



Моделирование и исследование в ПО COMSOL Multiphysics электрохимического метода получения водорода для коммунального и бытового применения

Рецензия эксперта на статью получена
14.06.2024 [The expert review of the article
was received on June 14, 2024]

Введение

Одной из важных задач XXI века является борьба с изменением климата. Для достижения среднесрочной цели — не допустить повышения глобальной температуры на 3°C к середине столетия — необходимо добиваться нулевого выброса парниковых газов. В 2019 году был принят план декарбонизации экономики Евросоюза, известный как «Зелёная сделка» (The European Green Deal), в рамках которого поставлена задача перехода от использования ископаемых к возобновляемым источникам энергии и сырья в странах ЕС к 2050 году. В России также были достигнуты высокие темпы развития ВИЭ-генерации. Так, в 2021 году объём ввода в эксплуатацию новых объектов ВИЭ в нашей стране превысил 1,2 ГВт. Начиная с февраля 2022 года цели декарбонизации и темпы развития ВИЭ в России получили дополнительный стимул в виде ускоренного замещения импортных компонентов оборудования российскими [1].

Однако растущие энергетические потребности вряд ли могут быть удовлетворены простой заменой традиционных источников энергии известными ВИЭ, которые характеризуются прерывистостью

характера генерации и проблемой хранения энергии на длительный срок. Технологические процессы производства водорода (H_2) как энергоносителя достаточно стабильны и позволяют минимизировать или полностью исключить выделение парниковых газов. В связи с этим водород, как возобновляемый и экологически безопасный источник энергии, может стать в ближайшее время основной альтернативой традиционным видам топлива.

В 2021 году Правительством РФ среди прочих документов по декарбонизации была утверждена «Концепция развития водородной энергетики». На первом этапе планируются разработка технологий и производство промышленной продукции для водородной энергетики, в том числе установок производства водорода и энергетических смесей на его основе из ископаемого сырья методами паровой конверсии природного газа и электролиза воды. В дальнейшем стоимость производства водорода на базе ВИЭ приблизится к стоимости производства водорода из ископаемого сырья, что позволит начать реализацию крупных проектов по производству и экспорту водорода, произведённого на базе ВИЭ [2].

УДК 661.931, 62–622. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Моделирование и исследование в ПО COMSOL Multiphysics электрохимического метода получения водорода для коммунального и бытового применения

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС, дп. Черкизово Московской области)

В последние годы особый интерес к водородной энергетике обусловлен интенсивным развитием топливных элементов, позволяющих преобразовать химическую энергию в электрическую. В связи с этим многие зарубежные компании и научные центры расширили исследования по созданию эффективных систем получения водорода в качестве альтернативного источника электроэнергии и топлива. Анализ подобных исследований показал, что перспективным является способ электролизно-водной генерации водорода (ЭВГ). Проведено моделирование и исследование функциональных характеристик двух типов ячеек ЭВГ в ПО COMSOL Multiphysics. Представлены сравнительные результаты их работоспособности и методы повышения эффективности генерирования водорода.

Ключевые слова: производство водорода, электролизно-водные генераторы, водно-щелочной электролиз, электролизные ячейки с нулевым зазором, моделирование в ПО COMSOL Multiphysics.

UDC 661.931, 62–622. Scientific specialty number: 2.1.3 (05.23.03).

Modeling and research in COMSOL Multiphysics electrochemical method of hydrogen production for communal and domestic usage

V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RGUTIS, dp. Cherkizovo, Moscow region)

In recent years, special interest in hydrogen energy is due to the intensive development of fuel elements that allow to convert chemical energy into electric. In this regard, many foreign companies and scientific centers have expanded research to create effective hydrogen systems as an alternative source of electricity and fuel. The analysis of such studies showed that the method of hydrogen production by water electrolysis is promising. Modeling and study of the functional characteristics of two types of cells in the COMSOL Multiphysics were carried out. Comparative results of their performance and methods for increasing the efficiency of hydrogen generation are presented.

Keywords: hydrogen production, water electrolyzers, alkaline water electrolysis, zero gap alkaline electrolysis cell, modeling in COMSOL Multiphysics.

Хранение энергии может осуществляться с помощью нескольких типов систем накопления энергии (СНЭ): гидроаккумулирующих электростанций (более 90 % мощности накопителей энергии в мире), литий-ионных аккумуляторов, проточных REDOX-батарей и других технологий и процессов, например, водородных.

Водородные СНЭ состоят из генератора водорода, систем его хранения и электрохимического генератора (ЭХГ), в котором из водорода вырабатываются тепловая и электрическая энергия. Один кубометр H_2 содержит 3,6 кВт·ч энергии. При электролизном производстве водорода на 1 м³ газа необходимо затратить до 5–6 кВт·ч электроэнергии, то есть эффективность составляет 50–70 %. Применение электролизёров с жидкостным охлаждением даёт с одного кубометра водорода до 0,5–1,0 кВт·ч теплоты. Дополнительно эффективность работы ЭХГ можно повысить, если использовать получаемый в процессе генерации кислород.

Хранится водород в сжатом, сжиженном или связанном состоянии. При использовании водорода в топливных элементах электрический КПД ЭХГ не превышает 60 %, но ещё до 35 % теплового КПД можно получить при жидкостном охлаждении ЭХГ [3].

В последние годы особый интерес к водородной энергетике обусловлен также интенсивным развитием топливных элементов, позволяющих с высоким КПД преобразовать химическую энергию в электрическую. Анализ публикаций показывает, что многие зарубежные компании и научные центры существенно расширили исследования по созданию эффективных систем получения, хранения и транспортировки водорода [4–5].

Существует несколько ведущих технологий производства водорода, но в последние годы получили распространение электрохимические способы получения водорода, к которым относятся такие электролизно-водные технологии, как водно-щелочной электролиз (Alkaline Water Electrolysis, AWE) и электролиз через протонообменную (полимерно-электролитную) мембрану (Proton Exchange Membrane, PEM), основным элементом которых является электролизно-водный генератор (ЭВГ).

Необходимо также отметить, что малогабаритные установки на основе электролизно-водных генераторов уже сегодня находят применение в различных областях коммунального хозяйства и сферы быта: при ремонте холодильного оборудования, сварке цветных металлов, в металлургии, микроэлектронике.



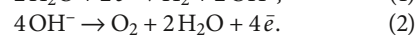
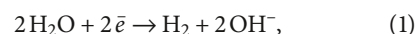
Производство водорода относится к высоким и наукоёмким технологиям. Так, уже на первых стадиях проектирования ЭВГ необходимо решение ряда ключевых задач эффективности функционирования отдельных элементов установки, прежде всего, надёжности и КПД ячеек ЭВГ. Этими вопросами занимаются как отечественные, так и многие зарубежные исследователи [6–9].

Электролизно-водный способ получения водорода и кислорода основан на электрохимическом разложении воды при подаче электроэнергии. Однако электролитическое производство водорода требует значительного расхода электроэнергии, что являлось до последнего времени значительным сдерживающим фактором в расширении сферы использования этого способа. Но теперь благодаря усилиям исследователей достигнут определённый прогресс в снижении энергопотребления при генерации водорода и повышении эффективности использования ЭВГ [8–9].

Удельная электропроводность основного компонента электролизно-водной технологии — дистиллированной воды — недостаточно высока, что затрудняет процесс разложения её на составляющие. Поэтому в устройствах, работающих по технологии PEM, необходимо применение дорогостоящих катализаторов, и требуется вода высокой чистоты. Это делает данный способ более дорогостоящим по сравнению с другими [7].

В последние годы получили распространение электрохимические способы получения водорода, к которым относятся такие электролизно-водные технологии, как водно-щелочной электролиз и электролиз через протонообменную (полимерно-электролитную) мембрану

Технология AWE использует не чистую дистиллированную воду, а водные растворы щелочей, кислот и солей. Чаще всего применяются растворы КОН и NaOH. При протекании электрического тока между электродами ячейки ЭВГ в среде электролита на катоде выделяется водород, а на аноде — кислород в соответствии со следующими уравнениями химических реакций:



При разработке ЭВГ значительная часть задач эффективности его работы может решаться ещё на этапе моделирования и исследования функциональных характеристик отдельных элементов — генерирующих водород ячеек. Так, результаты исследователей ЭВГ [6, 8–9] показывают, что большая часть потерь электрической энергии при электролизе приходится на сопротивление электролита и на перенапряжение на электродах ячеек. Потери в электролите зависят в основном от состава электролита, его электропроводности и протяжённости ионной цепи между электродами. Электропроводность щелочного электролита (растворы КОН или NaOH) повышается с увеличением температуры раствора и концентрации щёлочи. Однако это происходит до определённого уровня температуры и требует постоянного контроля. Электропроводность раствора КОН в сопоставимых условиях выше, чем у раствора NaOH.

Потери на перенапряжение в электродах зависят от материала электродов, состояния рабочей поверхности, плотности тока, температуры электролита и других факторов. Обычно электроды изготавливаются из металла с армированием рабочих поверхностей на основе использования технологий напыления или электролитического отложения слоя никеля, что снижает их эрозию и повышает ресурс [6].

В типовых ЭВГ электроды ячейки разделены между собой диафрагмой, создавая две внутренние полости — катодную и анодную. Газы, выделяемые при электролизе, отводятся в верхние зоны разделённых полостей ячейки. От расстояния между электродами в ячейке зависит величина электрического сопротивления электролита и, следовательно, плотность тока и эффективность процесса газорасделения в ячейках ЭВГ. Кроме того, при электролизе в AWE-ячейках пузырьки образующихся газов приводят к снижению электропроводности электролита, что негативно сказывается на производительности процесса. Важно определить пути минимизации этих явлений. Например, при сближении электродов в ячейке отсутствие пузырьков между ними также может дать положительный эффект.

Таким образом, AWE-технология производства водорода, уже хорошо зарекомендовавшая себя в промышленных процессах, несмотря на отмеченные выше недостатки, уверенно находит применение и в коммунальном хозяйстве и бытовом обслуживании. Однако получение водорода этим способом всё ещё требует оптимизации параметров процесса.

За рубежом проводятся исследования модифицированной AWE-ячейки с нулевым зазором между электродами и диафрагмой ЭВГ (The Zero Gap Configuration of AWE, ZGAWЕ). Предлагается также использовать для электродов ZGAWЕ ячейек пористые материалы, например, пористый никель, что существенно влияет на процесс электролиза [10–12].

Таким образом, производство водорода по технологии ZGAWЕ, как отмечают указанные авторы, обеспечивает более высокую плотность тока на электродах за счёт уменьшения сопротивления электролита, что способствует повышению эффективности ЭВГ щелочного типа до уровня более дорогой технологии PEM.

В связи с этим целью данного исследования водно-щелочной электролиза является разработка математических моделей (цифровых двойников) AWE и ZGAWЕ вариантов ячейек и сравнение их функциональных характеристик.

Для решения этой задачи используется ПО COMSOL Multiphysics, которое имеет необходимый набор интерфейсов для моделирования генерации и трансляции водорода и других газов в ячейках ЭВГ, а библиотека материалов COMSOL включает характеристики нужных материалов, в том числе электролитов и пористых металлических электродов, что позволяет решать инженерные задачи любой сложности методом конечных элементов.

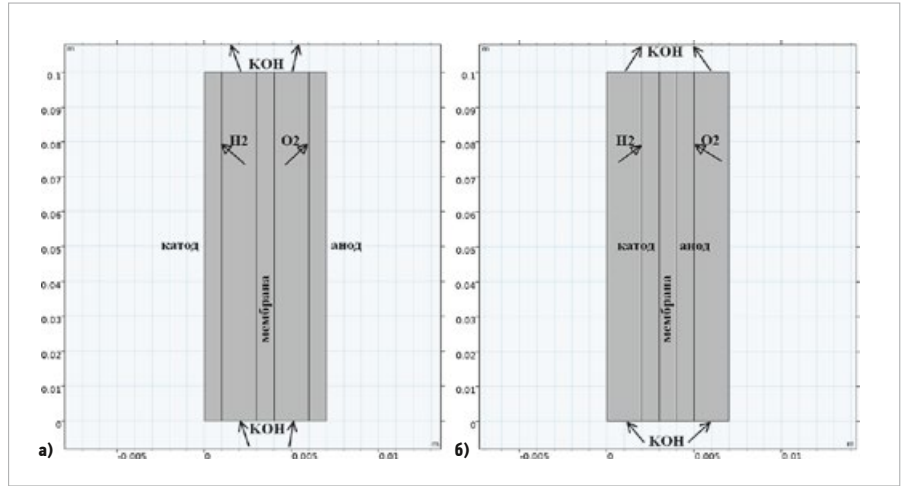


Рис. 1. Геометрия и конструктивные элементы ячейек (а — модель 1, б — модель 2)

Исследуемая модель и результаты

Упрощённая конструкция ячейек включает пару электродов, разделительную мембрану и два канала, через нижнюю границу которых на вход ячейки поступает электролит, а верхняя служит для отвода газообразных продуктов электролиза в потоке электролита на выходе из ячейки. На рис. 1 представлены двумерные модели AWE и ZGAWЕ ячейек и отмечены указанные элементы конструкции. Геометрические параметры ячейек: толщина мембраны — 0,001 м, толщина электродов — 0,001 м, диаметр каналов — 0,002 м, высота ячейки — 0,1 м. Модели ячейек AWE (рис. 1а) и ZGAWЕ типа (рис. 1б) различаются только взаимным расположением электродов и каналов: каналы между электродами (модель 1) или электроды между каналами (модель 2).

Производство водорода по технологии ZGAWЕ обеспечивает более высокую плотность тока на электродах за счёт уменьшения сопротивления электролита, что способствует повышению эффективности ЭВГ щелочного типа до уровня технологии PEM

Физическая модель электролиза воды на пористых поверхностях электродов при движении электролита в каналах ячейки основывается на нескольких сопряжённых интерфейсах. Интерфейс водного электролизёра Water Electrolyzer определяет перенос заряженных ионов в электролите и токопроводящих электродах, используя закон Ома в сочетании с балансом заряда. Учитываются активационные перенапряжения, а связь между переносом заряда и перенапряжением описывается уравнением Батлера — Фольмера.

Основные физические параметры модели для этого интерфейса — это концентрация электролита $c_l = 6 \times 10^3$ моль/м³ и начальное содержание электролита в объёме мембраны и электродов, которое определяется их пористостью $\epsilon_s = 0,5$ и $\epsilon_{el} = 0,75$, соответственно, а также электропроводности электродов σ_{el} (равная 1×10^6 См/м) и электролита σ_l , которая зависит от концентрации и температуры.

Процесс газорасделения вносит поправку в эффективную проводимость электролита $\sigma_{l,eff}$ так, что она зависит от объёмной доли газа ϕ и объёмной проводимости электролита σ_l согласно корреляции Брюггемена:

$$\sigma_{l,eff} = \sqrt{(1-\phi)^3} \sigma_l. \quad (3)$$

В интерфейсе Laminar Flow ламинарное течение раствора электролита в каналах ячейки задаётся скоростью на входе $v_{in} = 0,01$ м/с и давлением на выходе $p_{out} = 2,53 \times 10^6$ Па.

Интерфейс Darcy's Law описывает движение электролита в пористых электродах под действием давления и силы тяжести по закону Дарси:

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla(p - \rho g), \quad (4)$$

где поле скорости электролита $\mathbf{u}$ определяется проницаемостью $\kappa = 1 \times 10^{-10}$ м², динамической вязкостью μ и плотностью ρ жидкости, а также градиентом давления p . Величины μ и ρ задаются в свойствах раствора KOH из библиотеки материалов COMSOL как функции температуры и концентрации. В интерфейсе Phase Transport in Free and Porous Media Flow раствор электролита с пузырьками газов, образовавшихся при электролизе воды, моделируется как двухфазная жидкость, занимающая все домены, кроме разделительной мембраны.

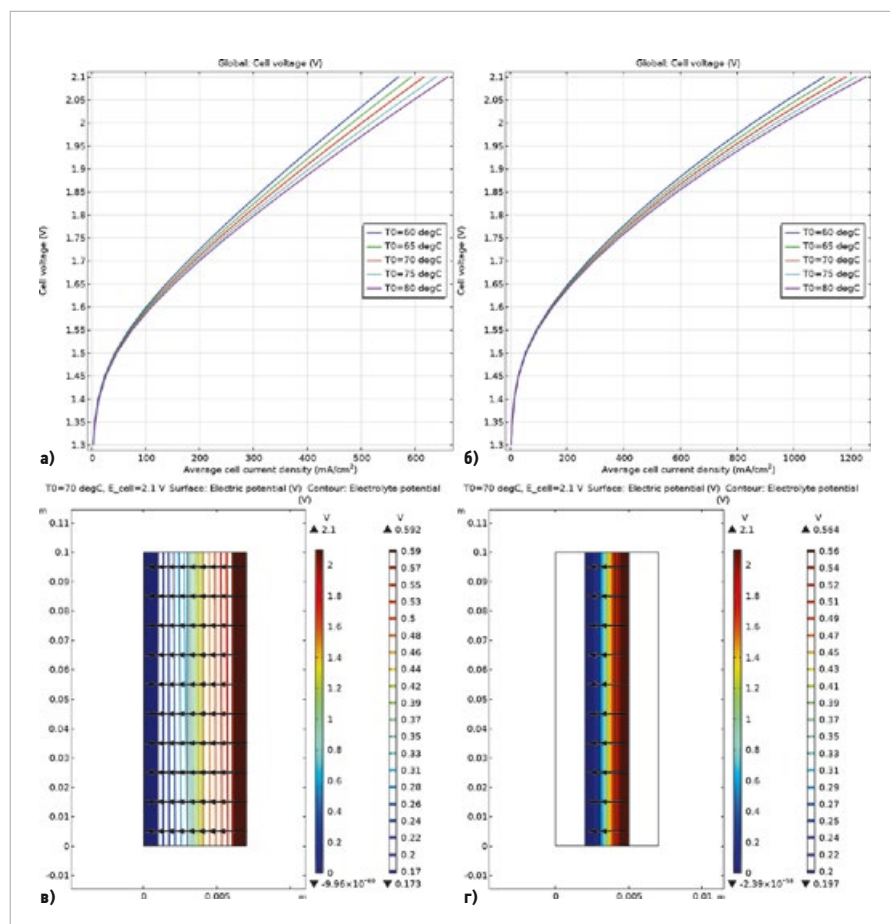


Рис. 2. Сравнение электрических характеристик ячеек [а — поляризационные кривые (модель 1), б — то же (модель 2), в — распределение электрического потенциала электродов и потенциала электролита (модель 1), г — то же (модель 2)]

Массовая выработка H_2 и O_2 в единицу времени задаётся уравнением Фарадея:

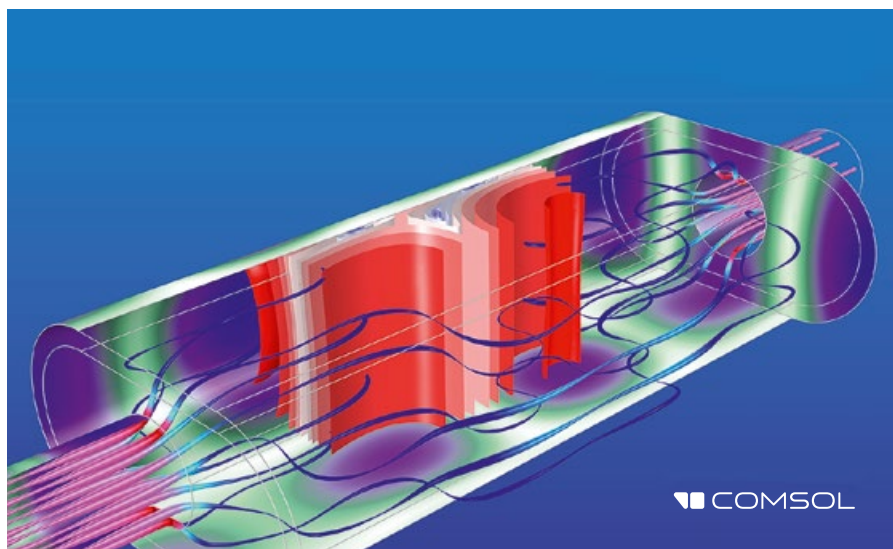
$$\dot{m} = \frac{M}{nF} I_{el}, \quad (5)$$

где M — молярная масса газа (2,02 и 32 г/моль, соответственно); n — число участвующих в реакции электронов (для катода — два электрона, для анода — четыре); $F = 9,65 \times 10^4$ Кл/моль — число Фарадея; I_{el} — объёмная плотность тока на электродах. Таким образом, для каждого из каналов рассчитываются объёмные доли газов Φ_{H_2} и Φ_{O_2} .

Изменение рабочей температуры влияет на производительность ячейки, поэтому учитывается выделение теплоты в процессе электролиза с помощью интерфейса Heat Transfer in Fluids.

На рис. 2 представлены результаты параметрического исследования моделей 1 и 2 с начальной температурой t_0 , изменяющейся от 60 до 80 °C с шагом 5 °C. Электрический потенциал на аноде Φ изменяется от 1,3 до 2,1 В с шагом 0,05 В. На рис. 2а поляризационные кривые для каждого из указанных значений начальной температуры AWE-ячейки показывают изменение средней плотности тока на аноде в зависимости от приложенного потенциала. Видно, что средняя плотность тока в ячейке I увеличивается от

минимальной (около 2,5–2,6 мА/см²) до максимальных значений $I = 570$ (при $t_0 = 60$ °C) и 663,62 мА/см² (при $t_0 = 80$ °C). Таким образом, при постоянной плотности тока увеличение начальной температуры приводит к уменьшению электрического потенциала на аноде и, следовательно, к росту производительности ячейки. Это объясняется тем, что при повышении температуры увеличивается скорость электрохимических реакций, что вызывает более высокую плотность обменного тока и меньшую потерю напряжения.



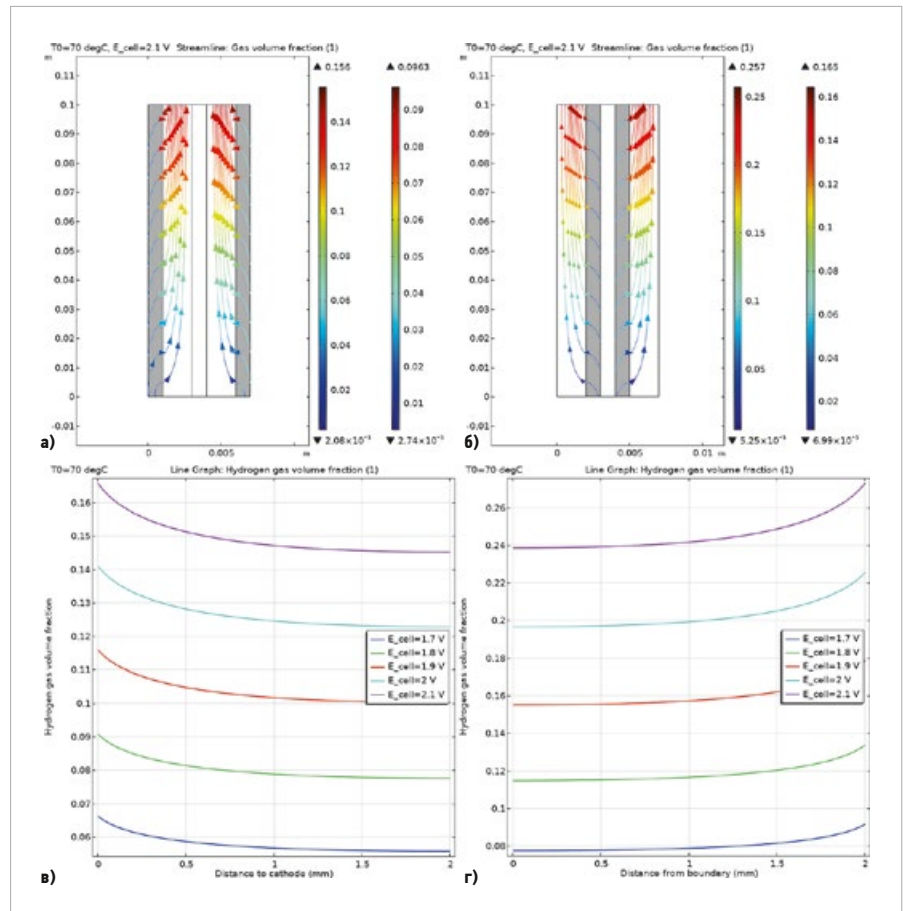
Аналогичное исследование для ячейки ZGAWЕ представлено на рис. 2б. Видно, что отмеченная выше зависимость напряжения в ячейке от начальной температуры сохраняется. Кроме того, средняя плотность тока в ячейке в зависимости от приложенного потенциала увеличивается быстрее и достигает больших значений, чем в предыдущем случае: от минимальной (около 2,6–2,7 мА/см²) до максимальных значений $I = 1105,9$ (при $t_0 = 60$ °C) и 1254 мА/см² (при $t_0 = 80$ °C), что означает почти двукратный прирост по сравнению с моделью 1. Следовательно, для достижения одинаковой плотности тока в AWE- и ZGAWЕ-ячейках во второй из них требуется приложить меньший электрический потенциал. Итак, конструкция ячейки с нулевым зазором обеспечивает меньшую потерю напряжения за счёт сопротивления электролита и более высокую плотность тока на аноде, что приводит к лучшей производительности ячейки.

Данный вывод подтверждается в том числе рис. 2в–г, которые показывают распределение электрического потенциала электродов и потенциала электролита в AWE- и ZGAWЕ-ячейках. Для начальной температуры $t_0 = 60$ °C и приложенного потенциала на аноде $\Phi = 2,1$ В максимальные значения потенциала электролита в ячейках равны 0,598 и 0,571 В, соответственно. При $t_0 = 70$ °C эти величины равны 0,592 и 0,564 В, а при $t_0 = 80$ °C равны 0,586 и 0,557 В, соответственно. Таким образом, величина наведённого потенциала в электролите уменьшается с ростом температуры, что означает снижение потерь за счёт сопротивления электролита в ячейках обоих типов. В то же время при прочих равных условиях потенциал электролита в модели 2 ниже, чем в модели 1, что подтверждает преимущество ячейки с нулевым зазором.

На рис. 3 представлены результаты параметрического исследования функциональных характеристик моделей 1 и 2 для некоторых значений начальной температуры ячейки при изменении потенциала на аноде в указанном выше диапазоне. На рис. 3а показаны линии поля скорости потока газов, выделяющихся на электродах AWE-ячейки. Легенда графика выражает доли газовых фракций водорода ϕ_{H_2} и кислорода ϕ_{O_2} в объёме электролита в каждом из соответствующих каналов. Видно увеличение долей выделяющихся при электролизе газов снизу-вверх вдоль поверхности электродов и накопление их в верхней части ячейки. Для начальной температуры $t_0 = 60^\circ\text{C}$ и приложенного потенциала $\Phi = 2,1$ В величина ϕ_{H_2} возрастает от минимальной $1,93 \times 10^{-3}$ на входе в ячейку до максимальной 0,147 на выходе. Доля сопутствующего газа O_2 в параллельном канале также растёт до значения $\phi_{O_2} = 0,088$ на выходе из ячейки. При увеличении начальной температуры выход газов возрастает. Например, при $t_0 = 70^\circ\text{C}$ доля H_2 возрастает до максимальной $\phi_{H_2} = 0,156$, а доля O_2 — до $\phi_{O_2} = 0,096$, а при $t_0 = 80^\circ\text{C}$ эти доли составляют 0,162 и 0,105, соответственно.

Для ZGAWE-ячейки аналогичное исследование представлено на рис. 3б. При одинаковых линейных размерах ячеек и начальных условиях отмеченный выше рост долей газовых фракций вдоль поверхности электродов от входа к выходу в модели 2 усиливается, а их значения увеличиваются. Так, при начальной температуре $t_0 = 60^\circ\text{C}$ величина ϕ_{H_2} возрастает от минимальной $4,89 \times 10^{-3}$ внизу до максимальной 0,247 вверху ячейки, а ϕ_{O_2} увеличивается до 0,152 на выходе из ячейки. При увеличении начальной температуры выход газов возрастает быстрее и достигает больших значений, чем в предыдущем случае: при $t_0 = 70^\circ\text{C}$ доля H_2 возрастает до максимальной $\phi_{H_2} = 0,257$, а доля O_2 — до $\phi_{O_2} = 0,165$, а при $t_0 = 80^\circ\text{C}$ эти доли составляют 0,263 и 0,177, соответственно. Следовательно, из двух типов ячеек производительность ячейки с нулевым зазором выше.

Это подтверждается рис. 3в–г, которые показывают распределение доли выделившегося в процессе электролиза водорода в верхнем сечении AWE- и ZGAWE-ячеек. Расстояние до поверхности катода отсчитывается в направлении от внутренней границы канала в случае AWE-ячейки (рис. 3в) и от его внешней границы для ZGAWE-ячейки (рис. 3г). В обоих случаях наблюдается рост выделения водорода от минимального уровня, соответствующего расстоянию до катода



• • Рис. 3. Сравнение функциональных характеристик ячеек в зависимости от потенциала [а — линии поля скорости и доли газовых фракций H_2 и O_2 в объёме электролита (модель 1), б — то же (модель 2), в — распределение доли газовой фракции H_2 по ширине верхнего сечения канала (модель 1), г — то же (модель 2)]

на величину диаметра канала (2 мм), до максимального на поверхности катода. Для начальной температуры $t_0 = 70^\circ\text{C}$ при изменении приложенного потенциала на аноде Φ от 1,7 до 2,1 В максимальные значения доли H_2 растут от 0,066 до 0,166 в AWE-ячейке и от 0,092 до 0,273 в ZGAWE-ячейке. Таким образом, из двух типов ячеек эффективность ячейки с нулевым зазором выше при каждом значении рабочего напряжения, причём с его увеличением доля H_2 на выходе из ZGAWE-ячейки также растёт быстрее.

COMSOL Multiphysics. Справка

COMSOL Multiphysics — это программный пакет для численного моделирования, основанный на методе конечных элементов. Это ПО позволяет проводить мультифизическое моделирование веществ, материалов и процессов, в том числе связанные явления. Программное обеспечение COMSOL и соответствующая компания были созданы в 1986 году в Королевском технологическом институте (KTH) в Стокгольме, Швеция. Первая версия COMSOL Multiphysics была выпущена в 1998 году.

На рис. 4 представлены результаты параметрического исследования функциональных характеристик моделей 1 и 2 для при изменении значений начальной температуры ячейки для некоторых значений потенциала на аноде из указанного выше диапазона. Рис. 4а–б показывают массовую выработку $\dot{m}$ выделившегося в процессе электролиза водорода на выходе из AWE- и ZGAWE-ячеек, соответственно. Видно, что $\dot{m}$ растёт в зависимости от температуры t_0 при каждом значении рабочего напряжения Φ в диапазоне 1,7–2,1 В, причём при большем заданном значении Φ скорость возрастания $\dot{m}$ увеличивается. При этом величина $\dot{m}$ для ячейки с нулевым зазором выше на всём интервале начальных температур. Например, при потенциале на аноде $\Phi = 2,1$ В $\dot{m}$ изменяется от 0,319 (при $t_0 = 60^\circ\text{C}$) до 0,368 мг/с при ($t_0 = 80^\circ\text{C}$) в модели 1, а при тех же начальных условиях — от 0,579 до 0,655 мг/с в модели 2. Таким образом, производительность ZGAWE-ячейки выше в среднем на 80 %.

Однако в процессе электролиза рабочая температура ячейки t растёт по сравнению с заданной начальной t_0 , что влияет на функциональные характеристики ячейки. На рис. 4в–г дано распределение температуры в объёме ячеек в моделях 1

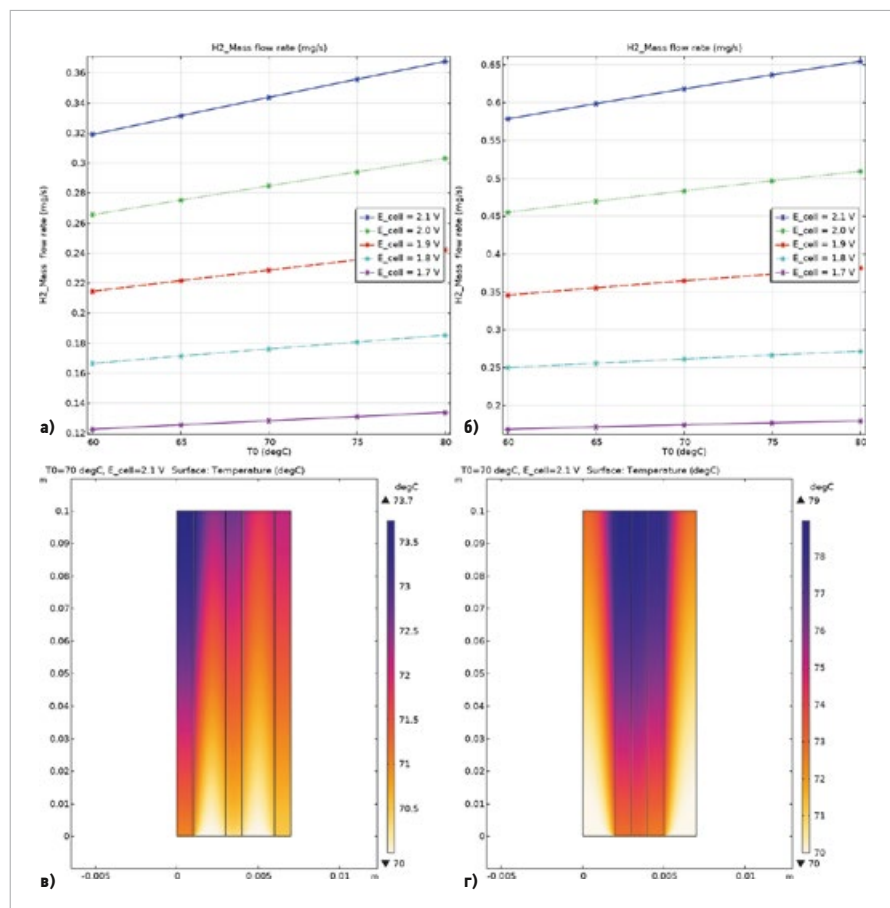


Рис. 4. Сравнение функциональных характеристик ячеек в зависимости от температуры [а — массовая выработка H₂ на выходе из ячейки (модель 1), б — то же (модель 2), в — распределение температуры в объёме ячейки (модель 1), г — то же (модель 2)]

и 2, установившееся в результате отсутствия теплообмена через границы домна ячейки при $t_0 = 70^\circ\text{C}$ и $\Phi = 2,1$ В. Видно, что значения t увеличиваются снизу вверх, причём температура электродов выше, чем в каналах электролита. При этом распределение t для AWE-ячейки несимметрично с областью повышенной температуры на катоде до $73,7^\circ\text{C}$ в его верхней части, что объясняется более интенсивным процессом образования пузырьков газа на катоде (рис. 3а) и, следовательно, ростом сопротивления в объёме электролита.

При тех же начальных условиях распределение t для ZGAWЕ-ячейки практически симметрично со значительным превышением температуры на электродах по сравнению с каналами электролита. Это объясняется затруднённым конвективным теплообменом электродов, разделённых только мембраной, и расположением каналов вдоль внешней границы электродов. Максимальное значение $t = 79^\circ\text{C}$ на верхней границе ячейки модели 2 значительно выше, чем в модели 1.

Для обеспечения стабильности функциональных параметров ячеек необходима вынужденная конвекция через их границы, особенно в модели 2, то есть дополнительное охлаждение в конструкции ячеек.

Заключение

1. Целью исследования водно-щелочного электролиза в AWE- и ZGAWЕ-ячейках было повышение эффективности производства водорода за счёт снижения внутреннего сопротивления электролита ячеек ЭВГ. Использовался метод численного моделирования в среде ПО COMSOL Multiphysics, позволяющего проводить исследования сложных технических процессов с необходимой точностью.

2. Показано, что поляризационные кривые, характеризующие уменьшение ионной проводимости электролита при образовании пузырьков водорода и кислорода на электродах, растут медленнее для ZGAWЕ-ячейки. Таким образом, ячейка с нулевым зазором между диафрагмой и электродами обеспечивает меньшую потерю напряжения за счёт снижения сопротивления электролита и более высокую плотность тока на аноде, что приводит к повышению производительности электролизно-водного генератора.

3. На основе параметрического исследования функциональных характеристик моделей AWE и ZGAWЕ для ряда значений начальной температуры ячейки и при изменении электрического потенциала на аноде в указанном диапазоне установлено, что газовыделение в модели 2 возрастает более интенсивно. Следовательно, из двух

типов ячеек производительность ячейки с нулевым зазором выше.

4. В то же время для ячейки ZGAWЕ установлено некоторое превышение температуры на электродах. Это объясняется затруднённым конвективным теплообменом электродов, разделённых только мембраной, и расположением каналов вдоль внешней границы электродов. Максимальное значение $t = 79^\circ\text{C}$ на верхней границе модели ZGAWЕ значительно выше, чем в модели AWE. Для стабильности функциональных параметров ячеек необходимо обеспечить возможность охлаждения элементов их конструкции и регулирование процесса в определённом диапазоне температуры.

5. Моделирование в ПО COMSOL Multiphysics процессов водно-щелочного электролиза стандартной ячейки AWE и ячейки с нулевым зазором ZGAWЕ позволило разработать математические модели (цифровые двойники) современных технологий получения водорода, что не только расширяет понимание применения их в условиях реального производства, но и намечает пути повышения эффективности функционирования промышленных установок ЭВГ.

1. Рынок возобновляемой энергетики РФ: текущий статус и перспективы развития. Часть 1 // Журнал СОК. 2023. №4. С. 68–78.
2. Об утверждении «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации»: Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 №2162-р.
3. Карасевич В.А. Использование систем накопления энергии для хранения энергии в автономных энергосистемах // Журнал СОК. 2023. №7. С. 68–70.
4. Khan T., Yu M., Waseem M. Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions. International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. Issue 60.
5. Pleshivtseva Yu., Derevyanov M., Pimenov A., Rapoport A. Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the decarbonization pathway. International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. Issue 83.
6. Варламов И.В., Феоктистов Н.А. Системы электропитания и управления электролизно-водными генераторами: монография. — М.: Изд.-торг. корп. «Дашков и Ко». 2012. 202 с.
7. Миронов Е.А. Моделирование и управление процессами производства водорода на основе электролиза // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки, 2023. Т. 31. №2. С. 70–84.
8. Wang T., Cao X., Jiao L. PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. Carbon Neutrality. 2022. Vol. 1. Issue 21.
9. Li W., Tian H., Ma L., Wang Y., Liu X., Gao X. Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress, and new strategies. Materials Advances. 2022. Vol. 3. Issue 14.
10. Phillips R., Dunnill Ch.W. Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas. RSC Advances. 2016. Vol. 6.
11. Wong X.Yi., Zhuo Y., Shen Y. Numerical analysis of hydrogen bubble behavior in a zero-gap alkaline water electrolyzer flow channel. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60. Issue 33.
12. Prasanth S.M. High fidelity multiphase modelling of hydrogenics in zero gap alkaline water electrolyzer. Web-source: comsol.com. Access date: June 10, 2024.

References — see page 80.

Modeling and research in COMSOL Multiphysics electrochemical method of hydrogen production for communal and domestic usage. Pp. 64–69.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS, dp. Cherkizovo, Moscow region)

1. *Rynok vozobnovljajemoj jenergetiki RF: tekushchij status i perspektivy razvitiya. Chast' 1* [The market of renewable energy of the Russian Federation: current status and development prospects. Part 1]. *Zhurnal Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 4. Pp. 68–78. [In Russian]
2. *Ob utverzhenii "Kontseptsii razvitiya vodorodnoj jenergetiki v Rossiyskoj Federatsii"* [On the approval of the "Concept for the development of hydrogen energy in the Russian Federation"]. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 05.08.2021 №2162-r* [Decree of the Government of the Russian No. 2162-r of August 5, 2021]. [In Russian]
3. *V.A. Karasevich. Ispol'zovanie sistem nakoplenija jenerгии dlja khraneniya jenerгии v avtonomnykh jenergosistemakh* [Usage of energy storage systems for distributed energy systems]. *Zhurnal Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 7. Pp. 68–70. [In Russian]
4. T. Khan, M. Yu, M. Waseem. Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Issue 60.
5. Yu. Pleshitseva, M. Derevyanov, A. Pimenov, A. Rapoport. Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the decarbonization pathway. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Issue 83.
6. I.V. Varlamov, N.A. Feoktistov. *Sistemy jelektricitetopitanija i upravlenija jelektralizno-vodnymi generatorami* [Power supply and control systems of electrolysis-water generators. A monography]. Moscow. *Izd.-torg. korp. "Dashkov i Ko"* ["Dashkov and Co." Publishing and Trade Corp.]. 2012. 202 p. [In Russian]
7. E.A. Mironov. Modelirovanie i upravlenie protsessami proizvodstva vodoroda na osnove jelektralizacii [Modeling and management of hydrogen production processes based on electrolysis]. *Vestnik SamGTU. Serija: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences]. 2023. Vol. 31. No. 2. Pp. 70–84. [In Russian]
8. T. Wang, X. Cao, L. Jiao. PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*. 2022. Vol. 1, Issue 21.
9. W. Li, H. Tian, L. Ma, Y. Wang, X. Liu, X. Gao. Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress and new strategies. *Materials Advances*. 2022. Vol. 3. Issue 14.
10. R. Phillips, Ch.W. Dunnill. Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6.
11. X.Y. Wong, Y. Zhuo, Y. Shen. Numerical analysis of hydrogen bubble behavior in a zero-gap alkaline water electrolyzer flow channel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60.
12. S.M. Prasanth. High fidelity multiphase modelling of hydrogenics in zero gap alkaline water electrolyzer. Web-source: comsol.com. Access date: June 10, 2024.