

**РЕЦЕНЗИЯ**

на магистерскую диссертацию  
(наименование вида работы)

**Сакиева Молдир Маратовна**  
(Ф.И.О. обучающегося)

**7M07113 – Электротехника и энергетика**  
(шифр и наименование специальности)

На тему: **Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей**

Выполнено:

- а) графическая часть на \_\_\_\_ - \_\_\_\_ листах  
б) пояснительная записка на \_\_\_\_\_ страницах

Представленная магистерская диссертация посвящена актуальному вопросу применения водородных технологий для энергообеспечения зданий в условиях Республики Казахстан. Автором успешно выполнено комплексное исследование, включая численное моделирование и сравнительный анализ систем на основе полимер-электролитных мембран (ПЭМ) и твердооксидных топливных элементов (СОТЭ).

**ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ**

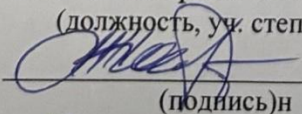
- 1) В диссертации полезно было бы дополнительно рассмотреть экономическую эффективность внедрения водородных топливных элементов в условиях Казахстана;
- 2) Возможны уточнения в части описания ограничений и рисков при эксплуатации данных систем (например, в суровых климатических условиях).

**Оценка работы**

В целом магистерская работа Сакиевой М.М. выполнена на актуальную тему и заслуживает оценки «отлично» (90%), а автор заслуживает присвоения степени магистра по специальности 7M07113 - «Электротехника и энергетика».

**Рецензент**

PhD, профессор,  
ALT Университет им. М.Тынышпаева  
(должность, уч. степень, звание)

  
(подпись)н  
« 18 » 08

Калиев Ж.Ж.

2025 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ





**ОТЗЫВ**  
**НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**  
на магистерскую диссертацию

**Сакиева Молдир Маратовна**

7M07113 – Электротехника и энергетика

Тема: Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей

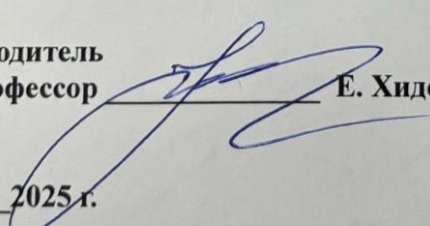
Диссертационная работа **Сакиевой М.** посвящена актуальной и востребованной теме развития водородной энергетики для повышения энергоэффективности зданий в условиях Республики Казахстан. Работа отличается комплексным характером, сочетая аналитический обзор мирового и отечественного опыта внедрения водородных технологий с детальным мультифизическим моделированием двух ключевых типов топливных элементов – ПЭМ-ТЭ и СОТЭ – в программной среде COMSOL Multiphysics.

Автор последовательно раскрывает актуальность и научную новизну исследования, обосновывает выбор моделируемых технологий и демонстрирует глубокое понимание предмета. В работе детально описан процесс построения 3D-модели топливных элементов и здания, выбор материалов, настройка физических интерфейсов и граничных условий, а также проведен анализ возникающих в процессе моделирования ошибок и путей их устранения.

Важным достоинством работы является сопоставление эффективности ПЭМ-ТЭ и СОТЭ для реальных условий Казахстана, а также формулировка практических рекомендаций по их интеграции в системы энергоснабжения зданий. Разработанные численные модели и полученные результаты обладают высокой практической ценностью и могут быть использованы для дальнейших инженерных расчетов, подготовки проектной документации и внедрения водородных технологий на практике.

Учитывая объем и содержание проделанной работы, считаю, что магистерская диссертационная работа заслуживает оценки «**отлично**» (90%), а её автор Сакиева М.М. может быть рекомендован к присуждению академической степени магистра технических наук.

Научный руководитель  
к.т.н., ассоц. профессор

 **Е. Хидолда**

«17» 06 2025 г.

**Протокол**

**о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)**

**Автор:** Сакиева Молдир Маратовна

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей

**Научный руководитель:** Еркин Хидолда

**Коэффициент Подобия 1:** 1.2

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 18

**Знаки из здругих алфавитов:** 8

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☒ Обоснование:

*Рекоменду к защите*

Дата

*[Подпись]* / *Хидолда Э.*

*23.08.2024 г.*

проверяющий эксперт



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Сакиева Молдир Маратовна**

**Тақырыбы: Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей**

**Жетекшісі: Еркин Хидолда**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 1.2**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0**

**Дәйексөз (35): 1.6**

**Әріптерді ауыстыру: 8**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 18**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

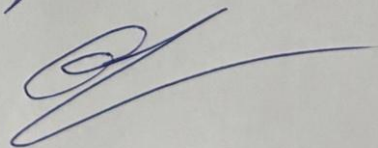
☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

Күні 23.06.2025

Кафедра меңгерушісі *Исраилов*

*Сурсабаев С.А.*



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сакиева Молдир Маратовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей

Научный руководитель: Еркин Хидолда

Коэффициент Подобия 1: 1.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 18

Знаки из других алфавитов: 8

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата 23.06.2025

Заведующий кафедрой Энергетики

Сараибеев СА

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Сакиева Молдир Маратовна

Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7M07113 – Электротехника и энергетика

Алматы 2025



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А.Буркитбаева

УДК

На правах рукописи

Сакиева Молдир Маратовна

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей»

Направление подготовки 7M07113-«Электротехника и энергетика»

Научный руководитель  
канд. тех. наук, ассоц. профессор

Е.Хидолда

«12» 06 2025 г.

Рецензент

PhD, профессор

АЛТ Университет им. М.Тынышпаева

Калиев Ж.Ж.

«18» 06 2025 г.

Нормоконтроль

старший преподаватель

А.О. Бердибеков

«19» 06 2025 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующей кафедрой

PhD, ассоц. профессор

Е.А. Сарсенбаев

«18» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

ИАО «КазахТех» им. К.И.Сатпаева»

Институт энергетики

и машиностроения

Алматы 2025



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»  
Институт

Институт Энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетики

7M07113-«Электротехника и энергетика»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой,

доктор PhD

Е. А. Сарсенбаев

« 01 » 02 2025 ж.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту: Сакиева Молдир Маратовна

Тема: Исследование применения водорода для энергообеспечения потребителей

Утверждена приказом: *№ 548-0 от 09.12.2023*

Срок сдачи законченной диссертации: «18» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

- 1) Разработка и моделирована система электроснабжения здания на основе топливных элементов на базе полимерно-электролитных мембран;
- 2) Разработка и моделирование автономной системы электро- и теплоснабжения здания на основе твердооксидных топливных элементов;
- 3) Расчёт системы электроснабжения, балансирующей за счет использования водорода.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- a) модель системы электроснабжения здания на основе топливных элементов на базе полимерно-электролитных мембран;
- б) модель автономной системы электро- и теплоснабжения здания на основе твердооксидных топливных элементов;
- в) научно-технические документы по использованию водорода для балансирования системы электроснабжения.

Рекомендуемая основная литература:

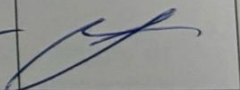
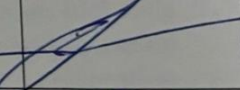
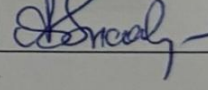
- 1 Hydrogen Roadmap Europe. European Commission, 2019.
- 2 Справочник по моделированию процессов в топливных элементах. – COMSOL Multiphysics Documentation, 2023.
- 3 Cherepanov, V.M. Водородная энергетика: достижения и перспективы. — Москва: Наука, 2015



**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

| Наименование<br>перечень разделов,<br>разрабатываемых<br>вопросов   | Сроки<br>представления<br>научному руководителю | Примечание |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|
| Раздел 1. Водород и его роль в мировой энергетике                   | 01.03.2025                                      | —          |
| Раздел 2. Методология исследования и выбор программного обеспечения | 01.05.2025                                      | —          |
| Раздел 3. Моделирование и анализ применения топливных элементов     | 01.06.2025                                      | —          |

**Подписи**  
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

| Наименования разделов                                     | Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)                          | Дата подписания | Подпись                                                                               |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Водород и его роль в мировой энергетике                   | Е. Хидолда, научный руководитель, канд. Тех. наук, ассоц. профессор | 17.06.2025      |  |
| Методология исследования и выбор программного обеспечения | Е. Хидолда, научный руководитель, канд. Тех. наук, ассоц. профессор | 17.06.2025      |  |
| Моделирование и анализ применения топливных элементов     | Е. Хидолда, научный руководитель, канд. Тех. наук, ассоц. профессор | 17.06.2025      |  |
| Нормо контролер                                           | А.О.Бердибеков, магистр, старший преподаватель                      | 19.06.2025      |  |

Научный руководитель \_\_\_\_\_ /Е.Хидолда /

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_ / М.М.Сакиева /

Дата « 01 » 02 2025 ж

## АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации исследованы возможности применения водородных топливных элементов для энергообеспечения зданий в условиях Казахстана. Основное внимание уделено моделированию и сравнительному анализу систем на основе полимер-электролитной мембраны (ПЭМ-ТЭ) и твердооксидных топливных элементов (СОТЭ) с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Проведён анализ мировых и отечественных тенденций, оценена эффективность, надёжность и экологическая безопасность интеграции водородных систем в энергоснабжение зданий. Полученные результаты и рекомендации способствуют переходу к «зелёной» экономике и повышению энергоэффективности объектов.

## АНДАТПА

Осы магистрлік диссертацияда Қазақстан жағдайында ғимараттарды энергиямен қамтамасыз ету үшін сутегі Отын элементтерін қолдану мүмкіндіктері зерттелді. COMSOL Multiphysics бағдарламалық кешенін пайдалана отырып, полимер-электролит мембранасы (PEM-te) және қатты оксидті отын элементтері (sote) негізіндегі жүйелерді модельдеуге және салыстырмалы талдауға баса назар аударылады. Әлемдік және отандық үрдістерге талдау жүргізілді, ғимараттарды энергиямен жабдықтауға сутегі жүйелерін интеграциялаудың тиімділігі, сенімділігі және экологиялық қауіпсіздігі бағаланды. Алынған нәтижелер мен ұсыныстар "жасыл" экономикаға көшуге және объектілердің энергия тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

## ANNOTATION

In this master's thesis, the possibilities of using hydrogen fuel cells for energy supply of buildings in Kazakhstan are investigated. The main attention is paid to modeling and comparative analysis of systems based on polymer-electrolyte membrane (PEM-TE) and solid oxide fuel cells (SOTE) using the COMSOL Multiphysics software package. The analysis of global and domestic trends has been carried out, the efficiency, reliability and environmental safety of the integration of hydrogen systems into the energy supply of buildings has been assessed. The obtained results and recommendations contribute to the transition to a "green" economy and increase the energy efficiency of facilities.



## СОДЕРЖАНИЕ

|       |                                                                                                   |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | Введение                                                                                          | 7  |
| 1     | Водород и его роль в мировой энергетике                                                           | 10 |
| 1.1   | Развитие водородной энергетики в Казахстане                                                       | 11 |
| 1.2   | Классификация водородных энергетических систем                                                    | 12 |
| 1.3   | Водородные топливные элементы: виды, преимущества и особенности                                   | 14 |
| 2     | Методология исследования и выбор программного обеспечения                                         | 17 |
| 2.1   | Построение и реализация 3D-модели в COMSOL                                                        | 18 |
| 2.2   | Особенности моделирования и обоснование использования двух типов топливных элементов              | 19 |
| 2.3   | Баланс поступающей энергии и предотвращение избыточности                                          | 21 |
| 2.4   | Научное и практическое обоснование подхода                                                        | 21 |
| 2.5   | Пример расчёта энергетического баланса с формулами                                                | 22 |
| 2.5.1 | Энергетический баланс здания                                                                      | 22 |
| 2.5.2 | Покрытие потребности в тепле                                                                      | 22 |
| 2.5.3 | Расход водорода                                                                                   | 23 |
| 2.5.4 | Пример расчёта для типового здания                                                                | 23 |
| 2.6   | Построение и настройка физических интерфейсов, выбор граничных условий и создание расчетной сетки | 24 |
| 2.7   | Логика выбора физических интерфейсов                                                              | 24 |
| 2.8   | Принципы выбора и задания граничных условий                                                       | 26 |
| 2.9   | Создание расчетной сетки                                                                          | 27 |
| 3     | Моделирование и анализ применения топливных элементов                                             | 29 |
| 3.1   | Результаты моделирования ПЭМ-топливного элемента                                                  | 29 |
| 3.2   | Результаты моделирования СОТЭ-топливного элемента                                                 | 34 |
| 3.3   | Результаты моделирования ПЭМ и СОТЭ-топливных элементов                                           | 39 |
| 3.4   | Вклад работы в реализацию ключевых пунктов государственных стратегических документов              | 40 |
|       | Заключение                                                                                        | 42 |
|       | Список литературы                                                                                 | 43 |

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие энергетики определяется необходимостью поиска новых устойчивых и экологически чистых технологий, способных обеспечить экономический рост и повышение качества жизни населения при одновременном сокращении воздействия на окружающую среду. Одним из ключевых приоритетов для большинства развитых и развивающихся стран становится интеграция возобновляемых источников энергии, снижение зависимости от ископаемого топлива и снижение выбросов парниковых газов. В этой связи особое внимание уделяется водородной энергетике, обладающей рядом уникальных свойств: высокой экологичностью, универсальностью применения и возможностью хранения и аккумулирования энергии.

В Республике Казахстан задачи повышения энергоэффективности и внедрения инновационных энергетических решений выдвинуты на передний план государственной политики, что отражено в стратегических документах — «Концепция по переходу к “зелёной экономике”», Национальный и Стратегический планы развития, а также в недавних Посланиях Президента страны. Водород, как многофункциональный энергетический носитель, открывает новые перспективы для обеспечения надёжного и гибкого энергоснабжения не только в промышленности, транспорте и коммунальном хозяйстве, но и для отдельных зданий, включая удалённые и автономные объекты.

Однако широкое внедрение водородных технологий сопровождается рядом научных, инженерных и экономических вызовов. К их числу относятся совершенствование конструкций топливных элементов, развитие инфраструктуры хранения и транспортировки водорода, интеграция с существующими системами, а также соответствие современным стандартам безопасности и энергоэффективности. Выбор оптимальных конфигураций топливных элементов для энергообеспечения зданий требует всестороннего анализа с учетом климатических, технических и нормативных особенностей Казахстана.

Особую роль в современных исследованиях играет моделирование мультифизических процессов с использованием передовых программных комплексов, таких как COMSOL Multiphysics, позволяющих проводить глубокий анализ и оптимизацию инженерных решений на этапе проектирования.

*Актуальность исследования.* В условиях перехода к «зелёной экономике» и реализации национальных стратегических программ развитие водородной энергетики приобретает для Казахстана особое значение. Водородные технологии позволяют не только повысить энергоэффективность и экологичность зданий, но и обеспечить надёжность энергоснабжения в регионах с высокими климатическими нагрузками и удалённостью от централизованных сетей. Рост интереса к интеграции водородных топливных элементов в энергосистемы зданий обусловлен мировой практикой,



успешными примерами в Японии, Европе, США и перспективой выхода Казахстана на рынок “зелёной” энергетики.

*Целью диссертационной работы* является комплексное исследование, моделирование и оптимизация применения водородных топливных элементов для энергообеспечения зданий в условиях Казахстана, с акцентом на повышение эффективности, надёжности и экологичности энергосистем.

*Задачи исследования.* Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) Провести анализ мирового и отечественного опыта внедрения водородных энергетических систем и обосновать актуальность использования топливных элементов для энергообеспечения зданий в Казахстане.

2) Разработать и реализовать численное моделирование системы электроснабжения здания на основе топливных элементов с полимерно-электролитной мембраной (ПЭМ-ТЭ) и твердооксидных топливных элементов (СОТЭ).

3) Проанализировать ключевые параметры работы систем, провести сравнение эффективности ПЭМ-ТЭ и СОТЭ, исследовать вопросы устойчивости и балансировки энергоснабжения с использованием водорода.

4) Разработать практические рекомендации по оптимальной интеграции водородных топливных элементов в энергосистемы зданий в условиях Казахстана.

*Практическая ценность:* Практическая ценность проведённого исследования заключается в создании численных моделей и рекомендаций, которые могут быть непосредственно использованы для проектирования, оптимизации и внедрения водородных топливных элементов (ПЭМ-ТЭ и СОТЭ) в системах электроснабжения и теплоснабжения зданий в условиях Казахстана.

Разработанные в работе модели позволяют:

- Оценивать эффективность различных конфигураций топливных элементов с учётом реальных климатических, технических и экономических условий;

- Определять оптимальные параметры работы и условия эксплуатации PEM и SOFC для получения максимального энергетического и экономического эффекта;

- Снижать энергозатраты и уровень выбросов загрязняющих веществ при обеспечении зданий электрической и тепловой энергией;

- Использовать полученные данные и рекомендации как основу для создания пилотных проектов и тиражирования инновационных решений в сфере «зелёной» энергетики;

- Применять методы мультифизического моделирования (COMSOL Multiphysics) для адаптации и развития аналогичных систем в других климатических регионах и для других типов объектов;

- Формировать методическую и техническую базу для обучения специалистов в области водородной энергетики, а также для дальнейших научных исследований и инновационных разработок.

Результаты моделирования и анализа могут быть использованы при разработке государственных и корпоративных программ по переходу к «зелёной» экономике, при подготовке проектно-сметной документации для строительства энергоэффективных зданий, а также для повышения квалификации инженерных кадров.

*Научная новизна работы* заключается в комплексном мультифизическом моделировании двух типов водородных топливных элементов для систем энергоснабжения зданий, сравнительном анализе их эффективности и выработке рекомендаций по внедрению с учётом климатических и технических особенностей Казахстана. Практическая значимость определяется возможностью использования полученных результатов для проектирования энергоэффективных, автономных и экологически безопасных зданий, что соответствует национальным приоритетам в энергетике и политике перехода к «зелёной» экономике.

*Публикации.* В период исследования по теме данной магистерской диссертации:

- опубликована статья в Научно-практическом журнале «International Satbayev Conference» 2024, на тему «Перспективы применения водорода в энергетическом секторе Казахстана»;

- опубликована статья в Научно-практическом журнале «International Satbayev Conference» 2025, на тему «Оптимизация систем электроснабжения с водородными технологиями»;

- опубликована статья в Научно-практическом журнале «Texnika Yulduzlari» №2 2025, на тему «Моделирование водородных энергетических систем Comsol Multiphysics».



## 1 Водород и его роль в мировой энергетике

Водород в последние годы превратился из чисто исследовательского интереса в одну из ключевых опор стратегического развития энергетики XXI века. Практически все развитые страны и крупнейшие энергетические корпорации рассматривают водород как универсальный энергоноситель, способный обеспечить гибкость, устойчивость и экологичность энергосистем будущего. Эта тенденция ярко проявляется на фоне глобального энергоперехода, когда необходимо существенно сокращать выбросы парниковых газов, обеспечивать интеграцию возобновляемых источников энергии и сохранять надёжность энергоснабжения при всё более переменчивом спросе и генерации.

Уникальные свойства водорода заключаются в его высокой удельной энергии, экологической чистоте конечных продуктов преобразования (при сжигании или использовании в топливных элементах выделяется лишь вода) и возможности аккумулирования избыточной энергии из ВИЭ. В связи с этим международные энергетические организации, такие как Международное энергетическое агентство (IEA), Hydrogen Council и Европейская комиссия, отмечают, что уже к 2023 году было анонсировано более 1000 водородных проектов по всему миру, а совокупные инвестиции в этот сектор превысили 300 миллиардов долларов США.

Среди наиболее показательных мировых пилотных проектов можно выделить инициативу ENE-FARM в Японии, в рамках которой за последние 15 лет внедрено более 450 тысяч домашних топливных элементов на основе водорода, а также создание первой в мире цепочки поставки жидкого водорода между Австралией и Японией — Kawasaki Hydrogen Road. Европейский союз активно реализует проекты “зелёной” стали (H2 Green Steel), промышленного водорода для нефтепереработки и энергетики (Refhyne, H2FUTURE), а также разрабатывает инфраструктуру для масштабного производства и распределения водорода. В Германии, Франции, Дании и Нидерландах действуют десятки микроэнергетических кластеров, использующих топливные элементы для автономного энергоснабжения зданий и посёлков.

В Соединённых Штатах Калифорния реализует программу Hydrogen Highway, направленную на развитие транспортной и коммунальной инфраструктуры на водороде. Американские компании, такие как Bloom Energy, поставляют SOFC-модули для дата-центров, больниц и кампусов, обеспечивая высокоэффективное и надёжное энергоснабжение с минимальными выбросами.

Южная Корея и Китай демонстрируют быстрый рост инвестиций и технологического развития в водородном секторе, делая ставку на создание водородных городов, транспорта и интеграцию водородных систем в промышленность и ЖКХ. В 2023 году Южная Корея уже эксплуатирует более 100 H<sub>2</sub>-заправок и десятки мегаваттных установок на базе PEMFC и SOFC для городских микроэнергетических систем.

В целом, по прогнозам IEA, к 2030 году мировая мощность электролизёров достигнет 134 ГВт, а водород сможет покрывать до 10% мирового спроса на энергию к середине века. Ожидается, что развитие инфраструктуры водородной экономики, дальнейшее снижение стоимости “зелёного” водорода (до \$2/кг) и совершенствование технологий топливных элементов обеспечат его широкое распространение как в промышленности и транспорте, так и в жилищно-коммунальном секторе, в том числе для автономного и резервного электроснабжения зданий.

Таким образом, водород уже стал неотъемлемой частью долгосрочных энергетических стратегий ведущих стран мира, а реализованные и действующие пилотные проекты подтверждают его потенциал как чистого, гибкого и универсального энергоносителя будущего.

### **1.1 Развитие водородной энергетики в Казахстане**

Водородная энергетика в Республике Казахстан в последние годы становится одним из ключевых направлений политики устойчивого развития и энергоперехода. Выбор этой стратегии обусловлен необходимостью диверсификации энергетического баланса, сокращения выбросов парниковых газов и формирования экспортного потенциала “зелёной” продукции. Казахстан, обладающий одним из крупнейших в мире запасов возобновляемых источников энергии - солнечной и ветровой - а также развитой транзитной и экспортной инфраструктурой, рассматривается как перспективный регион для производства, транспортировки и применения водорода.

В 2021–2022 годах на государственном уровне утверждена "Дорожная карта развития водородной энергетики", которая предусматривает поэтапное внедрение технологий производства, хранения, транспортировки и использования водорода. Ключевые цели включают создание пилотных производств “зелёного” водорода, реализацию пилотных проектов по применению водорода в промышленности, транспорте и энергетике зданий, развитие нормативно-правовой базы, а также научных исследований и подготовку кадров в этой области.

Научно-исследовательская деятельность в сфере водородной энергетики активно развивается в научных центрах и технологических парках, где разрабатываются и тестируются экспериментальные образцы топливных элементов, проводится моделирование их работы в условиях континентального климата Казахстана, а также анализируются варианты интеграции водородных систем с возобновляемыми источниками энергии и традиционными энергетическими объектами.

К числу значимых инициатив можно отнести запуск пилотных производств по выпуску “зелёного” водорода в Павлодарской и Мангистауской областях, развитие партнёрств с иностранными компаниями в сфере внедрения

электролизёров, а также начало работы по проекту Hydrogen Valley (совместно с зарубежными инвесторами).

Тем не менее, развитие водородной энергетики в Казахстане сталкивается с целым рядом вызовов. К ним относятся: высокая стоимость импортного оборудования, отсутствие масштабного рынка и локального производства компонентов, ограниченная инфраструктура хранения и транспортировки водорода, а также потребность в разработке новых стандартов безопасности и эффективной поддержке инноваций. Особую сложность представляют вопросы интеграции водородных технологий с действующей энергетической системой страны, учёт сезонных колебаний генерации возобновляемых источников и эксплуатация оборудования в условиях экстремальных температурных перепадов.

Несмотря на эти ограничения, Казахстан рассматривается мировыми экспертами как один из потенциальных лидеров по производству и экспорту “зелёного” водорода в Центральной Азии. Это подтверждается интересом международных компаний, участием Казахстана в глобальных энергетических инициативах, а также активным развитием исследовательской инфраструктуры. Внедрение водородных технологий на уровне зданий и микроэнергетических систем, интеграция с ВИЭ и накопителями энергии может стать важнейшим элементом стратегии повышения энергоэффективности, энергетической безопасности и реализации национальных приоритетов по переходу к “зелёной экономике”.

## **1.2 Классификация водородных энергетических систем**

Водородная энергетика в современной научно-технической и прикладной литературе рассматривается как разветвлённая система, охватывающая все этапы: от производства водорода до его конечного использования в различных секторах экономики. Наиболее распространённая классификация строится с учётом способа производства, способов хранения и транспортировки, сферы применения и мощности конечных установок.

По способу производства различают «серый», «голубой», «зелёный» и «бирюзовый» водород. Серый водород получают в основном из природного газа с выделением  $\text{CO}_2$ , голубой — аналогично, но с улавливанием и захоронением углекислого газа, зелёный водород производится посредством электролиза воды с использованием возобновляемых источников энергии, а бирюзовый — методом пиролиза метана с выделением твёрдого углерода. На сегодняшний день более 95% мирового объёма водорода производится традиционными, “углеродными” способами, однако темпы внедрения “зелёного” водорода ежегодно растут на десятки процентов, чему способствуют и политические стимулы, и технологический прогресс в области возобновляемой генерации и электролиза.



Особое значение имеют технологии хранения и транспортировки водорода. Применяются сжатие при высоком давлении, сжижение при сверхнизких температурах, хранение в металлгидридных накопителях, жидких органических носителях и даже в виде аммиака. Эти технологии позволяют интегрировать водород как в централизованные системы (например, городские газопроводы с долей  $H_2$ ), так и в децентрализованные решения для автономных объектов и микрорайонов.

В зависимости от сферы применения водородные энергетические системы принято делить на промышленные, транспортные и стационарные (энергоснабжение зданий и объектов инфраструктуры). Промышленный сектор использует водород для синтеза аммиака, нефтепереработки, металлургии и производства метанола, а также как восстановитель в процессах получения “зелёной” стали. В транспорте развиваются как двигатели внутреннего сгорания на водороде, так и водородные топливные элементы, применяемые в автомобилях, автобусах, поездах и морских судах. Крупнейшие автопроизводители и страны уже реализовали тысячи единиц водородного транспорта в Японии, Корее, Германии и США, а внедрение  $H_2$ -заправок набирает темпы.

Стационарные и распределённые системы водородной энергетики охватывают широкий спектр решений — от автономных микроустановок для домохозяйств до крупных когенерационных станций для жилых комплексов, больниц, школ и промышленных объектов. Одно из важнейших направлений — интеграция водородных систем с возобновляемыми источниками энергии (солнечные и ветровые электростанции), что позволяет аккумулировать избыточную “зелёную” электроэнергию в виде водорода и использовать её в периоды низкой генерации или пикового спроса. В зданиях и микрорайонах водородные топливные элементы обеспечивают не только электро-, но и теплоснабжение (режим когенерации), а также резервное и аварийное питание для критически важных инфраструктур.

Классификация по мощности и масштабу установки отражает универсальность водородной энергетики: существуют микроэнергетические решения (до 10 кВт) для отдельных зданий, среднемасштабные системы (10–500 кВт) для коммунальных объектов и крупные промышленные станции на десятки мегаватт. В мировой практике активно применяются как полностью автономные схемы (с полным циклом “ВИЭ — электролиз — накопление — топливные элементы”), так и гибридные решения с аккумуляторами и централизованной сетью. Современные проекты демонстрируют возможность создания так называемых “водородных долин” (Hydrogen Valley), в которых производство, хранение, транспортировка и потребление водорода интегрированы на уровне региона или города.

Важной тенденцией становится внедрение цифровых двойников и мультифизического моделирования для оптимизации всех этапов жизненного цикла водорода — от проектирования до эксплуатации. Международные стандарты (ISO, IEC) и национальные нормативы обеспечивают безопасность

и эффективность таких систем, а Казахстан, как страна с высоким потенциалом ВИЭ, может занять лидирующие позиции в их внедрении, особенно в сфере автономного и гибридного энергоснабжения зданий и удалённых объектов.

### **1.3 Водородные топливные элементы: виды, преимущества и особенности**

Водородные топливные элементы (ТЭ) занимают центральное место среди технологий преобразования химической энергии водорода в электрическую и тепловую, обеспечивая высокий КПД, экологическую чистоту и универсальность применения. Научный и инженерный интерес к топливным элементам обусловлен их способностью функционировать в самых разнообразных областях — от портативной и бытовой электроники до промышленной энергетики и транспорта. Главная особенность этой технологии заключается в прямом электролитическом процессе: водород на аноде разлагается на протоны и электроны, электроны по внешней цепи поступают на катод, где реагируют с кислородом, в результате чего образуется вода и выделяется энергия.

Существует несколько ключевых типов топливных элементов, каждый из которых обладает своими достоинствами и технологическими ограничениями. Наиболее востребованными и распространёнными в мировой и казахстанской практике являются топливные элементы на основе полимер-электролитной мембраны (ПЭМ-ТЭ, или PEMFC) и твердооксидные топливные элементы (СОТЭ, или SOFC).

ПЭМ-ТЭ работают при сравнительно низких температурах (50–80°C), что позволяет использовать их для энергообеспечения зданий, транспорта и резервного электроснабжения. Главные преимущества этого типа — быстрый старт, высокий КПД (до 60% по электричеству, а при когенерации — до 90% по совокупной энергии), компактность и простота управления. Среди недостатков отмечается сравнительно высокая стоимость платиновых катализаторов и мембран, а также чувствительность к загрязнению газов. В мировой практике PEMFC широко внедряются в бытовых установках (ENE-FARM в Японии, пилотные проекты в Германии, Южной Корее, США), доказывая свою эффективность для автономных зданий и микроэнергосетей.

Твердооксидные топливные элементы (SOFC) функционируют при высоких температурах (600–1000°C), что позволяет использовать широкий спектр топлив — не только чистый водород, но и природный газ, биогаз, аммиак, метанол. Преимущества SOFC заключаются в универсальности, высоком совокупном КПД (до 85% при учёте тепла), долговечности и возможности интеграции в промышленные и коммунальные системы с большим потреблением тепла. К числу недостатков относятся высокая стоимость керамических материалов и необходимость тщательной

термоизоляции для предотвращения потерь. SOFC получили развитие в Европе и США (например, решения Bloom Energy и Siemens), а также используются в крупных когенерационных установках для кампусов, больниц и микрорайонов.

В дополнение к этим двум типам развиваются и другие разновидности топливных элементов: щелочные (AFC), фосфорнокислотные (PAFC), расплавленные карбонатные (MCFC).

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика основных типов водородных топливных элементов (по данным [источники: обзоры IEA, DOE, научные публикации и отчёты производителей])

| Тип топливного элемента       | Рабочая температура | Применяемое топливо                       | Основные преимущества                                                        | Недостатки                                                 | Примеры применения                                                          |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| PEMFC (ПЭМ-ТЭ)                | 50–80 °C            | Водород                                   | Быстрый старт, высокий КПД, компактность, экологичность                      | Дорогие катализаторы (Pt), чувствительность к загрязнениям | ENE-FARM (Япония), бытовые установки, резервное электроснабжение            |
| SOFC (СОТЭ)                   | 600–1000 °C         | Водород, CH <sub>4</sub> , биогаз, аммиак | Универсальность топлива, высокий КПД, долговечность, возможность когенерации | Высокая температура, дорогие материалы, сложная изоляция   | Промышленные установки, микрорайоны, крупные здания (Siemens, Bloom Energy) |
| AFC (Щелочной)                | 60–220 °C           | Водород                                   | Высокий КПД, простота конструкции                                            | Чувствительность к CO <sub>2</sub> , узкое применение      | Космос (Apollo, Shuttle)                                                    |
| PAFC (Фосфорнокислотный)      | 150–220 °C          | Водород, природный газ                    | Долговечность, промышленное применение                                       | Высокая стоимость, медленный старт                         | Промышленные объекты                                                        |
| MCFC (Расплавленный карбонат) | 600–700 °C          | Водород, природный газ, биогаз            | Универсальность, высокий КПД                                                 | Коррозия, высокая температура                              | Крупные энергетические объекты                                              |



Они находят применение преимущественно в специализированных областях — на космических станциях, в крупных энергетических и промышленно-транспортных комплексах. Однако именно PEMFC и SOFC считаются сегодня наиболее перспективными для энергообеспечения зданий и инфраструктуры, сочетая эффективность, экологичность и экономическую целесообразность.

Особое значение для развития водородной энергетики имеет интеграция топливных элементов в комбинированные системы: их можно соединять с солнечными панелями, ветряными установками, аккумуляторами и централизованными сетями, обеспечивая автономность, высокое качество энергоснабжения и снижение затрат. Научные публикации и международные эксперименты свидетельствуют, что внедрение топливных элементов в зданиях позволяет не только снизить энергозатраты и выбросы CO<sub>2</sub>, но и повысить надёжность, особенно в удалённых и энергодефицитных регионах.

Современные исследования в области топливных элементов направлены на совершенствование материалов мембран и катализаторов, повышение долговечности, снижение стоимости, а также на моделирование мультифизических процессов для оптимизации конструкции и управления. Всё это делает водородные топливные элементы ключевым элементом перехода к «зелёной» экономике и развитию децентрализованных энергетических систем в Казахстане и во всём мире.

## 2 Методология исследования и выбор программного обеспечения

В работе используется комплексный подход, сочетающий аналитический обзор, теоретическое обоснование и численное моделирование водородных энергетических систем с применением современных цифровых инструментов. Основное внимание уделено разработке и анализу моделей топливных элементов на базе полимер-электролитных мембран (ПЭМ-ТЭ) и твердооксидных топливных элементов (СОТЭ) для стационарных зданий в условиях Казахстана.

В качестве программного обеспечения выбран пакет COMSOL Multiphysics — один из самых передовых инструментов для мультифизического моделирования сложных инженерных объектов. Данный программный комплекс позволяет реализовать моделирование процессов теплопереноса, массопереноса, электрохимических реакций, распределения электрических токов, а также их взаимодействие в трёхмерных геометриях. COMSOL Multiphysics широко применяется в научных и промышленных исследованиях по всему миру, что подтверждается обширной международной литературой и успешными кейсами интеграции водородных систем в зданиях.

Обоснование выбора COMSOL Multiphysics связано с его возможностями построения параметрических и пользовательских моделей, гибким управлением физическими интерфейсами и широкими средствами визуализации результатов. Особое преимущество программы — возможность интеграции различных физических явлений (электрохимия, теплообмен, диффузия, электропроводность) в едином моделировании, что особенно важно для анализа работы топливных элементов и их оптимизации под реальные условия эксплуатации.

В рамках исследования проведено поэтапное построение 3D-модели здания с интеграцией водородных топливных элементов. Для каждого типа ТЭ определялись ключевые параметры, выбирались соответствующие материалы, физические интерфейсы, граничные и начальные условия. Верификация моделей осуществлялась на основе известных литературных данных и сопоставления с результатами аналогичных исследований.

Моделирование в COMSOL включало:

- создание геометрии здания и компонентов топливных элементов;
- задание материалов (Nafion, Platinum, Nickel Oxide, керамика, сталь и др.);
- назначение физических интерфейсов: теплоперенос в твёрдых телах, транспорт разбавленных видов, электрические токи, электрохимические реакции;
- настройку граничных условий для подачи топлива, отвода продуктов реакции, электрических контактов;
- построение и адаптацию конечно-элементной сетки;

-

проведение параметрических расчётов и анализ полученных распределений температуры, концентраций, плотности тока, потенциалов и тепловых потоков.

Результаты моделирования позволили оценить эффективность различных конфигураций, выявить оптимальные режимы эксплуатации, а также разработать рекомендации по внедрению водородных топливных элементов в энергетические системы зданий с учётом климатических и технических особенностей Казахстана.

## 2.1 Построение и реализация 3D-модели в COMSOL

В данной работе ключевым этапом является построение трёхмерной мультифизической модели энергоснабжения здания на базе водородных топливных элементов с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Моделирование позволяет комплексно анализировать процессы теплопереноса, массопереноса, электрохимических реакций и распределения электрических токов, что обеспечивает более точный прогноз эффективности, надёжности и устойчивости водородной системы в реальных условиях эксплуатации.

### 1) Геометрия моделируемого объекта

Для имитации энергоснабжения типового здания была создана трёхмерная модель, включающая сам объект (здание), вспомогательные блоки — топливные элементы (ПЭМ-ТЭ и СОТЭ), водородные резервуары и соединительные трубопроводы. Вся модель строилась с учётом масштабов, характерных для современных энергоэффективных зданий.

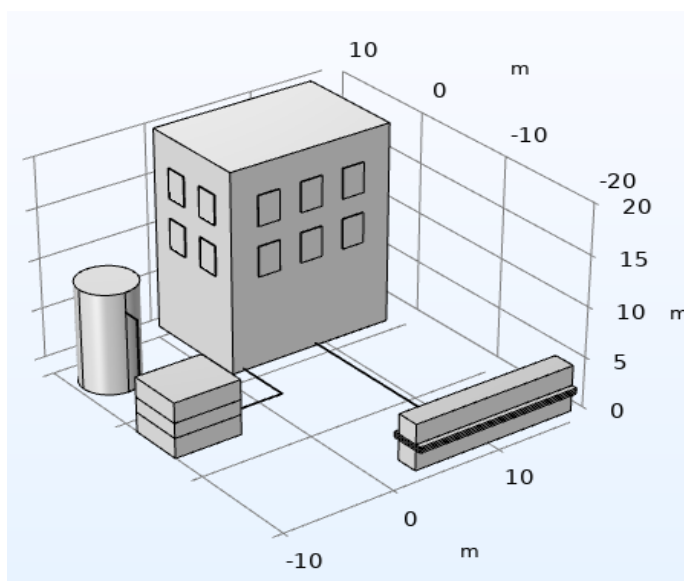


Рисунок 2.1- Геометрия и конструкция (здание, резервуар и блоки топливных элементов)

- Основное здание: прямоугольный параллелепипед размерами  $15 \times 10 \times 20$  м (ширина  $\times$  глубина  $\times$  высота), расположенный с центром в точке  $(0, 0, 0)$ .

- РЕМ-топливный элемент (ПЭМ-ТЭ): цилиндр диаметром 5 м и высотой 10 м, размещённый сбоку здания (координаты центра цилиндра:  $x = -8$ ,  $y = 5$ ,  $z = 0$ ). Именно этот блок моделирует работу полимер-электролитной мембраны.

- SOFC-блок (СОТЭ): параллелепипед размерами  $15 \times 2 \times 2$  м;  $15 \times 3 \times 0,2$  м;  $15 \times 2 \times 2$  м; установленный на некотором удалении от здания. Здесь реализовано моделирование твердооксидного топливного элемента.

- Дополнительные компоненты: резервуары для водорода (например, цилиндры диаметром 2.5 м, высотой 10 м), соединительные трубопроводы (цилиндры радиусом 0.5 м, различной длины), вспомогательные блоки и коммуникации.

Каждая геометрическая составляющая строилась с помощью стандартных примитивов COMSOL (Box, Cylinder, Work Plane, Extrude, Interpolation Curve и др.), что обеспечивало гибкость при корректировке и уточнении конфигурации модели.

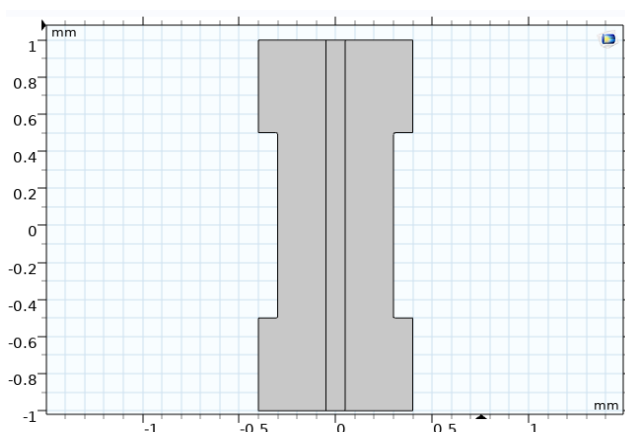
## **2.2 Особенности моделирования и обоснование использования двух типов топливных элементов**

Выбор двух разных топливных элементов — полимер-электролитного (РЕМ) и твердооксидного (SOFC) — обусловлен как научными интересами, так и практической целесообразностью для повышения устойчивости, эффективности и универсальности системы энергоснабжения зданий.

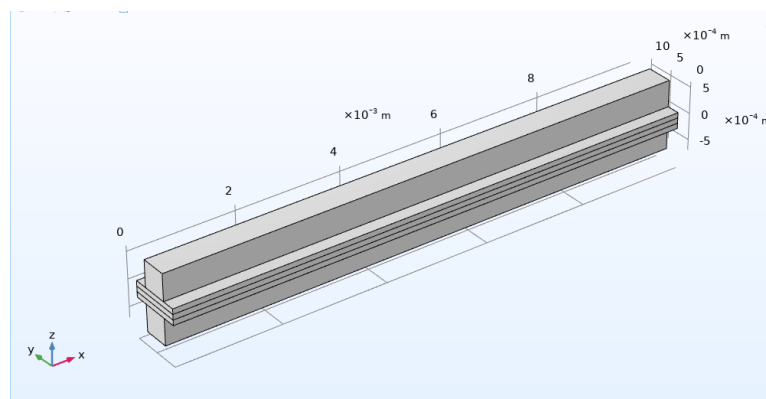
РЕМ-топливные элементы (РЕМFC) характеризуются быстрым запуском, работой при сравнительно низких температурах ( $50\text{--}80^\circ\text{C}$ ) и высокой эффективностью преобразования водорода в электрическую энергию. Это позволяет использовать их для обеспечения базовой или переменной нагрузки, в том числе для покрытия пиковых потребностей здания, быстрой балансировки энергопотоков и резервного питания. Благодаря компактности и оперативности управления РЕМFC успешно применяются в распределённых и автономных системах, включая жилые здания и микроэнергосети. В рамках данного исследования была разработана подробная двумерная (2D) модель РЕМ-топливного элемента, позволяющая проводить расчёт распределения температуры, концентраций реагентов, потоков и плотности тока, что существенно упрощает процесс оптимизации рабочих параметров. На рисунке представлены результаты моделирования двухмерной модели РЕМ-топливного элемента, демонстрирующие распределения ключевых параметров работы системы.



SOFC-топливные элементы (Solid Oxide Fuel Cell), напротив, эксплуатируются при высоких температурах (600–1000 °C), что обеспечивает не только высокий электрический, но и совокупный (электро+тепловой) КПД. За счёт своей термической устойчивости SOFC могут использовать не только водород, но и альтернативные топлива (природный газ, биогаз, аммиак), что повышает гибкость эксплуатации в различных климатических и экономических условиях. Высокотемпературный режим позволяет эффективно использовать отводимое тепло для систем отопления и горячего водоснабжения зданий (режим когенерации). Для исследования и анализа работы SOFC была построена трёхмерная (3D) модель, позволяющая учитывать более сложные и реалистичные процессы теплообмена и массообмена. Модель учитывает детальную структуру и геометрию элементов, что дает возможность точно определить температурные поля, концентрацию газов и эффективность генерации электроэнергии. На рисунке приведена трехмерная модель SOFC-топливного элемента с визуализацией температурных и концентрационных градиентов.



а) блок PEM



б ) блок SOFC

Рисунок 2.2 - Геометрическая реализация и структура слоев топливных элементов PEM и SOFC

Совмещение в одной системе двух разных типов топливных элементов открывает новые возможности для повышения надёжности и автономности энергоснабжения. Гибридная схема позволяет оптимально распределять нагрузку: PEMFC эффективно работают при переменных и пиковых нагрузках, SOFC — для обеспечения базового и длительного энергоснабжения с одновременной выработкой тепла. Это особенно важно для зданий с сезонными и суточными колебаниями спроса на электро- и тепловую энергию. Комплексное использование этих двух технологий даёт возможность разработать энергосистему, обладающую высокой гибкостью, эффективностью и адаптивностью к изменяющимся условиям эксплуатации.

### **2.3 Баланс поступающей энергии и предотвращение избыточности**

В ходе проектирования и моделирования особое внимание уделялось вопросам баланса энергопотоков. Поступление энергии в здание рассчитывалось на основе типовых профильных нагрузок для выбранного климатического региона Казахстана, а мощность топливных элементов подбиралась с учетом минимизации избыточной генерации и оптимального режима эксплуатации. Модель позволяет варьировать параметры работы каждого блока, а также рассматривать сценарии, при которых один из элементов работает как резервный или в режиме ограниченной мощности.

В современных системах возможна реализация интеллектуального управления, при котором часть энергии в периоды избыточной генерации может направляться на зарядку аккумуляторов, водонагрев или работу других инженерных систем здания. Это минимизирует потери, а излишки могут быть возвращены в общую сеть (при наличии двухстороннего подключения).

Применение гибридных схем с PEMFC и SOFC также повышает устойчивость энергоснабжения в случае отказа одного из блоков или резких изменений погодных/потребительских условий, что особенно актуально для зданий с критической инфраструктурой (больницы, школы, дата-центры, удалённые объекты).

### **2.4 Научное и практическое обоснование подхода**

В мировой практике отмечается растущий интерес к мультигенерационным системам, где используются различные типы топливных элементов совместно с возобновляемыми источниками и накопителями энергии. Такая интеграция не только оптимизирует энергетический баланс, но и обеспечивает гибкость и адаптивность системы под разные сценарии эксплуатации. В рамках данного исследования моделирование двух типов топливных элементов позволяет объективно сравнить их эффективность, выявить синергетические эффекты от совместной

работы и выработать рекомендации по выбору конфигурации для конкретных зданий.

Результаты численного моделирования подтверждают, что при правильном подборе мощности, последовательности включения и интеллектуальном управлении работой PEMFC и SOFC удаётся обеспечить покрытие потребностей здания без избыточной генерации, снизить удельные энергозатраты и повысить энергоэффективность объекта.

Таким образом, комплексный подход с использованием двух типов топливных элементов обоснован как с научной, так и с инженерной точки зрения, соответствует мировым тенденциям развития распределённой энергетики и может быть рекомендован для внедрения в условиях Казахстана с учётом местных климатических, технических и экономических особенностей.

## 2.5 Пример расчёта энергетического баланса с формулами

Рассчитаем, как гибридная система из PEMFC и SOFC покрывает энергетические и тепловые потребности здания.

### 2.5.1 Энергетический баланс здания

Пусть:

- $E_{el}$  — суточная потребность здания в электроэнергии, кВт·ч;
- $E_{heat}$  — суточная потребность в тепле, кВт·ч;
- $P_{SOFC}$ ,  $P_{PEM}$  — номинальные мощности SOFC и PEMFC, кВт;
- $\eta_{SOFC,el}$ ,  $\eta_{PEM,el}$  — электрический КПД SOFC и PEMFC;
- $\eta_{SOFC,th}$  — тепловой КПД SOFC (в PEMFC тепловой КПД обычно не используют, так как основной продукт — электричество).

Суточное покрытие энергопотребления:

$$E_{SOFC,el} = P_{SOFC} \cdot t_{SOFC,work} \quad (2.1)$$

$$E_{PEM,el} = P_{PEM} \cdot t_{PEM,work} \quad (2.2)$$

$$E_{el,tot} = P_{SOFC,el} + E_{PEM,el} \quad (2.3)$$

где: -  $t_{SOFC,work}$ ,  $t_{PEM,work}$  — время работы каждого блока (ч).

### 2.5.2 Покрытие потребности в тепле

SOFC работает в режиме когенерации:

$$E_{SOFC,heat} = E_{SOFC,el} \cdot \frac{\eta_{SOFC,th}}{\eta_{SOFC,el}} \quad (2.4)$$

Общая выработка тепла системой:

$$E_{heat,tot} = E_{SOFC,heat} + E_{heat,add} \quad (2.5)$$

-  $E_{heat,add}$  — дополнительное тепло от PEMFC или внешних источников, если требуется.

### 2.5.3 Расход водорода

Для обоих типов ТЭ расход водорода можно рассчитать по уравнению:

$$n_{H_2} = \frac{E_{el}}{\eta_{el} \cdot HHV_{H_2}} \quad (2.6)$$

где: -  $n_{H_2}$  — расход водорода (кг);

-  $E_{el}$  — выработка электроэнергии (кВт·ч);

-  $\eta_{el}$  — электрический КПД соответствующего топливного элемента;

-  $HHV_{H_2}$  — высшая теплота сгорания водорода (обычно 33.3 кВт·ч/кг).

### 2.5.4 Пример расчёта для типового здания

-  $E_{el}=120$  кВт·ч/сутки,

-  $E_{heat}=200$  кВт·ч/сутки,

-  $P_{SOFC}=5$  кВт,  $t_{SOFC,work}=20$  ч,  $\eta_{SOFC,el}=0.5$ ,  $\eta_{SOFC,el}=0.35$ ;

-  $P_{PEM}=6$  кВт,  $t_{PEM,work}=2$  ч,  $\eta_{PEM,el}=0.55$ ,  $\eta_{PEM,el}=0.55$ .

Расчёт:

$$E_{SOFC,el} = 5 \text{ кВт} \times 20 \text{ ч} = 100 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{PEM,el} = 6 \text{ кВт} \times 2 \text{ ч} = 12 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{el,tot} = 100 + 12 = 112 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

(оставшиеся 8 кВт·ч могут покрываться аккумулятором или корректироваться временем работы блоков)

$$E_{el,tot} = 100 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 0.35 / 0.5 = 70 \text{ кВт}$$

(если нужен более высокий теплоснабжающий эффект, SOFC может работать дольше)

$$n_{H_2,SOFC} = 100.5 \times 33.3 \approx 6 \text{ кг/сутки}$$

$$n_{H_2,PEM} = 12.55 \times 33.3 \approx 0.65 \text{ кг/сутки}$$

$$n_{H_2,tot} = 6 + 0.65 = 6.65 \text{ кг/сутки}$$



## **2.6 Построение и настройка физических интерфейсов, выбор граничных условий и создание расчетной сетки**

В процессе численного моделирования водородных энергетических систем для энергообеспечения зданий ключевым этапом является корректная настройка физических интерфейсов и граничных условий в программной среде COMSOL Multiphysics. На данном этапе формируется математическая основа модели, определяющая, каким образом будут протекать процессы электрохимии, теплопереноса, массопереноса и распределения электрического тока в смоделированной системе.

## **2.7 Логика выбора физических интерфейсов**

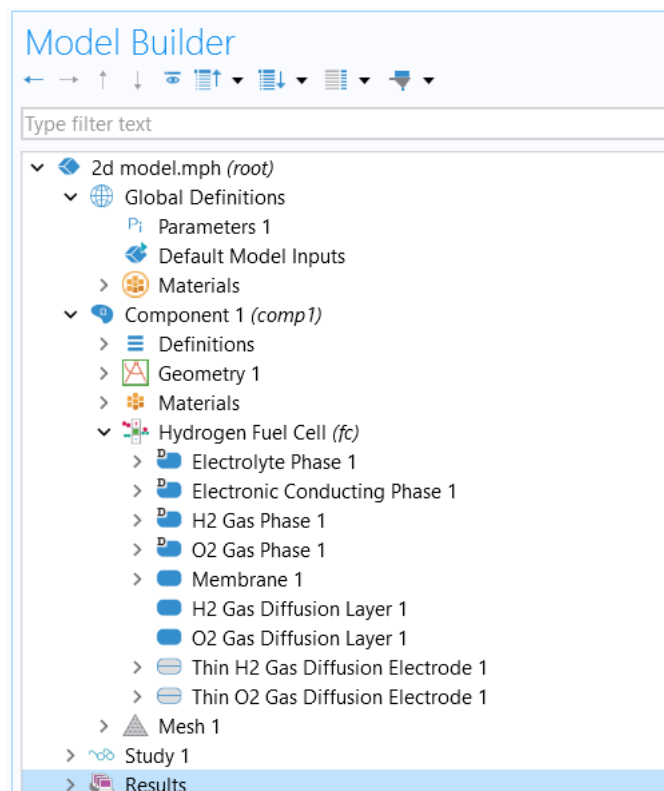
Для каждой из исследуемых топологических схем — как для блока ПЭМ-ТЭ, так и для блока СОТЭ — были выбраны специализированные физические интерфейсы, отражающие реальные физические процессы:

- Hydrogen Fuel Cell (для ПЭМ-ТЭ и для СОТЭ): реализует комплексное моделирование процессов переноса массы (водород, вода, кислород), протекания электрохимических реакций на аноде и катоде, а также распределения электрического и теплового полей.

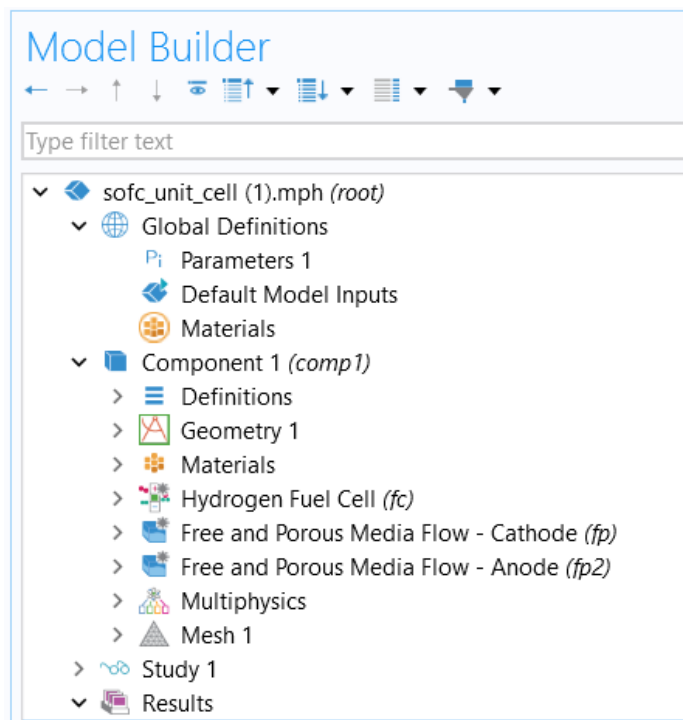
- Transport of Diluted Species: используется для расчета массопереноса в газовых и жидких фазах, что особенно важно для анализа концентраций водорода и кислорода на входах и выходах топливного элемента.

- Heat Transfer in Solids and Fluids: позволяет смоделировать распределение температуры в твердых и жидких частях конструкции, а также учесть тепловыделение и потери на различных стадиях работы системы.

- Electric Currents: отвечает за расчет распределения электрического потенциала и токов в проводящих элементах, что позволяет оценить электрическую эффективность и возможные потери.



а) Список интерфейсов использованные для PEM блока



б) Список интерфейсов использованные для SOFC блока

Рисунок 2.3 –Интерфейсы, которые были использованы

Каждый интерфейс назначается строго на те геометрические домены, которые соответствуют реальному расположению функциональных блоков в прототипе — анод, катод, мембрана, теплообменники, токосъемники и т.д.

## 2.8 Принципы выбора и задания граничных условий

Настройка граничных условий является критически важным этапом, так как именно они определяют характер взаимодействия системы с внешней средой, а также корректность расчетов при моделировании работы в различных режимах. В данной работе использовались следующие типы граничных условий:

- Вход концентрации (Inlet): задается на грани анода, куда подается водород из резервуара. Здесь, как правило, указывается массовая или молярная доля водорода (например,  $X_{H_2} = 1$ ), а также массовый расход или скорость потока. В COMSOL это реализуется через Boundary Condition с типом *Inlet*, где можно выбрать способ задания (молярные или массовые доли, концентрация или массовый расход).

- Выход (Outlet): устанавливается на грани, через которую продукты реакции или непрореагировавший газ выходят из блока топливного элемента (например, с другой стороны катода или мембраны). Здесь обычно задается условие нулевого избыточного давления или свободного выхода.

- Изоляция или симметрия (Wall/Insulation/Symmetry): на остальных гранях, не участвующих во входе/выходе, задается либо тепловая, либо электрическая изоляция, либо условие скользящей/нескользящей стены для моделирования массопереноса.

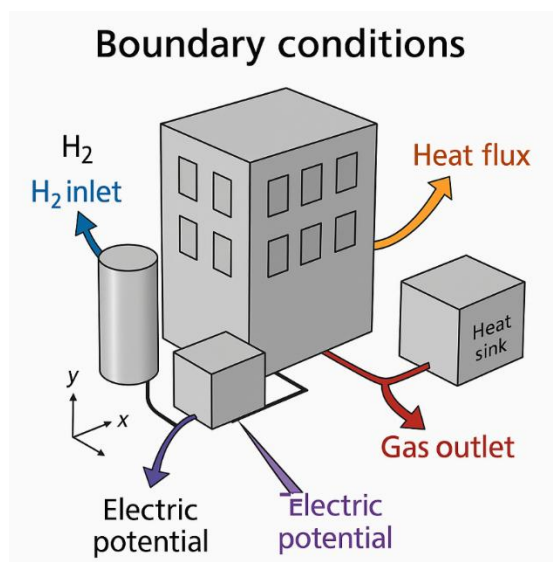


Рисунок 2.4 - Граничные условия модели

Пример расчетного задания (для интерфейса Transport of Diluted Species):

$$N_i = -D_i \nabla c_i + c_i u$$

где  $N_i$  — поток  $i$ -го компонента,  $D_i$  коэффициент диффузии,  
 $c_i$  — концентрация,  
 $u$  — вектор скорости.

На входе обычно задается либо  $c_i$ , либо массовая/молярная доля.

Математическая постановка задачи

В рамках работы использовались следующие фундаментальные уравнения:

- Уравнение Нернста для расчета электродного потенциала;
- Уравнение переноса массы (конвективно-диффузионное уравнение):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c + cu) = R$$

где  $R$  — скорость химической реакции.

Уравнение теплопереноса:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

где  $\rho$  — плотность,  
 $C_p$  — теплоемкость,  
 $k$  — теплопроводность,  
 $Q$  — тепловыделение от реакции.

## 2.9 Создание расчетной сетки

Качество расчетной сетки оказывает прямое влияние на точность и устойчивость численного моделирования. В данной работе использовалась трехмерная тетраэдрическая сетка с локальным убыванием размера элементов в областях стыка анода, катода и мембраны, а также вблизи входов/выходов и мест приложения граничных условий. Такая детализация необходима для точного учета локальных перепадов концентраций и температур.

- Для сложных геометрических областей и тонких межфазных границ был применен локальный рефинемент сетки.

- В COMSOL рекомендуется использовать автоматическую генерацию сетки с ручным заданием максимального размера элемента для каждой

доменной области, чтобы обеспечить баланс между численной точностью и временем расчёта.

Пример расчета: если область моделирования включает слой мембраны толщиной 0,5 мм, рекомендуется размер сеточного элемента выбирать не более 0,1–0,2 мм в этой области.

#### Практические аспекты интеграции интерфейсов

Особое внимание уделялось согласованию доменов, к которым были привязаны интерфейсы: например, интерфейс Hydrogen Fuel Cell настраивался только для областей, где физически присутствует топливный элемент (катод-анод-мембрана), а Heat Transfer in Solids and Fluids — на весь объем здания и теплогенерирующие блоки. Это позволяет избежать пересечений областей моделирования и конфликтов между физическими условиями.

В качестве иллюстрации приведены фрагменты (см. рис. X, Y, Z), отображающие структуру сетки и расположение граничных условий на поверхности модели.

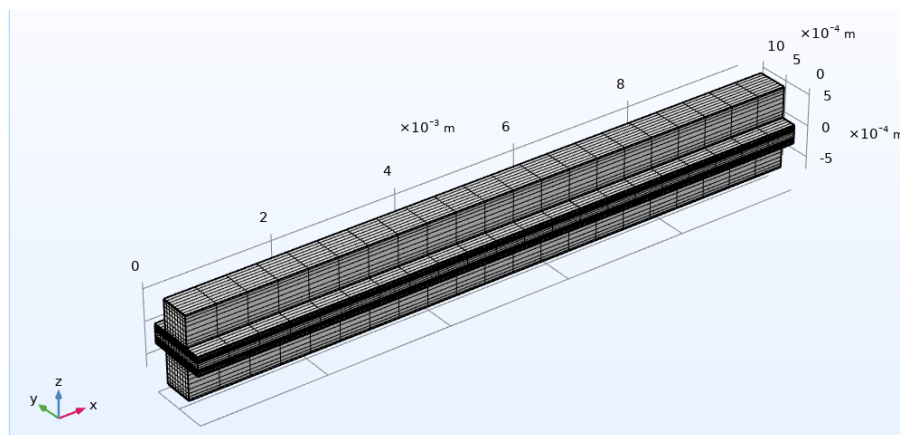
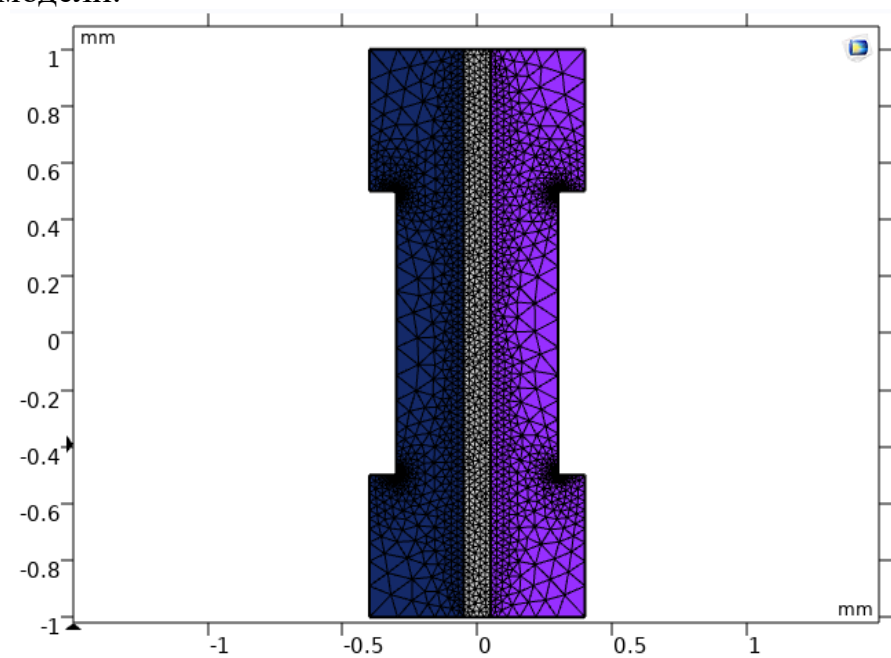


Рисунок 2.5 - Детальный вид схемы сетки



### 3 Моделирование и анализ применения топливных элементов

#### 3.1 Результаты моделирования ПЭМ-топливного элемента

В результате проведенного численного моделирования ПЭМ-топливного элемента в программной среде COMSOL Multiphysics были получены значимые данные, которые позволяют глубоко понять и проанализировать процессы, протекающие в топливном элементе. На рисунке 3.1 наглядно представлено распределение электрического потенциала электродов относительно земли. Данный график четко иллюстрирует разделение потенциалов на анодной и катодной сторонах, что полностью соответствует ожидаемому поведению в работе полимерно-электролитного мембранного топливного элемента и подтверждает корректность выбора физических условий моделирования.

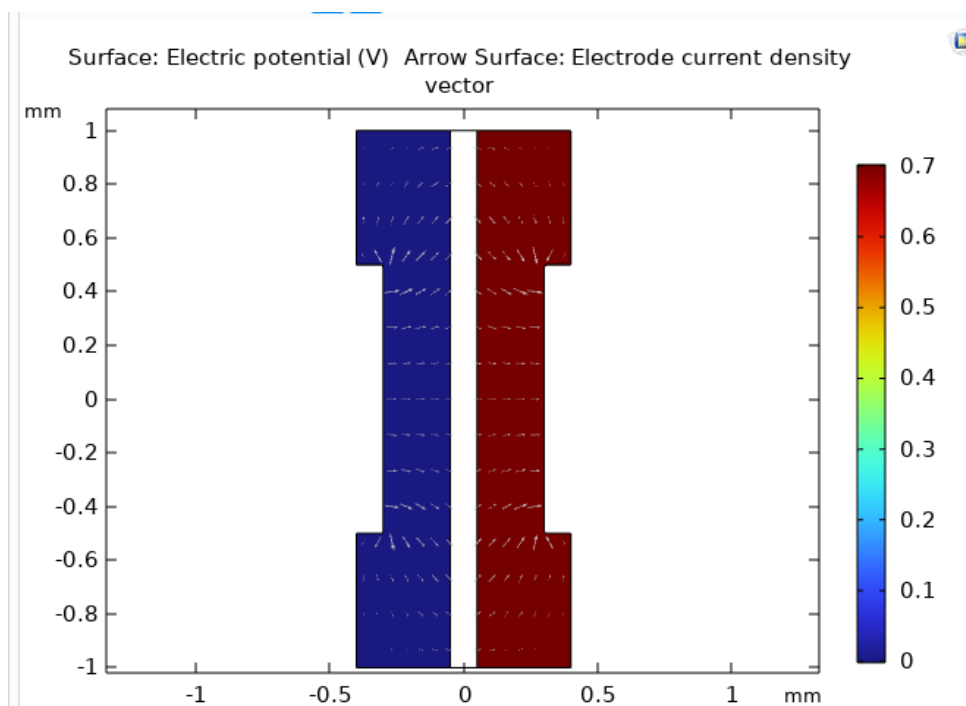


Рисунок 3.1 – Потенциал электрода относительно земли

Распределение потенциала электролита, представленное на рисунке 3.2, показывает небольшой градиент потенциала в центральной области электролита. Это наблюдение полностью согласуется с теоретическими представлениями о функционировании электрохимических процессов, что дополнительно свидетельствует о правильной настройке параметров модели и корректности применения физических интерфейсов в COMSOL Multiphysics.

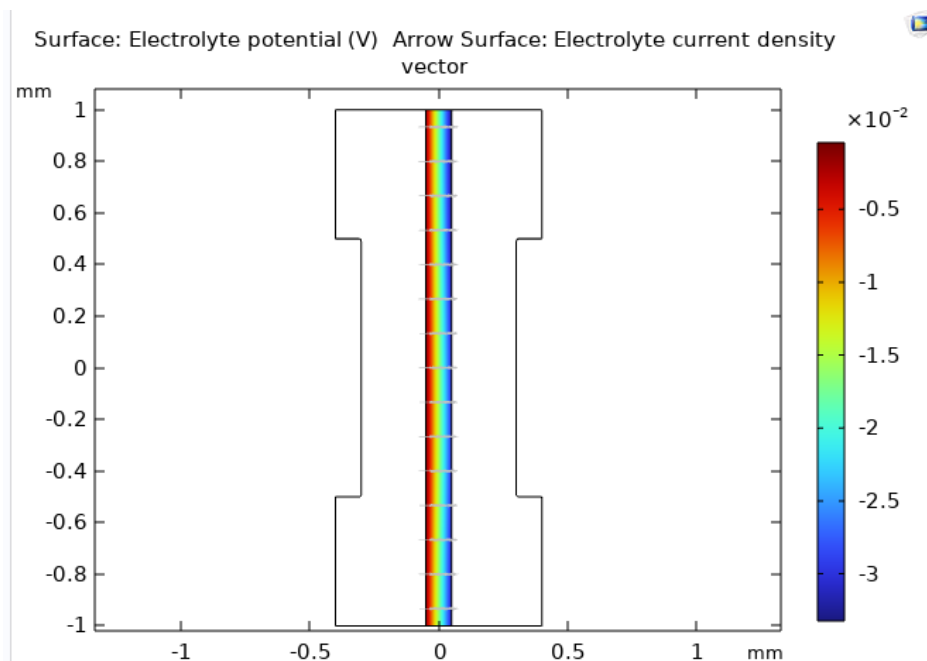


Рисунок 3.2 - Электролитный потенциал

Далее рассмотрены результаты расчётов мольной доли газообразных реагентов, представленные на рисунках 3.3-3.6. На рисунке 3.3 показано распределение мольной доли водорода. В процессе движения газа по анодному каналу отмечается снижение концентрации водорода, что объясняется его расходом в электрохимических реакциях на аноде. Это уменьшение концентрации отражает эффективную работу топливного элемента и соответствие реальным процессам в системе.

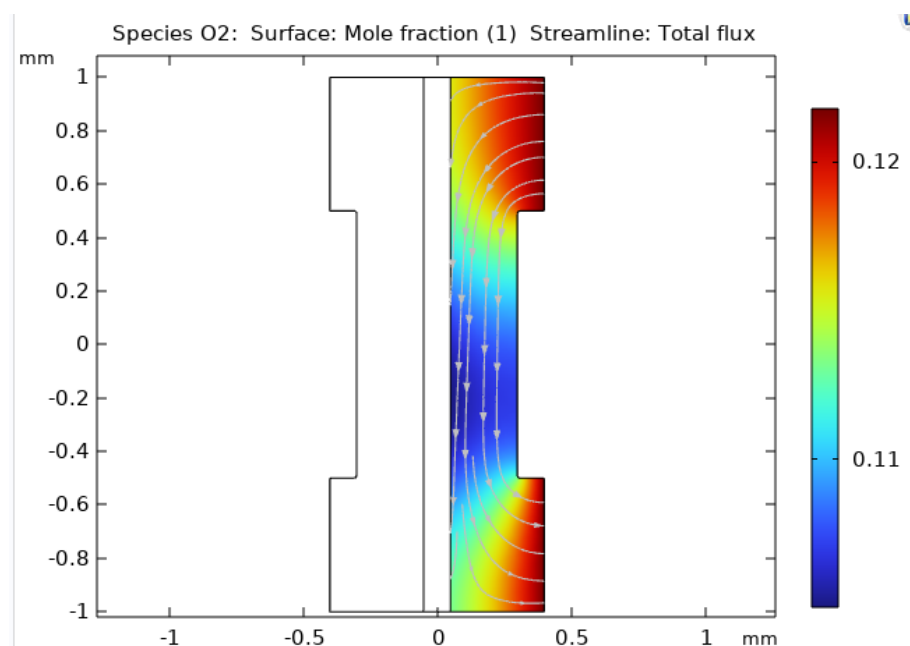


Рисунок 3.3 - Молярная доля, O2

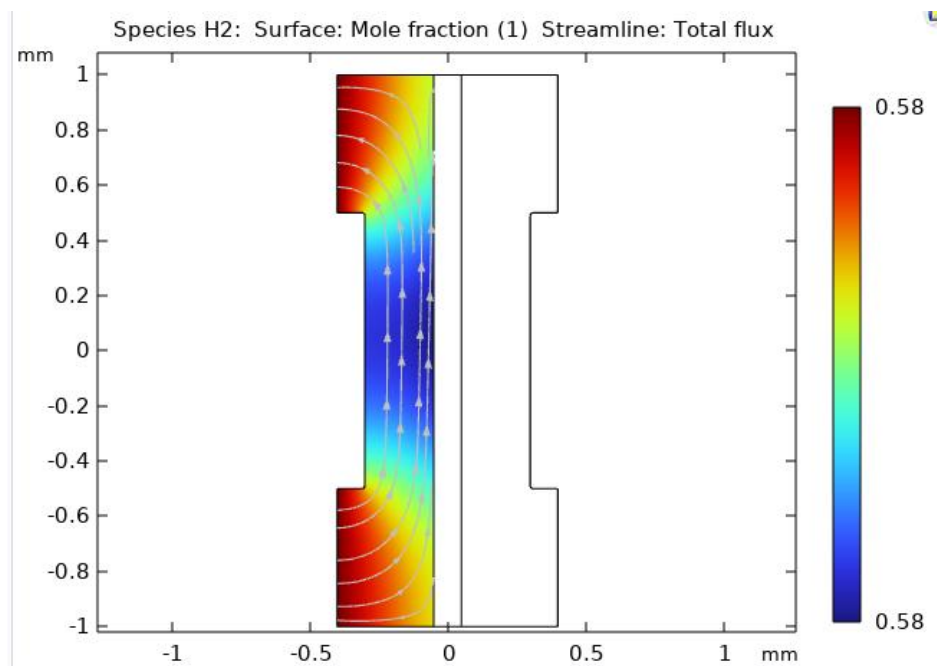


Рисунок 3.4 - Молярная доля, H<sub>2</sub>

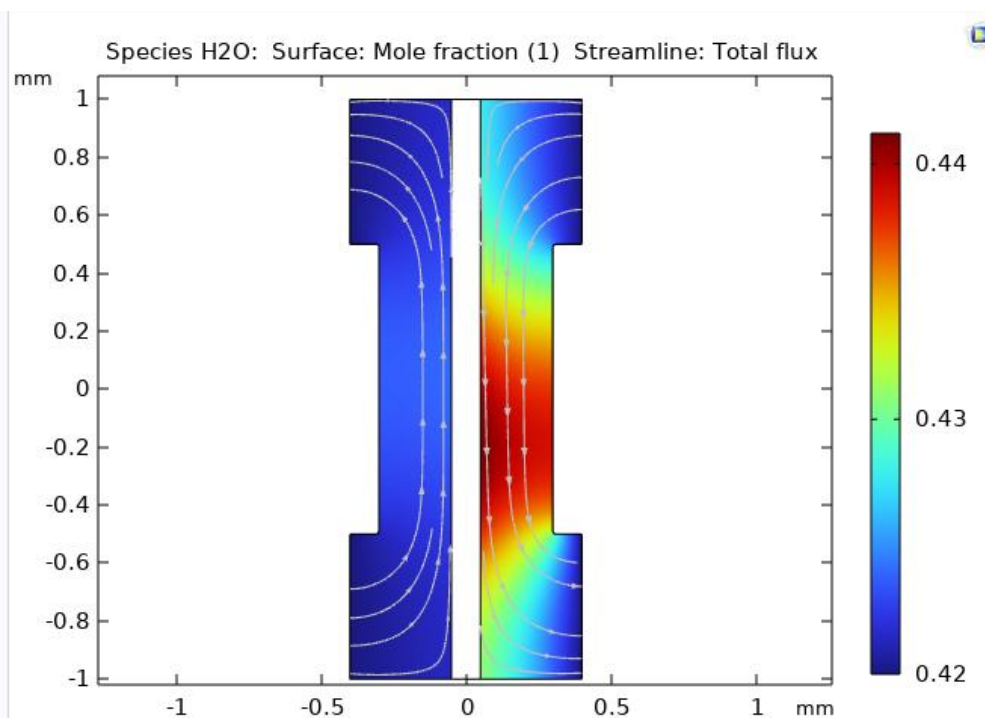


Рисунок 3.5 - Молярная доля, H<sub>2</sub>O

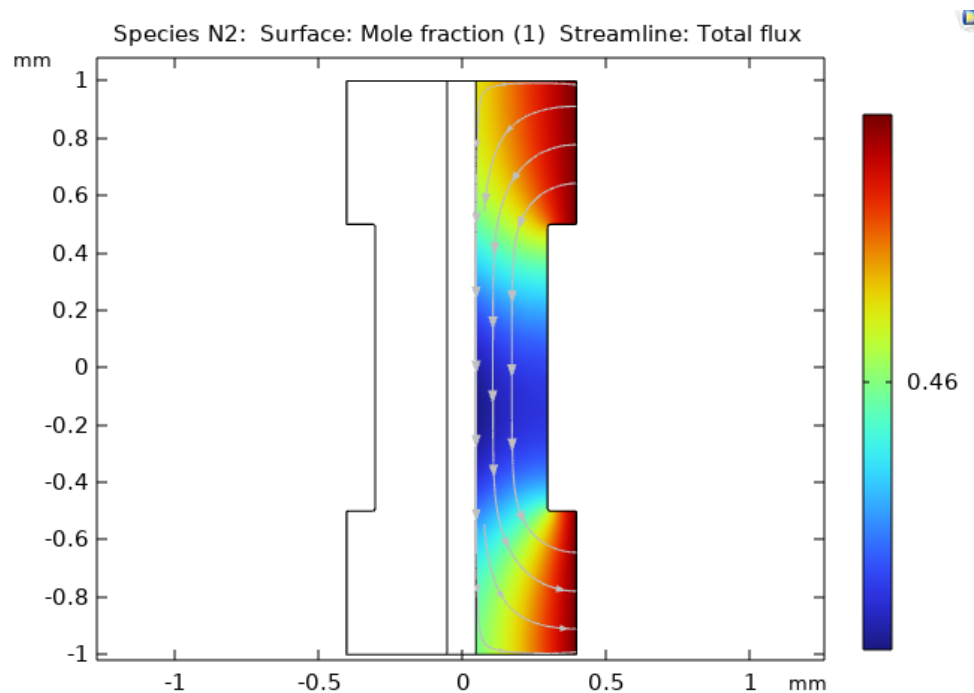


Рисунок 3.6 - Молярная доля, N2

Аналогично, на рисунке 3.4 отображено изменение мольной доли кислорода на катодной стороне элемента. Плавное уменьшение концентрации кислорода также соответствует его активному расходу во время электрохимической реакции, что подтверждается теоретическими расчетами и эмпирическими наблюдениями в реальных системах.

Распределение мольной доли образующейся воды, изображенное на рисунке 3.5, демонстрирует ее повышение на катодной стороне, обусловленное образованием воды в результате реакции кислорода и водорода. Полученные данные соответствуют теоретическим ожиданиям и подтверждают, что моделирование адекватно отражает физико-химические процессы, протекающие в топливном элементе.

Рисунок 3.6 иллюстрирует распределение мольной доли азота, который в данных условиях не принимает участие в химических реакциях. Как видно, его концентрация практически неизменна, что также подтверждает реалистичность проведенных расчетов и отсутствие значительных побочных процессов в рассматриваемой модели.

На рисунке 3.7 представлены данные о распределении давления и линиях скорости газового потока в элементе. Видно, что потоки газов распределены достаточно равномерно, а небольшие перепады давления не приводят к существенным изменениям в эффективности работы топливного элемента. Это указывает на стабильность моделируемого устройства и адекватность выбранных параметров граничных условий.

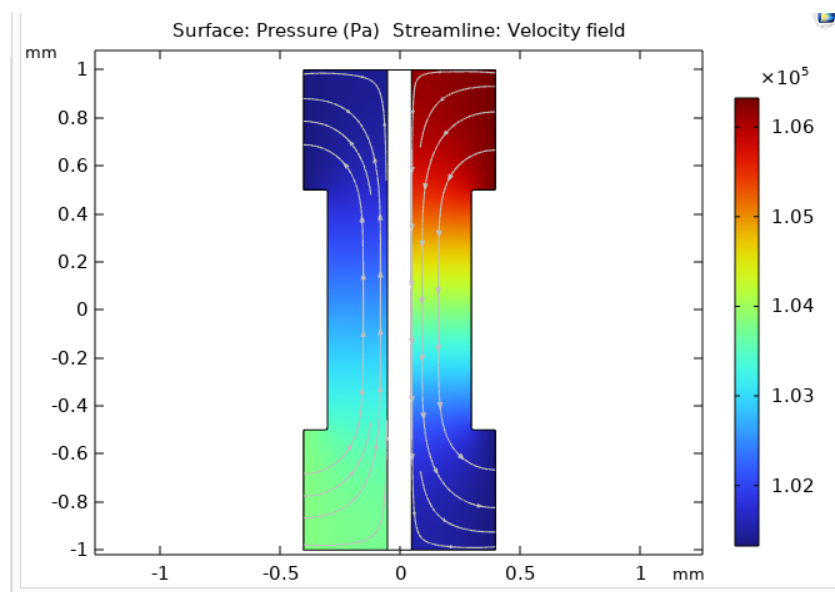


Рисунок 3.7 - Распределения давления

Завершает представление результатов график активности воды (относительной влажности), представленный на рисунке 3.8. Из него видно, что относительная влажность заметно повышается на катодной стороне, что естественно обусловлено реакцией образования воды. Эти данные особенно важны для оценки рабочих условий и контроля влажности мембраны, что критически влияет на долговечность и эффективность топливного элемента.

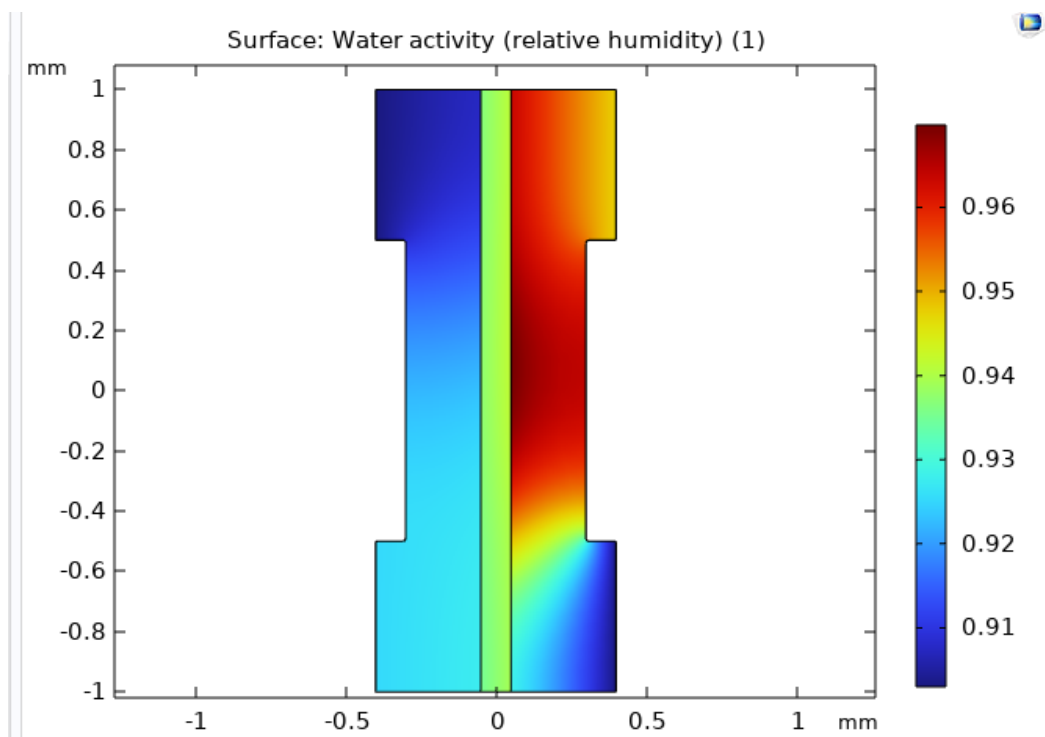


Рисунок 3.8 - Активность воды (относительная влажность)



Таким образом, представленные результаты моделирования подтверждают адекватность разработанной численной модели и ее способность реалистично отражать поведение полимерно-электролитного мембранного топливного элемента. Все полученные данные демонстрируют хорошее соответствие теоретическим прогнозам и существующим экспериментальным исследованиям, подтверждая возможность практического применения полученных выводов в дальнейшем проектировании и оптимизации реальных водородных систем.

### 3.2 Результаты моделирования СОТЭ-топливного элемента

В ходе численного моделирования твердооксидного топливного элемента (СОТЭ) с использованием COMSOL Multiphysics были получены подробные результаты, демонстрирующие эффективность и внутренние процессы функционирования данной системы.

На рисунке 3.9 отражено распределение электрического потенциала электродов относительно земли, где можно заметить явные различия потенциалов вдоль элемента, подтверждающие эффективную работу и адекватность выбранных электрических условий моделирования.

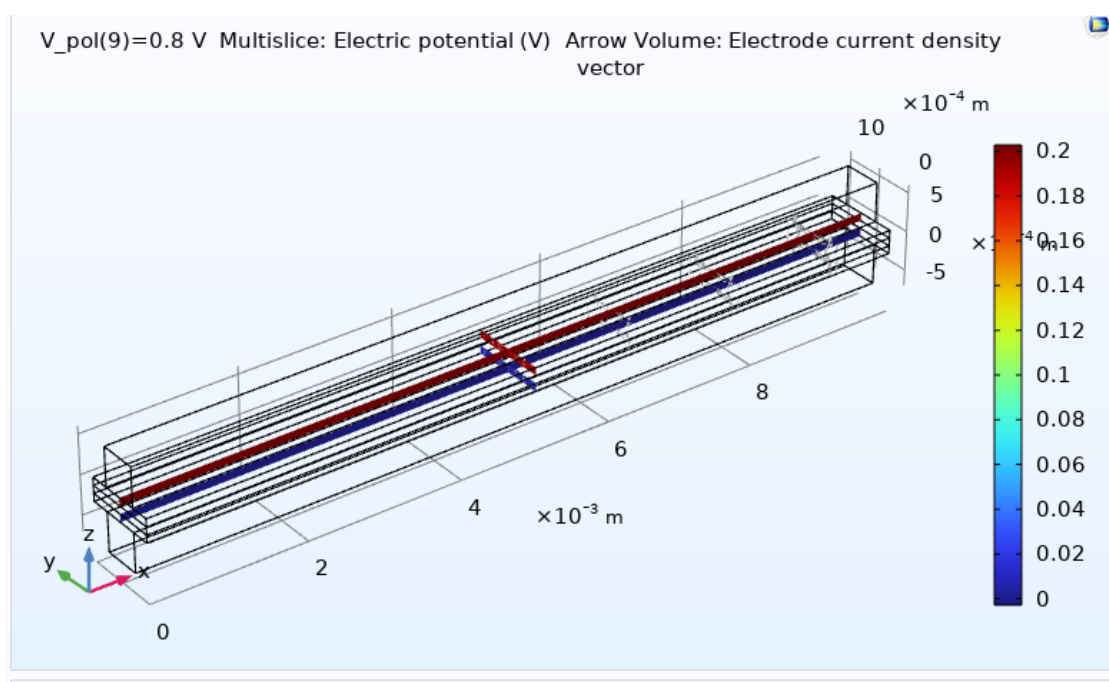


Рисунок 3.9 - Потенциал электрода относительно земли

Распределение электролитного потенциала, показанное на рисунке 3.10 ясно иллюстрирует градиент потенциала вдоль электролита, что соответствует

ожидаемым электрохимическим реакциям и подтверждает корректную настройку параметров модели.

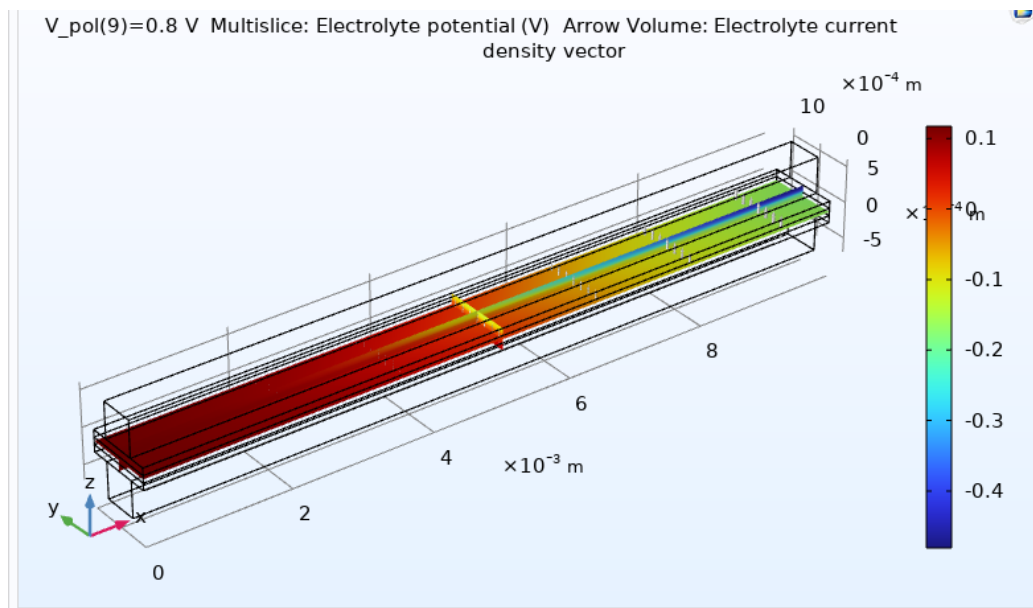


Рисунок 3.10 - Электролитный потенциал

Далее были исследованы концентрационные распределения основных газообразных компонентов, участвующих в электрохимических реакциях. Рисунки 3.11 и 3.12 отображают мольную долю водорода, где видно, как концентрация этого реагента постепенно снижается по ходу движения по аноду, что отражает активное расходование водорода в процессе реакции.

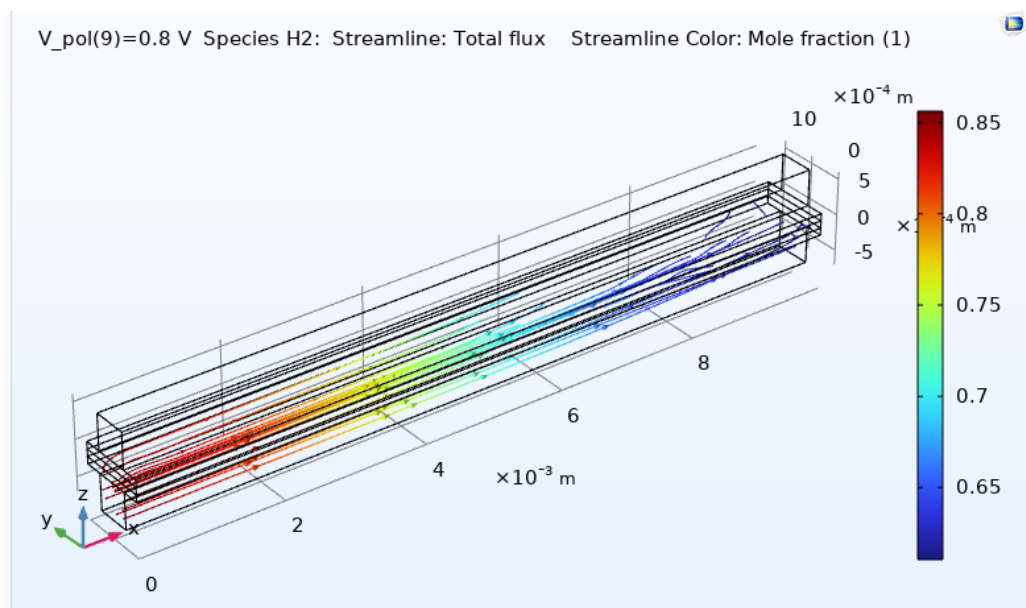


Рисунок 3.11 - Мольная доля, H<sub>2</sub>, линия тока

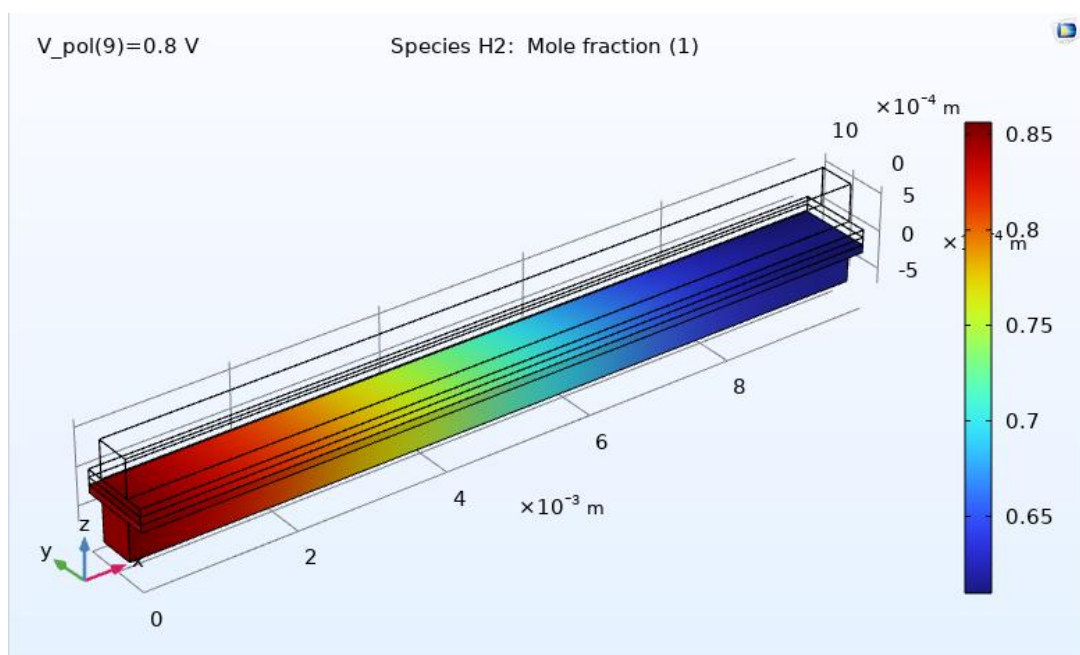


Рисунок 3.12- Молярная доля,  $H_2$ , поверхность

На рисунках 3.13 и 3.14 представлена молярная доля кислорода. Как ожидается, концентрация кислорода также заметно снижается по мере продвижения через катодный канал, что обусловлено его потреблением в реакции с водородом.

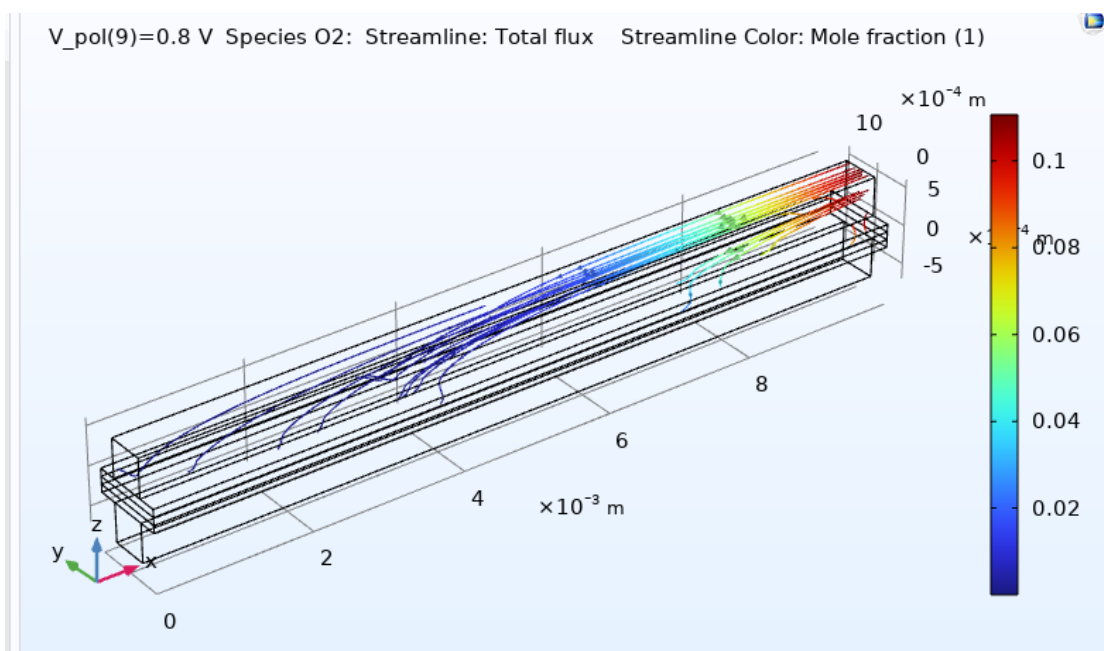


Рисунок 3.13- Молярная доля,  $O_2$ , линия тока

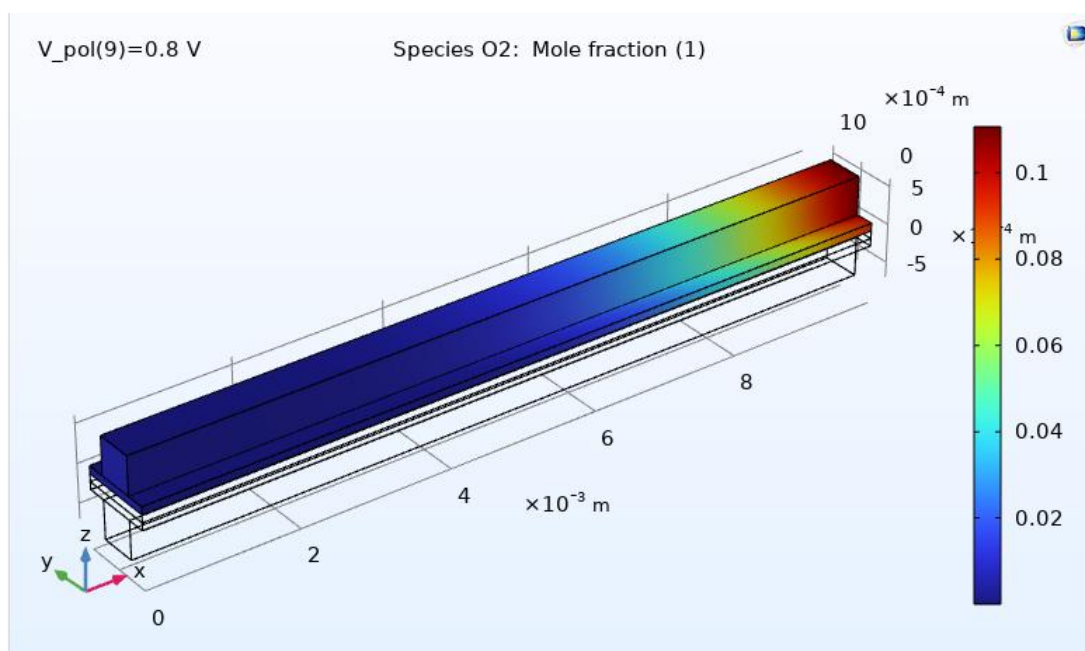


Рисунок 3.14 - Молярная доля,  $O_2$ , поверхность

Результаты моделирования мольной доли образующейся воды приведены на рисунках 3.15 и 3.16. Здесь наглядно видно, как вода образуется и распределяется по катодной стороне, подтверждая правильность реализации реакционных процессов в моделируемой системе.

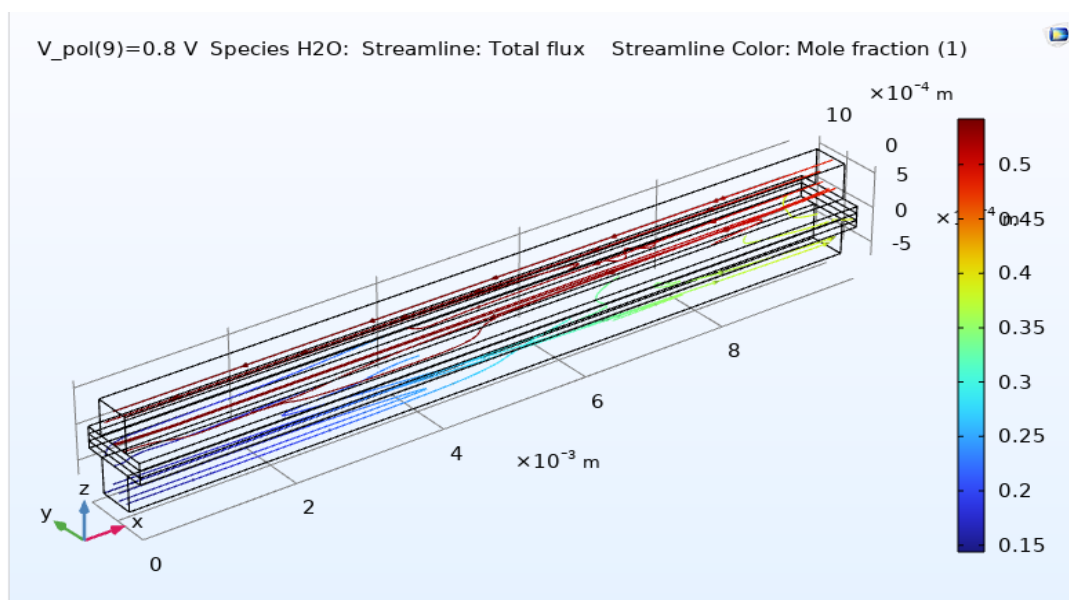


Рисунок 3.15 – Молярная доля,  $H_2O$ , линия тока

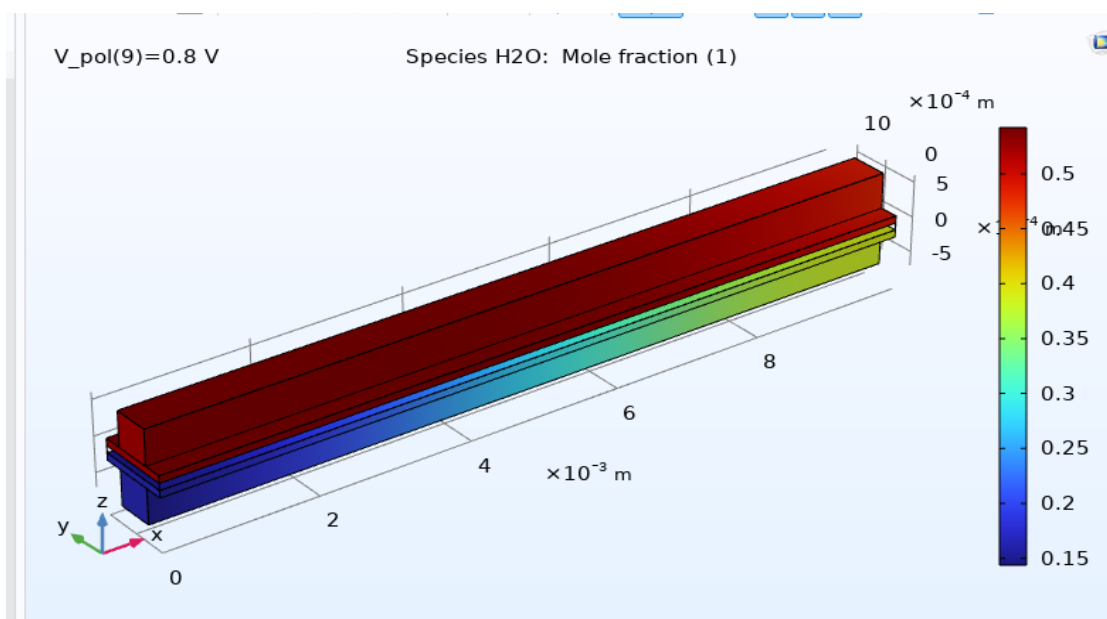


Рисунок 3.16 – Молярная доля, H<sub>2</sub>O, поверхность

Для азота, не участвующего в реакциях, результаты представлены на рисунках 3.17 и 3.18. Здесь концентрация азота остается практически постоянной, демонстрируя отсутствие побочных реакций и подтверждая корректность условий моделирования.

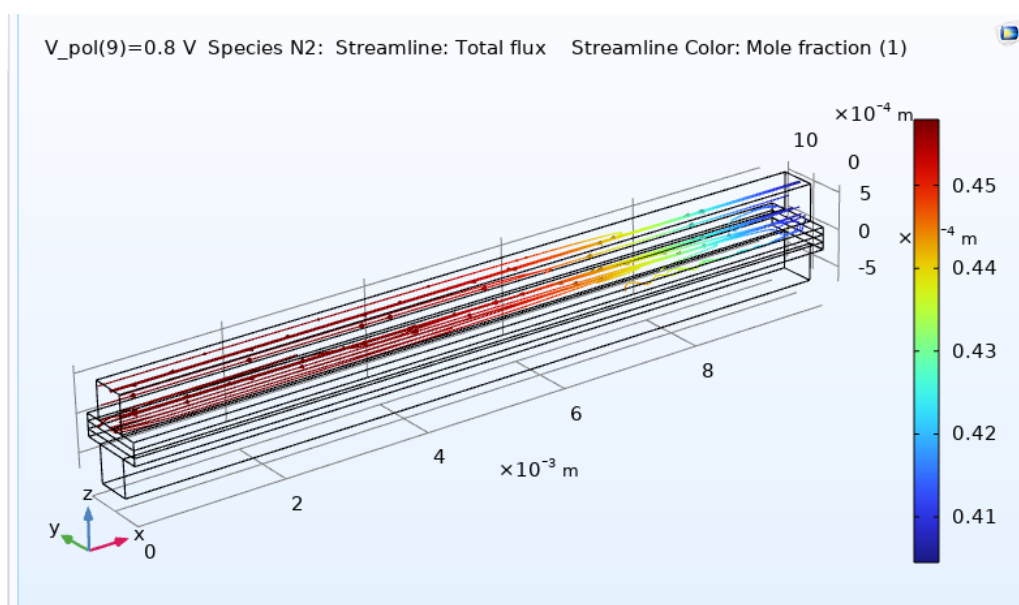


Рисунок 3.17 – Молярная доля, N<sub>2</sub>, линия тока

Дополнительно было проанализировано распределение давления и скорости газовых потоков в элементах. Давление и скорости в катод и аноде (не представлены на рисунках) показывают равномерное распределение потоков, что способствует стабильности функционирования системы. Эти



данные важны для оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик топливного элемента.

Также важно отметить результаты расчета плотности тока электролита, подтверждающие эффективное распределение тока по рабочей зоне элемента, что обеспечивает высокую надежность и стабильность работы системы.

Таким образом, все полученные результаты демонстрируют адекватность созданной численной модели СОТЭ и подтверждают ее способность реалистично отображать физико-химические процессы, что позволяет применять модель для дальнейшего проектирования и оптимизации твердооксидных топливных элементов в реальных условиях эксплуатации.

### **3.3 Результаты моделирования ПЭМ и СОТЭ-топливных элементов**

В результате проведенного численного моделирования полимерно-электролитного мембранного (ПЭМ) и твердооксидного топливного элемента (СОТЭ) с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics были получены значимые результаты, которые позволяют глубоко понять и проанализировать внутренние процессы этих двух типов топливных элементов.

Результаты моделирования ПЭМ-топливного элемента наглядно демонстрируют стабильное и прогнозируемое поведение системы, с четко выраженным разделением электрических потенциалов электродов, эффективным использованием реагентов и формированием продуктов реакции (воды) в ожидаемых зонах. Модель подтверждает высокую эффективность и быстрое реагирование на изменения условий эксплуатации, что делает ПЭМ-топливные элементы, особенно подходящими для динамических и переменных нагрузок, характерных для автономных и распределённых энергосистем.

Результаты моделирования СОТЭ-топливного элемента показывают стабильные градиенты потенциалов и концентраций реагентов, эффективное формирование воды и отсутствие существенных побочных процессов. СОТЭ-элементы характеризуются более высоким уровнем стабильности и равномерности процессов благодаря высоким рабочим температурам, что позволяет использовать широкий спектр топлив и повышает общую эффективность преобразования энергии.

Сравнительный анализ двух моделей показывает, что ПЭМ-элементы обеспечивают быстрое и эффективное управление нагрузками, идеальны для систем с изменчивым характером энергопотребления. В то же время СОТЭ-элементы проявляют высокую стабильность и способность работать с разными видами топлива, демонстрируя преимущества при постоянных нагрузках и в системах, требующих высокой общей эффективности за счет одновременного использования тепла и электрической энергии.

Таким образом, выбор типа топливного элемента зависит от конкретных требований и условий эксплуатации: ПЭМ-элементы подходят для динамических приложений, тогда как СОТЭ более предпочтительны для стационарных систем с комбинированным производством тепловой и электрической энергии. Полученные результаты дают ценную основу для дальнейшего исследования и оптимизации энергетических систем на основе водородных технологий.

### **3.4 Вклад работы в реализацию ключевых пунктов государственных стратегических документов**

Выполненное в диссертации исследование непосредственно решает задачи, поставленные в двух важнейших стратегических и программных документах Республики Казахстан:

1. Концепция по переходу Республики Казахстан к «зелёной экономике» (Указ Президента № 577 от 30 мая 2013 года)

Конкретный пункт: Развитие альтернативных и возобновляемых источников энергии, внедрение инновационных энергетических решений в жилищном секторе, обеспечение энергоэффективности и снижение углеродного следа.

*Как решает диссертация:*

Диссертация фокусируется на разработке, моделировании и сравнительном анализе схем энергообеспечения зданий с использованием двух типов водородных топливных элементов — ПЭМ-ТЭ и СОТЭ. Применение водородных технологий и современных топливных элементов позволяет обеспечить практически “нулевые” выбросы загрязняющих веществ при эксплуатации зданий, в отличие от традиционных углеводородных источников. Кроме того, интеграция этих технологий способствует снижению энергоёмкости объектов и формированию новых стандартов в строительстве “умных” и энергоэффективных зданий.

В Концепции по переходу к “зелёной экономике” в качестве одного из целевых индикаторов на этапе до 2030 года обозначено, что “доля альтернативных и возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе страны должна достигнуть 30%”. Проведённое моделирование, а также разработанные рекомендации по использованию топливных элементов в зданиях, вносят вклад в достижение именно этого индикатора, так как позволяют интегрировать инновационные ВИЭ-решения в реальный жилой и промышленный фонд. В работе приведены анализ сценариев по переходу на водородную энергетику в климатических и экономических условиях Казахстана, что полностью согласуется с задачами Концепции.

Кроме того, одним из основных принципов документа является развитие технологий аккумулирования и хранения энергии — топливные элементы в

предлагаемой системе выступают как раз таким инструментом, обеспечивая надёжность и гибкость энергоснабжения.

Статистика: согласно последним докладам Министерства энергетики РК, Казахстан планирует увеличить количество пилотных водородных проектов уже к 2025 году, а пилотные микрорайоны на водородных топливных элементах обсуждаются для пилотной реализации в городах Нур-Султан и Алматы.

2. Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» (от 13 января 2012 года № 541-IV)

Конкретный пункт: Внедрение энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий в зданиях, разработка и внедрение новых технических решений для оптимизации энергопотребления, стимулирование применения ВИЭ и систем аккумулирования энергии.

*Как решает диссертация:*

В рамках диссертационной работы смоделированы и сравнительно проанализированы различные варианты конфигураций водородных энергетических систем, что позволяет выявить наиболее энергоэффективные решения для зданий различного назначения (жилых, общественных, промышленных). Применение водородных топливных элементов (ПЭМ-ТЭ и СОТЭ) способствует снижению затрат на электро- и теплоснабжение, минимизации потерь, а также улучшению экологической ситуации в городах и регионах Казахстана.

Работа также учитывает положения закона о необходимости “создания благоприятных условий для внедрения инноваций и научных исследований в области энергосбережения”. В частности, результаты моделирования с использованием COMSOL Multiphysics могут служить базой для дальнейших инженерных разработок, а также быть использованы в реальных проектах по реконструкции или строительству энергоэффективных зданий.

Кроме того, одной из задач закона является стимулирование создания интеллектуальных энергетических систем с автоматическим управлением потоками энергии — предложенные в диссертации схемы с интеграцией топливных элементов и возможностью балансировки нагрузки полностью отвечают этим требованиям.

Пример из практики: уже сегодня в Казахстане реализуются пилотные проекты в Астане, Кызылорде и Уральске по внедрению “зелёных” домов с элементами автоматизации энергопотребления и ВИЭ. Диссертационная работа может служить научной и методологической базой для тиражирования таких решений в будущем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей магистерской диссертации выполнено комплексное исследование перспектив применения водородных топливных элементов для энергообеспечения зданий в условиях Республики Казахстан. В работе рассмотрены современные тенденции развития водородной энергетики в мире и стране, приведён сравнительный анализ наиболее перспективных типов топливных элементов — полимер-электролитных мембранных (ПЭМ-ТЭ, PEMFC) и твердооксидных (СОТЭ, SOFC). Проведён анализ преимуществ и ограничений данных технологий, приведены примеры мировых пилотных проектов и реализованных решений.

Основное внимание уделено моделированию интеграции топливных элементов в систему электроснабжения и теплоснабжения зданий с использованием мультифизической среды COMSOL Multiphysics. Разработана и реализована 3D-модель, в рамках которой были учтены геометрические параметры, физические свойства материалов, процессы теплопереноса, массопереноса и электрохимические реакции.

В результате моделирования выявлены особенности распределения энергии, концентрации водорода и тепловых потоков в элементах здания при различных режимах эксплуатации. Анализ показал, что совместное использование ПЭМ-ТЭ и СОТЭ позволяет повысить гибкость системы энергоснабжения, снизить выбросы загрязняющих веществ и повысить энергетическую эффективность объектов. Особое внимание уделено вопросам граничных условий, корректному выбору параметров расчёта и анализу возникающих проблем в процессе моделирования.

Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшего развития водородной энергетики в Казахстане и интеграции топливных элементов в зданиях различного назначения. Разработаны рекомендации по оптимальной конфигурации систем, условиям их внедрения и адаптации к национальным стандартам и государственным стратегическим задачам в области «зелёной экономики» и энергоэффективности.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию математических моделей, проведение экспериментальных работ, экономическую оценку жизненного цикла и разработку комплексных систем хранения и транспортировки водорода.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Hydrogen Roadmap Europe. European Commission, 2019.
- 2 The Future of Hydrogen. IEA Technology Report, International Energy Agency, 2019.
- 3 Annual Energy Outlook 2023. U.S. Department of Energy, EIA.
- 4 National Hydrogen Strategy. Government of Germany, 2020.
- 5 Liu, H. Principles of Fuel Cells. Taylor & Francis, 2006.
- 6 O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F.B. Fuel Cell Fundamentals. John Wiley & Sons, 2016.
- 7 Cherepanov, V.M. Водородная энергетика: достижения и перспективы. — Москва: Наука, 2015.
- 8 «Концепция по переходу Республики Казахстан к “зелёной экономике”». Указ Президента РК № 577 от 30.05.2013 г.
- 9 Tokayev, K. State of the Nation Address. Kazakhstan, 2020.
- 10 Справочник по моделированию процессов в топливных элементах. — COMSOL Multiphysics Documentation, 2023.
- 11 Kakaç, S., Veziroğlu, T.N. A Review of Fuel Cell Types and Their Applications. Energy Sources, 2005.
- 12 Aliev, M.A. Водородная энергетика в Казахстане: перспективы и вызовы // Вестник КазНТУ, 2022.
- 13 Steele, B.C.H., Heinzel, A. Материалы для технологий топливных элементов. Nature, 2001.
- 14 Zhang, L. и др. Современные достижения в области материалов PEM-топливных элементов. Journal of Power Sources, 2021.
- 15 Barbir, F. PEM топливные элементы: теория и практика. Academic Press, 2013.
- 16 Giddey, S., Badwal, S.P.S., Kulkarni, A. и др. Последние разработки в области технологии твердооксидных топливных элементов: обзор. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012.
- 17 COMSOL AB. Руководство пользователя по модулю "Топливные элементы и электролизеры". COMSOL, 2023.
- 18 Тарасов, Б.П. Водородная энергетика: учебное пособие для вузов. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2018.
- 19 Фролов В.И., Кузнецов Н.А. Моделирование процессов в твердооксидных топливных элементах с помощью COMSOL Multiphysics // Электричество, 2022, №4.
- 20 Xu, H. и др. Моделирование и симуляция работы твердооксидных топливных элементов с использованием COMSOL Multiphysics. Energies, 2018.
- 21 Steele, B.C.H., Heinzel, A. Материалы для технологий топливных элементов. Nature, 2001.
- 22 Zhang, L. и др. Современные достижения в области материалов PEM-топливных элементов. Journal of Power Sources, 2021.



- 23 Barbir, F. PEM топливные элементы: теория и практика. Academic Press, 2013.
- 24 Giddey, S., Badwal, S.P.S., Kulkarni, A. и др. Последние разработки в области технологии твердооксидных топливных элементов: обзор. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012.
- 25 COMSOL AB. Руководство пользователя по модулю "Топливные элементы и электролизеры". COMSOL, 2023.
- 26 Тарасов, Б.П. Водородная энергетика: учебное пособие для вузов. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2018.
- 27 Фролов В.И., Кузнецов Н.А. Моделирование процессов в твердооксидных топливных элементах с помощью COMSOL Multiphysics // Электричество, 2022, №4.
- 28 Xu, H. и др. Моделирование и симуляция работы твердооксидных топливных элементов с использованием COMSOL Multiphysics. Energies, 2018.
- 29 СТ КазНУТУ - 09 - 2023. Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала.- КазНУТУ, 2023.
- 30 Рахматов А.Р., Юлдашев, Ш.К. Анализ современных тенденций в развитии водородных топливных элементов // Журнал Ташкентского государственного технического университета. — 2025.