собой цилиндр, переходящий в усеченный конус. По его длине расположены три кольца с тангенциальными отверстиями, через которые подается рабочий газ в разрядную камеру. Подача газа осуществляется независимо через каждое кольцо. Выходной фланец так же выполнен из нержавеющей стали и охлаждается водой, его рубашка охлаждения соединена с рубашкой корпуса латунными втулками с кольцевыми резиновыми уплотнениями. Электроды имеют изогнутую форму и могут быть выполнены из медного прутка диаметром 20–40 мм с внутренним отверстием диаметром 8 мм. В них впаяны латунные штуцера, через которые осуществляется крепление



**Рис. 2.** Высоковольтный трехфазный плазмотрон переменного тока: 1 – инжектор; 2 – корпус; 3 – сопло; 4 – электрод.

электрода в корпусе и подача охлаждающей воды. Электрод устанавливается в корпус изнутри через керамический изолятор и фторопластовую втулку, через которую с наружной стороны корпуса вставляется ответный латунный штуцер. Со стороны усеченного конуса корпуса плазмотрона крепится инжектор, выходное сопло которого направлено в область минимального межэлектродного зазора. К штуцерам электродов, расположенным ближе к инжектору, крепятся токоподводящие шины. Технологический ресурс работы электрода (до плановой смены, без вывода установки из эксплуатации) составляет 32 часа.

Напряжение на дугах 180–240 В, линейный ток 450–900 А. Мощность плазмотрона может регулироваться в пределах 180–300 кВт. Место установки и внешний вид плазмотрона представлен на рис. 3.

Плазмохимический реактор, используемый в данной установке, разделен на пять зон, схематично он представлен на рис. 4.

Зона 1 заполнена плазменной струей с температурой до 4000 K, во второй зоне происходит подача перерабатываемых веществ и начинается их взаимодействие с потоком плазмы. В зонах 3–5 протекает основная часть плазмохимических и технологических процессов, на выходе из реактора (зона 5) температура потока снижается до значения ~1400 K.


Рис. 3. Внешний вид плазмотрона.



**Рис. 4.** Рабочие зоны плазмохимического реактора: 1 – струя плазмы; 2 – зона инжекции; 3 – зона окисления; 4 и 5 – добавка воздуха охлаждения газов.

Повышение качества плазмохимического обезвреживания токсичных продуктов по сравнению с обычным сжиганием может быть связано с рядом особенностей, присущих плазменному методу.

Хорошо известно, что ионизованные частицы плазмы сами являются химически активными и способны генерировать химически активные частицы (радикалы) при



**Рис. 5.** Схема источника питания: ДГ – дизель-генератор; СГ – синхронный генератор;  $L_1 - L_3$  – токоограничивающие реакторы.

столкновении с нейтральными молекулами. При временах подвода плазмы к зоне реакции меньших, чем время жизни радикалов, можно ожидать существенную интенсификацию химических процессов [11]. Более высокая среднемассовая температура в плазмохимическом реакторе способствует и повышению температуры стенок. В результате этого уменьшается количество не прореагировавшего вещества или количество побочных продуктов вследствие исчезновения более холодных зон вблизи стенок. Подача в реактор горячего, а не холодного (как при сжигании), воздуха уменьшает объем холодных (не реакционных) зон внутри реактора.

При высоких температурах в плазмохимических реакторах, химические процессы протекают с очень большой скоростью и не лимитируют скорость суммарного процесса. Определяющими являются более медленные в данных условиях процессы переноса реагирующих веществ в зону реакции [12].

# ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 5 приведена электрическая схема источника питания плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами [13, 14].

Схема включает в себя три токоограничивающих реактора с отпайками, позволяющая регулировать ток короткого замыкания от 500 A до 1500 A. Система охлаждения реакторов – водяная. Кроме того, в состав системы источника питания может входить высоковольтный трансформатор с  $E_k > 80\%$  для питания инжектора плазмы.

На рис. 6 приведена фотография источника питания с системой управления.

В качестве источника электроэнергии использовалась серийно выпускаемая дизель-генераторная установка мощностью 800 кВт/1000 кВА [15, 16] с синхронным генератором.

Ток уставки, А	Активное сопротивление	Индуктивность, мГн
500	4.6	1.9
700	3.6	1.37
1000	2	0.9
1500	1	0.6

Таблица 1. Характеристики токоограничивающих реакторов



Рис. 6. Внешний вид источника питания.

# ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим физические процессы, возникающие в синхронном генераторе при питании от дуговой нагрузки.

При выборе электрооборудования должны быть учтены специфические особенности дуговой нагрузки, такие как наличие большого индуктивного сопротивления, требуемая активная мощность плазмотрона  $P_{пл}$  и коэффициент мощности, выбираемый из условия устойчивости горения дуги:

$$\cos\varphi_{\Pi\Pi} = \frac{U_{\Pi\Pi}}{U_{\rm c}},\tag{1}$$

где  $U_{nn}$  – напряжение на дуге плазмотрона;  $U_{c}$  – напряжение хх источника питания.

Рекомендуется для однофазной дуги принимать  $\cos \varphi = 0.45$ . В ходе проведенных экспериментов было установлено, что устойчивая работа трехфазных плазмотронов с рельсовыми электродами достигается при коэффициенте мощности  $\cos \varphi$  в диапазоне 0.2–0.6.

$$U_{\Gamma} = U_{\rm c} = \frac{U_{\rm nn}}{\cos \varphi_{\rm nn}}.$$
 (2)

Если же указанное соотношение не соблюдается, и напряжение генератора выше, чем по формуле (2), то это потребует введения дополнительной токоограничивающей индуктивности, и общий коэффициент мощности окажется ниже. Таким образом, требования к напряжению генератора определяются соотношением (2).

Если же требуется максимально приблизить потребляемую активную мощность плазмотрона к предельной полной мощности, подводимой от генератора или сети, поглощаемая индуктивностями реактивная мощность может быть компенсирована применением косинусных конденсаторов.

Расчет цепи с включенным трехфазным плазмотроном может быть произведен на базе общих соотношений теории трехфазных цепей с учетом рассмотренных выше особенностей.

Дуга плазмотрона представляет собой нелинейный элемент, однако точный учет нелинейного элемента усложняет расчет. Поэтому дугу принято заменять либо эквива-



**Рис. 7.** Эквивалентные схемы генератора с дуговой нагрузкой: а – активным сопротивлением; б – эквивалентным генератором.

лентным активным сопротивлением  $R_{\rm Д}$  (рис. 7а), либо эквивалентной ЭДС  $E_{\rm Д}$  (рис. 7б), не зависящей от величины тока, но совпадающей с ним по фазе.

Реальный режим будет находиться между этими двумя крайними режимами. При расчете все указанные величины рассчитываются для одной фазы. Для схемы рис. 7а ток определяется по формуле:

$$I = \frac{U_{\Gamma}}{\sqrt{(x_{\kappa} + x_{p})^{2} + R_{\Pi}^{2}}}.$$
(3)

Для схемы рис. 76:

$$I = \frac{\sqrt{U_{\Gamma}^2 + U_{\Lambda}^2}}{x_{\kappa} + x_{\rm p}},\tag{4}$$

где

$$U_{\rm II} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} E_{\rm II},\tag{5}$$

 $U_{\rm Д}$  – напряжение на дуги;  $E_{\rm Д}$  – эквивалентная ЭДС;  $x_{\rm K}$  – внутреннее сопротивление источника.

В этом случае  $E_{\rm Д}$  целесообразно представлять эквивалентной синусоидой  $U_{\rm Д}$  (рис. 76). Соответственно мощность в дуге на одну фазу вычисляется в первом случае по формуле:

$$P_{\rm A} = I^2 R_{\rm A},\tag{6}$$



Рис. 8. Диаграмма мощности при питании плазмотрона от генератора.

а во втором случае:

$$P_{\Pi} = U_{\Pi} I, \tag{7}$$

На рис. 8 приведена диаграмма устойчивой работы плазмотрона в зависимости от соотношения активной и реактивной мощности.

По оси ординат отложена величина активной мощности плазмотрона, по оси абсцисс – мнимое значение реактивной мощности.

Полная мощность изображена на диаграмме в виде дуги с радиусом 1. Зона устойчивой работы плазмотрона представлена заштрихованным сектором.

На рис. 9 представлены характерные осциллограммы линейных токов и напряжений на дугах и активной мощности плазмотрона.

Состав отходящих газов	Кокаин, ррт	Марихуана, ррт
Водород	5	10
CO	105	70
CO <sub>2</sub>	8100	54600
Оксиды нитридов	5-8	5
Гидрокарбокаты	10-15	5-10
HCl	<5	<5
Азот	454000	421000
Кислород	63000	62500
Пары воды	400000	451000

Таблица 2. Результаты утилизации опасных веществ



Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений на дуге.

Ниже на рис. 10 приведена вольтамперная характеристика плазмотрона с рельсовыми электродами, рассчитанная по действующим значениям токов и напряжений и усредненная по трем фазам.

В табл. 2 приведены результаты уничтожения кокаина и марихуаны на данной плазмохимической установке. Измерения состава отходящих газов осуществлялись в реальном режиме времени при помощи масс-спектроскопии.

Коэффициент конверсии по HCl достигал 99.9% и по  $NO_x$  – более 90%.



Рис. 10. Вольтамперная характеристика плазмотрона с рельсовыми электродами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали испытания, автономная система электропитания установленной мощностью 800 кВт/1000 кВА с синхронным генератором обеспечивает надежную работу плазменной установки с активной мощностью плазмотрона до 350 кВт. Для возможности использовать плазмотрон с большей мощностью дополнительно необходим компенсатор реактивной мощности.

Из полученных результатов следует, что применение плазменной технологии уничтожения обеспечивает вполне приемлемые показатели по составу отходящих газов. А ее безопасность, производительность, время непрерывной работы, эксплуатационные затраты на переработку опасных отходов позволяют эффективно конкурировать с традиционными методами переработки.

Таким образом экспериментально подтверждено, что плазмохимическая установка на базе трехфазного плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами позволяет использовать ее в автономном режиме с дизель-генераторной станцией мощностью 800 кВт/1000 кВА, что обеспечивает создание передвижных плазменных установок с активной мощностью плазмотрона до 350 кВт и скоростью переработки при подаче реагентов до 100 кг/ч.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.
- Safronov A.A., Vasilieva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N. Research and application of ac plasma torch for the processing of potentially hazardous material // В кн.: Материалы Международной конференции: в 2-х томах. 2017. С. 251–252.
- Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Safronov A.A., Vasilieva O.B., Shiryaev V.N. Application of powerful ac plasma torch with rail electrodes in industrial installations // В кн.: Современные проблемы теплофизики и энергетики. Материалы конференции. 2020. С. 345–346.
- 4. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B. Development and research of possible usage of plasma equipment for syngas production // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. All-Russian scientific conference with international participation "Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers" (TPEAC-2019). 2020. C. 012045.

- 5. Моссэ А.Л., Савченко Г.Э., Савчин В.В., Ложечник А.В. Мобильная плазменная установка для уничтожения токсичных отходов // Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. Вып. 4. С. 56–62.
- 6. *Бернадинер М.Н., Бернадинер И.М.* Высокотемпературная переработка отходов. Плазменные источники энергии / Твердые бытовые отходы. 2011. № 5(59). С. 24–27.
- 7. *Моссе А.Л., Савчин В.В.* Плазменные технологии и устройства для переработки отходов, Минск Изд-во Белорусская наука, 2015. 415 с.
- 8. Fabry F., Rehmet C., Rohani V., Fulcheri L. Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review // Waste and Biomass Valorization. 2013. № 4. P. 421–439.
- 9. Safronov A.A., Vasileva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N., Subbotin D.I., Pavlov A.V. Investigation of the ac plasma torch working conditions for the plasma chemical applications // J. Physics: Conference Series. 2017. V. 825. № 1. P. 012013.
- Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A. Application field and ways to control ac plasma torch with rail electrodes // B c6.: Journal of Physics: Conference Series. 32. Cep. "XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, ELBRUS 2017". 2018. P. 012166.
- 11. *Ефроймович Ю. Е.* Инженерные методы расчёта дуговых печей с учетом нелинейности, вносимой дуговым разрядом // Электричество. 1948. № 12. Р. 43–56.
- Rutberg Ph., Safronov A., Popov S., Surov A., Nakonechny G. Investigation of Voltage and Current Variations in a Multiphase AC Electric Arc System // 12th International Congress on Plasma Physics, ICPP 2004 Nice France, 28–29 October 2004: Book of Abstracts. 2004. P. 106.
- 13. Гончаренко Р.Б., Киселев А.А., Румберг А.Ф., Сафронов А.А. Особенности систем электропитания трехфазных плазмотронов переменного тока // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 3. С. 122–127.
- 14. Рутберг Ф.Г., Гончаренко Р.Б., Кумкова И.И., Сафронов А.А. Особенности плазмотронов переменного тока и выбор их автономных источников электропитания применительно к установкам для получения синтез-газа // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 4. С. 104–115.
- 15. Интернет-ресурс: https://generatory.spb.ru/goods/diesel-caterpillar-c-32-2.html,(USA) Дата обращения 13.11.2021г.
- 16. Интернет-ресурс: https://generatory.spb.ru/goods/diesel-denyo-dca-1100spm.html (Japan) Дата обращения 13.11.2021 г.

#### Possibility of Creation of Mobile Plasma Installations Based on Autonomous Power Sources

# A. A. Safronov<sup>a</sup>, V. E. Kuznetsov<sup>a</sup>, Yu. D. Dudnik<sup>a, \*</sup>, V. N. Shiryaev<sup>a</sup>, and O. B. Vasilieva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia \*e-mail: julia dudnik-s@mail.ru

The paper deals with the problems of power supply of the plasma installation from a mobile diesel power plant with a synchronous generator. The description of the plasma-chemical installation is given. The main relationships between the parameters of the plasma torch power source and the parameters of the synchronous generator are obtained. Physical processes in a plasma reactor are considered. The results of a number of experiments obtained in the process of debugging the operability of the plasma-chemical installation are presented.

Keywords: plasma torch, power source, autonomous power plant, synchronous generator