

# РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УДЕРЖАНИЯ КОРИУМА В ЛОВУШКЕ СО СТРУЙНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ СТЕНОК

**М.В. Кашеев**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



В качестве устройства для удержания и охлаждения кориума за пределами корпуса реактора рассмотрена ловушка со струйным охлаждением стенок. Предложенная конструкция ловушки позволяет решить основные проблемы удержания и охлаждения кориума после его выхода из корпуса реактора. Выполнено расчетное исследование взаимодействия кориума с корпусом данной ловушки с использованием кода PPRKRS. Он может быть применен для анализа возможности удержания кориума в ловушке любой конструкции.

## ВВЕДЕНИЕ

В странах мира, ведущих в области реакторостроения, в том числе и в России, выполнен большой объем работ по обоснованию безопасности АЭС с легководными реакторами в случае возникновения тяжелых аварий, приводящих к плавлению активной зоны. При выполнении работ проводились расчетные и экспериментальные исследования процессов, связанных с плавлением активной зоны, перемещением кориума в нижнюю часть корпуса реактора, возможностью удержания кориума в корпусе реактора. Несомненный интерес представляет собой анализ вопросов, касающихся удержания кориума за пределами корпуса реактора, особенно в связи с необходимостью проектирования для новых АЭС с ВВЭР-1000 устройств удержания кориума, предотвращающих нарушение герметичности защитной оболочки после выхода кориума из корпуса реактора.

## ОРГАНИЗАЦИЯ УДЕРЖАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ КОРИУМА

Если кориум выйдет за пределы корпуса реактора, то его удержание и охлаждение можно организовать двумя способами:

- растеканием кориума по большой площади, с последующим охлаждением его путем подачи воды сверху;
- охлаждением кориума в ограниченном объеме под реактором - в шахте реактора, облицованной материалами, защищающими строительный бетон от разрушения.

В последнем случае, получившем название тигельного варианта, различают следующие подварианты:

- попадание кориума непосредственно в слой воды с возможной последующей фрагментацией;
- попадание кориума на промежуточное днище, близкое по форме к днищу реактора, с организацией охлаждения промежуточного днища естественной циркуляцией заливаемой или находящейся снаружи воды.

Для обоих рассмотренных вариантов локализации его (с растеканием кориума и охлаждаемой водой ловушкой) поведение кориума в шахте зависит от ряда параметров, среди которых наиболее значимыми являются характер разрушения корпуса реактора (глобальный или локальный), месторасположение разрыва (или проплавления) корпуса, состав кориума, его температура и уровень остаточного энерговыделения, скорость истечения кориума из разрыва и ряд других. Эти параметры целиком определяются сценарием развития аварии, и работа по их уточнению должна быть продолжена.

В настоящее время предпочтение может быть отдано тигельному варианту по сравнению с вариантом растекания кориума по большой площади. Вместе с тем выбор конкретной конструкции для удержания и охлаждения кориума при тигельном способе требует проведения дальнейших исследований.

Отметим также, что кориум, находящийся в нижней части корпуса реактора, может выйти в бетонную шахту реактора одним из следующих способов:

- в результате разрыва или проплавления днища корпуса с вытеканием кориума единовременно или несколькими порциями;
- в результате отрыва днища корпуса по всему периметру разрыва. При наличии конструкции, удерживающей днище от возможного перемещения, остается первый способ.

## **ЛОВУШКА СО СТРУЙНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ СТЕНОК**

Основной проблемой, связанной с ловушками и не нашедшей убедительного решения до сих пор, является проблема надежного отвода тепла от кориума. Намечившиеся пути ее решения, в основном, сводятся к увеличению поверхности теплоотвода от кориума к охлаждающей среде, что может быть достигнуто, например, с помощью растекания кориума по большой поверхности или предварительным заполнением ловушки легкоплавкими материалами для увеличения объема кориума и площади его взаимодействия со стенками ловушки.

В данной работе рассматривается конструкция ловушки, позволяющая отводить от кориума максимально возможные тепловые потоки при сохранении ее механической прочности.

Конструкция ловушки (рис.1) представляет собой котел, наружная поверхность которого охлаждается с помощью орошения струями малого диаметра. Струи формируются при прохождении через отверстия в стальном листе, расположенном эквидистантно охлаждаемой поверхности. Согласно результатам экспериментов [1-3], плотность теплового потока, отводимого при струйном охлаждении, может достигать  $10 \text{ МВт/м}^2$ .

Кориум в жидком виде или в виде смеси жидкой фазы и твердых фрагментов после выхода из корпуса реактора попадает в стальной внутренний несущий корпус ловушки толщиной примерно 100 мм, охлаждаемый снаружи струями. Толщина эквидистантно расположенного стального листа (промежуточного днища) около 20 мм, расстояние между внутренним корпусом и промежуточным днищем примерно 100 мм.

Наружный корпус служит для организации подвода воды к промежуточному днищу, толщина наружного корпуса около 50 мм. К промежуточному и наружно-

му днщу привариваются вертикальные ребра, создающие жесткость конструкции ловушки. Наружное днище опирается на бетонное основание шахты реактора. Величина зазора между наружным корпусом и промежуточным днищем примерно 50 мм.

Все размеры ловушки будут уточнены на последующих этапах ее проектирования.

Значительная толщина внутреннего корпуса обеспечивает необходимую механическую прочность ловушки, смягчение термошока в первый момент при падении в ловушку кориума.

Выполнена оценка теплосъема от стенок ловушки. Она проводилась в соответствии с [1], где приведены зависимости для определения критической плотности теплового потока при охлаждении обогреваемого диска струей жидкости. Выполненная оценка возмож-

ности охлаждения устройства для удержания кориума (принято  $d=1,5$  мм,  $D=10\div 50$  мм,  $d$  - внутренний диаметр сопла,  $D$  - диаметр обогреваемого диска) позволила установить, что расход воды около 20 кг/с обеспечит надежное охлаждение кориума. В связи с тем, что действительное распределение плотности теплового потока по поверхности устройства неравномерно, потребуется профилирование частоты отверстий на единицу площади. Для наиболее теплонапряженных участков поверхности ловушки плотность размещения отверстий варьируется от 500 до 1000  $1/\text{м}^2$ .

Можно ожидать, что в кориуме, поступающем в ловушку, будет 100÷150 т стали.

Выход кориума вероятнее всего будет ступенчатым. Однако нельзя и исключать и залпового выхода кориума, причем, очевидно, он является наиболее жестким.

В случае гильотинного разрушения корпуса реактора для сохранения ловушки потребуются ограничители перемещения оторвавшейся части корпуса реактора. В качестве ограничителей могут быть использованы трубы, охлаждаемые изнутри струями воды и проходящие через объем ловушки, что увеличивает площадь теплоотвода от кориума и упрощает работу ловушки.

Отметим, что ловушка должна быть рассчитана на прием 25-40  $\text{м}^3$  кориума.

## АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРИУМА С КОРПУСОМ ЛОВУШКИ

Для расчета взаимодействия кориума с корпусом ловушки применялся код PPRKRS (программа прогнозирования разрушения корпуса реактора с учетом стратификации компонент кориума), предназначенный для анализа взаимодействия кориума с внутрикорпусными устройствами и корпусом реактора ВВЭР с учетом его особенностей. Он основан на гетерогенной математической модели взаимодействия кориума с корпусом реактора [4] и разработан на базе кода ВКРК [5]. С

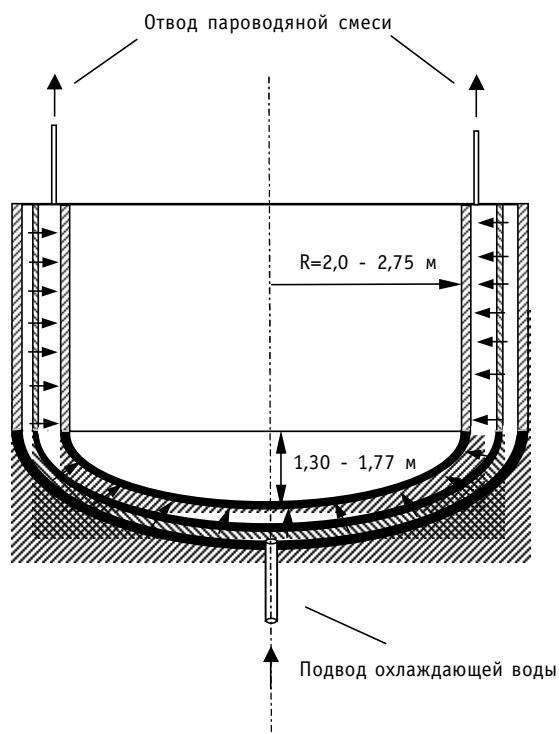


Рис. 1. Схема устройства для удержания кориума

использованием кода PPRKRS проведено сравнение процесса охлаждения кориума в ловушке при залповом выходе всего кориума для двух сценариев:

- а) в ловушке имеет место полное перемешивание всех компонент кориума;
- б) в ловушке происходит полное перемешивание диоксида урана, стали и циркония; оксиды циркония и железа всплывают на поверхность кориума и образуют слой легких оксидов.

В первом случае в ловушку падает кориум общей массой 262 т. Он состоит из 80 т  $UO_2$ , 24 т металлического циркония, 30% которого превращено в  $ZrO_2$ , 150 т стали, 8 т оксидов железа. Температура оксидов 2773 К, температура металлов 2223 К.

Теплофизические свойства кориума рассчитывались как для гомогенной смеси с учетом температурной зависимости свойств компонент. Температура наружной поверхности стенки ловушки принята равной температуре насыщения воды при давлении  $p=0,3$  МПа.

На рис. 2 показано изменение во времени температуры кориума в точке, расположенной на оси ловушки при  $z=1,09$  м. Время отсчитывается с момента выпадения кориума в ловушку.

Максимальная глубина проплавления стенки достигается в эллиптической части в момент времени 33300 с от начала аварии и составляет 1,7 см, оставшаяся толщина стенки корпуса равна 8,3 см. После этого момента глубина проплавления практически не меняется, т.е. фактически состояние корпуса ловушки стабилизируется. Максимальная температура кориума достигается к моменту времени 39300 с и составляет 2648 К. Затем температура кориума начинает постепенно снижаться.

Средняя плотность теплового потока за счет излучения с поверхности кориума составляет 0.2 и 0,25 МВт/м<sup>2</sup> в моменты времени 30600 и 45000 с от начала аварии.

Таким образом, в случае равномерного перемешивания компонент кориума ловушка сохраняет свою механическую прочность, температура кориума через

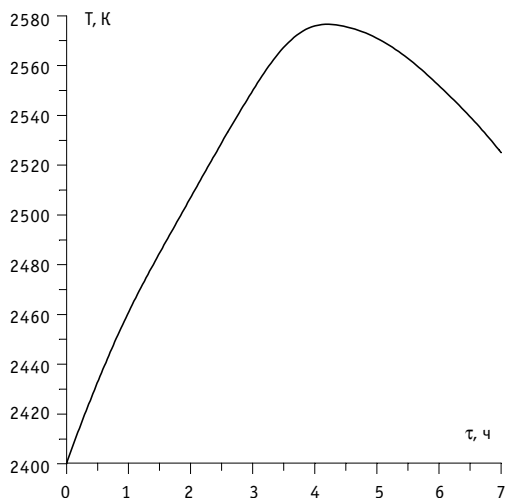


Рис. 2. Зависимость температуры кориума в точке с координатами  $r=0$ ,  $z=1,09$  м от времени с момента выпадения кориума в ловушку ( $\tau_0=6.5$  ч после начала аварии). Без слоя оксидов на поверхности кориума

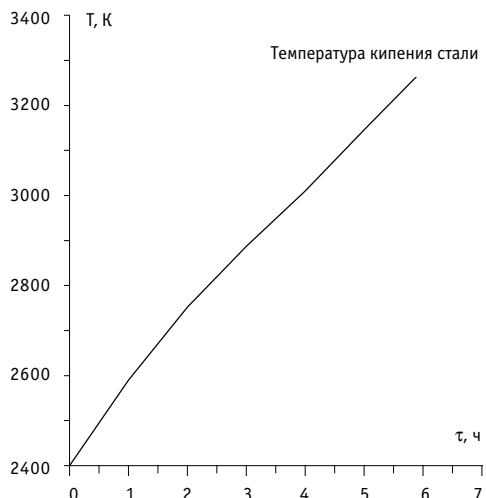


Рис. 3. Зависимость температуры кориума в точке с координатами  $r=0$ ,  $z=1,09$  м от времени с момента выпадения кориума в ловушку ( $\tau_0=6.5$  ч после начала аварии). С наличием слоя оксидов на поверхности кориума

5 ч после его выпадения в ловушку начинает снижаться.

Во втором случае (с наличием слоя легких оксидов на поверхности кориума) было принято, что сверху находится слой оксидов железа и циркония общей массой 15,2 т. Результаты расчета взаимодействия кориума с корпусом ловушки с учетом слоя легких оксидов на его поверхности представлены на рис. 3,4. Расчет также выполнен по программе PPRKRS.

На рис. 3 приведено изменение во времени температуры кориума в точке, расположенной на оси ловушки при  $z=1,09$  м (время отсчитывается от момента выпадения кориума в ловушку). Из рис. 3 видно, что температура кориума в рассматриваемой точке увеличивается со временем, причем для одних и тех же моментов времени она заметно выше, чем в случае представления кориума как гомогенной смеси без учета слоя оксидов сверху (см. рис. 2).

На рис. 4 представлена зависимость минимальной толщины непроплавленной части корпуса ловушки от времени. Максимальная глубина проплавления стенки достигается в момент времени 18900 с и составляет 4,38 см, оставшаяся толщина стенки корпуса равна 5,62 см. После этого момента состояние корпуса ловушки фактически стабилизируется. К моменту времени 22500 с достигается максимальная температура кориума, равная температуре кипения стали 3300 К.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наличие слоя оксидов на поверхности кориума существенно для процесса взаимодействия кориума с корпусом ловушки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная конструкция ловушки позволяет решить основные проблемы удержания и охлаждения кориума за пределами корпуса реактора:

- снимается вопрос с размещением в ловушке кориума независимо от его параметров и сценария выхода из корпуса реактора;
- обеспечивается естественная циркуляция теплоносителя по контуру: бассейн выдержки – ловушка – бассейн выдержки;
- запас имеющейся воды обеспечивает пассивным способом охлаждение ловушки в течение 24 часов и более.

2. С использованием кода PPRKRS получено, что в случае равномерного перемешивания компонент кориума ловушка сохраняет свою механическую прочность, температура кориума через 5 часов после его выпадения в ловушку начинает снижаться.

3. Наличие слоя оксидов на поверхности кориума существенно для процесса взаимодействия кориума с корпусом ловушки.

4. Код PPRKRS может быть использован для расчетного анализа процессов в

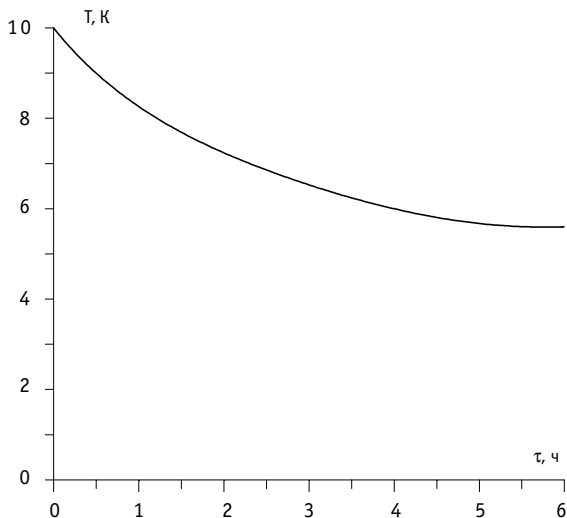


Рис. 4. Зависимость минимальной толщины непроплавленной части стенки корпуса ловушки от времени

ловушке кориума любой конструкции и при любом сценарии аварии.

### **Литература**

1. *Като, Шимицу*. Верхняя граница критической плотности теплового потока при кипении насыщенной жидкости в условиях вынужденной конвекции на обогреваемом диске при набегании тонкой струи // Теплопередача. – 1979. – Т. 101. – № 2. – С. 90-95.
2. *Monde M., Katto J.* Burnout in High Heat-Flux Boiling System with an Impinging Jet // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1978. – V. 21.
3. *Исаченко В.П., Кушнырев В.И.* Струйное охлаждение. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. *Кащеев М.В.* Гетерогенная математическая модель для описания стратификации компонент кориума при его взаимодействии с корпусом реактора. Препринт ФЭИ-2851. – Обнинск, 2000.
5. *Долгов В.В., Кащеев М.В., Муранов Ю.В.* Моделирование теплового разрушения корпуса реактора при тяжелой аварии на АЭС с реакторами типа ВВЭР // ТВТ. – 1996. – Т. 34. – № 5. – С. 770.

Поступила в редакцию 10.11.2000

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

---

### УДК 621.039.564:53.082.4

*Automatic Control System of Stressed State of a Metal for Technological Channels at Steel-zirconium Adapter of RBMK-type Nuclear Reactors* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, A.A. Zilper; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 7 illustrations, 9 tables.-References, 9 titles.

The results of development system for measuring of changes of stressed metal construction states have been shown in this article. The system can be used for control of the stressed state of adapters of RBMK-type reactor fuel channels. The changes of stressed state are determined by means of ultrasonic wave velocity changes which are generated in the suffered materials.

### УДК 51-72:531.15

*Analysis of a Rotor Working Equations with Electromagnetic Bearings* \E.V. Gaivoronskaya, S.V. Lebedeva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 2 illustrations.-References, 3 titles.

The problem of the creation of vertical turbine machine with electromagnetic bearings is considered with reference to high-temperature gas reactor. Simple formulas of the precession frequency and nutation frequency of the shaft are derived on the basis of solutions of the shaft working equations for the special cases depending on a sistem parameters.

### УДК 621.039.584

*The Calculational Study of the Possibility of Corium Confinement in the Catcher with the Walls Cooled by Impinging Jets* \M.V. Kachtcheev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 4 illustrations.-References, 5 titles.

A catcher with the walls cooled by impinging jets has been considered as a device for corium cooling and confinement outside the reactor vessel. The proposed catcher design enables the basic problems of corium confinement and cooling after its release from the reactor vessel to be solved. The calculational study for corium-to-catcher shell interaction using the PPRKRS code has been performed. It can be applied for the analysis of the possibility of corium confinement in the catcher of any design.

### УДК 621.039.526

*On Selection of Optimal Composition of the Na-K-Cs-alloy for LMFR Core Cooling* \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 7 pages, 1 illustration.-References, 5 titles.

The Na-K-Cs-alloy may be considered as a potential coolant for the LMFR. In this paper are discussed the selection of the optimal composition of this alloy. This composition may be obtained as the solution of multicriteria optimization problem.

### УДК 681.3:621.039.548

*The Calculation Analysis of Experiments on Destruction of Electroheated Fuel Element Simulators* \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 10 pages, 6 illustrations.-References, 18 titles.

The technique and computer program for account of emergency process of cylindrical fuel elements heating and melting are developed. Calculating analysis of experiments on electrical