

Information about the authors

Kulbanu Kabdulkarimovna Kabdulkarimova – Candidate of Chemical Sciences, Department of Chemical Technology and Ecology; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: gk2107@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0475-9906.

Материал поступил в редакцию 06.01.2021 г.

МРНТИ: 58.33.3

М.К. Бекмулдин^{1,3}, М.К. Скаков², В.В. Бакланов¹, К.О. Толеубеков^{1,3}

¹Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Казахстан, Курчатов; 071100, Республика Казахстан, область Абай, г. Курчатов, улица Бейбіт атом 10

²Национальный ядерный центр РК, Казахстан, Курчатов

071100, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

³Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан, Семей

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

e-mail: aug11@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ КОРИУМА В ПОДРЕКТОРНОЙ ЛОВУШКЕ РАСПЛАВА ЛЕГКОВОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Аннотация. Целью настоящей статьи является проведение анализа проведенных исследований взаимодействия кориума с жертвенными материалами, используемых в ловушке расплава АЭС. В результате проведенной работы описаны особенности локализации расплава кориума в ловушке расплава во время тяжелой аварии с расплавлением активной зоны легководного реактора и определен ряд существенных недостатков, связанных с используемыми в ловушке материалами и методом охлаждения кориума.

Также в статье обозначен объект будущих экспериментальных исследований, проводимых с целью совершенствования локализации кориума в ловушки расплава в случае гипотетической аварии с расплавлением активной зоны. Приведено описание экспериментальной установки «Лава-Б» для проведения экспериментальных исследований с результатами проведенного теплофизического расчета обоснования характеристик нагревательного устройства для имитации остаточного энерговыделения.

Ключевые слова: тяжелая авария, кориум, ловушка расплава, жертвенный материал, ANSYS, остаточное энерговыделение, индукционный нагрев, установка «Лава-Б».

Введение

На сегодняшний день тренды в сфере энергетики сместились в сторону экологичного производства энергии. Этот факт заставляет многие страны обратить внимание на атомную энергетику, поскольку атомная энергетика не выделяет в атмосферу большого количества вредных веществ по сравнению с традиционными видами получения энергии и способна удовлетворить возрастающие из года в год потребности в электроэнергии.

Однако вопросы безопасности эксплуатации АЭС остаются крайне актуальными, так как нельзя исключать риск возникновения аварийной ситуации. Опыт тяжелых аварий с расплавлением активной зоны, которые произошли на АЭС в Три-Майл-Айленде, Чернобыле и Фукусиме [1, 2], показал, что безопасность эксплуатации ядерных энергоблоков является одним из основных факторов, определяющий конкурентоспособность атомной энергетики в настоящее время и направление ее развития в будущем.

Локализация расплава кориума в охлаждаемых подреакторных ловушках тигельного типа с наполнителем из жертвенного материала является последним барьером на пути распространения кориума, образующегося в результате плавления активной зоны при тяжёлых авариях реакторов на атомных электростанциях [3].

Кориум представляет собой смесь двух несмешивающихся между собой компонент: металлической и оксидной. Металлическая компонента кориума образуется в результате расплавления стальных внутрикорпусных устройств и стенки ядерного реактора, а оксидная компонента в результате расплавления таблеток с ядерным топливом и растворении в этом расплаве металлического циркония и оксида циркония, образовавшегося в результате окисления металлического циркония водяным паром и кислородом воздуха. Плотность металлической части кориума меньше, чем оксидной, что вызывает расслоение этих расплавов при совместном присутствии [4].

При этом, взаимодействие металлической части кориума с охлаждающей водой, подаваемой на зеркало расплава, имеет серьезные негативные явления: образование взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций и угроза паровых взрывов в результате порционного выхода кориума из корпуса реактора [5].

Принципиальное решение обозначенных проблем

Для устранения этих проблем в ловушках расплава используются жертвенные материалы, предназначенные для снижения температуры поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума и уменьшения его плотности для осуществления гравитационной инверсии металлической и оксидной части кориума с целью уменьшения выделения взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций. При поступлении на поверхность жидких оксидов охлаждающая вода не создает угрозы возникновения паровых взрывов, что связано с теплофизическими особенностями жидких оксидов, и не вступает с ними в химические реакции с образованием водорода, не испытывает термического разложения вследствие относительно низкой температуры зеркала расплава [6].

В связи с этим, к жертвенным материалам предъявляются достаточно серьезные требования касательно их физико-химических свойств для обеспечения работоспособности вышеперечисленных функций ловушек расплава [7]. Для этого необходимо проведение большого объема расчетных и экспериментальных исследований. Например, в ходе проведения многочисленных исследований кандидатных материалов в качестве наполнителя ловушек расплава был рекомендован материал, состоящим из смеси легких оксидов железа Fe_2O_3 и алюминия Al_2O_3 , в результате, который был использован при строительстве ловушек расплава с ректорами ВВЭР-1000 на некоторых АЭС [8]. Эксперименты показали, что взаимное растворение жертвенного материала и расплава осуществляется со скоростью, достаточной для реализации инверсии оксидного и металлического слоев за время [9].

Таким образом, возможность использования охлаждаемых ловушек с наполнителем из жертвенного материала была экспериментально подтверждена, при этом некоторые исследователи отмечают некоторые недостатки, связанные с используемым методом охлаждения расплава, используемыми материалами в ловушке, и которые решаются в настоящее время многими коллективами [10-15]. Так среди отмеченных недостатков, которые могут привести к серьезным последствиям, наиболее важные, по нашему мнению, считаются:

- 1) образование водорода в результате паро-металлических реакций;
- 2) выделение кислорода в результате разложения жертвенных материалов, приводящее к гипотетическому образованию газовой прослойки между расплавом и жертвенными материалами;
- 3) при падении в бассейн воды высокотемпературного расплава большой массы может возникнуть паровой взрыв с одновременным возрастанием давления в ловушке, приводящий к разрушению ее целостности;

В связи с этим, в рамках дальнейших исследований изучения различных процессов, связанных с тяжелой аварией с расплавлением активной зоны, в филиале «Институт Атомной энергии» с целью накопления экспериментальных данных о характере взаимодействия расплава активной зоны с жертвенной композицией готовятся к серии экспериментальных исследований. В качестве объекта исследования выступают оксиды

алюминия Al_2O_3 и циркония ZrO_2 со специальной свинцовой вставкой. Целью экспериментов является изучение при взаимодействии ЖМ с кориумом:

1) Исследование параметров механических и тепловых процессов, происходящих при контакте кориума и жертвенного материала.

2) Определение результирующего изменения элементного состава кориума после эксперимента, в том числе исследование продуктов различных химических процессов, образующихся в результате взаимодействия материала с кориумом.

3) Исследование образовавшегося состава на предмет гомогенности, поскольку имеются некоторые данные о существовании небольшой концентрационной области гравитационного расслаивания в системе $Al_2O_3 - UO_2$ [16].

Говоря о взаимодействии свинца с жертвенным материалом, то в этом случае выдвигается предположение, что часть выделяющегося кислорода, образующегося в процессе разрушения жертвенного материала, будет поглощаться расплавленным свинцом с образованием оксидов свинца. Это позволит уменьшить количества кислорода в ловушке, что приведет к снижению тепловыделения за счет процессов горения некоторых материалов, таких как железо и углеродистой стали [17].

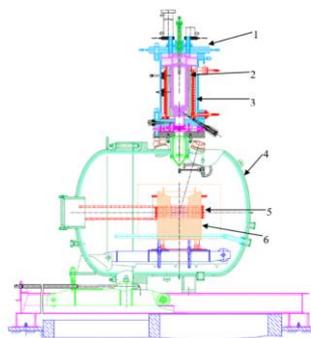
Температура кориума в первые часы после расплавления может достигать $2400\text{ }^\circ\text{C}$ [18]. При этом, учитывая значение температура кипения свинца ($\sim 1749\text{ }^\circ\text{C}$), можно предположить, что часть свинца будет кипеть с поглощением тепла на совершение фазового перехода. Также можно отметить, что после завершения процесса инверсии слоев расплава, за счет более высокой плотности остаток свинца опуститься с остальной металлической частью в нижнюю ловушку.

Однако, касательно использования свинца остаются неясными многие вопросы, в первую очередь, связанные с эффективностью и целесообразностью его использования. Например, отсутствует точная информация о характере взаимодействия свинца с кориумом и жертвенными материалами. Эти вопросы требуют дополнительного анализа термохимических процессов, происходящих при подобном взаимодействии.

Таким образом, на основе вышеизложенного, на наш взгляд, представляется целесообразным провести экспериментальных исследований взаимодействия кориума с жертвенной композицией, и дополнительно рассмотреть возможность использования свинцовой композиции в ловушках расплава. Базовой установкой для проведения экспериментальных исследований выступает установка «Лава-Б», созданная в филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК [19].

Методика проводимых экспериментов

Экспериментальная установка включает в себя два основных функциональных узла: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава прототипного кориума и устройство приема расплава (УПР), в котором размещается экспериментальная секция для моделирования исследуемых процессов. Прототип кориума, в состав которого входит диоксид урана, двуокись циркония, цирконий и сталь с общей массой до 60 кг, плавится в индукционной электроплавильной печи (ЭПП), а затем сливается в ловушку расплава, оснащенную специальным нагревателем для имитации остаточного энерговыделения, которая размещена в устройстве приема расплава (УПР). Внешний вид и схема установки «Лава-Б» показана на рисунке 1.

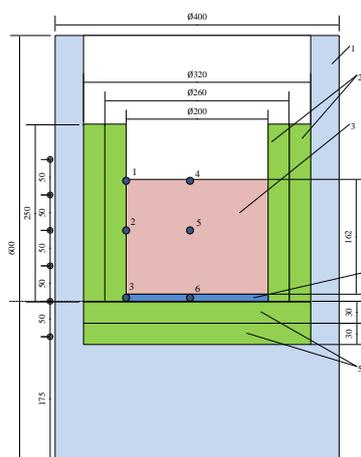


1 – ЭПП (электрическая плавильная печь), 2 – тигель графитовый, 3 – индуктор ЭПП, 4 – УПР (устройство приема расплава), 5 – индуктор УПР, 6 – бетонная ловушка.

Рисунок 1 – Внешний вид и схема установки «Лава-Б»

Теплофизический расчет. Для предварительной характеристики нагревательного устройства, необходимые для установления необходимого температурного поля в эксперименте, и установившегося в этом процессе температурного поля было проведено компьютерное моделирование теплофизических процессов нагрева расплава в экспериментальной секции. Расчеты теплового состояния теплофизической модели были выполнены с использованием пакета прикладных программ ANSYS.

Моделирование проводилось для двух случаев: при нагреве расплава и его взаимодействии с жертвенным материалом и в случае наличия свинцового слоя в ловушке. Для контроля температуры были выбраны контрольные точки, расположение которых приведено на рисунке 2.



1 – бетонное основание; 2 – цилиндр из жаростойкого материала; 3 – шихта;
4 – слой свинца; 5 – диск из жаростойкого материала

Рисунок 2 – Схема экспериментального устройства с расположением контрольных точек

В результате проведения компьютерного моделирования разработанных теплофизических моделей были получены их температурные поля. На рисунке 3 приведен график изменения температуры в контрольных точках расчетной модели без свинца и моделей с различной толщиной слоя свинца. Также на рисунке приведена диаграмма мощности (красная линия) и интегральная мощность индуктора (красная пунктирная линия).

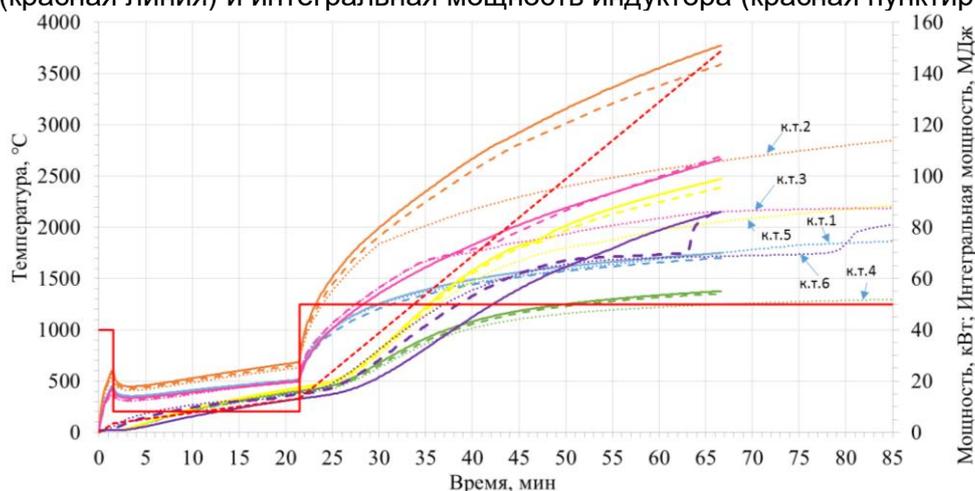


Рисунок 3 – Изменение температуры в контрольных точках для трех вариантов расчетной модели

Как видно из рисунка 3, заметная доля имитируемого остаточного энерговыделения кориума затрачивается на фазовый переход свинцового слоя и зависит соответственно от его толщины.

Из графика видно, что предложенная диаграмма нагрева расплава позволяет получить температуры, необходимые для получения прототипа кориума и для исследования его взаимодействия с выбранными материалами.

Заключение

В настоящее время проведено множество расчетных и экспериментальных исследований взаимодействия различных материалов с урансодержащими расплавами. Однако с развитием атомной отрасли, в частности реакторостроения, необходимо проводить дальнейшую работу для поиска новых материалов, а также улучшения прогнозирования поведения уже используемых жертвенных материалов и не только в случае тяжелой аварии. Развитие этих работ остаются крайне актуальными и будут способствовать развитию атомной промышленности.

Для дальнейшего накопления сведений о физико-химических процессах взаимодействия расплава активной зоны с жертвенными материалами и экспериментального подтверждения перспективности использования дополнительного свинцовой добавки будет проведена серия экспериментов на установке «Лава-Б».

Описанная экспериментальная база филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК позволит провести качественные исследования по обоснованию возможности реализации предложенного способа на практике и доказать его эффективность.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158470 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

Список литературы

1. Proceedings of the First International Information Meeting on the TMI-2 Accident, Germatown, MD, October 1985. 287 p.
2. Большов Л.А. Уроки Чернобыля и Фукусимы и современные концепции управления тяжелыми авариями // Атомная энергия, 2016, т. 121, № 1, – С. 3-10.
3. Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Хабенский В.Б. и др. Концепция локализации расплава корияма на внекорпусной стадии запроектной аварии АЭС с ВВЭР-1000 // Отраслевая конференция «Вопросы безопасности АЭС с ВВЭР». СПб., 2000.
4. Удалов Ю.П., Федоров Н.Ф., Лавров Б.А. и др. Функциональные материалы для пассивного управления запроектной аварией ядерного реактора на внекорпусной стадии локализации расплава активной зоны. Часть 1 // Известия СПбГТИ (ТУ), 2010, № 8(34), – С. 17-24.
5. B.R. Sehgal et al Melt-Structure-Water Interactions During Severe Accident in LWRs., NPSD, Royal Institute of Technology, Annual Report, Sweden, Nov. 2000.
6. Недорезов А.Б. Система локализации и охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора водоводяного типа // Патент РФ № 2576517, 2016.
7. Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б. и др. Физико-химическое моделирование и анализ процессов взаимодействия расплава активной зоны ядерного реактора с жертвенным материалом Физика и химия стекла. 2005. Т. 31, № 1. – С. 71-90.
8. Asmolov V.G., Bechta S.V., Berkovich V.M. et al. VVER-1000 Reactor Core Melt Catcher of Cold Crucible Type // Proc. of Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 05), May 15-19. Seoul, Korea.2005. P. 5238.
9. Асмолов В.Г. и др. Выбор буферного материала ловушки для удержания расплава активной зоны ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 2002. Т. 92. Вып. 1. – С. 7-18.
10. Удалов Ю.П., Фёдоров Н.Ф., Сидоров А.С., и др. Жертвенный керамический материал для ловушки расплава активной зоны ядерного реактора (варианты): пат. 2264996 Рос. Федерация. № 2003138013/03; заявл. 29.12.2003; опубл. 10.06.2005. Бюл. № 33. – 9 с.
11. А.А. Комлев, В.И. Альмяшев, С.В. Бешта, и др. Жертвенный материал для ловушки расплава на основе высокоглиноземистого цемента и керамического наполнителя // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, 2019, № 2(16), – С. 52-70.
12. Komlev A., Almjashev V., Bechta S. et al. (2015). New sacrificial material for ex-vessel core catcher. Journal of Nuclear Materials. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.10.035>
13. Tyrpekl V., Vácha P., Černý Z. et al. (2021) Development of geopolymer based sacrificial materials for GEN IV severe accident mitigation. Journal of Nuclear Materials. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153024>
14. Munot S.S., Kulkarni P.P., Nayak A.K. (2019). Experimental Investigation of Melt Coolability and Ablation Behavior of Oxidic Sacrificial Material at Prototypic Conditions in Scaled Down Core

Catcher. ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. <https://doi.org/10.1115/1.4043106>

15. Bekmuldin, M.K., Skakov, M.K., Baklanov, V.V. et al. Heat-resistant composite coating with a fluidized bed of the under-reactor melt trap of a light-water nuclear reactor // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, No. 3(37). – pp. 65-70. DOI 10.31489/2021No3/65-70

16. В. В. Гусаров, В. И. Альмяшев, В. Б. Хабенский и др. Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактор // Российский Химический Журнал. – 2005. – Том XLIX, № 4, С. 42-53.

17. Столяревский А.Я. Способ и устройство локализации расплава активной зоны ядерного реактора: пат. 2163037 Рос. Федерация. № 2015148799/07; заявл. 13.11.2015; опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29. – 15 с.

18. Janet Wood Institution of Engineering and Technology. Nuclear power. – IET, 2007. — p. 162. — ISBN 978-0-86341-668-2.

19. Скаков М.К., Васильев Ю.С., Дерявко И.И. и др., Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан – 60 лет. – под общ. ред. Э.Г. Батырбекова и М.К. Скакова. – Кокшетау: КФ «Кокшетау», 2018, – С. 139-141.

М.К. Бекмулдин^{1,3}, М.К. Скаков², В.В. Бакланов¹, К.О. Толеубеков^{1,3}

¹ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Қазақстан, Курчатов;
071100, Қазақстан Республикасы, Абай облысы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі 10

²ҰЛТТЫҚ ядролық орталық, Қазақстан, Курчатов
071100, Қазақстан Республикасы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі, 2Б

³Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан, Семей
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
e-mail: aug11@mail.ru

ЖЕҢІЛ СУ ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЫНЫҢ БАЛҚЫМАСЫНЫҢ КОРИУМ ОРНАЛАСУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Аңдатпа: Зерттеудің мақсаты-кориумның АЭС балқымасының тұзағында қолданылатын құрбандық материалдарымен өзара әрекеттесуіне жүргізілген зерттеулерге талдау жүргізу. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде активті аймақтың балқуымен болған ауыр апат кезінде балқыманың тұзағында кориум балқымасының орналасу ерекшеліктері сипатталған және тұзақта пайдаланылатын материалдар мен кориумды салқындату әдісіне байланысты бірқатар елеулі кемшіліктер анықталған.

Сондай-ақ мақалада гипотетикалық апат болған жағдайда кориумды балқытылған тұзаққа оқшаулауды жақсарту мақсатында жүргізілетін болашақ зерттеулердің объектісі көрсетілген. Қыздыру құрылғысының сипаттамаларын негіздеуді термофизикалық есептеу нәтижелерімен эксперименттік зерттеулер жүргізуге арналған «Лава-Б» эксперименттік қондырғысының сипаттамасы келтірілген.

Түйін сөздер: Ауыр апат, кориум, балқыту тұзағы, құрбандық материал, ANSYS, қалдықты энергия бөлу, индукциялық қыздыру, «Лава-Б» қондырғысы.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CORIUM LOCALIZATION IN THE CORE CATCHER OF A LIGHT-WATER NUCLEAR REACTOR

M. Bekmuldin^{1,3}, M. Skakov², V. Baklanov¹, A. Toleubekov^{1,3}

¹Filial "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kazakhstan, Kurchatov;
071100, Republic of Kazakhstan, Abai region, Kurchatov, Beibit atom street 10

²National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, Kurchatov
071100, Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Beibit atom str., 2B

³Shakarim University of Semey, Kazakhstan, Semey
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20 A
e-mail: aug11@mail.ru

Abstract: The goal of the study is the analysis of the conducted studies of the interaction of corium with sacrificial materials used in the core catcher. As a result of the work done, the features of the localization of the corium melt in the core catcher during a severe accident with core melt are

described. Number of significant disadvantages associated with the materials used in the core catcher and the method of cooling the corium are identified.

The article also describes the object of future research to improve the localization of the corium in the core catcher in the case of a hypothetical accident with a core meltdown. The description of the experimental facility "Lava-B" for experimental studies with the results of the thermophysical calculation of the justification of the characteristics of the heating device is given.

Key words: Severe accident, corium, core catcher, sacrificial material, ANSYS, decay heat, induction heating, «Lava-B» facility.

Сведения об авторах

Максат Куатбекович Бекмулдин – Инженер I категории лаборатории теплофизики реакторных установок; Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0002-6895-536X.

Мажин Канапинович Скаков – доктор физико-математических наук, профессор; Национальный ядерный центр РК, Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0001-6836-1214.

Виктор Владимирович Бакланов – 1-ый заместитель директора филиала; Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: iae@nnc.kz. ORCID: 0000-0001-7627-8752.

Куанышбек Оразбекович Төлеубек – инженер лаборатории экспериментальной теплофизики; Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер

Мақсат Қуатбекұлы Бекмулдин – реакторлық қондырғылардың жылу физикасы зертханасының I санатты инженері; ҚР ҰЯО РМК "Атом энергиясы институты" филиалы, Курчатов, Қазақстан Республикасы; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0002-6895-536X.

Мәжин Қанапінұлы Сқақов – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор; ҚР Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан Республикасы; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0001-6836-1214.

Виктор Владимирович Бакланов – 1-ші филиал директорының орынбасары; ҚР ҰЯО РМК "Атом энергиясы институты" филиалы, Курчатов, Қазақстан Республикасы; e-mail: iae@nnc.kz. ORCID: 0000-0001-7627-8752.

Куанышбек Оразбекұлы Төлеубек – эксперименттік жылу физикасы зертханасының инженері; ҚР ҰЯО РМК "Атом энергиясы институты" филиалы, Курчатов, Қазақстан Республикасы.

Information about the authors

Maksat Kuatbekovich Bekmoldin – Engineer of the I category of the Laboratory of Thermophysics of Reactor installations; Branch of the "Institute of Atomic Energy" of the RSE NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0002-6895-536X .

Mazhin Kanapinovich Skakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: maks_alya@mail.ru. ORCID: 0000-0001-6836-1214.

Viktor Vladimirovich Baklanov – 1st Deputy Director of the branch; Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: iae@nnc.kz. ORCID: 0000-0001-7627-8752.

Kuanyshbek Orazbekovich Toleubekov – Engineer of the Laboratory of Experimental Thermophysics; Branch of the "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan.

Материал поступил в редакцию 02.02.2021 г.