

Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 1 / 2026, Vol. 9, Iss. 1 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 519.63:544.65

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-3

## Математическое моделирование твердооксидного топливного элемента

<sup>1</sup> Василенко В.А. \*

<sup>2</sup> Лебедев И.Д.,

<sup>1,3</sup> Макаренков Д.А.,

<sup>1</sup> Кольцова Э.М.,

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),

<sup>3</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА,

\* Ответственный автор E-mail: [vasilenko.v.an@muctr.ru](mailto:vasilenko.v.an@muctr.ru)

**Аннотация:** цели разработка математической модели для описания явлений, протекающих в среднетемпературном твердооксидном топливном элементе. В процессе решения уравнений модели требуется найти ряд кинетических параметров, в том числе константы скоростей электрохимических реакций.

**Методы.** Математическая модель основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных и включает уравнения материального и теплового балансов, а также балансовые соотношения для заряда. Разработаны алгоритм численного решения уравнений математической модели и соответствующий программный модуль расчета уравнений, реализованный на языке программирования Python.

**Результаты.** В ходе работы определены кинетические параметры модели, включая константы скоростей реакций. Адекватность предложенной модели подтверждена сравнением с экспериментальными данными: максимальная относительная погрешность не превышает 8.1%. С использованием модели получены распределения температуры газа и интерконнектора, а также концентраций компонентов по времени, длине газового канала и толщине функционального слоя и электролита. Рассчитаны вольтамперные характеристики единичной ячейки. Выполнена оптимизация скорости подачи топлива и окислителя по критерию максимума выходной мощности.

**Выводы.** Разработанная математическая модель адекватно описывает исследуемые процессы, протекающие на электродах среднетемпературного топливного элемента. Определено оптимальное соотношение расходов топлива и окислителя, которое составляет 1:10.

**Ключевые слова:** твердооксидный топливный элемент, массовый баланс, тепловой баланс, математическое моделирование, численные методы, оптимизация

**Для цитирования:** Василенко В.А., Лебедев И.Д., Макаренков Д.А., Кольцова Э.М. Математическое моделирование твердооксидного топливного элемента // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 1. 3. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-3

Поступила в редакцию: 11 августа 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 14 ноября 2025 г.; Принята к публикации: 11 января 2026 г.

## Mathematical modeling of a solid oxide fuel cell

<sup>1</sup> Vasilenko V.A.,  
<sup>2</sup> Lebedev I.D.,  
<sup>1, 3</sup> Makarenkov D.A.,  
<sup>1</sup> Koltsova E.M.,

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology,  
<sup>2</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),  
<sup>3</sup> National Research Center "Kurchatov Institute" – IREA,  
\* Corresponding author E-mail: [vasilenko.v.an@muctr.ru](mailto:vasilenko.v.an@muctr.ru)

**Abstract: Objectives:** development of a mathematical model to describe the phenomena occurring in a medium-temperature solid oxide fuel cell. Solving the model equations requires finding a number of kinetic parameters, including the rate constants of electrochemical reactions.

**Methods.** To determine the viscosity of polymer solutions, their molecular weight and to study the adsorption of *k*-carrageenan on CX, the method of capillary viscometry was used. The assessment of the stability of the zones over time was carried out photometrically.

**Results.** The mathematical model is based on a system of partial differential equations and includes material and heat balance equations, as well as charge balance relationships. An algorithm for numerically solving the mathematical model equations and a corresponding software module for calculating the equations implemented in the Python programming language have been developed.

**Conclusions.** The developed mathematical model adequately describes the processes occurring at the electrodes of a medium-temperature fuel cell. The optimal fuel-to-oxidizer ratio was determined to be 1:10.

**Keywords:** solid oxide fuel cell, mass balance, heat balance, mathematical modeling, numerical methods, optimization

**For citation:** Vasilenko V.A., Lebedev I.D., Makarenkov D.A., Koltsova E.M. Mathematical modeling of a solid oxide fuel cell. Chemical Bulletin. 2026. 9 (1). 3. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-3

The article was submitted: August 11, 2025; Approved after reviewing: November 14, 2025; Accepted for publication: January 11, 2026.

### Введение

Наблюдаемый ежегодный рост объёмов выбросов углекислого газа требует активизации мер по решению данной проблемы и перехода к использованию экологически чистых источников энергии. В настоящее время приоритет смещается в сторону технологий, использующих экологически чистое топливо или отличающихся высокой эффективностью. В процессе перехода к экологически чистой энергетике водородные технологии, в частности топливные элементы, играют ключевую роль. Хотя применение возобновляемых источников энергии уже способствует снижению выбросов, необходимы дополнительные меры для обеспечения стабильной выработки энергии. Твердоокисные топливные элементы (ТОТЭ) являются весьма перспективным типом высокотемпературных топливных элементов. Высокая рабочая температура (600 – 1000°C) обуславливает их основные преимущества: высокую оксидно-ионную проводимость твердооксидного электролита, высокую скорость кинетики реакций и, следовательно, высокую эффективность преобразования энергии, а также гибкость и толерантность к типу топлива благодаря способности углеводородов к риформингу. Кроме того, высокая температура выходящего газа позволяет утилизировать или перерабатывать его для других применений [1].

С другой стороны, значительное количество исследований направлено на снижение рабочей температуры при сохранении высокой ионной проводимости используемых твердых электролитов. Данной проблеме посвящен ряд обзорных статей. В работе [2] рассмотрены основы теплопередачи внутри элемента и влияние структурных параметров (например, тип конструкции – планарный или трубчатый, форма каналов и интерконнектора, направление потоков топлива) на градиент температуры. В обзоре [3] обобщены сведения о компонентах ТОТЭ, подчеркнута важность использования тонкопленочной структуры и двухслойного электролита для улучшения характеристик при пониженных температурах. Авторами рассмотрены способы изготовления компонентов, и, хотя оптимальный метод требует дополнительных исследований, рекомендовано использование трафаретной печати и ленточного литья. Существуют и более узкие исследова-

ния, например, разработка компании Ceres Power Ltd – модель IT-SOFC [4]. Ее концепция основана на нанесении толсто пленочной структуры положительный электрод – электролит – отрицательный электрод (PEN) на пористую подложку из нержавеющей стали и использовании церия, легированного гадолинием (CGO), в качестве электролита, что позволяет достичь мощности до 500 мВт/см<sup>2</sup> при относительно низких для ТОТЭ температурах 500-600°C.

Отдельно следует выделить исследования, посвященные изучению различных конфигураций мембранно-электродного блока и топливной ячейки в целом.

Особое внимание заслуживает статья [5], представляющая обзор текущих разработок ТОТЭ в Forschungszentrum Juelich (FZJ «Общество с ограниченной ответственностью Исследовательского центра Юлиха», Юлих, Германия) – одного из лидеров в области разработки базовых технологий твердооксидных топливных элементов. Отдельные элементы играют ключевую роль в определении потенциальной производительности устройств, поэтому в FZJ уделяют значительное внимание повышению их характеристик на трех уровнях: улучшение свойств анодной подложки, электролита и катода. В настоящее время именно катод вносит наибольший вклад в удельное сопротивление площади элемента, что является основным фактором, ограничивающим рост выходной мощности. В 2023 году в FZJ проводились испытания установок мощностью 10 и 40 кВт, в ходе которых удалось достичь КПД от 60 до 71%, превысив расчетные показатели [6].

В настоящее время для описания работы топливных элементов (ТЭ) сформулировано большое количество математических моделей [7-9]. Широко изучаются аналитические и эмпирические методы моделирования ТЭ. Аналитические модели обычно позволяют спроектировать блок ТЭ, оптимизируя его выходные характеристики, однако их точность зависит от допущений и математических приближений. Современные математические модели содержат ряд основных уравнений для описания различных явлений в ТОТЭ, включая уравнения сохранения импульса, массы и энергии, а также электрохимические соотношения, например, уравнение Батлера-Фольмера. В работе [7] представлен обзор исследований по математическому моделированию ТОТЭ трубчатых и планарных конфигураций. Рассматриваются такие аспекты, как перенос массы, энергии и импульса, диффузия в пористых средах, электрохимические реакции (включая окисление СО), реакции конверсии и риформинга, а также поляризационные потери в подсистемах. Авторы [8] провели моделирование не только для газового канала прямоугольной формы, но и для каналов треугольного и трапециевидного сечения, сохраняя одинаковыми площадь активной поверхности и рабочие условия каждой ячейки. Расчеты показали, что наилучшую производительность обеспечивает прямоугольный канал, в то время как трапециевидный показал худшие результаты.

Для компьютерной реализации решения математических моделей используют различные среды программирования и готовые программные продукты. Одной из наиболее распространенных является среда COMSOL Multiphysics компании COMSOL [9-11]. Например, в [10] с применением пакета COMSOL авторы провели сравнительное исследование характеристик потока и электрических характеристик интерконнекторов с обычными прямыми каналами и новой щелевой конструкцией. Результаты показали, что новая конструкция позволяет достичь более высокого использования топлива, и выходная плотность мощности при низком расходе топлива остается выше, чем у обычной конструкции при высоком расходе. Авторы [11] с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics выполнили трехмерное численное моделирование твердооксидного топливного элемента. Изучено влияние условий эксплуатации, концентрации топлива и пористости электрода на электрохимические характеристики электродов ТОТЭ. Показано, что более высокая пористость улучшает массоперенос топлива, что приводит к практически равномерному распределению концентрации водорода в функциональном слое.

Другая распространенная вычислительная система, основанная на методе конечных элементов – программный пакет ANSYS для расчета гидродинамики (CFD). В статье [12] представлена трехмерная вычислительная модель планарной ячейки ТОТЭ с кросспоточной системой подачи топлива. Моделирование проводилось с применением программного комплекса ANSYS Fluent и его специализированного модуля SOFC Model. Изучено влияние различных параметров на плотность тока и сделан вывод, что повышение рабочего давления увеличивает производительность элемента, тогда как увеличение скорости потока практически не влияет на характеристики. В [13] разработана трехмерная CFD-модель планарного блока ТОТЭ на водородном топливе с использованием дополнительного модуля программного комплекса ANSYS 14.0. Авторы определили распределение температуры, давления, молярных долей компонентов и плотности тока вдоль блока для трех конфигураций потоков газов: параллельного, противоточного и поперечного. Обнаружено, что параллельная и противоточная конфигурации обеспечивают лучшую общую производительность, при этом наименьшие температурные градиенты наблюдаются при противотоке. Также отмечено

неравномерное распределение плотности тока: наибольшие значения – на границе катод-ребра, наименьшие — на анодной стороне в середине поперечного сечения каналов. В работе [14] с применением Ansys Fluent исследована трапециевидная форма поперечного сечения ячеек. Предполагалось, что такая геометрия обеспечит равномерное распределение плотности тока. Однако граница раздела катод-интерконнектор, где отсутствует воздушный канал, была признана критической областью из-за высоких градиентов температуры и критически низкой локальной плотности мощности. Авторы рекомендовали провести анализ тепловых напряжений, особенно на указанной границе.

Одним из современных подходов к моделированию является построение полуэмпирических моделей с использованием искусственных нейронных сетей, что образует своего рода аналитический класс моделей. Методы прогнозирования характеристик и рабочего ресурса ТЭ, основанные на методах машинного обучения, с применением методов искусственного интеллекта, нейросетевого моделирования представлены в обзорах [15-17] и ссылках в них. Так, в [18] моделирование ТОТЭ выполнялось на основе нейронной сети Хопфилда. В работе [19] применялся модифицированный метаэвристический алгоритм Fractional Order Dragonfly для минимизации квадратичной ошибки между эмпирическими и расчетными значениями выходного напряжения.

В современных исследованиях авторы часто комбинируют методы вычислительной гидродинамики и нейросетевого моделирования. Например, в [20] моделирование единичной ячейки проводилось в COMSOL Multiphysics, а для моделирования стека из 50 и башни из 150 ячеек использовались нейросетевые методы.

Авторы [21] рассмотрели три модели машинного обучения: искусственную нейронную сеть, случайный лес и экстремальный градиентный бустинг. Обучающая выборка включала более 30 тысяч записей результатов лабораторных экспериментов с ТОТЭ и 47 управляющих параметров. Положительный эффект (повышение точности и вычислительной производительности) был достигнут только для модели многослойного перцептрона. Модель экстремального градиентного бустинга продемонстрировала наилучшие показатели производительности и точности, тогда как модель случайного леса – наименьшую дисперсию и абсолютную ошибку, а также наилучшую обобщающую способность.

Исследование [22] направлено на разработку цифрового двойника для прогнозирования эффективности коммерческого ТОТЭ при различных условиях эксплуатации. Лабораторная мини-энергетическая установка включала горячий бокс со стеклом ТОТЭ, мини-реактор риформинга метана, горелку, рекуператор тепла и конденсатор для рециркуляции воды. Экспериментальные данные использовались для обучения моделей машинного обучения: искусственных нейронных сетей, случайного леса и градиентного бустинга. Модель случайного леса показала наилучшие результаты при оценке электрической эффективности.

Представленные в мировой литературе результаты подтверждают потенциал алгоритмов машинного обучения для поддержки интеграции топливных элементов в системы управления энергией, что способно повысить эффективность и ускорить переход к решениям в области устойчивой энергетики.

Целью данной работы является разработка математической модели для описания процессов переноса и электрохимических реакций, протекающих в среднетемпературном твердооксидном топливном элементе.

#### Материалы и методы исследований

При разработке математической модели ТОТЭ предполагалось, что топливо – водород подается на анод топливного элемента, окислитель – кислород поступает на катод. В активном слое катода происходит реакция восстановления кислорода до ионной формы электронами, поступающими из внешней цепи:



В активном слое анода происходит реакция окисления водорода оксид ионом, проходящим через электролит, с образованием электронов и воды:



На рис. 1 представлена схема расчетной области фрагмента мембранно-электродного блока (МЭБ) топливного элемента, включающая газовые каналы, электроды и электролит (выделена синей областью).

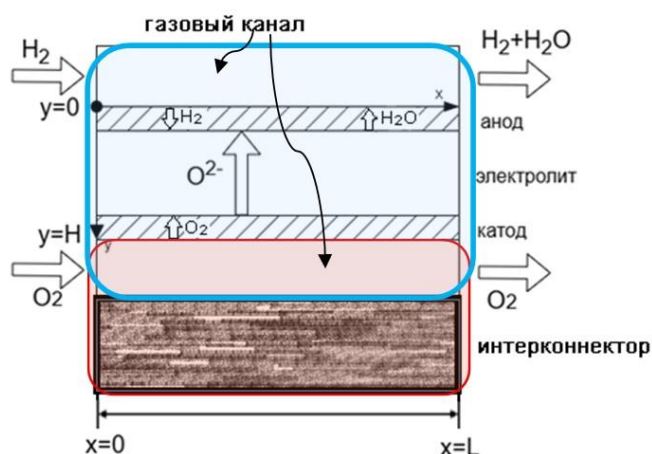


Рис. 1. Схема расчётной области.  
Fig. 1. Scheme of the calculation domain.

При разработке математической модели принимались следующие допущения:

- массоперенос компонентов в газовом канале происходит только вдоль оси  $x$ ;
- массоперенос компонентов в функциональных слоях – активных слоях анода и катода, и через электролит происходит только по оси  $y$ ;
- газы: топливо (водород), окислитель (кислород) и продукт реакции (пар) не поступают в слой электролита и находятся только в газовых каналах и активных слоях электродов;
- ионы кислорода образуются в активном слое катода, проходят по электролиту в активный слой анода, отсутствуют в газовых каналах;
- подача газов на аноде и катоде сонаправлена.

Изменение концентрации водорода в газовом канале анода  $C_{H_2}$  происходит за счет конвекции и массопереноса компонента из газового канала в функциональный слой анода:

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x} = -\beta_{H_2} \frac{S_{an}}{V_{an}} (C_{H_2} - \tilde{C}_{H_2}|_{y=0}), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация компонента в газовом канале, моль/м<sup>3</sup>,  $\tilde{C}$  – концентрация компонента в функциональном слое твердой фазе, моль/м<sup>3</sup>,  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $S$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>,  $V$  – объём канала, м<sup>3</sup>.

Левое граничное условие 1-го рода и правое граничное условие 2-го рода для изменения концентрации водорода имеют вид:

$$C_{H_2}^{an}|_{x=0} = C_{H_2}^{ex}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{H_2}^{an}}{\partial x}|_{x=L} = 0. \quad (5)$$

Изменение концентрации воды в газовом канале анода  $C_{H_2O}$  происходит за счет конвекции и массопереноса из зоны электрохимической реакции (функциональный слой анода) в газовый канал:

$$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x} = \beta_{H_2O} \frac{S_{an}}{S_{an}} (C_{H_2O} - \tilde{C}_{H_2O}|_{y=0}). \quad (6)$$

Граничные условия для изменения концентрации воды описываются уравнениями, аналогичными граничным условиям для концентрации водорода:

$$C_{H_2O}^{an} \Big|_{x=0} = C_{H_2O}^{EX}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{H_2O}^{an}}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (8)$$

Изменение концентрации кислорода в газовом канале катода  $C_{O_2}$  происходит за счет конвекции и массопереноса компонента из газового канала в функциональный слой катода и записывается аналогично уравнению (3):

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} + v \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} = -\beta_{O_2} \frac{S_{cat}}{V_{cat}} (C_{O_2} - \tilde{C}_{O_2} \Big|_{y=H}). \quad (9)$$

Граничные условия для изменения концентрации кислорода описываются данными уравнениями:

$$C_{O_2}^{cat} \Big|_{x=0} = C_{O_2}^{EX}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{O_2}^{cat}}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (11)$$

Изменение концентрации водорода в функциональном слое анода происходит за счет диффузии и убыли компонента в результате электрохимической реакции:

$$\frac{\partial \tilde{C}_{H_2}^{an}}{\partial t} = D_{H_2}^{an} \frac{\partial^2 \tilde{C}_{H_2}^{an}}{\partial y^2} - W_{an}, \quad (12)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии компонента, м<sup>2</sup>/с. Скорость электрохимической реакции  $W_{an}$  записывается следующим образом:

$$W_{an} = k_{an} \tilde{C}_{H_2} \exp\left(\frac{\alpha_{an} n F \eta_{an}}{RT}\right), \quad (13)$$

где  $k$  – константа скорости реакции, 1/с;  $\alpha$  – коэффициент переноса заряда;  $n$  – число электронов, принимающих участие в электрохимической реакции;  $F$  – постоянная Фарадея, Кл/моль;  $\eta$  – перенапряжение, В;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

Граничные условия на границе газовый канал/ функциональный слой анода для данного уравнения имеют вид:

$$-D_{H_2}^{an} \frac{\partial \tilde{C}_{H_2}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \beta_{H_2} \frac{S^{an}}{V^{an}} (C_{H_2}^{an} - \tilde{C}_{H_2}^{an} \Big|_{y=0}). \quad (14)$$

Изменение концентрации воды в функциональном слое анода происходит за счет диффузии и образования в результате электрохимической реакции и описывается уравнением (14):

$$\frac{\partial \tilde{C}_{H_2O}^{an}}{\partial t} = D_{H_2O}^{an} \frac{\partial^2 \tilde{C}_{H_2O}^{an}}{\partial y^2} + W_{an}. \quad (15)$$

Граничные условия на границе газовый канал/функциональный слой анода для данного уравнения имеют вид:

$$-D_{H_2O}^{an} \frac{\partial \tilde{C}_{H_2O}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \beta_{H_2O} \frac{S^{an}}{V^{an}} (C_{H_2O}^{an} - \tilde{C}_{H_2O}^{an} \Big|_{y=0}). \quad (16)$$

Изменение концентрации кислорода в функциональном слое катода происходит за счет диффузии и убыли компонента в результате электрохимической реакции, описывается уравнением (17):

$$\frac{\partial \tilde{C}_{O_2}^{cat}}{\partial t} = D_{O_2}^{cat} \frac{\partial^2 \tilde{C}_{O_2}^{cat}}{\partial y^2} - W_{cat}, \quad (17)$$

где  $W_{cat}$  – скорость электрохимической реакции на катоде может быть представлена в виде выражения (18):

$$W_{cat} = k_{cat} \tilde{C}_{O_2}^{0,5} \exp\left(\frac{-\alpha_{cat} n F \eta_{cat}}{RT}\right). \quad (18)$$

Граничные условия для границы газовой канал/функциональный слой катода для данного уравнения имеют вид:

$$D_{O_2}^{cat} \frac{\partial \tilde{C}_{O_2}}{\partial y} \Big|_{y=H} = \beta_{O_2} \frac{s^{cat}}{v^{cat}} \left( C_{O_2}^{cat} - \tilde{C}_{O_2}^{cat} \Big|_{y=H} \right). \quad (19)$$

Представленные в уравнениях (13), (15) и (18) граничные условия для границы раздела газовой канал/функциональный слой электрода описывают изменение концентраций компонентов, обусловленное процессом массоотдачи из объема газового канала к поверхности электрода.

Для водорода, воды и кислорода на границе функциональный слой электрода/электролит принимаются условия отсутствия потоков (условия непроницаемости). Это означает, что данные компоненты не проникают из электрода в электролит, а их градиенты концентрации на этой границе равны нулю.

Изменение концентрации ионов кислорода в функциональных слоях электродов и электролита происходит за счет диффузии, электромиграции за счет разности потенциалов, образование в результате электрохимической реакции на катоде и убыль за счет электрохимической реакции на аноде и описывается уравнением (20):

$$\frac{\partial C_{O_2^-}}{\partial t} = D_{O_2^-} \frac{\partial^2 C_{O_2^-}}{\partial y^2} - z D_{O_2^-} \cdot \frac{F}{RT} \cdot \frac{\partial C_{O_2^-}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Phi_e}{\partial y} + W_{cat} - W_{an}, \quad (20)$$

где  $z$  – заряд частицы;  $\Phi_e$  – потенциал ион-проводящей фазы.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} D \frac{\partial C_{O_2^-}}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0 \\ D \frac{\partial C_{O_2^-}}{\partial y} \Big|_{y=H} &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Связь электрического потенциала с плотностью тока для потенциалов электрон-проводящей фазы  $\Phi_s$  и ион-проводящей фазы  $\Phi_e$  записывается аналогично [5]:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_s \frac{\partial \Phi_s}{\partial y} \right) = -i, \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_e \frac{\partial \Phi_e}{\partial y} \right) = i, \quad (23)$$

где  $\sigma$  – проводимость фазы, 1/(Ом·м). Удельная плотность тока  $i$ , А/м<sup>2</sup>, связана со скоростью электродной реакции соотношением Фарадея:

$$i = -nFW. \quad (24)$$

В качестве начальных условий для потенциалов принимаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Phi_s^e(t=0, y) &= V_{oc}, \\ \Phi_s^a(t=0, y) &= 0, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $V_{oc}$  – напряжение разомкнутой цепи, В.

$$\Phi_e(t=0, y) = 0 \quad (26)$$

Предполагается, что в начальный момент времени потенциал ион-проводящей фазы отсутствовал, а потенциал электрон-проводящей фазы соответствовал потенциалу разомкнутой цепи.

Для потенциала твердой фазы граничные условия формулируются следующим образом:

$$\Phi_s^a(t, y = 0) = 0 \quad (27)$$

$$\Phi_s^c(t, y = N_y) = U_a(t) \quad (28)$$

Величина  $U_a(t)$ , (В), обозначает напряжение на аноде.

На границах расчетной области для потенциала электролита выполняются соотношения:

$$\frac{\partial \Phi_e}{\partial y}(t, y = 0) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial \Phi_e}{\partial y}(t, y = N_y) = 0 \quad (30)$$

Значения активационного перенапряжения на аноде и катоде определяются из соотношений (31) и (32) соответственно:

$$\eta^{an} = \Phi_s - \Phi_e, \quad (31)$$

$$\eta^{cat} = \Phi_s - \Phi_e - V_{oc}, \quad (32)$$

Искомая величина суммарной плотности тока представляет собой результат пространственного интегрирования распределения удельной плотности тока в пределах функциональных слоев электрода.

$$I(t) = \int_0^H i(t, y) dy. \quad (33)$$

Дифференциальные уравнения решались конечно-разностным методом. Уравнения, описывающие изменение концентраций компонентов в газовых каналах (3, 6, 8) решаются с помощью неявного метода Эйлера, выражая производную в виде левой конечной разности. Уравнения, описывающие изменение концентраций компонентов в функциональных слоях (11, 14, 16, 19) представляются в виде неявных абсолютно устойчивых разностных схем и решаются методом прогонки. Уравнения, описывающие изменение потенциалов электрон- и ион-проводящих фаз (22-23), решаются методом установления с добавлением производную по времени, преобразуя стационарную задачу в нестационарную.

При разработке математической модели теплового баланса была принята модель, опубликованная Куликовским А. [23]. Рассматривается фрагмент мембранно-электродного блока ТОТЭ, состоящий из пластины интерконнектора с прямым линейным каналом для подачи окислителя (воздуха). Расчетная область приведена на рис. 1 (выделена красным).

Модель состоит из двух дифференциальных уравнений: распределение тепла в интерконнекторе и воздуха в газовом канале вдоль оси  $x$ .

Изменение температуры пластины интерконнектора происходит за счет теплопроводности материала, выделения тепла в результате электрохимической реакции, теплообмена с воздушным потоком в газовом канале. Уравнение для расчета температуры интерконнектора имеет вид:

$$\rho_p c_{p_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \left( \frac{T \Delta S}{2F} + \eta \right) \frac{i}{h_p} - H_a \frac{T - T_a}{h_c}, \quad (34)$$

где,  $\rho_p$  – плотность материала интерконнектора, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{p_p}$  – теплоемкость материала интерконнектора, Дж/(кг·К);  $\lambda_p$  – теплопроводность материала интерконнектора, Вт/(м·К);  $\Delta S$  – изменение энтропии общей электрохимической реакции, Дж/(моль·К);  $h_p$  – толщина интерконнектора, м;  $H_a$  – коэффициент теплопередачи между воздухом в канале и интерконнектором, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_a$  – температура воздушного потока, К;  $h_c$  – высота канала, м.

Изменение температуры воздуха в газовом канале происходит за счет конвекции и теплообмена с пластиной и имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho_a c_{Pa} T_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a v_a c_{Pa} T_a)}{\partial x} = H_a \frac{T - T_a}{h_c}, \quad (35)$$

где,  $\rho_a$  – плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>;  $v_a$  – скорость воздушного потока, м/с;  $c_{Pa}$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Омическое перенапряжение  $\eta$  для может быть выражено как произведение локального удельного сопротивления  $R$  (Ом·м<sup>2</sup>) на плотность тока. В свою очередь отмечается, что температурная зависимость удельного сопротивления следует «обратному закону Аррениуса» с линейным по температуре предэкспоненциальным множителем:

$$R(T) = R_* \left(\frac{T}{T_*}\right) \exp\left(\frac{T_*}{T}\right), \quad (36)$$

где индекс «\*» соответствует характеристическим значениям.

Ниже приведены соотношения для определения начальных (37) и граничных (38-39) условий для определения температуры интерконнектора и воздуха:

$$T(t = 0, x) = T_0, \quad (37)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x}(t, x = 0) = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x}(t, x = L) = 0 \end{cases} \quad (38)$$

$$T_a(t, x = 0) = T_0, \quad (39)$$

Уравнения (35-36) решались разностным методом. Разностным аналогом уравнения (35) является абсолютно устойчивая неявная схема Кранка-Николсона. Уравнение (36) решали с помощью явной разностной схемы.

Значения токов обмена находились по соотношению (40). Для определения их значений на аноде и катоде были использованы данные публикации [8].

$$i_0 = k \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (40)$$

где  $k$  – константа скорости реакции на электроде, А/м<sup>2</sup>;  $E_a$  – значение энергия активации, Дж/моль.

Начальные значения констант скорости реакций для модели электрохимических процессов можно определить, используя соотношение (41) и значения токов обмена, полученных по (22):

$$k_0 = \frac{i_0}{nFC^0\delta}, \quad (41)$$

где  $n$  – количество электронов, участвующих в реакции;  $C^0$  – начальное значение концентрация компонента реакции, моль/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – толщина электрода, м;

Значения удельной электропроводности твердой фазы ( $\sigma_s$ , 1/(Ом·м)) и электролита ( $\sigma_e$ , 1/(Ом·м)) могут быть найдены аналогично [8] по соотношениям (42) и (43):

$$\sigma_s = \frac{4,2 \cdot 10^7}{T} \cdot \exp\left(-\frac{1200}{T}\right), \quad (42)$$

$$\sigma_e = 3,34 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{10300}{T}\right). \quad (43)$$

В процессе решения уравнений математической модели требуется найти ряд кинетических параметров, в том числе константы скоростей электрохимических реакций.

#### Результаты и обсуждения

В результате численного решения уравнений разработанной математической модели были получены пространственно-временные распределения концентраций компонентов, а также температуры воздуха и

интерконнекта. Определение кинетических параметров выполнялось методом сканирования в диапазоне плотностей тока от 0 до 2000 А/м<sup>2</sup>. Остальные физико-химические свойства, такие как электропроводность электродов и электролита, а также коэффициенты теплопроводности, принимались по данным литературных источников [8, 23]. Все значения параметров, использованные в расчетах, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров, используемых при расчете.

Table 1

Values of parameters used in the calculation.

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
Начальное значение температуры	$T_0$ , К	873
Толщина интерконнектора	$h_p$ , м	$1 \times 10^{-3}$
Высота газового канала (характеристическая длина для теплообмена)	$h_c$ , м	$1 \times 10^{-3}$
Длина газового канала	$L$ , м	$1 \times 10^{-1}$
Теплопроводность материала интерконнектора	$\lambda_p$ , Вт/(м·К)	12
Теплопроводность воздуха	$\lambda_a$ , Вт/(м·К)	0.073
Изменение энтропии в реакции взаимодействия водорода и кислорода	$\Delta S$ , Дж/(моль·К)	44.3
Удельная теплоемкость воздуха при 700°C	$c_{p_a}$ , Дж/(кг·К)	1160
Плотность воздуха при 700°C	$\rho_a$ , кг/м <sup>3</sup>	0.32
Удельная теплоемкость стали (материал интерконнектора)	$c_{p_p}$ , Дж/(кг·К)	500
Плотность стали	$\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	7900
Скорость потока в канале	$v_a^0$ , м/с	6
Характеристическое значение температуры	$T^*$ , К	3280
Характеристическое значение удельного сопротивления	$R^*$ , Ом·м <sup>2</sup>	$0.116 \times 10^{-4}$
Омическое перенапряжение	$\eta$ , В	0.3
Характеристическое значение плотности тока	$i^*$ , А/м <sup>2</sup>	$1 \times 10^4$

Значения параметров модели, приведенные в табл. 2, включают величины, рассчитанные по формулам (39-42), а также определенные в ходе сканирования.

Таблица 2

Значения параметров, полученные расчетным путем.

Table 2

Parameter values obtained by calculation.

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
Ток обмена на аноде	$i_0^{\text{an}}$ , А/м <sup>2</sup>	286
Ток обмена на катоде	$i_0^{\text{cat}}$ , А/м <sup>2</sup>	38.3
Начальное приближение константы скорости реакции на аноде	$k_0^{\text{an}}$ , 1/с	$1.48 \times 10^{-3}$
Начальное приближение константы скорости реакции на катоде	$k_0^{\text{cat}}$ , 1/с	$1.98 \times 10^{-4}$
Удельная электропроводность электролита	$\sigma_e$ , 1/Ом·м	0.84
Удельная электропроводность твердой фазы	$\sigma_s$ , 1/Ом·м	12575

Продолжение таблицы 2  
Continuation of Table 2

Константа скорости реакции на аноде	$k_{an}, 1/c$	$7 \times 10^{-3}$
Константа скорости реакции на катоде	$k_{cat}, 1/c$	$9 \times 10^{-4}$

В результате расчетов по математической модели получены зависимости изменения во времени и по длине газового канала температур интерконнекта и воздуха. Кроме того, получены профили концентраций реагентов (водорода, воды, кислорода и ионов кислорода) как в объеме газовых каналов, так и в пределах функциональных слоев электродов.

На рис. 2 представлено сравнение вольт-амперных характеристик, рассчитанных по предлагаемой модели, с литературными экспериментальными данными работы [8] (экспериментальные точки выделены красным цветом). Наблюдается хорошее соответствие между результатами, полученными в ходе численного моделирования (описанного в разделе «Теоретические и численные методы»), экспериментальными значениями и расчетными данными из [8]. Проверка адекватности модели проведена в интервале плотностей тока 2000–4500 А/м<sup>2</sup>, при этом максимальная относительная ошибка не превысила 8,1 %.

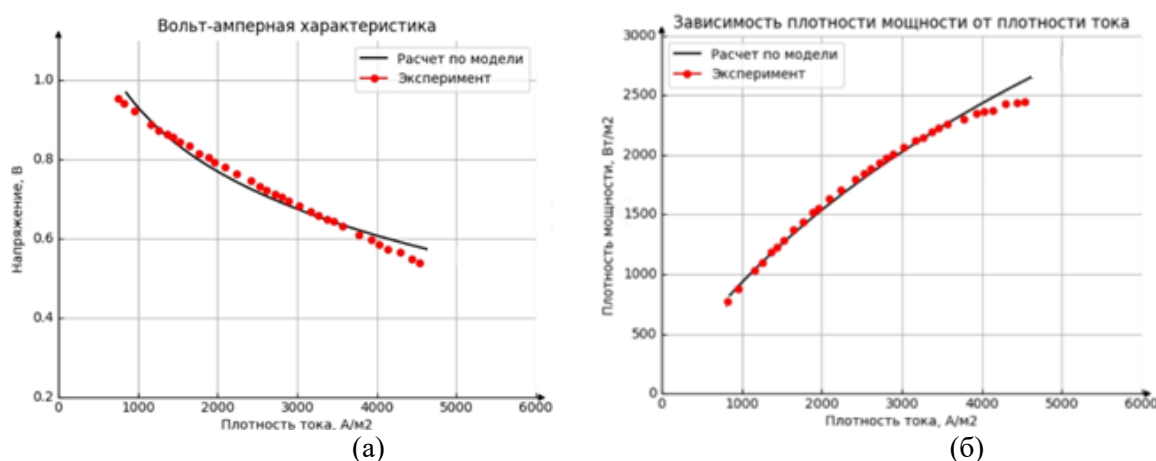


Рис. 2. Зависимость напряжения (а) и плотности мощности (б) от плотности тока.  
Fig. 2. Dependence of voltage (a) and power density (b) on current density.

Выполнена оптимизация рабочих параметров ТОТЭ по критерию максимальной удельной мощности. В ходе численных экспериментов варьировались скорости подачи топлива и окислителя (рис. 3).

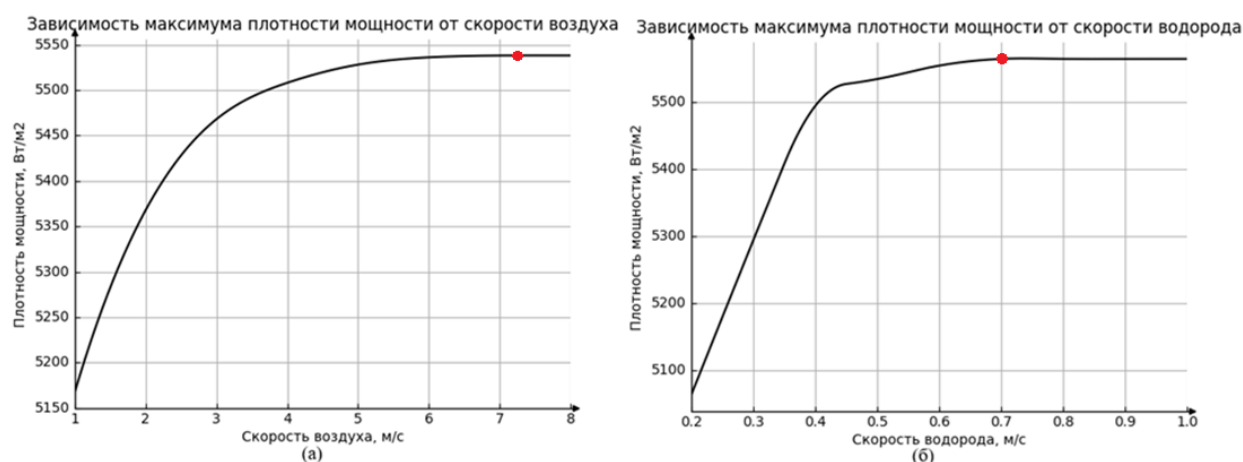


Рис. 3. Зависимость максимума плотности мощности от скорости подачи воздуха (а), скорости подачи водорода (б).

Fig. 3. Dependence of the maximum power density on the air supply rate (a), hydrogen supply rate (b).

Оптимальные значения параметров определялись методом Нелдера–Мида. Установлено, что оптимальная скорость подачи воздуха составляет 7,3 м/с, водорода – 0,7 м/с. Достигнутые значения удельной мощности при этом равны 5,538 кВт/м<sup>2</sup> и 5,564 кВт/м<sup>2</sup> соответственно. Найденное оптимальное соотношение расходов топлива и окислителя составляет 1:10.

### Выводы

В данной работе разработана и представлена динамическая математическая модель твердооксидного топливного элемента, учитывающая тепловые эффекты и электрохимические процессы, протекающие на электродах. Модель включает уравнения материального и теплового балансов, а также балансовые соотношения для сохранения заряда. В ходе решения определены кинетические параметры модели, включая константы скоростей реакций.

Сопоставление с литературными данными показало удовлетворительное соответствие (максимальная относительная ошибка – 8,1 %). В результате численного моделирования получены распределения температур и концентраций компонентов в зависимости от времени и пространственных координат, а также вольт-амперные характеристики ячейки. С использованием метода Нелдера–Мида проведена оптимизация режимов работы ТОТЭ по критерию максимальной удельной мощности. Оптимальные значения скоростей подачи топлива (водорода) и окислителя (воздуха) составили 0,7 м/с и 7,3 м/с соответственно.

В представленной работе модель построена на основе одномерных дифференциальных уравнений, что является определенным упрощением. Для повышения точности описания процессов в дальнейшем целесообразен переход к двумерной постановке задачи.

### Список источников

1. Hu Y., Li D., Guo H., Liu S.-H., Meng Y., Ding S., Li C.-X. Recent progress of high-performance interconnectors for SOFC: From materials, protective coatings, optimizing strategies, towards the real stack applications // *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 505. P. 159321. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159321>
2. Zeng Z., Qian Y., Zhang Y., Hao C., Dan D., Zhuge W. A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks // *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. P. 115899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115899>
3. Zakaria Z., Mat Z.A., Abu Hassan S.H., Kar Y.B. A review of solid oxide fuel cell component fabrication methods toward lowering temperature // *International Journal of Energy Research*. 2020. Vol. 44. № 5. P. 5946 – 5961. <https://doi.org/10.1002/er.4907>
4. Leah R. T., Brandon N. P., Aguiar P. Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500-600° C // *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 145. № 2. P. 336 – 352. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.067>
5. Blum L., Buchkremer H.-P., Gross S., Gubner A., (Bert) de Haart L.G.J., Nabielek H., Quadackers W.J., Reisgen U., Smith M.J., Steinberger-Wilckens R., Steinbrech R.W., Tietz F., Vinke I.C. Solid oxide fuel cell development at Forschungszentrum Juelich // *Fuel Cells*. 2007. Vol. 7. № 3. P. 204 – 210. <https://doi.org/10.1002/fuce.200600039>
6. Peters Ro., Tiedemann W., Hoven I., Deja R., Kruse N., Kunz F., Blum L., Peters R., Eichel R.-A. Experimental results of a 10/40 kW-class reversible solid oxide cell demonstration system at Forschungszentrum Jülich // *Journal of the Electrochemical Society*. 2023. Vol. 170. № 4. P. 044509. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/accbf0>
7. Hajimolana S.A., Hussain M.A., Wan Daud W.M.A., Soroush M., Shamiri A. Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol.15. P. 1893 – 1917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.011>
8. Khazae I., Rava A. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries // *Energy*. 2017. Vol. 119. P. 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.074>
9. Zazhigalov S.V., Zagoruiko A.N., Popov M.P., Nemudry A.P., Belotserkovsky V.A. Mathematical modeling and experimental studies of microtubular solid oxide fuel cells // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 54. № 4. P. 647 – 654. <https://doi.org/10.1134/S0040579520040284>
10. Sarkar B., Hariharan D., Gundlapally S.R. Hybrid 1+1D model for direct ammonia-fed planar SOFCs: Simulation and Analysis // *Fuel*. 2025. Vol. 392. P. 134780. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134780>
11. Fu Q., Li Z., Wei W., Liu F., Xu X., Liu Z. Performance enhancement of planar solid oxide fuel cell using a novel interconnector design // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. № 41. P. 21634 – 21656. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.001>
12. Nguyen X.-V. Three-dimensional simulation of the operating characteristics of cell layers in solid oxide fuel cells // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 4462. <https://doi.org/10.3390/app15084462>

13. Tikiz I., Taymaz I., Pehlivan H. CFD modelling and experimental validation of cell performance in a 3-D planar SOFC // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. № 29. P. 15441 – 15455. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.152>
14. Zhang Z., Chen J., Yue D., Yang G., Ye S., He C., Wang W., Yuan J., Huang N. Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in a cross-flow anode-supported planar SOFC // *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 80 – 98. <https://doi.org/10.3390/en7010080>
15. Yakubu A.U., Qingsheng L., Kai M., Jinwei C., Abbaker O. Mohammed A., Zhao J., Jiang Q., Ye X., Liu J., Yu Q., Aurangzeb M., Xiong S. Modeling, optimization, and thermal management strategies of hydrogen fuel cell systems // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 105924. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105924>
16. Bedi U. Recent advances in fuel cell design and modeling: A comprehensive review // *Next Energy*. 2026. Vol. 11. P. 100517. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100517>
17. Zhang Z., Liu H., Lan G., Wang Y., Liu C., Yin Z., Lu K. Single-cell modeling, simulation and optimization of high-temperature proton exchange membrane fuel cells: current status, challenges, and perspectives // *Journal of Power Sources*. 2026. Vol. 664. P. 238943. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238943>
18. Ba S., Xia D., Gibbons E.M. Model identification and strategy application for solid oxide fuel cell using rotor Hopfield neural network based on a novel optimization method // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. № 51. P. 27694 – 27704. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.12>
19. Guo H., Gu W., Khayatnezhad M., Ghadimi N. Parameter extraction of the SOFC mathematical model based on fractional order version of dragonfly algorithm // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. № 57. P. 24059 – 24068. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.190>
20. Xiong X., Liang K., Ma G., Ba L. Three-dimensional multi-physics modelling and structural optimization of SOFC large-scale stack and stack tower // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. № 7. P. 2742 – 2761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.146>
21. Beloev H.I., Saitov S.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Mayorov E.S., Babikov O.E., Iliev I.K. Solid oxide fuel cell voltage prediction by a data-driven approach // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 2174. <https://doi.org/10.3390/en18092174>
22. Testasecca T., Maniscalco M.P., Brunaccini G., Airò Farulla G., Ciulla G., Beccali M., Ferraro M. Toward a digital twin of a solid oxide fuel cell microcogenerator: data-driven modelling // *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 4140. <https://doi.org/10.3390/en17164140>
23. Kulikovskiy A.A. Thermal waves in SOFC stacks // *Journal of the Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155. №9. P. 693-698. <https://doi.org/10.1149/1.2953579>

### References

1. Hu Y., Li D., Guo H., Liu S.-H., Meng Y., Ding S., Li C.-X. Recent progress of high-performance interconnectors for SOFC: From materials, protective coatings, optimizing strategies, towards the real stack applications. *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 505. P. 159321. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159321>
2. Zeng Z., Qian Y., Zhang Y., Hao C., Dan D., Zhuge W. A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks. *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. P. 115899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115899>
3. Zakaria Z., Mat Z.A., Abu Hassan S.H., Kar Y.B. A review of solid oxide fuel cell component fabrication methods toward lowering temperature. *International Journal of Energy Research*. 2020. Vol. 44. No. 5. P. 5946 – 5961. <https://doi.org/10.1002/er.4907>
4. Leah R. T., Brandon N. P., Aguiar P. Modeling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500-600° C. *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 145. No. 2. P. 336 – 352. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.067>
5. Blum L., Buchkremer H.-P., Gross S., Gubner A., (Bert) de Haart L.G.J., Nabielek H., Quadackers W.J., Reisinger U., Smith M. J., Steinberger-Wilckens R., Steinbrech R.W., Tietz F., Vinke I. C. Solid oxide fuel cell development at Forschungszentrum Juelich. *Fuel Cells*. 2007. Vol. 7. No. 3. P. 204 – 210. <https://doi.org/10.1002/fuce.200600039>
6. Peters Ro., Tiedemann W., Hoven I., Deja R., Kruse N., Kunz F., Blum L., Peters R., Eichel R.-A. Experimental results of a 10/40 kW-class reversible solid oxide cell demonstration system at Forschungszentrum Jülich. *Journal of the Electrochemical Society*. 2023. Vol. 170. No. 4. P. 044509. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/acbf0>

7. Hajimolana S.A., Hussain M.A., Wan Daud W.M.A., Soroush M., Shamiri A. Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol.15. P. 1893 – 1917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.011>
8. Khazaei I., Rava A. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries. *Energy*. 2017. Vol. 119. P. 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.074>
9. Zazhigalov S.V., Zagoruiko A.N., Popov M.P., Nemudry A.P., Belotserkovsky V.A. Mathematical modeling and experimental studies of microtubular solid oxide fuel cells. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 54. No. 4. P. 647 – 654. <https://doi.org/10.1134/S0040579520040284>
10. Sarkar B., Hariharan D., Gundlapally S.R. Hybrid 1+1D model for direct ammonia-fed planar SOFCs: Simulation and Analysis. *Fuel*. 2025. Vol. 392. P. 134780. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134780>
11. Fu Q., Li Z., Wei W., Liu F., Xu X., Liu Z. Performance enhancement of planar solid oxide fuel cell using a novel interconnector design. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. No. 41. P. 21634 – 21656. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.001>
12. Nguyen X.-V. Three-dimensional simulation of the operating characteristics of cell layers in solid oxide fuel cells // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 4462. <https://doi.org/10.3390/app15084462>
13. Tikiz I., Taymaz I., Pehlivan H. CFD modeling and experimental validation of cell performance in a 3-D planar SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. No. 29. P. 15441 – 15455. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.152>
14. Zhang Z., Chen J., Yue D., Yang G., Ye S., He C., Wang W., Yuan J., Huang N. Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in a cross-flow anode-supported planar SOFC. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 80 – 98. <https://doi.org/10.3390/en7010080>
15. Yakubu A.U., Qingsheng L., Kai M., Jinwei C., Abbaker O. Mohammed A., Zhao J., Jiang Q., Ye X., Liu J., Yu Q., Aurangzeb M., Xiong S. Modeling, optimization, and thermal management strategies of hydrogen fuel cell systems. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 105924. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105924>
16. Bedi U. Recent advances in fuel cell design and modeling: A comprehensive review. *Next Energy*. 2026. Vol. 11. P. 100517. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100517>
17. Zhang Z., Liu H., Lan G., Wang Y., Liu C., Yin Z., Lu K. Single-cell modeling, simulation and optimization of high-temperature proton exchange membrane fuel cells: current status, challenges, and perspectives. *Journal of Power Sources*. 2026. Vol. 664. P. 238943. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238943>
18. Ba S., Xia D., Gibbons E.M. Model identification and strategy application for solid oxide fuel cell using rotor Hopfield neural network based on a novel optimization method. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. No. 51. P. 27694 – 27704. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.12>
19. Guo H., Gu W., Khayatnezhad M., Ghadimi N. Parameter extraction of the SOFC mathematical model based on fractional order version of dragonfly algorithm // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol.47. No. 57. P. 24059 – 24068. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.190>
20. Xiong X., Liang K., Ma G., Ba L. Three-dimensional multi-physics modeling and structural optimization of SOFC large-scale stack and stack tower. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No. 7. P. 2742 – 2761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.146>
21. Beloev H.I., Saitov S.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Mayorov E.S., Babikov O.E., Iliev I.K. Solid oxide fuel cell voltage prediction by a data-driven approach. *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 2174. <https://doi.org/10.3390/en18092174>
22. Testasecca T., Maniscalco M.P., Brunaccini G., Airò Farulla G., Ciulla G., Beccali M., Ferraro M. Toward a digital twin of a solid oxide fuel cell microcogenerator: data-driven modeling. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 4140. <https://doi.org/10.3390/en17164140>
23. Kulikovskiy A.A. Thermal waves in SOFC stacks. *Journal of the Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155. No. 9. P. 693-698. <https://doi.org/10.1149/1.2953579>

### *Информация об авторах*

Василенко В.А., кандидат технических наук, доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-376X>, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, [vasilenko.v.an@muctr.ru](mailto:vasilenko.v.an@muctr.ru)

Лебедев И.Д., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 127473, г. Москва, ул. Садовая-Самотечная, д. 1, [ilya-lebedev007@yandex.ru](mailto:ilya-lebedev007@yandex.ru)

Макаренков Д.А., доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9; заместитель директора по науке, НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, 107076, г. Москва, ул. Богородский Вал, д. 3, [makarenkovd@gmail.com](mailto:makarenkovd@gmail.com)

Кольцова Э.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ORCID 0000-0002-8093-4617, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, [koltsova.e.m@muctr.ru](mailto:koltsova.e.m@muctr.ru)

© Василенко В.А., Лебедев И.Д., Макаренков Д.А., Кольцова Э.М., 2026

### *Information about the authors*

Vasilenko V.A., PhD (Engineering), Associate Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-376X>, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, [vasilenko.v.an@muctr.ru](mailto:vasilenko.v.an@muctr.ru)

Lebedev I.D., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 1 Sadovaya-Samotechnaya Street, Moscow, 127473, [ilya-lebedev007@yandex.ru](mailto:ilya-lebedev007@yandex.ru)

Makarenkov D.A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047; Deputy Director for Science, National Research Center "Kurchatov Institute" – IREA, 3 Bogorodsky Val St., Moscow, 107076, [makarenkovd@gmail.com](mailto:makarenkovd@gmail.com)

Koltsova E.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department, ORCID 0000-0002-8093-4617, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, [koltsova.e.m@muctr.ru](mailto:koltsova.e.m@muctr.ru)

© Vasilenko V.A., Lebedev I.D., Makarenkov D.A., Koltsova E.M., 2026