



Моделирование и исследование в ПО COMSOL Multiphysics влияния ультразвука на эффективность электрохимического метода получения водорода

Рецензия эксперта на статью получена
14.05.2025 [The expert review of the article
was received on May 14, 2025]

Водород — возобновляемый и экологически безопасный источник энергии — давно рассматривается как основная альтернатива традиционным видам топлива. В зависимости от способа производства водороду присваивают цветовую маркировку. Предпочтение отдаётся так называемому «зелёному» водороду, который получают электролизом воды с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, солнечных, ветровых и гидроэлектростанций. Так как при этом не образуются парниковые газы, такое производство считается самым экологичным. «Зелёный» водород как экологически безопасное топливо может сыграть решающую роль в борьбе с изменением климата.

В последние годы развитие водородной энергетики связано также с разработкой топливных элементов, преобразующих химическую энергию в электрическую с высоким КПД. Однако широкому коммерческому использованию водорода препятствуют ряд факторов, в том числе сложность его хранения и транспортировки. Материалы и технологии для хранения большого объёма водорода и его быстрого высвобождения ещё только

предстоит создать. Главной же причиной того, что развитие водородной энергетики в Европе существенно отстаёт от намеченного графика, является высокая стоимость «зелёного» водорода [1].

В 2021 году Правительством РФ среди прочих документов по декарбонизации была утверждена «Концепция развития водородной энергетики». Предполагается, что к 2035 году стоимость производства водорода на базе ВИЭ приблизится к стоимости производства водорода из ископаемого сырья, что позволит начать реализацию крупных проектов по его производству и экспорту [2]. Удешевить выработку «зелёного» водорода можно путём повышения производительности процесса его получения и эффективности систем хранения и транспортировки, что требует интенсификации научных исследований по этим направлениям.

Однако уже в настоящее время малогабаритные установки на основе электролизно-водной генерации (ЭВГ) водорода широко применяются в различных областях коммунального хозяйства и сферы быта. В них обычно используются технологии низкотемпературного электрохими-

УДК 661.931, 62–622. Научная специальность: 2.4.5.

Моделирование и исследование в ПО COMSOL Multiphysics влияния ультразвука на эффективность электрохимического метода получения водорода

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

Электрохимическое расщепление воды с помощью энергии ВИЭ является самым экологически безопасным способом производства водорода. Но его высокая стоимость препятствует развитию водородной энергетики. Повысить эффективность устройств электролизно-водной генерации (ЭВГ) водорода можно путём снижения потерь энергии. В ячейках ЭВГ эти потери связаны с накоплением газовых пузырьков на электродах и в электролите. Для удаления пузырьков многими исследователями предлагались различные методы. Анализ подобных исследований показал, что перспективным является ультразвуковое воздействие на процесс электролиза. Проведено моделирование и исследование влияния ультразвука на функциональные характеристики ячейки ЭВГ в ПО COMSOL Multiphysics. Представлены сравнительные результаты для разных параметров процесса и методы повышения эффективности генерирования водорода.

Ключевые слова: производство водорода, электролизно-водные генераторы, водно-щелочной электролиз, удаление пузырьков, ультразвук, моделирование в ПО COMSOL Multiphysics.

UDC 661.931, 62–622. Scientific specialty number: 2.4.5.

Modeling and research in COMSOL Multiphysics influence of ultrasound on the efficiency of the electrochemical method of hydrogen production

V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer; **Ya. A. Kochetkova**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS)

Electrochemical splitting of water using the energy of renewable sources is the most environmentally friendly way of hydrogen production. But its high cost prevents the development of hydrogen energy. It is possible to increase the efficiency of water electrolysis generation of hydrogen by reducing energy losses. In the cells of the electrolyzer these losses are caused by the accumulation of gas bubbles on the electrodes and in the electrolyte. To remove bubbles, many researchers proposed various methods. An analysis of such studies has shown that ultrasound effects on the electrolysis process are promising. Modeling and study of the influence of ultrasound on the functional characteristics of the cell in the COMSOL Multiphysics software was carried out. Comparative results for different process parameters and methods of increasing the efficiency of hydrogen generation are presented.

Key words: hydrogen production, water electrolyzers, alkaline water electrolysis, bubble removal, ultrasound, modeling in COMSOL Multiphysics.

ческого расщепления воды, такие как водно-щелочной электролиз (Alkaline Water Electrolysis, AWE), в том числе с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane, PEM) и с анионообменной мембраной (Anion Exchange Membrane, AEM). Они задействуют различные механизмы реакций с разными типами электролита и условиями протекания [3] и требуют дифференцированного подхода к исследованиям.

Авторами ранее проводилось исследование эффективности модифицированной AWE-ячейки — с нулевым зазором между электродами и диафрагмой [4], что позволило наметить пути повышения эффективности функционирования бытовых и промышленных установок электролизно-водной генерации.



Фото: Asahi Kasei Group, asahi-kasei.com

■ Установка водно-щелочного электролиза (10 МВт) компании Asahi Kasei на «Водородно-энергетическом исследовательском полигоне Фукусима» (г. Намие, Япония)

Способы AWE и PEM являются наиболее коммерчески доступными и часто используемыми. Они имеют много преимуществ: зрелые технологии, простота использования, компактные конструкции электролизёров, высокая плотность тока и скорость производства водорода, приемлемая эффективность системы [3]. Однако данные конструкции электролизёров страдают от накопления пузырьков водорода и кислорода на электродах и в электролите, что приводит к дополнительному перенапряжению. Чтобы уменьшить этот эффект, предлагались различные методы: электроды из материалов, обладающих специальными свойствами, такими как супергидрофильная поверхность или аэрофильная пористая внутренняя структура, управляемая турбулентность потока электролита и его механическое перемешивание, использование силы гравитации, магнитного поля и фототермических эффектов [5]. Однако ни один из них не был продемонстри-

рован в достаточно крупных масштабах, чтобы минимизировать потери энергии в электролизно-водных установках.

Также было показано, что применение ультразвукового воздействия при электролизе воды является перспективной стратегией благодаря совместному эффекту различных явлений, происходящих при прохождении акустической волны в электролите [6–8].

Ультразвук принадлежит к звуковому спектру в диапазоне от 20 кГц до 10 МГц и классифицируется на три частотные категории: низкую (20 кГц — 100 кГц), промежуточную (100 кГц — 1 МГц) и высокую (1 МГц — 10 МГц). Высокие частоты в основном используются в медицинской диагностике, в то время как низкие и промежуточные — в сонохимии, которая фокусируется на усилении ультразвуком химических реакций и процессов, в том числе разложения и очистки продуктов, синтеза материалов и наноструктурирования твёрдых поверхностей.

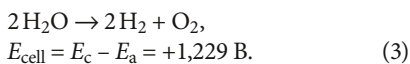
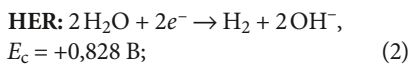
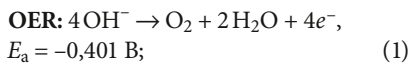
Ультразвуковые волны, проходящие через жидкость, вызывают два значительных эффекта: акустическое течение, не зависящее от времени, и акустическую кавитацию, которая включает формирование и коллапс газовых полостей в жидкости. Эти два процесса могут происходить одновременно в зависимости от компоновки, формы и размера электрохимического реактора [6].

Акустическая кавитация (образование и разрушение микрополостей в жидких средах при воздействии упругой звуковой волны) является доминирующим явлением в низкочастотном диапазоне, в то время как промежуточные частоты индуцируют конвективные течения в жидкости.

Технологии низкотемпературного электрохимического расщепления воды AWE и PEM являются наиболее коммерчески доступными и часто используемыми. Они имеют много преимуществ: зрелые технологии, простота использования, компактные конструкции электролизёров, высокая плотность тока и скорость производства водорода, приемлемая эффективность системы

Во время прохождения ультразвука через жидкость звуковые волны вызывают колебания давления и скорости. Их вязкое затухание в неидеальной жидкости приводит к молекулярному смещению и создаёт глобальные потоки. При этом вокруг газовых пузырьков могут возникать различные устойчивые структуры в зависимости от акустической частоты, амплитуды и размера пузырька [7].

В данной статье мы рассматриваем действие ультразвука на процессы в АВЕ-ячейке электролизёра. Эта технология является электрохимическим процессом производства молекулярных водорода H_2 и кислорода O_2 путём расщепления молекул воды в щелочной среде посредством обмена гидроксид-ионами OH^- между электродами через специальную мембрану-сепаратор. Уравнения (1)–(3) описывают реакции выделения кислорода на аноде (Oxygen Evolution Reaction, OER), выделения кислорода на катоде (Hydrogen Evolution Reaction, HER) и общую реакцию с соответствующими стандартными электродными потенциалами E_a и E_c и стандартным напряжением ячейки E_{cell} при стандартных условиях (температура 298,15 K, давление 1 атм и рН = 14):



Значение 1,229 В является стандартным равновесным напряжением ячейки U_0 . Если условия отличаются от стандартных, равновесное напряжение U_{eq} определяется с помощью U_0 и дополнительных величин, которые зависят от температуры, а также концентрации или парциального давления реагента и продуктов реакции, как это описывается уравнением Нернста [7]. Для достижения определённой скорости расщепления воды, то есть ненулевой плотности тока, напряжение ячейки U_{cell} должно превышать равновесное напряжение. На практике реакции OER и HER не происходят при равновесных потенциалах, поскольку они должны преодолеть энергетический барьер активации, что требует перенапряжений на электродах ячейки: η_a на аноде и η_c на катоде, которые зависят от таких рабочих условий, как температура, давление и концентрация электролита, а также от материалов электродов и катализатора.

В качестве электролитов используют растворы КОН или NaOH при 20–40 % весовой концентрации, с рабочей температурой 70–80 °C и давлением от 1 до 30 бар и с электродами на основе никеля [3, 7]. Омические потери складываются из сопротивления электролита R_e , сопротивления сепаратора R_s и сопротивления соединительной цепи R_c . При относительно низкой рабочей температуре электролит остаётся в жидкой форме, что приводит к образованию и дисперсии пузырьков и дополнительному сопротивле-



нию R_b . Кроме того, истощение реагентов в процессе реакций влияет на общую производительность ячейки и вызывает дополнительные перенапряжения на поверхностях электродов η_{aconc} и η_{cconc} , связанные с концентрацией.

Следовательно, напряжение ячейки может быть представлено как:

$$U_{cell} = U_{eq} + |\eta_a| + |\eta_c| + j\sum R + |\eta_{aconc}| + |\eta_{cconc}|, \quad (4)$$

где j — плотность тока; $\sum R$ — общее сопротивление ячейки:

$$\sum R = R_e + R_s + R_b + R_c.$$

Пузырьки, прикрепившиеся к газоделяющему электроду, уменьшают эффективную площадь реакции, увеличивают омическое сопротивление и влияют на массоперенос, что вызывает суммарное перенапряжение:

$$\eta_b = \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}, \quad (5)$$

где η_{act} — перенапряжение активации; η_{ohm} — омическое перенапряжение; η_{conc} — перенапряжение концентрации.

Если плотность тока достаточно велика, чтобы превысить растворимость газов, пузырьки будут расти. Задерживаясь на электроде, крупные пузырьки занимают часть его поверхности, которая становится электрохимически неактивной. Доля площади поверхности электрода, занятая пузырьками, называется «пузырьковым покрытием» θ . Из-за этого покрытия эффективная площадь реакции уменьшается, поэтому теоретическая плотность тока j_0 всегда ниже фактической:

$$j = \frac{j_0}{1 - \theta}.$$

Как плотность обменного тока j , так и перенапряжение активации η_{act} положительно коррелируют с пузырьковым покрытием. Их связь устанавливается ключевым уравнением в электрохимии, которое описывает кинетику электрохимических реакций на границе раздела фаз

«электрод — электролит», — уравнением Батлера — Фольмера [9]:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[- \frac{(1 - \alpha)zF\eta_{act}}{R_u T} \right] - \exp \left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{R_u T} \right) \right\}, \quad (6)$$

где R_u — универсальная газовая постоянная, $R_u = 8,314$ Дж/(моль·К); T — температура; α — коэффициент переноса заряда; z — количество электронов, участвующих в обмене; F — число Фарадея, $F = 9,65 \times 10^4$ Кл/моль.

Два слагаемых в скобках в правой части уравнения соответствуют проходящим одновременно реакциям окисления и восстановления, соответственно. Но скорость первой намного меньше, чем скорость второй, поэтому реакцией окисления можно пренебречь. Следовательно, из уравнения (6) перенапряжение активации:

$$\eta_{act} = - \frac{R_u T}{\alpha z F} \ln(1 - \theta). \quad (7)$$

Пузырьковое покрытие можно оценить как долю общей площади поверхности электрода, покрытую ортогональной проекцией массива прилипших пузырьков, усреднённого по размеру и времени пребывания [9]:

$$\theta = 0,604 v_g \frac{t_r}{V_r^{1/3}}, \quad (8)$$

здесь v_g — скорость выделения газа на электроде; t_r — среднее время пребывания пузырьков на поверхности электрода; V_r — средний объём пузырьков, покидающих поверхность электрода. При увеличении плотности тока выделение газа на электродах ускоряется, поэтому пузырьковое покрытие растёт, а проблема перенапряжения обостряется. Так как снижение скорости выделения газа противоречит цели электролиза, то уменьшить пузырьковое покрытие можно, изменяя время существования пузырька и его размер в момент отрыва.

Индукцированное пузырьками перенапряжение концентрации включает два процесса массопереноса на газовыделяющем электроде: истощение ионного реагента на поверхности электрода и накопление газообразного продукта в объёме электролита, которые усиливаются вихревыми потоками, вызванными отрывом газовых пузырьков. Неравномерная локальная концентрация реагентов и продукта реакции вызывает перенапряжение концентрации [7]:

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{RT}{\alpha z F} \ln \left(\frac{C_{\text{bulk}}}{C_{\text{surf}}} \right) + \frac{RT}{(1-\alpha) z F} \ln \left(\frac{C_{\text{dissolv}}}{C_{\text{sat}}} \right), \quad (9)$$

где C_{bulk} и C_{surf} — концентрации реагентов в объёме электролита и на поверхности электрода; C_{dissolv} и C_{sat} — концентрация растворённых газов в электролите и концентрация их насыщения, соответственно.

По мере увеличения количества пузырьков на поверхности электрода образуется слой пузырькового покрытия толщиной δ_b . Когда выталкивающая сила оказывается больше сил поверхностного натяжения, пузырьки сами отрываются от поверхности электрода. Образуется заполненный пузырьками слой электролита — «пузырьковая завеса», создающая ещё одно перенапряжение. Оно возникает из-за сопротивления току между электродами, который в электролите переносится ионами OH^- , а во внешней цепи (электроды и токосъёмники) — электронами. Диспергированная в электролите пузырьковая завеса уменьшает количество доступных путей для миграции ионов, тем самым снижая эффективную проводимость электролита K_m — отношение проводимости электролита при наличии пузырьков к внутренней проводимости электролита K .

Это омическое перенапряжение можно найти по формуле [7]:

$$\eta_{\text{ohm}} = -j \frac{\delta_b}{K} \left(\frac{1}{K_m} - 1 \right). \quad (10)$$

Жизненный цикл пузырька на газовыделяющем электроде включает стадии зарождения (нуклеации), роста и отделения. Нуклеация — это стохастический процесс образования кластера из молекул газа, растворённого в перенасыщенном растворе. После зарождения пузырёк продолжает расти, принимая молекулы газа из раствора, при более высоком внутреннем давлении p_{in} , чем давление окружающей жидкости p_l , которое складывается из среднего давления на границе пузырька и давления окружающей среды p_0 .

Выделяют три режима роста: начальный этап инерциально-го роста, который длится около 10 мс, диффузионный рост в результате массопереноса газа из раствора в пузырёк, а также рост в процессе электрохимической реакции

На этой стадии радиус пузырька R изменяется по закону идеального газа:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{MR_u T}{p_{\text{in}}}, \quad (11)$$

где M — количество молей газа в пузырьке. Внутреннее давление пузырька:

$$p_{\text{in}} = p_l + \frac{2\sigma}{R},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе «жидкость — газ»; разность давлений $2\sigma/R$ представляет собой давление Лапласа (дополнительное давление под искривлённой поверхностью, возникающее из-за сил поверхностного натяжения и кривизны поверхности жидкости).

Выделяют три режима роста: начальный этап инерциального роста, который управляется импульсом взаимодействия между пузырьком и окружающей жидкостью и длится около 10 мс; диффузионный рост в результате массопереноса газа из раствора в пузырёк; рост в процессе электрохимической реакции [5]. Кроме того, пузырьки растут в результате слияния, когда два пузырька объединяются, чтобы уменьшить общую поверхностную энергию. Рост пузырька продолжается до тех пор, пока сила плаваемости не преодолеет силу адгезии, которая удерживает его на поверхности электрода. Наконец, пузырёк отрывается от электрода, освобождая активную зону реакции и присоединяется к конвективному потоку.

Однако рост некоторых пузырьков прекращается прежде, чем они достигают размера отрыва от электрода. Стабильность этих пузырьков имеет решающее значение для определения времени их пребывания в жидкости. Стабилизация размера происходит под влиянием таких факторов, как акустическое давление, вязкость жидкости и диффузия газа. Минимальное давление, необходимое для взрывного роста пузырька радиуса R_0 , называется порогом Блейка p_B и определяется из уравнений [6]:

$$p_B = p_0 - p_v + \frac{4\sigma}{3R_{\text{cr}}};$$

$$R_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{3R_0^3}{2\sigma} \left(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}, \quad (12)$$

где p_v — парциальное давление пара; R_{cr} — критический радиус пузырька, в ряде работ [6, 8, 9] для R_{cr} пузырька водорода указывается значение 25 мкм.

В обычных условиях газовые пузырьки подвергаются воздействию только выталкивающих сил и сил натяжения. Когда в жидкости возникает поле акустического давления, пузырёк газа может совершать объёмные пульсации. Если градиент акустического давления ∇p не равен нулю, то он создаёт поступательную силу, действующую на пузырёк.

Это первичная сила Бьёркнеса f_{B1} , которая вычисляется как усреднение по времени произведения ∇p и осциллирующего объёма пузырька $V_b(t)$ [10]:

$$f_{B1} = -\langle V_b(t) \nabla p(t) \rangle. \quad (13)$$

Осцилляцию радиуса пузырька $R(t)$ можно описать нелинейным дифференциальным уравнением Рэлея — Плессета [6], описывающим динамику сферического пузырька в несжимаемой жидкости:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_l} \left(p_{\text{in}} - p_l - \frac{2\sigma}{R} \right). \quad (14)$$

Отсюда для заданного радиуса пузырька R_0 можно найти его резонансную частоту ω_0 . Если считать, что температура в зоне акустического воздействия остаётся постоянной, то:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{\sigma_l R_0^2} \left[3 \left(p_l - p_v \right) + \frac{4\sigma}{R_0} \right]. \quad (15)$$

Под действием первичной силы Бьёркнеса пузырьки с резонансной частотой, превышающей частоту источника звука, движутся в направлении градиента давления, а с меньшей резонансной частотой — в противоположном. Таким образом, в плоском поле стоячей волны пузырьки меньше резонансного размера собираются в пучностях давления, в то время как пузырьки больше резонансного размера — в узлах давления [7].

Вторичная сила Бьёркнеса вызывает притяжение между пузырьками. Когда два или более пузырьков сближаются, градиент давления толкает их друг к другу, причём тем сильнее, чем больше разность их размеров. При контакте между пузырьками есть две возможности. Если пузырьки сталкиваются с силой, достаточной для слияния, происходит агломерация в один большой пузырёк. При этом выталкивающая сила увеличивается, так что пузырёк стремится вверх и может увлечь за собой другие. Если же пузырьки скользят по плоской поверхности, столкновение с другими пузырьками может привести к их фрагментации, создавая пузырьковую завесу в электролите.

Величина вторичной силы Бьёркнеса ещё недостаточна для слияния этих кластеров микропузырьков. Они сливаются позже, когда притягивается больше пузырьков, продолжая ранее описанный цикл.

Вторичная сила Бьёркнеса f_{B2} , действующая на пузырьки с осциллирующими объёмами $V_1(t)$ и $V_2(t)$, вычисляется по формуле [11]:

$$f_{B2} = \frac{\rho_{\text{liq}}}{4\pi r_{12}^2} \langle \dot{V}_1 \dot{V}_2 \rangle, \quad (16)$$

где r_{12} — расстояние между центрами пузырьков.

Поступательные движения пузырьков в акустическом поле имеют большое значение в управлении эффектами акустической кавитации. За исключением сил плавучести, силы Бьёркнеса являются наиболее мощными движущими силами, действующими на пузырьки в жидкости.

Экспериментальные исследования гидродинамического поведения пузырьков водорода, возникающих в процессе водно-щелочного электролиза в ультразвуковом поле, охватывали пять фундаментальных характеристик: процессы слияния и удаления пузырьков, критический диаметр, продолжительность роста до отрыва, скорость образования пузырьков и распределение пузырьков по размерам [12]. Наблюдались явления, которые были описаны ранее как результат действия сил Бьёркнеса, а именно нарастающая фрагментация и дисперсия микропузырьков. Пузырьки большего размера скользят по поверхности, сливаясь с пузырьками меньшего размера, пока не достигнут своего радиуса отрыва. Кроме того, они легко фрагментируются при столкновении с другими пузырьками.

Было обнаружено, что критический диаметр значительно уменьшается: с 58 до 16 мкм, что согласуется с уменьшением времени существования пузырька с 533 до 118 мс. Кроме того, пузырьковый шлейф в жидкости сужается, а скорость и траектории пузырьков сильно изменяются. В обычных условиях пузырьки поднимаются только благодаря выталкивающей силе с максимальной скоростью 0,01 м/с. При ультразвуковом воздействии пузырьки движутся без какого-либо предпочтительного направления с максимальной скоростью 0,06 м/с и устремляются вверх только тогда, когда достигают своего диаметра выброса. Наконец, ультразвук оказывает большое влияние на распределение пузырьков по размерам. В обычных условиях это распределение соответствует кривой Гаусса со средним диаметром 72 мкм, что согласуется со случайными свойствами роста и вы-



свобождения. Во время обработки ультразвуком размеры сместились в сторону меньшего диаметра, составив в среднем 17 мкм. Однако распределение уже не является гауссовым, что отражает детерминированное действие ультразвуковых волн. Кроме того, во время ультразвукового воздействия наблюдалось увеличение количества пузырьков, но меньшее пузырьковое покрытие. Таким образом, даже если под действием ультразвука образуется больше пузырьков, они, как правило, намного меньше, занимают меньшую часть поверхности электрода и быстрее высвобождаются.

Акустические течения влияют на конвекцию как макро-, так и микроуровня. Кроме ускорения выхода пузырьков из объёма электролита, под действием ультразвука они также легче высвобождаются из внутренней структуры пористого электрода [8].

Экспериментальные исследования поведения пузырьков водорода охватывали пять фундаментальных характеристик: процессы слияния и удаления пузырьков, критический диаметр, продолжительность роста до отрыва, скорость образования пузырьков и распределение пузырьков по размерам



Даже при учёте расхода энергии, необходимой для создания ультразвукового поля, рост энергоэффективности электролизёра остаётся существенным: от 5 до 18 % [7]. Что касается промышленного внедрения, ультразвуковые технологии могут применяться достаточно гибко: источник ультразвука помещается непосредственно в ячейку электролизёра или последняя погружается в ультразвуковую ванну, причём возможны многочисленные варианты конфигурации [6]. Также может использоваться ультразвуковой волновод, в том числе для локального встраивания преобразователей ультразвука в биполярную пластину или электроды. Ультразвуковые технологии исследуются и для других типов электролизёров, например, ячейек с нулевым зазором [8].

При имплементации генератора ультразвука в конструкцию электролизёра значительная часть задачи повышения эффективности его работы может решаться ещё на этапе моделирования и исследования функциональных характеристик отдельных элементов. Для этого необходимо создать математические модели (цифровые двойники) различных вариантов ячеек и источников ультразвука и сравнить их функциональные характеристики. Таким методом авторами ранее неоднократно проводилось исследование эффективности различных конструкций, например, AWE-ячейки с нулевым зазором [4].

Для решения данной задачи в статье используется ПО COMSOL Multiphysics, которое имеет необходимый набор интерфейсов для совместного моделирования генерации водорода в ячейке электролизёра и поля ультразвука в растворе электролита, позволяет решать с необходимой точностью методом конечных элементов уравнения, описывающие данные процессы и представлять решения в виде детальных графиков.

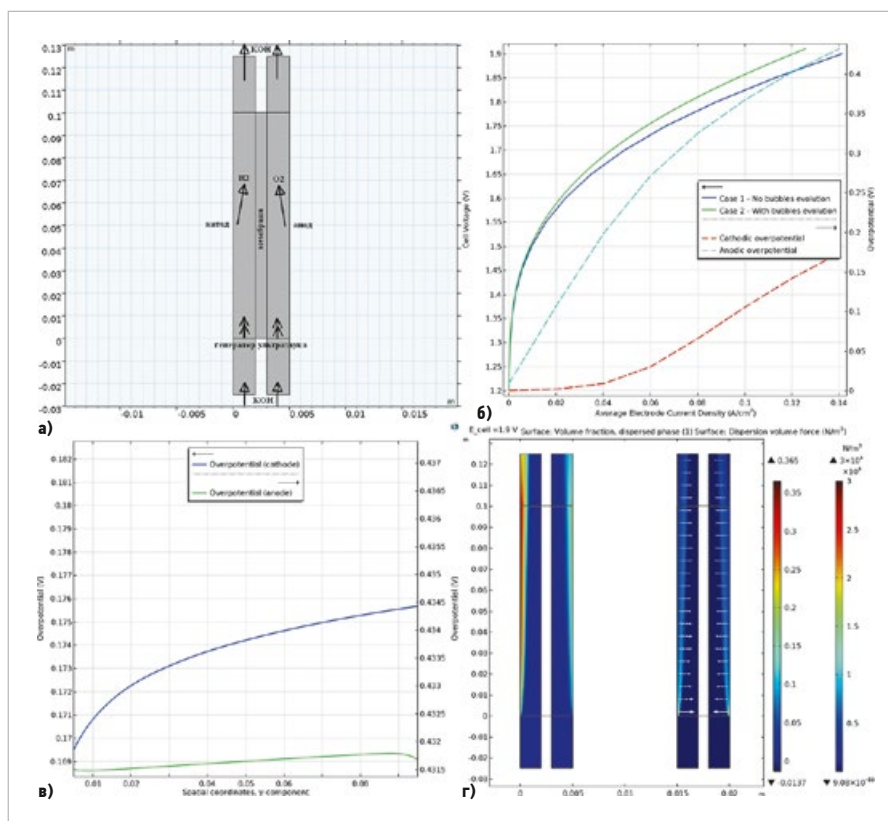


Рис. 1. Геометрия модели и функциональные характеристики AWE-ячейки [а — конструктивные элементы; б — поляризационные кривые и среднее перенапряжение на электродах в зависимости от потенциала; в — распределение перенапряжения по длине электродов; г — распределение газовой фракции электролита и силы дисперсии в ячейке]

Исследуемая модель и результаты

Упрощённая конструкция ячейки включает два электрода, разделительную мембрану и два канала, через нижние границы которых на вход ячейки поступает электролит, а верхние служат для отвода газообразных продуктов электролиза в потоке электролита на выходе из ячейки. На рис. 1а представлена двумерная модель AWE-ячейки и отмечены указанные элементы конструкции. Геометрические параметры: диаметр каналов — 2 мм, толщина мембраны — 1 мм, ширина ячейки — 5 мм, длина электродов — 10 см, длина входной и выходной части каналов — 2,5 см, высота ячейки — 15 см.

В COMSOL Multiphysics физическая модель электролиза воды на пористых поверхностях электродов при движении электролита в каналах ячейки основывается на нескольких сопряжённых интерфейсах. В интерфейсе водного электролизёра Water Electrolyzer для катода и анода решаются уравнения Батлера — Фольмера (6) и совместно с ними основное уравнение для всего объёма ячейки:

$$j = -\sigma_{\text{eff}} \nabla \Phi, \quad (17)$$

где эффективная электропроводимость находится по формуле Брюггемана $\sigma_{\text{eff}} = (1 - \varphi_d)^{1,5} \sigma_l$ и зависит от объёмной доли дисперсной фазы φ_d и электропроводимости электролита σ_l , которая задается в свойствах раствора КОН как функ-

ция температуры; Φ — потенциал электролита. Начальные параметры модели: рабочая температура $T_0 = 70^\circ\text{C}$, концентрация электролита $c = 6 \times 10^3$ моль/м³, пористость сепаратора $\varepsilon_s = 0,5$, давление в ячейке $p = 1$ атм, референсная плотность обменного тока на катоде $j_{\text{c,ref}} = 100$ А/м², на аноде $j_{\text{a,ref}} = 1$ А/м².

В COMSOL Multiphysics физическая модель электролиза воды на пористых поверхностях электродов при движении электролита в каналах ячейки основывается на нескольких сопряжённых интерфейсах

Двухфазная смесь газов и жидкого электролита описывается физической моделью Эйлера — Эйлера, в которой дисперсные пузырьки водорода и кислорода рассматриваются как газовые фазы, для которых уравнения сохранения массы и импульса соответствуют уравнениям непрерывности и Навье — Стокса для ньютоновской жидкости и предполагается ламинарное течение и постоянная температура. Расчёт многофазного течения через пористые элементы ячейки использует скорость смеси и диффузионный поток массы для учёта разницы между скоростью смеси и отдельными фазовыми скоростями.

В интерфейсе Euler — Euler Model, Laminar Flow вычисляются векторы скорости как жидкой u_l , так и газовой u_d фаз потока, объёмная доля газа φ_d и граничные условия для массового потока $\dot{m}$ H₂ и O₂ на электродах ячейки на основе уравнения Фарадея:

$$\dot{m} = \frac{M}{zF} j_{\text{el}}, \quad (18)$$

где M — молярная масса газа, $M = 2,02$ и 32 г/моль; j_{el} — плотность тока на электродах. Плотность тока в электролите связана с массовым потоком ионов OH⁻, который устанавливается в качестве граничного условия на границах сепаратора. Начальные условия: скорость на входе $v_{\text{in}} = 0,1$ м/с, давление на выходе $p_{\text{out}} = 0$.

На пузырьки газов в потоке электролита действуют различные объёмные силы: подъёмная сила F_L , сила сопротивления F_D и сила дисперсии F_{BD} [13]. При этом первые две рассчитываются в рамках интерфейса модели Эйлера — Эйлера автоматически, а последнюю нужно добавить в модель по формуле:

$$F_{BD} = -\varphi_d \rho_l \frac{k_g}{d_b} |u_{\text{slip}}| \nabla \varphi_d, \quad (19)$$

где диаметр пузырьков $d_b = 2R_{\text{cr}} = 50$ мкм (исходя из ранее указанного значения $R_{\text{cr}} = 25$ мкм); коэффициенты дисперсии газовых пузырьков $k_{\text{H}_2} = 2,5 \times 10^{-4}$ м²/с и $k_{\text{O}_2} = 5 \times 10^{-4}$ м²/с; плотность электролита — $\rho_l = 1240$ кг/м³. Скорость скольжения пузырьков $u_{\text{slip}} = u_l - u_d$ вычисляется на каждом шаге решения.

На рис. 1б представлены результаты параметрического исследования модели при изменении электрического потенциала на аноде Φ от 1,3 до 1,9 В с шагом 0,05 В. Поляризационные кривые показывают изменение средней плотности тока на аноде в зависимости от приложенного потенциала. Рассматриваются два случая: идеальный, без учёта влияния пузырьков на проводимость электролита и реальный с учётом их влияния. Сравнение поляризационных кривых для первого (синий цвет) и для второго варианта (зелёный) показывает значительный эффект поляризации из-за образующихся пузырьков. Видно, что средняя плотность тока в ячейке j с ростом потенциала Φ увеличивается от почти нулевой до максимальных значений 0,141 и 0,126 А/см², соответственно. При этом зелёная кривая всюду выше синей, и разница увеличивается при возрастании j , то есть при наличии пузырьков для поддержания постоянной плотности тока требуется увеличение электрического потенциала на аноде, что означает снижение производительности ячейки.

Также на рис. 1б показаны графики роста среднего значения перенапряжения на катоде (красный цвет) и аноде (бирюзовый цвет). Видно, что увеличение электрического потенциала ячейки сопровождается ростом перенапряжения на электродах до 0,174 и 0,432 В, соответственно. Это объясняется одновременным ростом пузырькового покрытия. Таким образом, добиться увеличения производительности электролизёра без освобождения электродов от пузырьков невозможно.

Данный вывод подтверждается рис. 1в–г, которые показывают распределение перенапряжения по длине электродов и дисперсной фракции электролита в ячейке при электрическом потенциале на аноде $\Phi = 1,9$ В. Видно, что перенапряжение на катоде растёт вдоль электрода снизу вверх гораздо быстрее, чем на аноде. Это вызвано двукратной разницей количеств H_2 и O_2 , образующихся в процессе электролиза, согласно уравнениям (1)–(3). Пузырьковое покрытие растёт снизу вверх неравномерно и достигает на верхнем конце катода значения 0,36, а на аноде — 0,18. Следовательно, освобождение катода от пузырьков в большей степени повлияет на эффективность ячейки. Также на рис. 1г дано распределение силы дисперсии (19), действующей на газовые пузырьки. Видно, что она направлена перпендикулярно оси каналов от электродов к центру, то есть способствует преодолению адгезии и отрыву пузырьков, но её величина недостаточна для этого.

С целью воздействия на газовые пузырьки в конструкцию электролизёра добавлен генератор ультразвука, который показан горизонтальной линией на рис. 1а в сечении каналов ячейки на нижней границе вертикальных электродов. Фокусировка ультразвукового сигнала обычно достигается с помощью фазовой задержки либо с использованием фокусирующей линзы. В данной модели для излучения сигнала используется сферически сфокусированный ультразвуковой преобразователь с вогнутой линзой. Предполагается, что корпус преобразователя и линза жёсткие.

Сферическая линза с фокальной длиной F и апертурой a излучает сигнал, фокусирующийся в фокальной точке, которая должна находиться в зоне максимального скопления газовых пузырьков. Согласно рис. 1г — это область верхней границы электродов. Таким образом, $F = 11$ см, $a = 5$ мм. Сигнал представляет собой синусоидальный импульс с амплитудой $p_A = 0,1$ МПа и частотой $f_0 = 0,5$ МГц:

$$p = p_A \sin(2\pi f_0 t). \quad (20)$$

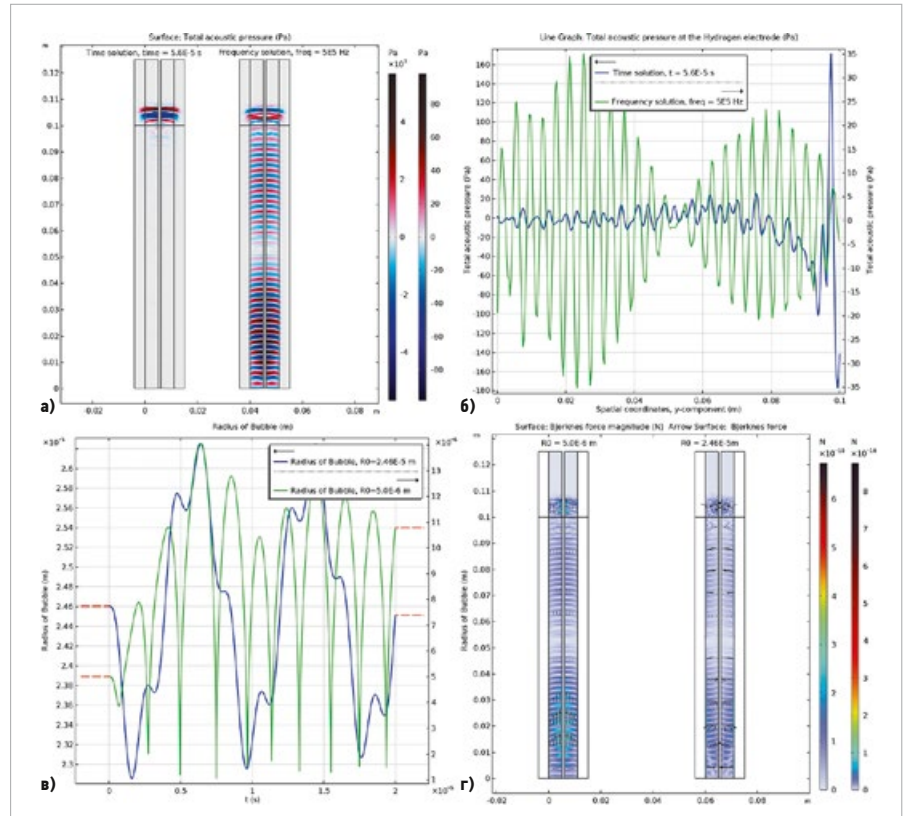


Рис. 2. Акустические результаты ультразвукового воздействия [а — распределение акустического давления во временной ($t = 5,6 \times 10^{-5}$ с) и частотной ($f = 0,5$ МГц) областях в объёме ячейки; б — то же по длине катода при тех же значениях t и f ; в — осцилляции радиуса пузырька при $R_0 = 5,0$ и $24,6$ мкм; г — распределение силы Бьеркнеса в объёме ячейки при тех же R_0]

Амплитуда сигнала достаточна для генерации гармоник высшего порядка. Время распространения сигнала до фокальной точки $t_F = F/c = 5,64 \times 10^{-5}$ с $\approx 28 T_0$, где T_0 — акустический период.

Сигнал фокусируется в небольшой фокальной зоне, где его интенсивность достигает высокого уровня. В этом случае нелинейные эффекты могут стать значительными, что приводит к передаче энергии от низших гармоник к высшим.

Увеличение электрического потенциала ячейки сопровождается ростом перенапряжения на электродах вследствие роста пузырькового покрытия. То есть добиться увеличения производительности электролизёра без освобождения электродов от пузырьков невозможно

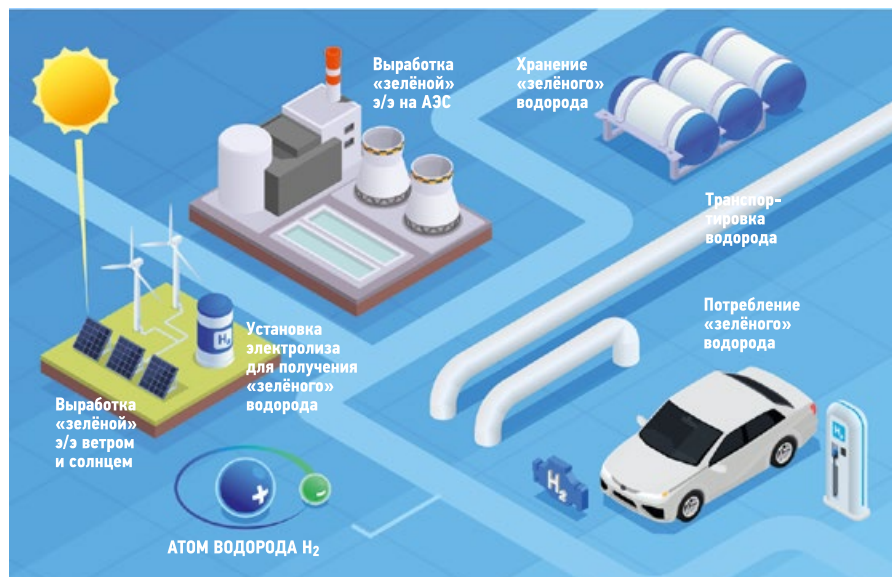
Вклад гармоник высшего порядка растёт с увеличением расстояния распространения. Указанные явления позволяют учесть интерфейс Nonlinear Pressure Acoustics, Time Explicit (нелинейная акустика давления с заданием по времени), в котором разрывным методом Галёркина (Discontinuous Galerkin Method, DGM) решается система нелинейных акустических уравнений. Используемый подход пред-

полагает, что кумулятивные нелинейные эффекты, которые накапливаются в процессе распространения звуковых волн, доминируют над локальными нелинейными эффектами. Диссипация энергии звуковых колебаний соответствует модели вязкой термopроводящей жидкости.

Результатом решения является распределение акустического давления в объёме ячейки. Распространение начального импульса образует в каждый момент времени локальную зону чередования положительного и отрицательного давления шириной T_0 с. Переход с помощью преобразования Фурье из временной области в частотную с шагом $\Delta f = 1/t_F \approx f_0/28$ даёт распределение давления по спектру частот от 0 до $2f_0$.

На рис. 2а показаны распределения давления в момент времени $5,6 \times 10^{-5}$ с и в частотной области на несущей частоте f_0 . На первом графике вблизи верхней границы электродов проходит звуковая волна с амплитудой приблизительно 5×10^3 Па, на втором показан профиль стоячей волны с локальным максимумом амплитуды 98 Па в той же области.

На рис. 2б показаны распределения акустического давления по длине катода при тех же значениях времени и частоты. По кривой синего цвета видно, что нелинейные всплески давления незначительны на большей части катода, а на его верхней границе резко возрастают до 160–180 Па.



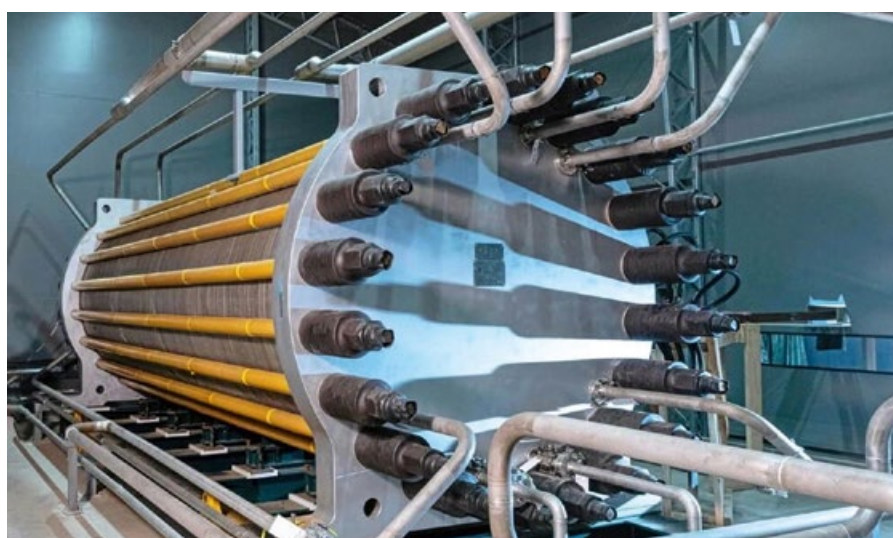
По второй кривой зелёного цвета характер этих колебаний можно уточнить: осцилляции делятся на две группы, сосредоточенные на половине длины электрода каждая, с максимальной амплитудой до 35 и 24 Па, соответственно.

Общая модель распределения пузырьков газа в жидкости под действием звукового импульса основана на динамике отдельных сферических пузырьков. Существует несколько моделей осцилляции пузырька, которые различаются по сложности и точности. По сравнению с более простым уравнением Рэлея — Плессета (14) уравнение Келлера — Миксиса характеризуется более высокой точностью и стабильностью решения [6]:

$$\rho_l \left[\left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) \right] = \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} \right) (p_{in} - p - p_l) + \frac{\dot{p}_{in} R}{c} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu \dot{R}}{R}. \quad (21)$$

Здесь скорость звука в электролите составляет $c = 1950$ м/с, динамическая вязкость равна $\mu = 9,09 \times 10^{-4}$ Па·с. Акустическое поле p задаётся в отсутствие пузырька в той точке, которую занимает центр пузырька фактически.

Уравнение (21) численно решалось в ПО MATLAB для заданного выше синусоидального импульса $p(20)$ на интервале $0,2 \times 10^{-5}$ с длиной $10 T_0$ при различных значениях начального радиуса R_0 . Заданная частота $f_0 = 0,5$ МГц является резонансной для $R_0 = 24,6$ мкм, что достаточно близко к ранее принятому значению $R_c = 25$ мкм. На рис. 2в даны графики $R(t)$ для $R_0 = 5,0$ мкм и $R_0 = 24,6$ мкм. Диапазон изменения радиуса — от 13,96 до 1,06 мкм и от 2,62 до 2,29 мкм, соответственно, причём колебания $R(t)$ затухают со временем. Видно также, что осцилляции радиуса в первом случае соответствуют синусоидальным импульсам $p(t)$ с периодом T_0 и числом пиков, равным десяти.



Установка электролиза щелочной воды с корпусом цилиндрического типа включает в себя основной корпус, в котором пакетно набраны: торцевые прижимные пластины, уплотнительные прокладки, разделительные пластины, сеточные электроды анодов и катодов из никеля, а также специальные разделительные мембраны-диафрагмы, не позволяющие молекулам водорода и кислорода контактировать и вступать в реакцию.

При этом амплитуда колебаний $R(t)$ изменяется с вторичным периодом $5T_0$. Таким образом, на интервале $(0; 10T_0)$ отмечаются две группы осцилляций: десять быстрых и две медленных с меньшим изменением амплитуды. Во втором случае, при $R_0 = 24,6$ мкм, быстрые осцилляции вырождаются в незначительные скачки амплитуды на фоне медленных колебаний, но общее их количество сохраняется.

Решение уравнения (21) $R(t)$ даёт объём пузырька $V(t) = 4/3 \pi [R(t)]^3$ и позволяет вычислить силу Бьёркнеса по формуле (13). Здесь градиент амплитуды давления ∇p может быть найден в частотной области, в то время как с осцилляциями объёма пузырька по времени связана фаза давления φ . Две области решения можно разделить, рассматривая отдельно вклады от стоячих и бегущих волн.

Тогда компоненты вектора f_B можно найти по формулам [14]:

$$f_{Bi} = \frac{\partial p}{\partial x_i} \left[I_c \cos(\varphi - \psi_i) + I_s \sin(\varphi - \psi_i) \right], \quad (22)$$

где ψ_i — сдвиг фазы давления, зависящий от координаты i ; угловая частота $\omega = 2\pi f_0$; параметры I_c и I_s вычисляются как средние по периоду осцилляции T_0 :

$$I_c = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} V(t) \cos(\omega t) dt;$$

$$I_s = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} V(t) \sin(\omega t) dt. \quad (23)$$

На рис. 2г представлены распределения силы Бьёркнеса в объёме ячейки для значений $R_0 = 5,0$ мкм и $R_0 = 24,6$ мкм.

Видно, что линии уровня средней величины f_B образуют зональную структуру, производную от профиля стоячей волны на рис. 2а. Различия графиков связаны с фазовым сдвигом ψ . Пузырьки меньшего размера имеют резонансную частоту $f_r > f_0$ и, как сказано выше, движутся в направлении градиента давления. Это соответствует направлению вдоль оси канала. Величина ψ в этом случае незначительно сказывается на направлении f_B . Однако в фокальной области осцилляции амплитуды p и ∇p велики, поэтому величина и направление f_B изменяются скачками. Пузырьки радиуса $R_0 = 24,6$ мкм подвергаются действию ультразвука на резонансной частоте f_0 , что вызывает значительный фазовый сдвиг давления и изменение направления силы Бьёркнеса.

В этом случае f_B направлена почти перпендикулярно оси канала на большей части его длины, то есть под малым углом к силе дисперсии F_{BD} , кроме начального участка и фокальной области, где её величина и направление также резко изменяются. Можно предположить, что суммарное воздействие f_B и F_{BD} на пузырьковое покрытие будет сильнее и пузырьки радиуса, близкого к критическому R_{cr} , будут удаляться эффективнее.

Результатом воздействия ультразвука на процесс электролиза является изменение функциональных характеристик ячейки электролизёра. На рис. 3а приводятся распределения дисперсной фракции электролита при электрическом потенциале на аноде $\Phi = 1,9$ В для двух вариантов начального размера пузырьков. Видны существенные изменения по сравнению с контрольным результатом (рис. 1г). При этом, если к моменту прохождения ультразвукового импульса начальный радиус образующихся на электродах пузырьков $R_0 = 5,0$ мкм, уменьшение максимального значения ϕ_d до 0,294 по сравнению с исходным 0,365 показывает снижение количества газовых пузырьков, но качественный вид распределения не меняется. На катоде по-прежнему образуется пузырьковое покрытие, создающее перенапряжение активации. Во втором случае, при $R_0 = 24,6$ мкм, максимальное значение ϕ_d увеличивается до 0,513, но дисперсная фаза равномерно распределена в широкой полосе, и пузырьковое покрытие на электродах устраняется. Таким образом, ультразвук отрывает пузырьки, близкие к критическому размеру, от поверхностей электродов и способствует их удалению из зоны реакции.

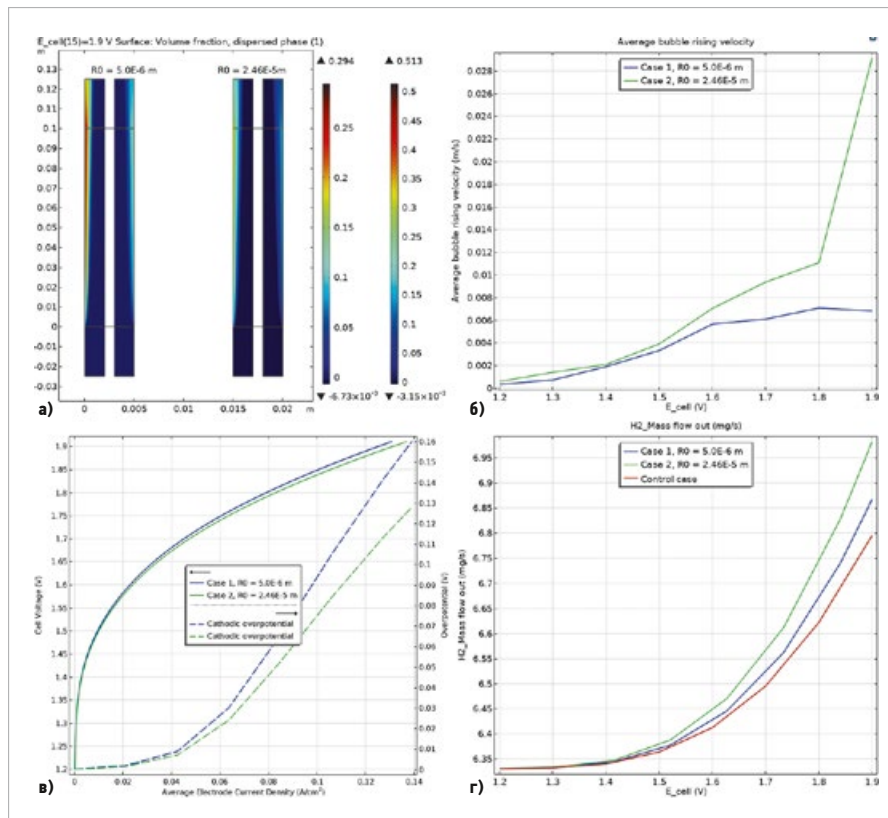


Рис. 3. Сравнение функциональных характеристик ячейки при ультразвуковом воздействии на пузырьки радиуса $R_0 = 5,0$ и $24,6$ мкм [а — распределение газовой фракции электролита в ячейке; б — средняя скорость подъёма пузырьков в зависимости от потенциала; в — поляризационные кривые и среднее перенапряжение на катоде в зависимости от потенциала; г — скорость массового потока H_2 в зависимости от потенциала]

На рис. 3б даны графики средней скорости подъёма пузырьков к верхней границе канала ячейки в зависимости от электрического потенциала на аноде Φ . Видно, что при увеличении Φ от 1,2 до 1,6 В пузырьки с различными начальными радиусами движутся с близкими скоростями. При росте Φ до 1,9 В для случая с $R_0 = 5,0$ мкм средняя скорость стабилизируется около 0,007 м/с, а для $R_0 = 24,6$ мкм резко возрастает до 0,03 м/с.

Это подтверждает освобождение катода от пузырьков размера близкого к критическому при достижении рабочего напряжения ячейки на рис. 3а.

На рис. 3в представлены поляризационные кривые, выражающие изменение средней плотности тока j на аноде в зависимости от приложенного потенциала Φ от 1,3 до 1,9 В. Сравнение результатов для случая $R_0 = 5,0$ мкм (синий цвет) и для $R_0 = 24,6$ мкм (зелёный цвет) с контрольными (рис. 1б) показывает улучшение параметров процесса электролиза в результате воздействия ультразвука. Максимальные значения j равны 0,131 и 0,137 А/см², соответственно, то есть меньше идеальной величины 0,141, но превышают значение 0,126 А/см², вызванное поляризацией на 4,0 и 8,7%, соответственно. При этом зелёная кривая всюду ниже синей, и разница увеличивается при возрастании j , то есть положительный эффект удаления пузырьков больше для радиуса $R_0 = 24,6$ мкм, близкого к критическому.

Графики роста среднего значения перенапряжения на катоде, представленные на рис. 3, даны пунктиром для случая $R_0 = 5,0$ мкм (синий цвет) и для $R_0 = 24,6$ мкм (зелёный цвет). Видно, что удаление пузырьков уменьшило максимальное перенапряжение по сравнению с контрольным 0,174 В до 0,16 и 0,128 В, то есть до 8 и 26%, соответственно.



Таким образом, при равных значениях приложенного потенциала плотность тока увеличивается под действием ультразвука, и выработка газов в ячейке должна возрасти.

На рис. 3г показаны графики скорости массового потока $\dot{m}_2$ через верхнюю границу ячейки для начальных значений радиуса пузырька $R_0 = 5,0$ мкм (синий цвет), для $R_0 = 24,6$ мкм (зелёный цвет) и контрольного случая (красный цвет) в зависимости от приложенного потенциала Φ от 1,3 до 1,9 В. Положительная корреляция роста потенциала Φ и плотности тока j при достижении рабочего напряжения ячейки 1,9 В даёт значения скоростей массового потока $\dot{m} = 6,87, 6,98$ и $6,79$ мг/с, соответственно, то есть имеет место увеличение на 1,1 и 2,7 %, соответственно. Таким образом, подтверждается увеличение производительности ячейки в результате обработки ультразвуком, причём для случая пузырьков радиуса $R_0 = 24,6$ мкм эффект выше.

Целью исследования действия ультразвука на процесс водно-щелочного электролиза было повышение эффективности производства водорода. Построенные поляризационные кривые подтверждают увеличение перенапряжения активации при росте пузырькового покрытия. Распределение газовой фазы показывает, что уменьшение ионной проводимости электролита вызвано образованием пузырьков водорода и кислорода на электродах и в слое электролита между ними

В данной модели начальный радиус газовых пузырьков был зафиксирован на момент ультразвукового импульса, в то время как в реальных условиях рост пузырьков происходит в течение всего процесса электролиза, и воздействию ультразвуком будут подвергаться одновременно пузырьки всех возможных размеров. Также не учитывалось действие вторичной силы Бьеркнеса, вызывающей притяжение между пузырьками. Указанные явления должны рассматриваться в усовершенствованной модели. Другой подход к исследованию действия ультразвука на процесс электролиза может быть связан с моделированием поверхностных волн на электродах и других элементах ячейки при встраивании в них пьезоэлементов или использовании подводящего волновода.

Заключение

Исходя из изложенного выше, можно сделать следующие выводы:

1. Целью исследования действия ультразвука на процесс водно-щелочного электролиза в ячейках Alkaline Water Electrolysis (AWE) было повышение эффективности производства водорода за счёт снижения внутреннего сопротивления электролита и потерь на перенапряжение. Использовался метод численного моделирования в среде программного обеспечения COMSOL Multiphysics, позволяющий изучать сложные технические процессы, как математические модели (цифровые двойники) современных технологий получения водорода.
2. В COMSOL Multiphysics в интерфейсе Water Electrolyzer решается уравнение Батлера — Фольмера. Построенные поляризационные кривые подтверждают увеличение перенапряжения активации при росте пузырькового покрытия. В интерфейсе Euler — Euler Model, Laminar Flow электролит рассматривается как двухфазная жидкость с дисперсной фазой газовых пузырьков. Распределение газовой фазы показывает, что уменьшение ионной проводимости электролита вызвано образованием пузырьков водорода и кислорода на электродах и в слое электролита между ними. Увеличение производительности электролизёра без освобождения электродов от пузырьков невозможно.
3. С этой целью в модель электролизёра добавлен сферически сфокусированный ультразвуковой преобразователь с вогнутой линзой. Моделирование ультразвукового воздействия на процесс электроли-

за проводится в два этапа. В интерфейсе Nonlinear Pressure Acoustics, Time Explicit находится распределение акустического давления в ячейке. Затем из решения уравнения Келлера — Миксиса вычисляется сила Бьеркнеса, действующая на газовые пузырьки при различных значениях начального радиуса. Отмечено, что направления силы Бьеркнеса, действующей на пузырьки размера, соответствующего резонансной частоте, и силы дисперсии близки, что усилит их суммарное воздействие.

4. Это предположение подтверждается на этапе моделирования процесса электролиза с учётом возникающих в электролите объёмных сил для двух вариантов начального радиуса пузырьков. Изменение функциональных характеристик ячейки электролизёра особенно заметно для радиуса, близкого к критическому $R_{cr} = 25$ мкм, при достижении рабочего напряжения ячейки 1,9 В. Отмечается одновременное увеличение газообразной фазы в объёме ячейки и уменьшение пузырькового покрытия на электродах. Таким образом снижается сопротивление электролита (до 8,7 %), уменьшается перенапряжение активации (до 26 %) и растёт выработка водорода (до 2,7 %). То есть как электрическая эффективность, так и производительность ячейки увеличиваются.

5. Дальнейшее моделирование в ПО COMSOL Multiphysics процессов водно-щелочного электролиза под действием ультразвука связано с развитием технологий в условиях реального производства и поиском пути повышения эффективности промышленных установок электролизно-водной генерации (ЭВГ). ●

1. [Только 17 % запланированных водородных энергетических проектов Европейского союза будут реализованы к 2030 году \[Электр. текст\]. Журнал СОК: «Новости рынка» от 04.04.2025. Режим доступа: c-o-k.ru. Дата обрац. 10.05.2025.](#)
2. Об утверждении «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации»: Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 №2162-р.
3. 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. Pp. 5598–5644.
4. [Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование и исследование в ПО COMSOL Multiphysics электрохимического метода получения водорода для коммунального и бытового применения // Журнал СОК. 2024. №6. С. 62–67.](#)
5. He Y., Cui Y., Zhao Zh., Chen Y., Shang W., Tan P. Strategies for bubble removal in electrochemical systems. *Energy Reviews*. 2023. Vol. 2. Issue 1.
6. Sharifishourabi M., Dincer I., Mohany A. Implementation of experimental techniques in ultrasound-driven hydrogen production: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 62. Pp. 1183–1204.
7. Gravelle J., Hihn J.-Y., Pollet B.G. Power ultrasound as performance enhancer for alkaline water electrolysis: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 100. Pp. 428–441.
8. Islam Md.H., Pollet B.G. Perspective in the industrial applications of sonoelectrochemical hydrogen production. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2025. Vol. 48.
9. Deng L., Jin L., Yang L., Feng Ch., Tao A., Jia X., Geng Zh., Zhang C., Cui X., Shi J. Bubble evolution dynamics in alkaline water electrolysis. Web-source: sciencedirect.com. Access date: May 10, 2025.
10. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part II: Primary Bjerknes force and bubble structures. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012. Vol. 19. Pp. 56–65.
11. Jiao J., He Y., Yasui K., Kentish S.E., Ashokkumar M., Manasseh R., Lee J. Influence of acoustic pressure and bubble sizes on the coalescence of two contacting bubbles in an acoustic field. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. Vol. 22. Pp. 70–77.
12. Cho K.M., Deshmukh P.R., Shin W.G. Hydrodynamic behavior of bubbles at gas-evolving electrode in ultrasonic field during water electrolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 80.
13. Le Bideau D., Mandin P., Benbouzid M., Kim M., Sellier M., Ganci F., Inguanta R. Eulerian two-fluid model of alkaline water electrolysis for hydrogen production. *Energies*. 2020. Vol. 13.
14. Lesnik S., Aghelmaleki A., Mettin R., Brenner G. Modeling acoustic cavitation with inhomogeneous polydisperse bubble population on a large scale. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 89.

[References — see page 80.](#)

Modeling and research in COMSOL Multiphysics influence of ultrasound on the efficiency of the electrochemical method of hydrogen production. Pp. 46–55.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer; **Yana A. Kochetkova**, senior lecturer; Russian State University of Tourism and Service (RGUTIS)

1. *Novosti rynka: Tol'ko 17% zaplanirovannykh vodorodnykh proektov ES budut realizovany k 2030 godu* [Market news: Only 17% of planned EU hydrogen projects will be implemented by 2030]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation] of April 4, 2025. Web-source: c-o-k.ru. Access date: 10.05.2025. [In Russian]
2. *Ob utverzhdenii "Kontseptsii razvitiya vodorodnoj jenergetiki v Rossijskoj Federatsii"* [On approval of the "Concept for the development of hydrogen energy in the Russian Federation"]. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 05.08.2021 №2162-r* [Order of the Government of the Russian Federation No. 2162-r of August 5, 2021]. [In Russian]
3. 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. Pp. 5598–5644.
4. *V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. Modelirovanie i issledovanie v PO COMSOL Multiphysics jelektrokhimicheskogo metoda poluchenija vodoroda dlja kommunal'nogo i bytovogo primenenija* [Modeling and research in COMSOL Multiphysics electrochemical method of hydrogen production for communal and domestic usage]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 6. Pp. 62–67. [In Russian]
5. Y. He, Y. Cui, Zh. Zhao, Y. Chen, W. Shang, P. Tan. Strategies for bubble removal in electrochemical systems. *Energy Reviews*. 2023. Vol. 2. Issue 1.
6. M. Sharifshourabi, I. Dincer, A. Mohany. Implementation of experimental techniques in ultrasound-driven hydrogen production: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 62. Pp. 1183–1204.
7. J. Gravelle, J.-Y. Hihn, B.G. Pollet. Power ultrasound as performance enhancer for alkaline water electrolysis: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 100. Pp. 428–441.
8. Md.H. Islam, B.G. Pollet. Perspective in the industrial applications of sonoelectrochemical hydrogen production. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2025. Vol. 48.
9. L. Deng, L. Jin, L. Yang, Ch. Feng, A. Tao, X. Jia, Zh. Geng, C. Zhang, X. Cui, J. Shi. Bubble evolution dynamics in alkaline water electrolysis. Web-source: sciencedirect.com/journal/escience. Access date: May 10, 2025.
10. O. Louisnard. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part II: Primary Bjerknes force and bubble structures. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012. Vol. 19. Pp. 56–65.
11. J. Jiao, Y. He, K. Yasui, S.E. Kentish, M. Ashokkumar, R. Manasseh, J. Lee. Influence of acoustic pressure and bubble sizes on the coalescence of two contacting bubbles in an acoustic field. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. Vol. 22. Pp. 70–77.
12. K.M. Cho, P.R. Deshmukh, W.G. Shin. Hydrodynamic behavior of bubbles at gas-evolving electrode in ultrasonic field during water electrolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 80.
13. D. Le Bideau, P. Mandin, M. Benbouzid, M. Kim, M. Sellier, F. Ganci, R. Inguanta. Eulerian two-fluid model of alkaline water electrolysis for hydrogen production. *Energies*. 2020. Vol. 13.
14. S. Lesnik, A. Aghelmaleki, R. Mettin, G. Brenner. Modeling acoustic cavitation with inhomogeneous polydisperse bubble population on a large scale. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 89.