

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН



/ Казакова А.В. /

« 20 » апреля 2022 г.

**Дополнительная профессиональная образовательная программа  
профессиональной переподготовки  
Современные технологии и оборудование:  
«Цифровое моделирование функциональных элементов и состава  
мембранно-электродных блоков электролизеров»**

форма обучения очная

2022 г.

## Аннотация программы

Дополнительная профессиональная образовательная программа предназначена для повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода

Квалификация выпускника уровень 5 национальной рамки квалификаций  
Уровень квалификации в соответствии с профессиональным стандартом – 5.

Осваиваемый вид профессиональной деятельности – в соответствии с профессиональным стандартом, осуществление проведения работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований, осуществление выполнения экспериментов и оформления результатов исследований и разработок, подготовка элементов документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов работ в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров

Авторы:

Золотухина Екатерина Викторовна, доктор хим. наук, главный научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Левченко Алексей Владимирович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Герасимова Екатерина Владимировна, кандидат хим. наук, старший научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Лысков Николай Викторович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Правообладатель программы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д.1, [www.icp.ac.ru](http://www.icp.ac.ru), 8(49652)21602

Нормативный срок освоения программы 250 часов при очной форме обучения. Реализации программы возможна с применением дистанционных образовательных технологий.

Программа является инвариантной для профессиональной переподготовки и предусматривает возможность выбора модулей для освоения (повышения квалификации) обучающимися по программам магистратуры, связанным с водородной и электрохимической энергетикой, модулей для освоения.

## Содержание

1. Общие положения	5
1.1. Требования к поступающим	7
1.2. Нормативный срок освоения программы	7
1.3. Квалификационная характеристика выпускника	7
2. Характеристика подготовки	8
2.1. Общая характеристика подготовки	8
2.2. Образовательные результаты и структура программы	8
2.3. Пояснительная записка	10
3. Учебный план	14
4. Оценка качества освоения образовательной программы дополнительного профессионального образования	17
Приложение 1. Оценочные средства входного контроля	18
Приложение 2. Программа программного модуля «Теория и практика получения водорода электролизным способом»	23
Приложение 2.1-2.4. Оценочные средства	41
Приложение 2.5. Учебные материалы	74
Приложение 2.6. Методические материалы	75
Приложение 3. Программа программного модуля «ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств»	78
Приложение 3.1. Оценочные средства	92
Приложение 3.2. Учебные материалы	103
Приложение 3.3. Методические материалы	104
Приложение 4. Управление образовательной программой	108
Приложение 5. Учебные материалы к программному модулю «Теория и практика получения водорода электролизным способом»	109
Приложение 6. Учебные материалы к программному модулю «ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств»	110

## **1. Общие положения**

Нормативную правовую основу разработки дополнительной профессиональной образовательной программы (далее – программа) составляют:

– Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;

– Приказ Минобрнауки России от 01 июля 2013 г. № 499 (ред. От 15.11.2013 г.) «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам» (Зарегистрировано в Минюсте России 20 августа 2013 г. № 29444);

– Приказ Минобрнауки России от 12 сентября 2013 г. № 1061 «Об утверждении перечней специальностей и направлений подготовки высшего образования» (с изменениями на 30 августа 2019 года);

– Приказ Минобрнауки России от 17 июля 2017 г. № 670 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования - магистратура по направлению подготовки 04.04.02. «Химия, физика и механика материалов»;

– Профессиональный стандарт 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам

## ***Термины, определения и используемые сокращения***

В программе используются следующие термины и их определения:

Виды профессиональной деятельности (ВПД) – составная часть области профессиональной деятельности, образованная целостным набором трудовых функций, каждая из которых обладает относительной автономностью и определена работодателем как необходимый компонент содержания образовательной программы профессиональной переподготовки.

Знание – информация о свойствах объектов, закономерностях процессов и явлений, правилах использования этой информации для принятия решений, присвоенная обучающимся на одном из уровней, позволяющих выполнять над ней мыслительные операции.

Междисциплинарный курс (МДК) – часть образовательной программы дополнительного профессионального образования или программы профессионального модуля, предназначенная для формирования знаний и умений, объединенных по прагматическим основаниям с нарушением академических границ отраслей знаний.

Модуль – совокупность частей учебной дисциплины (курсов), имеющая определенную логическую завершенность по отношению к установленным целям и результатам воспитания, обучения.

Оценочные средства – дидактические средства для оценки качества подготовленности обучающихся.

Опыт практической деятельности (ОПД) – образовательный результат, включающий выполнение обучающимся деятельности, завершающейся получением

результата/продукта, значимого при выполнении трудовой функции, в условиях реального производства или в модельной ситуации, которая воспроизводит значимые условия реального производства.

Профессиональная компетенция (ПК) – интегрированный результат образования, готовность применять знания, умения и практический опыт для успешной деятельности в процессе выполнения определенной трудовой функции.

Профессиональный модуль (ПМ) – часть образовательной программы дополнительного профессионального образования, предназначенная для формирования определенных профессиональных компетенций в рамках того или иного вида профессиональной деятельности.

Рабочая программа – нормативный документ, регламентирующий взаимодействие преподавателя и обучающихся в ходе учебно-воспитательного процесса.

Умение – освоенный субъектом способ выполнения действия, обеспечиваемый совокупностью приобретенных знаний и навыков; операция (действие), выполняемая определенным способом и с определенным качеством.

Учебная дисциплина (УД) – часть образовательной программы дополнительного профессионального образования, предназначенная для формирования знаний и умений в соответствующей сфере профессиональной деятельности.

Фонды оценочных средств (ФОС) – совокупность оценочных средств, используемых на различных этапах педагогической диагностики.

### ***1.1. Требования к поступающим***

Лица, поступающие на обучение, должны иметь документ о получении высшего образования уровня бакалавра, специалиста или магистра в области химии, физики или инженерных технологий, в области электрохимических производств, материаловедения и наноматериалов и иметь следующие знания и умения:

- Ориентируется в строении вещества, понимает механизм химических процессов
- Знает законы электрофизики, уравнения идеального газа, единицы измерения электрофизических величин
- Знает свойства полного дифференциала, подходы к решению дифференциальных и интегральных уравнений
- Умеет рассчитывать рН, мольно-массовые характеристики, концентрацию в смеси

Для проверки необходимых для освоения знаний и умений разработан ФОС (Приложение 1).

### ***1.2. Нормативный срок освоения программы***

Нормативный срок освоения программы при очной форме подготовки составляет:

- 36 или 164 часа для траектории повышения квалификации в соответствии с освоенным профессиональным модулем.

- 250 часов для траектории профессиональной переподготовки.

Программа является инвариантной для профессиональной переподготовки и предусматривает возможность выбора модулей для освоения (повышения квалификации) обучающимися по программам магистратуры, связанным с водородной и электрохимической энергетикой, модулей для освоения.

### ***1.3. Квалификационная характеристика выпускника***

Выпускник должен быть готов к профессиональной деятельности по цифровому моделированию структуры функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров в качестве специалиста по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, повысить квалификацию в качестве специалиста по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалиста по компьютерному проектированию технологических процессов, специалиста по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалиста в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалиста в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалиста по

проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалиста по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов.

Квалификационный уровень по национальной рамке квалификаций: 5.

### 3. УЧЕБНЫЙ ПЛАН

дополнительной профессиональной образовательной программы  
(повышения квалификации, профессиональной переподготовки)

#### Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров

Форма обучения – очная  
Нормативный срок обучения – 250 часов

Индекс	Элементы учебного процесса, в т.ч. учебные дисциплины, профессиональные модули, междисциплинарные курсы	Всего часов	Обязательная аудиторная учебная нагрузка		Самостоятельная работа, часов	Практики, стажировки, часов
			всего, часов	в т.ч. практические занятия, часов		
1	2	3	4	5	6	7
<b>Профессиональный цикл</b>						
ПМ.00	Профессиональные модули					
ПМ 01	<b>Теория и практика получения водорода электролизным способом</b>	<b>36</b>	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>16</b>	<b>4</b>
МДК 01.01	Основные вопросы физической химии и электрохимии	30	20	6	10	0
МДК 01.02	Водород и его получение электролизным способом	8	8	2	0	0
МДК 01.03	Устройство современных электролизеров для производства водорода и использование электролизного водорода	20	8	0	12	0
ПП 01	Практика	8	0	0	4	4

1	2	3	4	5	6	7
ПМ 02	<b>Моделирование мембранно-электродного блока электролизера в COMSOL Multiphysics</b>	<b>164</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>122</b>	<b>22</b>
МДК 02.01	ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств	24	12	8	12	0
МДК 02.02	Оформление проектного решения	12	8	4	4	0
ПП 02	Практика в модельной ситуации	106	0	0	84	22
<b><i>Всего по учебным дисциплинам и профессиональным модулям</i></b>		<b>208</b>	<b>56</b>	<b>20</b>	<b>126</b>	<b>26</b>
Консультации		4				
Контроль		22	22			
Подготовка и защита выпускной квалификационной \ аттестационной работы		16	2		14	
<b>Итого</b>		<b>250</b>				

**КАЛЕНДАРНЫЙ УЧЕБНЫЙ ГРАФИК**  
**дополнительной профессиональной образовательной программы**  
**(повышения квалификации, профессиональной переподготовки)**  
**Современные технологии и оборудование:**

**Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров**

Форма обучения – очная  
 Нормативный срок обучения – 250 часов

Индекс	Элементы учебного процесса	Сроки обучения (месяцы/недели)					
		1				2	
		1	2	3	4	5	6
ПМ 01	<b>Теория и практика получения водорода электролизным способом</b>						
МДК 01.01	Основные вопросы физической химии и электрохимии	30					
МДК 01.02	Водород и его получение электролизным способом	8					
МДК 01.03	Устройство современных электролизеров для производства водорода и использование электролизного водорода		20				
ПП 01			8				
ПМ 02	<b>Моделирование мембранно-электродного блока электролизера в COMSOL Multiphysics</b>						
МДК 02.01	ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств		9	15			
МДК 02.02	Оформление проектного решения			12			
ПП 02				4	32	40	30
	Консультации						4
	Контроль	2	3	9	8		
	Подготовка и защита выпускной квалификационной \ аттестационной работы						16
	<b>Всего</b>			<b>160</b>		<b>90</b>	

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии Российской академии наук



УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН

/ Казакова А.В. /

« 30 » ноября 2022 г.

**ПРОГРАММА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ**  
**«Теория и практика получения водорода электролизным способом»**

2022 г.

Программа предназначена для повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода

Организация-разработчик: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

Разработчики:

Золотухина Екатерина Викторовна, доктор хим. наук, главный научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Левченко Алексей Владимирович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Герасимова Екатерина Владимировна, кандидат хим. наук, старший научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Лысков Николай Викторович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Правообладатель программы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д.1, [www.icp.ac.ru](http://www.icp.ac.ru), 8(49652)21602

© ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Паспорт профессионального модуля	26
2. Структура и содержание профессионального модуля	31
3. Условия реализации программы профессионального модуля	35
4. Контроль и оценка результатов освоения профессионального модуля	39
Приложение 2.1 Образцы оценочных средств для оценки сформированности ПК	41
Приложение 2.2 Образцы оценочных средств для оценки сформированности промежуточных результатов по МДК 01	50
Приложение 2.3 Образцы оценочных средств для оценки сформированности промежуточных результатов по МДК 02 и 03	60
Приложение 2.4 Образцы оценочных средств для оценки сформированности промежуточных результатов по МДК 03	67
Приложение 2.5 Учебно-методические материалы для обучающихся	74
Приложение 2.6 Методические материалы для преподавателя	75

# 1. ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ «Теория и практика получения водорода электролизным способом»

## 1.1. Область применения программы

Профессиональный модуль предназначен для повышения квалификации \ профессиональной переподготовки целевой группы обучающихся специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода. Программа профессионального модуля используется в программе «Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров» в части получения следующих результатов:

- ПК 1.1** Формировать исходную базу данных для цифровых расчетов мембранно-электродных блоков электролизеров, включающую систему исходных параметров, свойства используемых материалов, характеристики мембранно-электродных блоков, предварительные термодинамические расчеты
- ПК 1.2** Формировать техническое задание на моделирование мембранно-электродных блоков электролизера

Данный модуль является инвариантным для обучающихся по программе профессиональной переподготовки «Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров».

Обучающийся по программе магистратуры «Водородная и электрохимическая энергетика» может выбрать данный модуль для построения своей индивидуальной образовательной программы повышения квалификации в области водородных технологий.

Программа профессионального модуля также может быть использована в ООП магистратуры «Нанотехнологии в электрохимическом производстве», «Водородная и электрохимическая энергетика», «Новые энергетические технологии».

## **1.2. Требования к промежуточным результатам освоения модуля**

С целью формирования перечисленных результатов обучающийся в ходе освоения программы модуля должен:

иметь практический опыт:

- анализа научно-технической информации в области цифровых расчетов мембранно-электродных блоков (МЭБ) электролизеров для получения водорода из воды (ОПД1).
- составления технического задания на составление цифровой модели МЭБ электролизеров при заданных параметрах (ОПД2).

уметь:

- осуществлять расчет основных термодинамических характеристик процесса электролиза воды (У1);
- искать научно-технические источники информации в научной базе поиска и выделять в них параметры, характеристики функциональных элементов и состава МЭБ электролизеров для получения водорода из воды (У2);
- составлять по найденным в научно-технических источниках информации сведениям базу данных для моделирования МЭБ электролизеров для получения водорода из воды (У3);
- определять цель и задачи, формулировать результаты научно-исследовательской работы по цифровому моделированию МЭБ электролизера (У4);
- выделять этапы моделирования и формулировать требования к результату моделирования (У5).

знать:

- основные физико-химические и электрохимические понятия и законы, лежащие в основе электролизного способа получения водорода и определяющие термодинамику и кинетику этого процесса (З1);
- основные свойства, области применения водорода и способы его получения, место электролизного производства водорода среди этих способов (З2);
- основные типы электролизеров для получения водорода, состав и строение МЭБ твердополимерных и твердооксидных электролизеров (ТПЭ и ТОЭ) (З3);
- основные материалы, используемые в ТПЭ и ТОЭ, перечень требований к ним и перечень параметров для оценки работы электролизеров (З4);
- алгоритм работы с базами поиска научно-технической литературы (З5);

- перечень параметров, влияющих на вольтамперные характеристики электролизеров и уравнения, описывающие кинетику процессов на электродах электролизера (36);
- требования к оформлению технического задания в соответствии с ГОСТ 19.201-78 ЕСПД (37).

***1.3. Количество часов на освоение программы модуля:***

всего – **68** часов, в том числе:

обязательной аудиторной учебной нагрузки обучающегося – **46** час;

самостоятельной работы обучающегося – **18** час;

практики - **4** час.

## 2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ

### 2.1. Учебно-тематический план профессионального модуля

Наименования элементов ПМ	Всего часов	Обязательная аудиторная учебная нагрузка, часов		Практика, часов	Самостоятельная работа, часов
		всего	в т.ч. практические и лабораторные занятия		
МДК 01 Основные вопросы физической химии и электрохимии	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>6</b>		<b>10</b>
Тема 1 Основные вопросы физической химии в приложении к окислительно-восстановительным процессам	10	8	2		2
Тема 2 Основные вопросы электрохимии	20	12	4		8
МДК 02 Водород и его получение электролизным способом	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>0</b>		<b>0</b>
Тема 1. Свойства и использование водорода	4	4	0		0
Тема 2. Получение водорода электролизным способом	4	4	0		0
МДК 03 Устройство современных электролизеров для производства водорода и использование электролизного водорода	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>8</b>		<b>4</b>
Тема 1 Устройство электролизеров на основе твердополимерной мембраны	11	9	4		2
Тема 2 Устройство электролизеров на основе высокотемпературных твердооксидных мембран	11	9	4		2
Практика (стажировка)	8			4	4
<b>Всего:</b>	<b>68</b>	<b>46</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]

## 2.2. Содержание обучения по профессиональному модулю

Наименование тем	Содержание учебного материала, лабораторные работы и практические занятия, практика, самостоятельная работа обучающихся, проекты	Объем часов	
<b>МДК 01</b> Основные вопросы физической химии и электрохимии			
<b>Тема 1.</b> Основные вопросы физической химии в приложении к окислительно-восстановительным процессам	<b>Содержание</b>		
	1	Химическая термодинамика в приложении к окислительно-восстановительным процессам. Основные понятия химической термодинамики. Первое начало термодинамики. Термохимия. Понятие теплового эффекта химической реакции. Влияние температуры на тепловой эффект. Второе начало термодинамики. Влияние температуры на энтропию. Самопроизвольные и вынужденные процессы. Изменение свободной энергии как характеристика самопроизвольности процесса. Влияние концентрации на свободную энергию. Равновесие в обратимых системах. Влияние температуры на положение равновесия.	2
	2	Гетерогенная химическая кинетика окислительно-восстановительных процессов. Понятие скорости химической реакции. Общее кинетическое уравнение. Порядок реакции. Молекулярность. Обратимые и необратимые реакции. Реакции разного порядка. Сложные реакции. Влияние температуры на константу скорости реакции. Особенности механизма гетерогенных каталитических реакций.	2
	3	Адсорбционные взаимодействия на границе раздела фаз. Явление адсорбции. Адсорбенты и адсорбаты. Изотермы адсорбции. Гетерогенный катализ. Свойства катализаторов. Типы каталитических реакций.	2
	<b>Практические занятия</b>		
	1	Расчет изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса окислительно-восстановительной реакции при разных температурах	2
	<b>Самостоятельная работа</b>		
	1	Решение расчетных задач для оценки изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса процесса в заданном интервале температур	2
	2	Решение расчетных задач на влияние концентрации веществ на изменение энергии Гиббса и определение самопроизвольности процесса.	2
<b>Содержание</b>			

<b>Тема 2.</b> Основные вопросы электрохимии	1	Особенности и понятия электрохимических систем. Отличие окислительно-восстановительных процессов от электрохимических. Электроды и электролиты в электрохимических источниках тока и электролизерах. Особенности газовых электродов. Гальванический элемент и электролизер. Катод и анод, и отрицательный и положительный электроды. Формирование двойного электрического слоя на границе раздела электрод/раствор электролита.	1	
	2	Термодинамика электродных процессов. Электрохимическая цепь. Электродвижущая сила цепи (ЭДС). Связь ЭДС с энергией Гиббса. Потенциал электрода. Уравнение Нернста для равновесного электродного потенциала. Напряжение цепи при разряде и при заряде. Понятие поляризации электрода. Виды поляризации. Равновесный потенциал и ток обмена. Направление тока в электрохимических системах. Влияние температуры на электродный потенциал.	2	
	3	Кинетика электродных процессов. Стадии электродного процесса. Массоперенос и перенос заряда. Лимитирующая стадия. Движущие силы массопереноса. Диффузионный и миграционный токи. Электропроводность электролитов. Кинетический ток. Уравнение Батлера-Фольмера. Общее кинетическое уравнение. Решения общего кинетического уравнения для обратимых и необратимых реакций. Вольтамперные характеристики. Большие и малые поляризации. Частные случаи. Сложный механизм электродных реакций. Роль химических стадий.	3	
	4	Понятие об электролизе. Законы Фарадея. Повышение напряжения заряда. Несамостоятельность процессов в электролизерах. Основные параметры электрохимических устройств. ТермоЭДС, тепловой КПД, влияние температуры и давления газов на ЭДС. Заряд-разрядные характеристики. Вольтамперные кривые. Приложение уравнений кинетики электродных процессов для описания поляризации на электродах в электролизере. Энергозатраты. Вклад поляризаций и омических потерь в потери напряжения.	2	
	<b>Практические занятия</b>			
	1	Расчет термодинамических характеристик электродной реакции	2	
	2	Расчет зарядовых и термодинамических характеристик электролизеров	2	
	<b>Самостоятельная работа</b>			
	1	Решение расчетных задач для определения основных термодинамических характеристик электродных реакций	2	
	2	Решение расчетных задач для определения характеристик электродных реакций в электролизере	4	
<b>МДК 02</b> Водород и его получение электролизным способом				

<b>Тема 1.</b> Свойства и использование водорода	<b>Содержание</b>		
	1.	Свойства водорода. Использование водорода в качестве накопителя энергии. Использование водорода в качестве источника энергии. Электротранспорт на водородном топливе.	2
	2	Способы получения и хранения водорода. «Цвета» водорода в зависимости от способа получения. Безопасность при работе и проектировании систем получения и хранения водорода.	2
<b>Тема 2.</b> Получение водорода электролизным способом	<b>Содержание</b>		
	1.	Получение водорода электролизным способом. Типы электролизеров, перспективы их развития. Цифровое проектирование электролизеров и моделирование их функциональных элементов: программы	2
	2	Водородное охрупчивание конструкционных материалов. Взаимодействие водорода с материалами. Образование гидридов. Разрушение материалов под действием водорода. Материалы, стойкие к водороду.	2
<b>МДК 03</b> Устройство современных электролизеров для производства водорода и использование электролизного водорода			
<b>Тема 1.</b> Устройство электролизеров на основе твердополимерной мембраны	<b>Содержание</b>		
	1.	Общие представления о типах электролизеров для получения водорода. Классификация. Строение электролизных модулей разных типов. Принципы работы щелочных электролизеров и их виды.	1
	2	Устройство электролизеров на основе твердополимерной мембраны. Строение мембранно-электродных блоков. Биполярные и монополярные пластины. Проточные каналы и их типы. Электродные процессы. Влияние различных факторов на работу электролизера. Параметры, влияющие на работу электролизного модуля. Алгоритм поиска параметров в научной литературе. Использование баз поиска научной литературы для составления параметрической базы данных.	2
	3	Материалы для твердополимерных электролизеров (ТПЭ) и их деградация. Материалы, используемые для катодов. Достоинства и недостатки. Требования к материалам. Материалы, используемые для анодов. Достоинства и недостатки. Требования к материалам. Типы электролитов. Достоинства перфторированных полимеров и причины их деградации. Материалы газожидкостных диффузионных слоев. Причины их деградации. Материалы биполярных или монополярных пластин. Причины их деградации.	2
<b>Практические занятия</b>			

	1	Составление алгоритма поиска литературы, содержащей данные для цифрового моделирования. Составление перечня ключевых слов под конкретную задачу. Составление перечня параметров для ТЭП, требуемых для составления модели. Соотнесение характеристик с конкретными материалами, составление базы данных.	2
	2	Составление плана и основных разделов техзадания на моделирование твердополимерного электролизера по требованиям ГОСТ 19.201-78 ЕСПД. Правильная формулировка цели и последовательность задач. Выделение этапов моделирования. Подходы к формулировке результата моделирования.	2
	<b>Самостоятельная работа</b>		
	1	Решение кейсовой задачи на составление разделов техзадания по ГОСТ 19.201-78 ЕСПД для моделирования твердополимерного или твердооксидного электролизера.	2
<b>Тема 2.</b> Устройство электролизеров на основе высокотемпературных твердооксидных мембран	<b>Содержание</b>		
	1.	Устройство электролизеров на основе высокотемпературных твердооксидных мембран. Строение мембранно-электродных блоков. Конструкции ТОЭ. Коммутационные соединения. Преимущества и недостатки различных конструкций. Влияние различных факторов на работу электролизера. Параметры, влияющие на работу электролизного модуля.	2
	2	Материалы для твердооксидных электролизеров (ТОЭ) и их деградация. Материалы, используемые для катодов. Достоинства и недостатки. Требования к материалам. Материалы, используемые для анодов. Достоинства и недостатки. Требования к материалам. Типы электролитов. Требования к электролитам. Особенности высокотемпературных электролитов. Материалы коммутационных соединений. Требования к материалам. Коэффициенты термического расширения материалов. Причины деградации устройств ТОЭ, связанные с особенностями их работы.	2
	3	Применение водородных электролизеров для заправочных станций. Использование электролизеров для производства водорода. Требования к чистоте газа. Примеры использования.	1
	<b>Практические занятия</b>		
	1	Составление алгоритма поиска литературы, содержащей данные для цифрового моделирования ТОЭ. Составление перечня ключевых слов под конкретную задачу. Составление перечня параметров для ТОЭ, требуемых для составления модели.	2

	2	Составление плана и основных разделов техзадания на моделирование твердооксидного электролизера по требованиям ГОСТ 19.201-78 ЕСПД. Определение цели и задач. Выделение этапов моделирования, их последовательности. Подходы к формулировке результата моделирования.	2
<b>Самостоятельная работа при изучении темы</b>			
	1	Выбор материалов для катода, анода и электролита, подходящих по коэффициентам термического расширения и химической стабильности на основе анализа литературы с характеристикой мембранно-электродных блоков ТОЭ разных конструкций	2
Стажировка		Знакомство с реализацией технологий водородной энергетики (электролизер, водородная заправка, материалы электродов, способы создания мембранно-электродных блоков) в Центре компетенций НТИ по технологиям новых и мобильных источников энергии при ФИЦ ПХФ и МХ РАН	2
Практика		<b>Виды работ:</b> 1. Составление базы данных (аннотированного отчета) для моделирования МЭБ электролизера (ТЭП или ТОЭ) под сформулированную задачу 2. Составление проекта техзадания на НИР по моделированию МЭБ электролизера (ТЭП или ТОЭ) под сформулированную задачу.	6
<b>Всего:</b>			<b>68</b>

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии Российской академии наук



УТВЕРЖДАЮ:  
Зам. директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН

/ Казакова А.В. /

« 20 » *августа* 20 22 г.

**ПРОГРАММА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ**  
**«Моделирование мембранно-электродного блока электролизера в**  
**COMSOL Multiphysics»**

Программа предназначена для повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода

Организация-разработчик: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

Разработчики:

Золотухина Екатерина Викторовна, доктор хим. наук, главный научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Левченко Алексей Владимирович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Герасимова Екатерина Владимировна, кандидат хим. наук, старший научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Правообладатель программы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д.1, [www.icp.ac.ru](http://www.icp.ac.ru), 8(49652)21602

© ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Паспорт профессионального модуля	81
2. Структура и содержание профессионального модуля	83
3 Условия реализации программы профессионального модуля	86
4 Контроль и оценка результатов освоения профессионального модуля	90
Приложение 3.1. Образцы оценочных средств для итогового контроля	92
Приложение 3.1.1 Образцы оценочных средств для промежуточного контроля	96
Приложение 3.2. Учебно-методические материалы для обучающихся	103
Приложение 3.3. Методические материалы для преподавателя	104

# 1. ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ «Моделирование мембранно-электродного блока электролизера в COMSOL Multiphysics»

## 1.1. Область применения программы

Профессиональный модуль предназначен для повышения квалификации \ профессиональной переподготовки целевой группы обучающихся специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции наноиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода. Программа профессионального модуля используется в программе «Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров» в части получения следующих результатов:

- ПК 2.1** Разрабатывать цифровые модели мембранно-электродных блоков электролизеров и оценивать их расчетную способность, исследовать модель и изменять расчетные параметры для обеспечения требований технического задания
- ПК 2.2** Составлять практические рекомендации к техзаданию на изготовление мембранно-электродных блоков электролизеров по результатам моделирования

Данный модуль является инвариантным для обучающихся по программе профессиональной переподготовки «Цифровое моделирование функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизеров».

Обучающийся по программе магистратуры «Водородная и электрохимическая энергетика» может выбрать данный модуль для построения своей индивидуальной образовательной программы повышения квалификации в области водородных технологий.

Программа профессионального модуля также может быть использована в ООП магистратуры «Нанотехнологии в электрохимическом производстве», «Водородная и электрохимическая энергетика», «Новые энергетические технологии».

### ***1.2. Требования к промежуточным результатам освоения модуля***

С целью формирования перечисленных результатов обучающийся в ходе освоения программы модуля должен:

иметь практический опыт:

- составления и оптимизации цифровой модели мембранно-электродного блока электролизера в соответствии с требованиями техзадания;(ОПД3)
  - составления практических рекомендаций к составлению техзадания на изготовление МЭБ электролизера на основании проектного решения (ОПД4)
- уметь:
- составлять и модифицировать цифровую модель МЭБ ТОЭ и ТПЭ в ПО COMSOL Multiphysics (У6);
  - исследовать цифровую модель МЭБ ТОЭ и ТПЭ в ПО COMSOL Multiphysics и проводить ее оптимизацию; (У7)
  - составлять описание проектного решения по созданной цифровой модели МЭБ электролизера и результата проектного решения и представлять в виде презентации; (У8)
  - сопоставлять полученное проектное решение по МЭБ электролизера с экспериментальными данными аналогов; (У9)
  - выделять в полученном проектном решении параметры, необходимые для создания опытного образца электролизера (У10)

знать:

- модули и интерфейсы ПО COMSOL Multiphysics, необходимые для построения цифровой модели МЭБ ТПЭ и ТОЭ; (З8)
- алгоритмы составления цифровой модели МЭБ электролизера, варьируемые параметры, подходы к изменению и оптимизации модели; (З9)
- требования ГОСТ 22487-77 к терминологии; (З10)
- правила составления презентационного материала по результатам моделирования МЭБ электролизера в ПО COMSOL Multiphysics; (З11)
- алгоритм оценки приведенной стоимости водорода, получаемого электролизным способом (З12)

### ***1.3. Количество часов на освоение программы модуля:***

всего – **142** часа, в том числе:

обязательной аудиторной учебной нагрузки обучающегося – **20** часов;

самостоятельной работы обучающегося – **100** часов;

практики - **22** часа.

## 2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ

### 2.1. Учебно-тематический план профессионального модуля

Наименования элементов ПМ	Всего часов	Обязательная аудиторная учебная нагрузка, часов		Практика, часов	Самостоятельная работа, часов
		всего	в т.ч. практические и лабораторные занятия		
МДК 01 ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств	24	12	8		12
Тема 1. ПО COMSOL Multiphysics. Основные модули и их предназначение.	8	4	2		4
Тема 2. Особенности моделирования функциональных элементов электролизеров в ПО COMSOL Multiphysics	16	8	6		8
МДК 02 Оформление проектного решения	12	8	4		4
Тема 1. Оценка экономической эффективности результата проекта.	4	2	0		2
Тема 2. Требования к оформлению научно-технических отчетов и презентация результатов проекта.	8	6	4		2
Практика	106			22	84
<b>Всего:</b>	<b>142</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>22</b>	<b>100</b>
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]

## 2.2. Содержание обучения по профессиональному модулю

Наименование тем	Содержание учебного материала, лабораторные работы и практические занятия, практика, самостоятельная работа обучающихся, проекты	Объем часов	
<b>МДК 01</b> ПО COMSOL Multiphysics для построения цифровых моделей функциональных элементов твердотельных электрохимических устройств		<b>24</b>	
<b>Тема 1.</b> ПО COMSOL Multiphysics. Основные модули и их предназначение.	<b>Содержание</b>		
	1. ПО COMSOL Multiphysics. Основные модули, интерфейсы и их предназначение. Построение моделей, выбор модулей. Примеры. Алгоритм создания цифровой мультифизической модели.	2	
	<b>Практические занятия</b>		
	1. Разбор назначения 1, 2 и 3D моделей. Разбор использования известных мультифизических пакетов для моделирования	2	
<b>Самостоятельная работа при изучении темы</b>			
1.	Освоение интерфейса программы COMSOL Multiphysics. Построение простейших геометрий.	4	
<b>Тема 2.</b> Особенности моделирования функциональных элементов электролизеров в ПО COMSOL Multiphysics	<b>Содержание</b>		
	1. Особенности моделирования функциональных элементов электролизеров в ПО COMSOL Multiphysics. Основные модули и приближения, применяемые для описания работы мембранно-электродного блока электролизера	2	
	<b>Практические занятия</b>		
	1.	Расчет 1D модели мембранно-электродного блока электролизера	2
	2.	Расчет 2D модели мембранно-электродного блока электролизера	4
	<b>Самостоятельная работа при изучении темы</b>		
1.	Построение 1D геометрии мембранно-электродного блока электролизера по заданным параметрам и ее преобразование в 2D-модель.	2	
2.	Варьирование и оптимизация расчетной сетки, варьирование параметров модели – определение влияния задаваемых параметров и уравнений на конечные результаты моделирования	6	
<b>МДК 02</b> Оформление проектного решения		<b>12</b>	
<b>Тема 1.</b> Оценка экономической	<b>Содержание</b>		
	1. Оценка приведенной стоимости на примере электролизера с протонообменной мембраной. Расчетные формулы. Основные понятия и определения формул расчета. Структура капитальных	2	

эффективности результата проекта.		затрат. Материальные и нематериальные компоненты. Структура операционных затрат. Пример расчета	
	<b>Самостоятельная работа при изучении темы</b>		
	1	Решение кейсовой задачи оценки приведенной стоимости водорода	2
Тема 2. Требования к оформлению научно-технических отчетов и презентация результатов проекта.	<b>Содержание</b>		
	1.	Подходы к представлению результатов расчета мембранно-электродного блока электролизера в виде презентации. Структура презентации. Состав введения, сравнение эффективности и производительности ТПЭ и ТОЭ. Схемы процессов. Состав МЭБ и геометрия модели. Формулировка цели и задач. Описание модели. Основные используемые уравнения. Параметры модели. Варьируемые параметры модели. Представление результатов моделирования. Требования к содержанию заключения.	2
	<b>Практические занятия</b>		
	1.	Построение презентации под кейсовую задачу (файл модели). Сопоставление данных модели с экспериментальными данными	4
	<b>Самостоятельная работа при изучении темы</b>		
1.	Оформление презентации по результатам практических работ, включающее поиск-обоснование актуальности работы – файл презентации	2	
Практика в модельной ситуации	<b>Практика:</b> <b>виды работ</b> Выполнение НИР по расчету функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков электролизера в 2D модели по техническому заданию: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Постановка задачи. Выбор контролируемых и расчетных параметров</li> <li>2. Поиск исходных параметров для построения цифровой модели</li> <li>3. Выбор геометрии и уравнений. Построение цифровой модели</li> <li>4. Пробные расчеты, оптимизация модели</li> <li>5. Получение итоговых данных. Модификация модели</li> <li>6. Анализ достоверности полученного решения</li> <li>7. Формирование отчета по НИР - презентации и доклада</li> </ol>		106
<b>Всего:</b>			<b>142</b>

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики  
и медицинской химии Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ:  
Зам. директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН  
 / Казакова А.В. /  
«30» января 2022 г.

**Управление дополнительной профессиональной  
образовательной программой профессиональной переподготовки  
Современные технологии и оборудование:  
«Цифровое моделирование функциональных элементов и состава  
мембранно-электродных блоков электролизеров»**

Программа предназначена для повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки специалистов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, специалистов по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, специалистов по компьютерному проектированию технологических процессов, специалистов по испытаниям инновационной продукции nanoиндустрии, специалистов в области разработки, сопровождения и интеграции технологических процессов и производств в области материаловедения и технологии материалов, специалистов в области технологического обеспечения полного цикла производства объемных нанометаллов, сплавов, композитов на их основе и изделий из них, специалистов по проектированию изделий из наноструктурированных композиционных материалов, специалистов по технологии в области производства продукции с применением наноструктурированных катализаторов и инженерно-технических работников предприятий электрохимических производств с целью приобретения ими профессиональных компетенций в области цифрового моделирования функциональных элементов и состава мембранно-электродных блоков современных электролизных модулей получения водорода

Организация-разработчик: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

Разработчики:

Золотухина Екатерина Викторовна, доктор хим. наук, главный научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Левченко Алексей Владимирович, кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

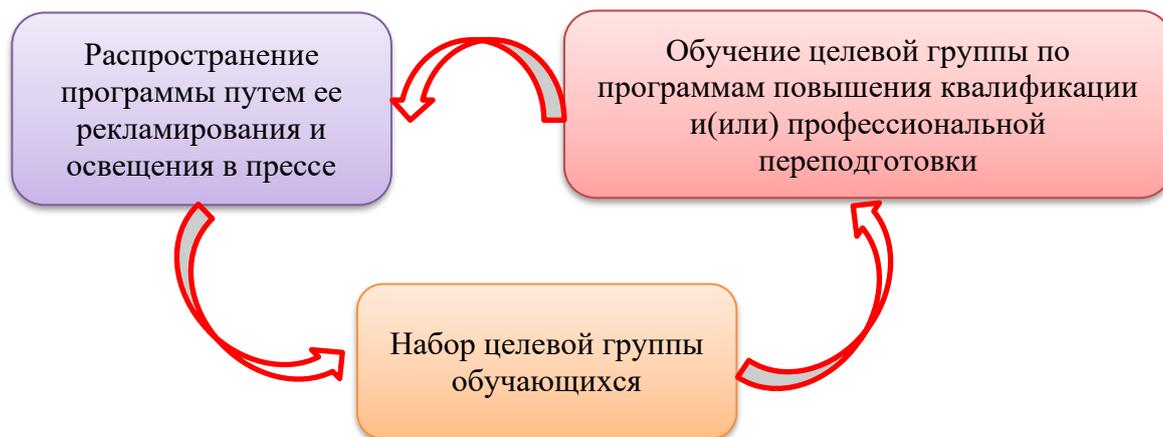
Герасимова Екатерина Владимировна, кандидат хим. наук, старший научный сотрудник ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Правообладатель программы: Министерство науки и высшего образования РФ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д.1, [www.icp.ac.ru](http://www.icp.ac.ru), 8(49652)21602

© ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2022

## УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММОЙ

Управление образовательной программой представляет собой замкнутый цикл, представленный для наглядности в виде блок-схемы ниже.



Для распространения образовательной программы в других вузах-партнерах будет осуществляться ряд рекламных мероприятий:

1. Освещение образовательной программы на встречах с индустриальными партнерами Центра компетенций НТИ ФИЦ ПХФ и МХ РАН;
2. Освещение образовательной программы на конференциях, посвященных образованию в РФ
3. Представление образовательной программы на мероприятиях НТИ (Архипелаг)
4. Представление образовательной программы в Летней и Зимней школах Центра компетенций
5. Представление образовательной программы на научных и промышленных конференциях и выставках вместе с результатами научно-исследовательской деятельности Центра.
6. Представление образовательной программы студентам, аспирантам, преподавателям вузов-партнеров
7. Освещение результатов программы и научных результатов Центра по построению цифровых моделей в прессе (соцсети, каналы, сайты и т.п.).

Набор обучающихся будет осуществляться следующим образом:

Осуществляется набор целевой группы обучающихся из представителей, направляемых индустриальными компаниями, студентов, аспирантов, преподавателей вузов, научных сотрудников институтов. Набор осуществляет ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» прямым образом (по прямому обращению) или по рекомендации Центра компетенций НТИ при ФИЦ ПХФ и МХ РАН на основании результатов первичного тестирования.

Обучение по программе будет осуществляться как очно (по запросу), так и в форме ЭУК с использованием дистанционной платформы вуза-партнера. Обучение набранной целевой группы будет осуществляться либо по типу повышения квалификации (в зависимости от выбранного для изучения модуля), либо по полной программе переподготовки кадров (250 часов) с выдачей соответствующих документов (удостоверения о повышении квалификации и (или) диплома о профессиональной переподготовке).

Каждый результат НИР, имеющий значимость РИД, каждая группа обучающихся будут включаться в статистику или содержательную часть блока рекламирования программы. Таким образом, цикл управления программой замыкается.