

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ  
ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО  
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

RUSSIAN ACADEMY OF  
SCIENCES  
NUCLEAR  
SAFETY INSTITUTE

Препринт № IBRAE-97-18

Preprint IBRAE-97-18

А.Д.Васильев, С.Ф.Крылов, Е.П.Пахомов, А.Г.Попков,  
В.Ф.Стрижов, А.С.Филиппов, В.В.Чуданов

**АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ЛОВУШЕК И  
ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ  
РЕЖИМОВ ЛОВУШКИ С ПЛОСКИМ ДНОМ  
С ЗАЩИТНЫМ СЛОЕМ ИЗ  
ДИОКСИДЦИРКОНИЕВОВОГО БЕТОНА**

Москва  
1997

Moscow  
1997

Васильев А.Д., Крылов С.Ф., Пахомов Е.П., Попков А.Г., Стрижов В.Ф., Филиппов А.С., Чуданов В.В. АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ЛОВУШЕК И ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЛОВУШКИ С ПЛОСКИМ ДНОМ С ЗАЩИТНЫМ СЛОЕМ ИЗ ДИОКСИДЦИРКОНИЕВОГО БЕТОНА. Препринт № IBRAE-97-18. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1997. 47 с.

#### Аннотация

В работе приведен краткий обзор концепций устройств удержания расплавленных топливосодержащих масс вне корпуса реактора. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к ловушкам, приведен обзор проводимых и планируемых экспериментов с имитаторами топлива и реальным корриумом. Приведены результаты предварительных расчетов тепловых режимов ловушки с плоским дном из диоксидциркониевого бетона.

©ИБРАЭ РАН, 1997

Vasilev A.D., Krylov S.F., Pakhomov E.P., Popkov A.G., Strizhov V.F., Filippov A.S., Chudanov V.V. AN ANALYSIS OF CORE-CATCHERS CONCEPTS AND NUMERICAL ESTIMATES OF A THERMAL BEHAVIOR OF A FLAT CORE-CATCHER WITH THE PROTECTIVE MATERIALS OF ZIRCONIUM DIOXIDE CONCRETE. (in Russian). Preprint IBRAE-97-18. Moscow: Nuclear Safety Institute, November 1997. 47 p.

#### Abstract

A brief description of ex-vessel core retention devices (core catchers) concepts is presented. Main requirements for core catchers designs are considered. The results of numerical estimates and brief description of experiments with corium simulants and prototypes are given. The results of preliminary numerical modeling of thermal behavior of core catcher with zirconium dioxide concrete as protective material are presented.

©Nuclear Safety Institute, 1997

# Анализ концепций ловушек и численные оценки тепловых режимов ловушки с плоским дном с защитным слоем из диоксидциркониевого бетона

*А.Д.Васильев, С.Ф.Крылов, Е.П.Пахомов, А.Г.Попков, В.Ф.Стрижов, А.С.Филиппов, В.В.Чуданов*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (095) 955-26-20, факс: (095) 230-20-29, эл. почта: pkv@ibrae.ac.ru

## Содержание

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Введение .....                                                                                                    | 3  |
| 2 Анализ концепций ловушек .....                                                                                    | 4  |
| 2.1 Основные требования предъявляемые к ловушкам .....                                                              | 5  |
| 2.2 Концепции ловушек .....                                                                                         | 8  |
| 2.2.1 Ловушки с большой площадью растекания .....                                                                   | 9  |
| 2.2.2 Ловушки с вертикальным расположением .....                                                                    | 10 |
| 2.2.3 Концепция ловушки, охлаждаемой посредством подачи воды снизу. ....                                            | 12 |
| 2.3 Защитные материалы ловушек .....                                                                                | 12 |
| 2.4 Краткий обзор экспериментов .....                                                                               | 14 |
| 3 Предварительный анализ режимов работы ловушки с плоским дном с защитным слоем из диоксидциркониевого бетона ..... | 15 |
| 3.1 Конструкция ловушки .....                                                                                       | 15 |
| 3.2 Численные оценки тепловых режимов ловушки .....                                                                 | 17 |
| 3.2.1 Расчет теплового взаимодействия расплавленного кориума со стенками ловушки и бетонной шахты. ....             | 17 |
| 3.2.2 Результаты расчетов .....                                                                                     | 19 |
| 3.2.3 Основные результаты расчетов стадии разогрева ловушки .....                                                   | 27 |
| 3.3 Теплоотвод за счет кипения воды .....                                                                           | 28 |
| 3.5 Интегральная мощность остаточного тепловыделения .....                                                          | 30 |
| 3.6 Параметрические расчеты теплового поведения слоя кориума на диоксидциркониевом бетоне ....                      | 30 |
| 3.4 Оценка влияния растекания .....                                                                                 | 42 |
| 4 Основные результаты .....                                                                                         | 43 |
| 5 Литература .....                                                                                                  | 45 |

## 1. Введение

Одной из основных особенностей, определяющих конструкцию будущих реакторов, является учет возможности возникновения тяжелой аварии на атомной электростанции. При проектировании и реализации контейнмента реактора внимание должно уделяться созданию условий для удержания расплавленных топливосодержащих масс (кориума) как в корпусе, так и вне корпуса реактора. При выходе кориума в пространство вне корпуса реактора главной проблемой является предотвращение или ослабление взаимодействия кориума с бетоном. Основными опасными последствиями процесса взаимодействия материалов активной зоны с бетоном являются: выход газов в результате разложения бетона, что может привести к возрастанию содержания водорода и длительному режиму повышенного давления в контейнменте; выход продуктов деления в окружающую среду; возможное заражение почвы и подземных вод.

С целью предотвращения последствий тяжелых аварий с плавлением активной зоны в течение нескольких последних лет в различных странах предпринимаются попытки разработки концепции устройств удержания кориума вне корпуса реактора. При разработке таких устройств удержания (ловушек) необходимо рассматривать совокупность факторов, влияющих на условия выхода кориума из корпуса реактора и на состояние кориума. При анализе условий, в которых должны работать ловушки, необходимо рассматривать все возможные процессы, приводящие к нежелательным последствиям.

В результате тяжелой аварии кориум после прохождения через конструкционный барьер - корпус реактора поступает в устройство удержания кориума. Конкретная реализация ловушки зависит от

принятой концепции и конструктивных особенностей контейнмента реактора, в котором она будет находиться. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к ловушке, собранные в ней осколки активной зоны и материала корпуса (расплавленные или твердые) должны быть изолированы от длительного взаимодействия с бетоном, должен быть обеспечен необходимый теплосъем остаточного тепловыделения. В зависимости от типа реактора и концепции используемой ловушки определяется количество кориума, которое должна принять ловушка, и необходимый уровень теплосъема остаточного тепловыделения для обеспечения допустимых температур кориума. В настоящее время рассматриваются две основные концепции ловушки с различными механизмами теплосъема: мокрая ловушка, в которой предусмотрен прямой контакт охладителя с кориумом, и сухая ловушка, в которой теплоотвод осуществляется излучением к охлаждаемой поверхности, без прямого контакта с охладителем. Каждая из концепций имеет свои преимущества и недостатки, поэтому требуется детальный анализ ловушек каждого типа при в условиях конкретной реакторной установки. В зависимости от используемой концепции охлаждения предъявляются различные требования к материалам, из которых сделаны ловушки.

Ряд концепций ловушек разрабатывается для новых типов реакторов, что дает возможность изменять конструкцию разрабатываемого контейнмента на стадии проектирования. Часть проектов планируется для использования ловушек в реакторах, находящихся в эксплуатации, при этом устройства должны работать в заданных конструктивных условиях, являясь дополнительным средством безопасности, не нарушая рабочего режима и не конфликтуя с остальными системами безопасности станции.

В работе приведены результаты анализа ловушек кориума на основе данных литературных источников, опубликованных в открытой печати, в которых обсуждаются концепции, конструктивные особенности и основные требования, предъявляемые устройствам удержания топлива, а также экспериментальные работы по этой тематике. Рассмотрена конструкция ловушки с плоским дном с защитным слоем из диоксидциркониевого бетона. Приведены численные оценки тепловых режимов работы ловушки.

## 2. Анализ концепций ловушек

Описание разрабатываемых концепций и конструкций устройств для удержания кориума можно найти в работах [1-15]. При разработке устройств удержания кориума необходимо рассматривать совокупность факторов, влияющих на условия выхода кориума из корпуса реактора и на состояние кориума. При детерминистическом подходе в анализе тяжелых аварий рассматриваются все возможные процессы, приводящие к нежелательным последствиям независимо от вероятности их совершения. Условия выхода кориума из корпуса и его характеристики, в частности, скорости истечения, температуры и состав кориума определяются сценарием разрушения корпуса [1,15]. Рассматриваются следующие основные сценарии, приводящие к разрушению или нарушению целостности корпуса с дальнейшим распространением кориума, которые должны быть учтены при проектировании и реализации устройств удержания:

- разрушение корпуса реактора, вызванное паровым взрывом в корпусе
- истечение кориума под высоким давлением вследствие прямого нагрева контейнмента или выгорания водорода
- глобальная авария корпуса реактора
- локальная авария корпуса реактора
- выпадение кориума в несколько этапов, после основного выхода на первом этапе

Поскольку существует широкий набор сценариев, возникают большие неопределенности в оценке начальных условий, характеристик выпавшего в ловушку кориума и условий внутри контейнмента. Главные и наиболее опасные нагрузки, возникающие в этих условиях должны быть учтены в разрабатываемых конструкциях устройств для удержания кориума. В связи с этим формулируются основные требования, предъявляемые к ловушкам

## 2.1 Основные требования, предъявляемые к ловушкам

Остановимся на рассмотрении концепций ловушек, применительно к существующим и разрабатываемым типам реакторов. В качестве основополагающих рассматриваются следующие характеристики ловушки:

- Способность собирать возможно большую часть выпавшего из корпуса реактора кориума.
- Обеспечение транспортировки кориума из системы сбора к предусмотренному месту локализации.
- Долговременное удержание топлива.
- Обеспечение эффективного теплоотвода.
- Обеспечение условий выживания устройства ловушки в ходе тяжелой аварии.
- Возможность долговременной работы в пассивном режиме.
- Способность удержания продуктов деления (FP).
- Отсутствие неблагоприятных эффектов по нарушению целостности контейнмента.
- Избежание дополнительной сложности.
- Возможность удаления после аварии.
- Простота в обслуживании.
- Умеренная стоимость.

Рассмотрим более детально основные характеристики ловушек.

Способность собирать возможно большую часть выпавшего из корпуса реактора кориума. При разрушении корпуса реактора необходимо избегать произвольного рассредоточения кориума в различных участках контейнмента. Эта проблема особенно важна в режимах, характеризующихся высоким давлением в корпусе, когда значительная часть осколков кориума может быть вынесена за пределы шахты реактора, в которой обычно размещаются ловушки. Для режимов выхода в условиях низких давлений, эффективность сбора существенно выше, так как скорости движения осколков и расплавленных масс, находящихся в основном под действием гравитационных сил, значительно ниже. Кориум, может распространяться внутрь полости контейнмента в виде струй (локальная авария нижней части корпуса реактора) или перемещаться большой массой (глобальная авария). Расположение и размер разрушения корпуса, а также характеристики кориума (теплофизические и химические свойства, состав, внутреннее тепловыделение, температура, скорость истечения и т.д.) зависят от характера протекания тяжелой аварии.

На имеющемся уровне исследования и понимания проблемы, сценарии разрушения корпуса реактора и, следовательно, характеристики кориума не могут быть точно определены и рассчитаны, поэтому для создания устройств удержания, следует учитывать следующие неопределенности:

- Место разрушения корпуса: кориум может вытекать в любом месте
- Момент начала истечения кориума: может быть произвольным, так что остаточное тепловыделение и начальная температура могут варьироваться в широких пределах;
- Скорость истечения кориума и его состав не являются хорошо определенными величинами;
- Состояние: распространяющийся кориум может быть полностью жидким, состоять из смеси жидкой и твердой фазы с содержанием фрагментов различных размеров, или находиться в твердой фазе.

В простейшем случае в конструкции ловушки отсутствуют специальные собирающие устройства: кориум падает под действием силы тяжести прямо в устройство удержания (ловушка, бассейн с водой, поверхность для растекания), размещенные непосредственно под корпусом. В более сложных случаях предусматривается использование воронок под корпусом, либо рассматриваются конструкции, в которых исключается попадание значительных масс кориума в соседние отсеки контейнмента. Стенки устройства

коллектора могут изготавливаться из защищающих материалов, частично или полностью покрывающих его поверхность.

**Транспортировка собранных осколков из коллектора к предусмотренной системе локализации.** В простейшем случае система транспортировки отсутствует и кориум втекает прямо в удерживающее устройство. В более сложных случаях, конструкционно задан путь, по которому кориум направляется к предусмотренному месту локализации.

Основные принципы и свойства, предполагаемые в настоящее время:

- Прямая транспортировка: не используются специальные средства для транспортировки и/или перераспределения. Кориум падает непосредственно в ловушку расположенную непосредственно под корпусом или в бассейн с водой;
- Растекание кориума по наклонной или горизонтальной поверхности;
- Направление течения кориума через отверстие воронки;
- Направление течения через отверстия в защитной решетке;
- Направление потоков по одному или более предусмотренным путям.

При транспортировке массы кориума могут быть распределены по нескольким каналам, для того, чтобы облегчить дальнейшее охлаждение.

Собранный для транспортировки или перераспределения кориум может быть жидким, смесью жидкого и твердого (более или менее стратифицированным), в виде вязкой суспензии или в виде твердых фрагментов. Конструкция должна обеспечивать транспортировку кориума независимо от его физического состояния.

**Долговременное удержание топлива.** Собранный и доставленный к месту локализации кориум, должен быть остановлен и затем долговременно удерживаться внутри специального устройства, рассчитанного на нагрузки, вызванные первичным поступлением топливосодержащих масс и дальнейшим механическим и тепловым воздействием.

Конструкции удерживающих устройств зависят в значительной степени от свойств и состояния кориума (начальная температура, состав, физическое состояние, доля металлических компонентов, гомогенность). В связи с этими аспектами, выбор соответствующих материалов, способных обеспечить удержание кориума, является определяющим.

В литературе рассматриваются различные геометрии удерживающих устройств:

- Собственно шахта реактора;
- Приемное устройство с плоским дном, расположенное ниже корпуса;
- Один или более контейнеров или тиглей (цилиндрических, конических или прямоугольных), расположенных ниже корпуса или в соседних отсеках;
- Среда, состоящая из частиц огнеупорных материалов (залитая водой или нет);
- Поддоны в среде из частиц огнеупорных материалов;
- Модифицированное основание шахты реактора, сконструированное таким образом, чтобы обеспечить необходимое пространство для растекания, с целью улучшения охлаждения расплава.

Желательно, чтобы материалы, используемые для защиты систем удержания от воздействия кориума, имели следующие свойства:

- Высокая температура плавления, большая теплоемкость и теплота плавления. Для уменьшения скорости движения фронта плавления.
- Низкая теплопроводность. Для малой скорости передачи тепла в жертвенные материалы.
- Высокая плотность.
- Перемешиваемость расплавленного топлива и жертвенного слоя: объемное тепловыделение будет существенно уменьшаться при перемешивании.
- Химическая совместимость с  $UO_2$  и сталью, отсутствие изотермических реакций;

- Отсутствие генерации газов  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ .
- Сопротивление тепловым нагрузкам: для избежания механических разрушений при быстропотекающих тепловых процессах;
- Умеренная стоимость и доступность материалов.

**Обеспечение эффективного теплоотвода.** Основной целью является охлаждения расплавленного топлива до полной солидификации для избежания ситуации разрушения корiumом основания контейнмента и основных конструкций, а также для предотвращения выхода продуктов деления. При конструировании устройства ловушки, определяющим является решение проблемы поддержания поверхности кориума при температуре достаточно низкой, чтобы избежать нагрузок на материалы ловушки и потерь ее механических свойств.

*Методы охлаждения* могут быть объединены в следующие категории:

- Растворение кориума. В этом подходе используются жертвенные материалы или химические реакции для понижения температуры кориума перед началом стадии окончательного охлаждения. При таком подходе температура кориума достаточно низка, так что могут быть использованы обычные устройства охлаждения.

- Использование для защиты стен ловушки совместимых с кориумом и огнеупорных материалов, дающих возможность прямого охлаждения перегретого кориума.

*Принципы отвода тепла.* Поскольку источник внутреннего тепловыделения может быть достаточно высоким (от 1 до 3 Мвт/м<sup>3</sup>), для процесса охлаждения существенно, чтобы поверхность теплообмена была достаточно большой. Это может быть получено при:

- растекании кориума по большой поверхности;
- разделении общей массы кориума на малые части с большой суммарной поверхностью (эффективность измеряется отношением объема к площади);
- использовании физических явлений, увеличивающих эффективную поверхность теплообмена.

*Методы использования имеющейся в контейнменте воды для охлаждения:*

- Прямым способом, для непосредственного охлаждения кориума (перемешанного или не перемешанного с жертвенными материалами) водой - стратегия мокрой ловушки.
- Косвенным способом, для охлаждения кориума посредством теплообмена через стены, отделяющие кориум от воды - стратегия сухой ловушки.

В рамках рассмотренных выше признаков, восемь категорий ловушек могут быть специфицированы наборами трех различных букв, соответствующих трем признакам:

1.  $(W,D)$ :  $W$ -мокрая ловушка,  $D$ -сухая ловушка
2.  $(V,F)$ :  $V$ -вертикальное расположение,  $F$  - горизонтальное расположение
3.  $(L,H)$ :  $L$ - низко- и  $H$ - высоко- температурные барьеры (наличие или отсутствие жертвенных материалов).

Таким образом, набор символов  $(W-F-L)$  обозначает категорию устройств с концепцией мокрой ловушки, плоской, использующей жертвенные материалы для понижения температуры смеси.

**Условия выживания устройства в ходе тяжелой аварии.** В этом аспекте, наибольшую опасность представляет энергетический паровой взрыв внутри корпуса реактора (альфа-мода). В случае постулированной аварии корпуса реактора, сопровождающейся взрывом, расплавленное топливо и быстролетающие осколки (остатки корпуса) ударяются об основание ловушки или шахты (если ловушка находится в стороне). Истечение расплава из корпуса под высоким давлением или глобальная авария корпуса реактора также могут вызвать большие тепловые и механические нагрузки.

В настоящее время предложены следующие принципы защиты устройства удержания кориума

- Установка соответствующих защитных устройств между корпусом и системой удержания.
- Использование защитных решеток между корпусом и ловушкой, которые принимают на себя удары осколков топлива и корпуса, образующихся в результате взрыва. Иногда используется несколько сеток для усиления защиты.
- Использование материалов, принимающих удар летящих частиц (песчаные и гравийные слои, металлические балки, и т.п.).

- Установка системы удержания достаточно далеко от зоны взрыва для уменьшения нагрузок до уровня, которые система может выдержать.

Кроме механических и тепловых нагрузок, вызванных летящими осколками или действием струй кориума (оксидных или металлических) под высоким давлением, которые могут разрушить часть ловушки, опасность представляет давление, возникающее внутри реактора, которое само по себе вызывает сильные нагрузки на ловушку.

**Возможность долговременной работы в пассивном режиме.** Устройства удержания топлива должны работать в условиях без использования большой мощности с ограниченным вмешательством человека и без сложного внешнего управления. Если пассивный теплоотвод невозможен, может быть использована квазипассивная (автономная) система.

Основные принципы, лежащие в основе концепции пассивного охлаждения:

- растекание топлива по большой поверхности достаточно тонким слоем, так что остаточное тепловыделение может быть снято теплопроводностью к конструкциям контейнмента и/или излучением с поверхности кориума;
- использование больших масс жертвенных материалов, уменьшающих при растворении в кориуме остаточное тепловыделение до величин, обеспечивающих снятие тепла теплопроводностью и излучением;
- использование пассивных теплообменников (таких, как тепловые трубы).

Однако, поскольку доступное пространство ограничено конструкциями контейнмента, «сухое» растекание (без добавления воды с целью охлаждения) кориума по очень большой поверхности является практически невозможной задачей для модернизаций существующих реакторов и, видимо, достаточно сложно и дорого для будущих конструкций. Аналогично, снятие тепла посредством отдельных тепловых труб требует большого числа таких устройств, и соответственно больших геометрических размеров внутри контейнмента.

**Способность удержания продуктов деления.** Должны быть приняты меры для ограничения выхода продуктов деления, находящихся в топливе в атмосферу контейнмента и полностью исключено проникновение в окружающую среду за пределы контейнмента.

Физические принципы, используемые в настоящее время, следующие:

- Быстрое охлаждение кориума ниже пороговой температуры (около 2300K), выше которой начинается существенное испарение компонент кориума. В течение процесса охлаждения образование устойчивой корки на поверхности кориума способствует замедлению выхода продуктов деления в контейнмент.
- Использование растворения кориума в подходящих типах материалов. Так например, в концепции CORMSORS используется стекло в устройстве, размещаемом под корпусом реактора. Концепция основана на растворении кориума слоем жертвенного стекла, уменьшении тепловыделения в выпавшем кориуме, равномерном растекании, с последующим охлаждением за счет излучения или теплопередачи к воде. Устройство состоит из тонких слоев стали, между которыми находятся толстые слои стекла. Сталь снижает скорость течения расплава, для того, чтобы дать время раствориться осколкам топлива в стекле.

В вопросе выхода продуктов деления существенное значение при использовании жертвенных материалов приобретают химические аспекты взаимодействия.

**Отсутствие неблагоприятных эффектов по нарушению целостности контейнмента.** Установка ловушек внутри конструкции контейнмента изменяет его поведение в аварийных случаях и может вызывать некоторые неблагоприятные эффекты в рабочем режиме, в зависимости от конкретной архитектуры контейнмента. Поэтому, требуется специальный анализ возможных конструкций ловушек с учетом поведения контейнмента в целом.

**Простота обслуживания и умеренная стоимость.** Система включенная в конструкцию реактора, должна работать в течение времени жизни реактора (50- 60 лет). Поддержка и обслуживание должны осуществляться на возможно более простом уровне.

Поскольку вероятность применения такого устройства достаточно мала, суммарная стоимость его элементов конструкции и имплементации в контейнмент реактора должна быть разумно ограничена.

**Возможность удаления после аварии.** Должна быть предусмотрена возможность удаления ловушки и охлажденного топлива после тяжелой аварии из конструкции реактора и с последующим захоронением радиоактивных материалов.

## 2.2 Концепции ловушек

С учетом требований, предъявляемых к ловушкам, в настоящее время предлагается несколько концепций ловушек[39], краткие характеристики которых приведены ниже:

- Ловушка, представляющая собой полость, заполненную водой, размещаемую под корпусом реактора. Основными опасностями при таком подходе являются паровой взрыв и непосредственный нагрев контайнмента реактора.
- Ловушка, заполненная частицами термостойких материалов  $UO_2/ThO_2$ , обеспечивающими распределение расплавленного кориума и достаточную пористость затвердевшего кориума для достижения необходимого режима охлаждения.
- Концепция SCORE основана на процессах отвода тепла графитовыми балками, охлаждаемыми водой. Проблема такой конструкции - в обеспечении равномерного распределения расплава на поверхности балок и химической стабильности графита.
- В концепции «ступенчатых поддонов» расплав охлаждается при прямом контакте с водой после его распределения на последовательности горизонтальных поддонов, расположенных в среде, состоящей из частиц огнеупорных материалов. Проблема в обеспечении достаточного растекания кориума и пористости затвердевшего расплава.
- Концепция сухой ловушки на основе многотигельной конструкции должна обеспечить распределение расплава на нескольких тиглях.
- Концепция COMET предполагает охлаждение кориума при подаче воды снизу после растекания кориума и разрушения жертвенных материалов на дне основания. Проблема состоит в возможном неравномерном растекании по основанию и возможности возникновения парового взрыва.
- Стратегия EPR состоит в растекании расплавленного топлива на большую площадь и охлаждение посредством заливки поверхности кориума водой. Необходимо обеспечить условие равномерного растекания тонким слоем по всей доступной поверхности и исключить возможность возникновения парового взрыва.
- Концепция CORMSORS основана на растворении кориума тонким слоем жертвенного стекла, равномерном растекании кориума. Основная проблема - в равномерном растворении стекла и слабоизученном влиянии температурных и концентрационных градиентов на режим естественной конвекции.
- Концепция сухого растекания основана на охлаждении кориума через дно и стенки с использованием огнеупорной керамики и тонкого слоя стали. Тепловое излучение с поверхности снимается посредством охлаждения стенок водой. Может рассматриваться только для сценариев аварий с низким давлением. Должны быть приняты меры для исключения прямого воздействия механических осколков и струи.
- Концепция сухой многослойной ловушки во многих аспектах схожа с предыдущей концепцией. Основное различие - в использовании более сложной структуры материалов основания и стенок.

Ниже приведено более подробное описание основных типов ловушек.

### 2.2.1 Ловушки с большой площадью растекания

В работе [3] рассматривается одна из концепций «мокрой» ловушки с плоским дном и большой площадью растекания расплавленного кориума. Предполагается, что устройство для удержания расплавленного топлива должно быть максимально простой конструкции для того, чтобы предельно сократить влияние непредусмотренных физических процессов и избежать связанных с этим технологических проблем. Кроме того, устройства аварийного удержания топлива не должны находиться

в противоречии с рабочим режимом станции. Одним из возможных решений представляется наличие достаточного пространства для растекания кориума с охлаждением поверхности водой. Это решение выбрано в качестве предпочтительного варианта при разработке франко/немецкого европейского водяного реактора (EPR).

Основной принцип, используемый в EPR реакторе - растекание кориума на большое пространство в специально отведенный отсек).

Характеристики отсека:

- Площадь около  $150 \text{ м}^2$ ;
- Дно и боковые стенки покрыты слоями, защищающими от тепловых и механических нагрузок;
- Между отсеком удержания топлива и верхними отсеками существует пространство для выхода пара;
- Основание, по которому происходит растекание, в нормальном режиме является сухим;
- Отсек соединен с помощью труб с баком, в котором содержится вода для повторной заливки. Заливка происходит после поступления кориума в отсек и плавления легкоплавких заглушек.

Основные вопросы, которые должны быть решены для обоснования концепции ловушки: граничные условия (сценарий плавления активной зоны и режим аварии корпуса); растекание топливосодержащих масс (характеристики течения); взаимодействие кориума с охладителем (истечение в охладитель после аварии корпуса, заливка расплава); охлаждение расплава водой сверху, поведение конструкций контайнмента, выход продуктов деления.

В работе [6] описаны результаты теплового и механического анализа, проведенного в приложении к проблеме сухих ловушек с плоским дном. Основные черты концепций таких ловушек следующие:

- нет непосредственного взаимодействия расплавленного кориума с водой (при этом устраняется проблема парового взрыва);
- рассчитаны на использование в режимах высоких температур;
- растекание кориума обеспечивается на большое расстояние (около  $100 \text{ м}^2$ );
- основной теплосъем происходит за счет излучения к поверхности, охлаждаемой водой.

С нижней границы тепло отводится за счет теплопроводности через защитные материалы, граница которых охлаждается за счет контакта с конвектирующей водой.

Максимальный поток на нижней границе - около  $10^5 \text{ Вт/м}^2$ , на верхней границе существенно выше: порядка  $10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

Численные исследования теплового поведения ловушки проводились на упрощенной (относительно реальной конструкции) модели, с учетом слоистой структуры ловушки (кориум, защитные материалы, сталь) при соответствующих условиях охлаждения (сверху- излучение, снизу конвективное охлаждение водой). Расчеты проводились для сценария выпадения кориума объемом  $20 \text{ м}^3$  при температуре  $3000^\circ\text{C}$ .

Варьировалась толщина слоя защитных материалов и толщина кориума.

Результаты исследования следующие

- В базовом расчетном варианте получены следующие средние величины: максимальная температура в расплаве около  $3100^\circ\text{C}$ , в защитных материалах  $2300^\circ\text{C}$ , корпусной стали -  $400^\circ\text{C}$ . Толщина корки на верхней и нижней границах растет со временем.

- С увеличением теплопроводности ( в 5 раз относительно базового варианта) тепловой поток через дно возрастает: с  $10^5 \text{ Вт/м}^2$  до  $1.4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . При уменьшении теплопроводности (в 5 раз) температура защитных материалов возрастает с  $2300^\circ\text{C}$  до  $3200^\circ\text{C}$ .

- Доля остаточного тепловыделения, отводимая через дно конструкции, слабо зависит от толщины расплавленного слоя.

Приведены результаты численных расчетов механического поведения конструкций ловушки. Показана сильная зависимость от физических свойств используемых материалов.

## 2.2.2 Концепции ловушек с вертикальным расположением

Концепция ловушки с вертикальным расположением рассмотрена в [9]. Ловушка представляет собой многослойную среду, состоящую из нескольких слоев частиц различного диаметра. Верхний слой наполнен керамическими частицами  $ThO_2$  и  $Al_2O_3$  различного размера. Второй сверху слой состоит из частиц малого размера (1.5-2.5 мм), который затормаживает распространение кориума на основе комбинаций эффектов поверхностного натяжения и теплопроводности. Слой, содержащий расплавленный кориум, охлаждается с боков, сверху и снизу за счет естественной конвекции в пористой среде, образованной большими частицами (размером около 20 мм). В тестах по изучению переходных процессов с термитными расплавами (10 кг), поступающими в среду, образованную керамическими частицами (10- 20 мм) и заполненную водой, показали отсутствие нежелательных процессов взаимодействия расплава с водой. В проведенных опытах не было парового взрыва, не было разрушения среды, наблюдалась лишь небольшая фрагментация расплава.

В подходе [10] расплав распределяется в среде, образованной из зигзагообразно расположенных графитовых балок (сечением 60\*90 см), расположенных в шахте реактора. Расплав застывает на поверхности балок в виде тонких корок. Долговременное удержание достигается при заливке шахты реактора водой.

В работах [4], [5] рассматривается конструкция ловушки с использованием сборки поддонов в пористой среде. Поддоны объединены в ступенчатую вертикальную структуру.

Отмечается, что наиболее очевидное решение проблемы охлаждения расплавленного кориума заключается в распределении расплава по горизонтальной поверхности, что требует наличия достаточно большой площади для достижения малых толщин растекающегося слоя при которых возможно затвердевание расплава в течение нескольких часов при охлаждении водой сверху (так для расплава объемом 30 м<sup>3</sup> для растекания толщиной менее 10 см требуется площадь свыше 300 м<sup>2</sup>). Такие большие площади не предусмотрены в конструкциях существующих реакторов и могут входить в противоречие с другими требованиями в разрабатываемых конструкциях реакторов. С другой стороны, в большинстве типов реакторов имеется достаточно пространства в вертикальном направлении.

В работе исследуется конфигурация, в которой используется вертикальное направление для увеличения поверхности растекания, обеспечивающее достаточно быстрое затвердевание топлива. Конфигурация состоит из сборки наложенных керамических термостойких поддонов. Имеются два типа поддонов: с центральным и боковым расположением в ловушке. Поддоны находятся в среде, образованной частицами шарообразной формы, сделанных из термостойкой керамики. Поддоны также изготовлены из термостойкой керамики. Расплав, попадая в ловушку сверху проходит через пористую среду, отдавая частицам часть своей энергии и растекается тонким слоем по поверхности поддонов. Пористая среда является, кроме того, средством, способствующим разбиению падающей струи топлива на мелкие структуры, защищая поддоны от прямого взаимодействия со струей. Размер частиц определяется двумя противоречивыми требованиями: для предотвращения парового взрыва они должны быть достаточно маленькими, а для обеспечения достаточной пористости и возможности проникновения через них расплава, размеры частиц должны быть достаточно большими. В начальный момент времени такая ловушка может быть сухой или заполнена водой. В случае сухой ловушки, с течением времени она заполняется водой (например, после плавления легкоплавких заглушек). В случае мокрой ловушки обеспечивается уровень воды ниже поверхности ловушки. Охлаждение обеспечивается за счет естественной конвекции в пористой среде.

В отличие от вертикальной концепции [10] здесь дополнительно использованы поддоны, собирающие и распределяющие кориум. Второе отличие - использование оксидных частиц вместо графита, что позволяет избежать химических реакций и парового взрыва в конфигурации с начальным заполнением ловушки водой.

Численные расчеты ловушек проводились с помощью кода PLUGM [38]. Показано, что растекание по поддонам происходит тонким слоем с дальнейшим затвердеванием и формированием тонких корок.

Тесты со 100 кг расплавленных оксидов железа и алюминия, получающихся посредством термитной реакции, дали информацию о тепловой устойчивости различных материалов к расплавленной металло - оксидной смеси и показали, что течение расплава может привести к растеканию тонким слоем на горизонтальные поддоны.

В рассмотренных выше концепциях ловушек с использованием пористой среды одной из основных проблем является уменьшение пористости верхнего слоя при прохождении и затвердевании расплава. Изучению этой проблемы, в частности, посвящены эксперименты [4].

Многотигельная концепция ловушки топлива [7] предложена для внедрения в новую конструкцию LWR контейнента. Рассматривается концепция ловушки и различные способы, которыми ловушка

может быть реализована для использования в реакторах. Представлены анализ многотигельной ловушки и результаты предварительных расчетов конкретной конструкции ловушки. Обсуждается адекватность концепции ловушки для реакторного применения.

### 2.2.3 Концепция ловушки, охлаждаемой посредством подачи воды снизу

В [8] рассматривается концепция ловушки, которая планируется к реализации в новых PWR реакторах на основе стандартного немецкого PWR реактора. Ловушки разрабатываются для использования в возможных условиях как высоких, так и низких давлений в ходе тяжелых аварий с плавлением активной зоны. Охлаждение в ловушке происходит за счет растекания и фрагментации топлива во внекорпусном пространстве посредством подачи воды через основание.

При прохождении через расплав, в результате прямого контакта, вода испаряется, пар конденсируется на стенках контейнмента, образуя циркулирующую систему пар/вода.

Ловушка рассчитана на прием и удержание топливосодержащих масс и конструкционных материалов после аварии корпуса реактора. Основные требования, предъявляемые разработчиками к ловушке, следующие:

- Сбор кориума, вышедшего во внекорпусное пространство для исключения проникновения через основание и воздействие на важные конструкции контейнмента;
- Снятие остаточного тепловыделения порядка 25 МВт в начальный момент и около 10 МВт при долговременном удержании для реактора 1300 МВт Эл.
- Ограничение выхода продуктов деления, растворенных в кориуме. Существенный выход начинается при температурах выше 2000 К, потому кроме съема тепла, необходимо поддержание температуры ниже температуры испарения продуктов деления. Конечной целью является полное затвердевание кориума.
- Ловушка должна быть способной принять около 200 тонн расплава, выпавшего при аварии корпуса (типичный состав: 120 тонн оксидов и 80 тонн металлов, включая 20 тонн циркалия).

- Начальная температура может достигать 3000 К.

Выделяются два основных сценария аварии корпуса:

- авария, которая может возникнуть при взрыве в корпусе или в условиях высокого давления с тепловым воздействием на корпус;
- авария в условиях низкого давления с отрывом нижней части корпуса или с малым поступлением расплава в течение длительного времени.

С точки зрения сохранения целостности системы удержания топлива наиболее опасна авария вследствие взрыва корпуса. Для сбора энергии вылетевших частиц под корпусом реактора над ловушкой устанавливается защитная решетка. Решетка пропускает мелкие частицы и расплав, задерживая крупные осколки. Для охлаждения используется вода первичного контура, суммарная масса которой может составлять около 1600 тонн.

В основе создания ловушки использован опыт изучения взаимодействия кориума с бетоном. Ловушка проектируется с учетом малой имеющейся площади и с оптимальными условиями теплосъема. Основная часть конструкции - стальная плита, покрытая жертвенным слоем и соединенная с основанием массивными поддерживающими структурами. В случае аварии пространство под плитой заполнено водой в результате переполнения буферного бака. В слой жертвенного материала (предполагается использование материала типа бетона) встроены каналы, закрытые заглушками, которые проплавляются при некоторой глубине эрозии. После этого, через каналы подается вода снизу из под плиты. В результате прохождения воды через кориум происходит фрагментация слоя, увеличивая охлаждаемую поверхность кориума. В ходе взаимодействия с водой происходит интенсивное образование пара. При этом может происходить ограниченное выделение водорода и аэрозолей, которое прекращается на фазе стабилизации охлаждения.

### 2.3 Защитные материалы ловушек

При проектировании ловушек особое внимание должно уделяться выбору материалов, из которых сделана ловушка. Защитные материалы находятся в непосредственном контакте с кориумом, поэтому они должны быть устойчивы к высоким температурам и иметь температуру плавления выше, чем предполагаемая температура кориума (2400 °C и более). Материалы не должны реагировать с кориумом с выделением газов, чтобы избежать увеличения давления в контейнменте. Материалы должны обладать хорошей совместимостью с водой. Теплопроводность материалов важна особенно в случае сухой ловушки с точки зрения увеличения тепла, выносимого с границы. Среди других важных свойств защитных материалов: сопротивление механическому и тепловому ударам, сохранение свойств с течением времени.

Исследование свойств оксидов, рассматриваемых в качестве защитных материалов ловушек, проведено в [2]. Рассматривается конструкция ловушки, облицованной керамическим слоем, контактирующим с кориумом с возможностью охлаждения как снаружи, так и изнутри. Предполагается, что ловушка должна быть способной принять и удержать кориум объемом порядка  $20\text{ м}^3$  с остаточным тепловыделением  $2\text{ МВт/м}^3$ . Температура кориума вне корпуса оценивается как  $2400\text{--}2500^\circ\text{C}$ . Авторы выделяют концепции мокрой и сухой ловушки. Проводится анализ поведения оксидов как в случае сухой, так и мокрой ловушки, так как отсутствие воды в ловушке в ходе тяжелой аварии не может быть гарантировано. Рассматриваются два варианта реализации: плоская ловушка с большой поверхностью растекания и ловушка с высокими узкими тиглями. Эти конструкции ловушек в основном состоят из металлических структур, охлаждаемых водой, и покрыты изнутри керамикой (кирпичи, плитки).

В качестве кандидатов на роль защитных материалов рассматриваются керамики на основе оксидов  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SrO}$ . Проанализированы и сравнены следующие свойства оксидов: плотность, теплопроводность, температура плавления, температура кипения, совместимость с кориумом, растворимость в воде, термомеханическое поведение.

**Плотность.** Более предпочтительно использование материалов с высокой плотностью, поскольку в случае частичного разрушения защитных материалов они сохраняют местоположение, не всплывая на поверхность кориума. Учитывая величину плотности кориума ( $\rho=8\text{ г/см}^3$ ), значительная часть рассматриваемых оксидов удовлетворяет этому требованию.

**Взаимодействие с водой.** При анализе возможности использования материалов в условиях мокрых ловушек рассматривается степень растворимости в воде (холодной и горячей) и возможность химических реакций с водой. Отмечается, что растворимость  $\text{CaO}$   $\text{SrO}$  достаточно высока, растворимость  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$  удовлетворительна, а  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  - наиболее подходящие материалы с этой точки зрения.

**Теплопроводность.** Теплопроводность оксидов достаточно низка по сравнению с карбидами, боридами, нитридами. Эта особенность удовлетворяет концепции мокрой ловушки, когда достигается изоляция основания. В случае сухой ловушки должно выноситься максимальное количество тепла через основание, и возможно, в этом случае должны использоваться другие материалы. В диапазоне температур  $20\text{--}2000^\circ\text{C}$  оксиды  $\text{MgO}$  и  $\text{BeO}$  имеют более высокую теплопроводность по сравнению с другими оксидами. Теплопроводность зависит от пористости рассматриваемых материалов. Так для  $\text{BeO}$  при температуре  $50^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности равен  $250\text{ Вт/(м К)}$ , при пористости 20% коэффициент теплопроводности уменьшается до  $125\text{ Вт/(м К)}$ . Увеличение теплопроводности можно достичь на основе создания композитных материалов (смеси оксидов и металлов).

**Совместимость с кориумом.** Рассматривается упрощенный вариант состава кориума, состоящего только из  $\text{UO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ . Наиболее приемлемыми по этому параметру материалами являются  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

**Термомеханическое поведение оксидов.** Рассматривается устойчивость по отношению к термическому удару при падении кориума на защитные материалы ловушки. Известно, что керамика плохо держит тепловые нагрузки. Но при поступлении кориума в ловушку, ситуация упрощается тем, что термический удар работает в обратном направлении, улучшая сопротивление термоудару. Так, для  $\text{ZrO}_2$  критическая разность температур  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  для удара с понижением температуры и около  $900^\circ\text{C}$  в случае нагрузки с повышением температуры. Основная проблема последствий теплового удара - возможность возникновения микротрещин, в которые может проникать расплавленный кориум. При этом может происходить коррозия материала с дальнейшим всплыванием разрушенных частиц на поверхность кориума, в случае используемых материалов с малой плотностью. Для того, чтобы минимизировать высокие механические нагрузки в керамических слоях, должен быть решен вопрос о конструкции, расположении и размерах керамических кирпичей (плиток), а также связанная с этим проблема выбора цементного состава, с помощью которого происходит закрепление керамики.

**Сохранение свойств материалов в течение длительного промежутка времени.** Этот промежуток времени определяется временем жизни ловушки (около 50-60 лет). Если материалы подвергаются воздействию влажности или прямому попаданию воды, возможно образование гидратов, что приводит к изменению объема и возникновению напряжений. Чтобы ограничить эту проблему, предпочтительно использовать материалы с малой пористостью. Рассматривается реализация, где керамические материалы из  $\text{ZrO}_2$  размещены между двумя стальными листами и защищены от воздействия влаги.

На основе проведенного анализа делаются следующие выводы по использованию оксидов в качестве защитных материалов ловушек:

**Мокрая ловушка.** В этом случае более предпочтительным представляется использование  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{UO}_2$  и, возможно, в некоторых условиях  $\text{MgO}$ . Преимущество  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  и  $\text{HfO}_2$ : - высокая плотность, хорошая совместимость с кориумом и хорошее поведение по отношению к воде.  $\text{ZrO}_2$  за исключением плотности, имеет аналогичные свойства. Все эти материалы имеют низкую

теплопроводность и в случае мокрой ловушки, для которой основная цель - защитить основание, эти материалы обеспечивают необходимые требования. Преимущество  $ThO_2$  состоит в отсутствии реакции с кислородом и парами воды при высокой температуре, основной недостаток, как и  $UO_2$ , - его радиоактивность. Для  $MgO$  основная проблема - поведение по отношению к воде.

*Сухая ловушка.* Предполагается, что в качестве защитного материала может использоваться  $MgO$  (хотя его теплопроводность ниже, чем  $BeO$ ), т.к. он более прост в изготовлении и обладает рядом дополнительных преимуществ. Необходимо дополнительно исследовать свойства композитных материалов и рассмотреть возможность использования огнеупорных материалов.

При реализации ловушек особое внимание должно уделяться закреплению керамических материалов и использованию материалов с большой плотностью и малой пористостью.

## 2.4 Краткий обзор экспериментов

В дополнение к упомянутым при описании концепций и реализаций ловушек экспериментам по изучению поведения кориума вне корпуса реактора, приведем список проводимых и планируемых экспериментов по этой тематике.

Экспериментальная программа VULCANO [12] предназначена для изучения поведения кориума в корпусе и вне корпуса реактора, поведения материалов используемых в ловушках, исследование условий, ослабляющих последствия выхода кориума во внекорпусное пространство. Группы экспериментов VULCANO-C направлены на изучение процессов в корпусе реактора, и VULCANO-E - на исследование растекания кориума и заливки водой. В первой серии экспериментов по изучению поведения кориума вне корпуса реактора (VULCANO-E-30) используется кориум в количестве от 30 до 100 кг. Исследуются процессы растекания, характеристики кориума и поведение материалов ловушки. Крупномасштабные эксперименты с 500кг кориума (VULCANO-E-500) проводятся с целью изучения процесса растекания в зависимости от скорости поступления кориума, течения в сухой или предварительно залитой ловушке, возможности охлаждения заливкой сверху, поведения материалов и конструкций, риска взаимодействия кориума с водой. Измеряемые в эксперименте величины: суммарная мощность в расплаве, температуры на поверхности и внутри расплава, толщины корок и толщина растекающегося слоя, скорость растекания, радиационный тепловой поток, скорость абляции основания, выход газов.

Для исследования поведения кориума в корпусе и вне корпуса реактора предназначена экспериментальная программа на основе модифицированной установки FARO [11]. В экспериментах используется 350 кг расплавленного кориума с различным составом ( $UO_2$ ,  $Zr$ ,  $ZrO_2$ ,  $SS$ ) в условиях воздействия на внутрикорпусные и внекорпусные конструкции. В рамках программы исследуются поведение системы удержания при первичном воздействии кориума (падение большой массы, стекание струями с учетом образования корок) и растекании кориума по поверхности; поведение кориума при долговременном удержании и поведение конструкционных материалов при охлаждении водой снизу посредством естественной конвекции воды; изучение эффекта заливки водой сверху, включая возможность возникновения энергетического парового взрыва.

Для того, чтобы идентифицировать доминирующие процессы при заливке снизу и прохождения воды через расплав в концепции ловушки [8], проведены эксперименты по растеканию имитаторов топлива: расплава пластика и расплава припоя. Показано, что фрагментация топлива достигается при соответствующем выборе давления, под которым подается вода, и соответствующих размеров сечения заглушек. В экспериментах среднего масштаба с термитными расплавами исследовались процессы испарения воды при прохождении через горячий расплав, изучалась возможность возникновения парового взрыва. Для исследования процессов при подаче воды в условиях интенсивного взаимодействия кориума с водой и возможность парового взрыва проводятся эксперименты COMET-T на основе установки BETA [17]. Используются термитные смеси с изоляционными стенками из  $MgO$ . Геометрические характеристики установки следующие: рассматривается цилиндр высотой 100 см и радиусом 25 см, снизу цилиндра расположена стальная плита, покрытая слоем бетона. В основании находятся 9 каналов с легкоплавкими заглушками. В результате термитной реакции получается 30 кг оксидов ( $Al_2O_3 + CaO$ ) и 20кг расплава железа при температуре 2200К. Параметры, варьируемые в эксперименте: давление, под которым подается вода, количество и диаметр каналов, высота слоя бетона и слоя кориума. Для обоснования и оптимизации концепции ловушки проводятся эксперименты COMET-N с индукционным нагревом расплава на модернизированной установке BETA.

Эксперименты KATS (Германия)[40] направлены на изучение растекания термитных расплавов. В опытах используется 300 кг стратифицированных термитных смесей: 150 кг железа и 150 кг алюминия. Максимальная температура расплава в экспериментах достигала 2450С, средняя температура- 2100С. Растекание происходит в одномерном канале, сухом или заполненном водой.

Экспериментальная программа SULTAN [13] ориентирована на исследование теплопередачи в топливе, содержащемся в нижней части корпуса реактора или устройствах удержания топлива вне корпуса за счет циркуляции кипящей воды. Рассматривается процесс кипения на поверхностях с различными углами наклона, при различных давлениях.

Среди экспериментов по изучению стадии растекания можно выделить работы [18] по изучению растекания симулянтов топлива по горизонтальному основанию при наличии воды, серия экспериментов [19] по моделированию растекания железо-алюминиевой термитной смеси, эксперименты [15] по растеканию воды в масштабной геометрии контейнента реактора MARK-1. Заявлен проект экспериментальной программы [21], предназначенной для изучения поведения расплавленного топлива в контейненте реактора. Одной из основных целей этой программы является тестирование кода MELTSPREAD [22] - нестационарного одномерного кода для моделирования растекания высокотемпературного расплава по бетонному или металлическому основанию.

Ведутся работы по программе CORINE [23,24], включающей в себя серию экспериментов по изучению гидродинамических и тепловых характеристик растекающихся жидкостей. Цель эксперимента - изучение стадии растекания расплавленного топлива в ходе тяжелой аварии с плавлением активной зоны и получение материала для валидации компьютерных кодов. Программа включает три группы экспериментов. Эксперименты первой группы направлены на изучение инерциально-гравитационных и инерциально-вязких режимов течения исследуемых типов жидкости. В этой серии экспериментов основными варьируемыми параметрами являются скорость поступления жидкости и вязкость (вода с глицерином в различной пропорции). В экспериментах второго и третьего типа исследуются процессы образования корок на подложке, скорости разрушения корок, течение в среде охладителя (воде), влияние барботажа газов.

### **3. Предварительный анализ режимов работы ловушки с плоским дном с защитным слоем из диоксидциркониевого бетона**

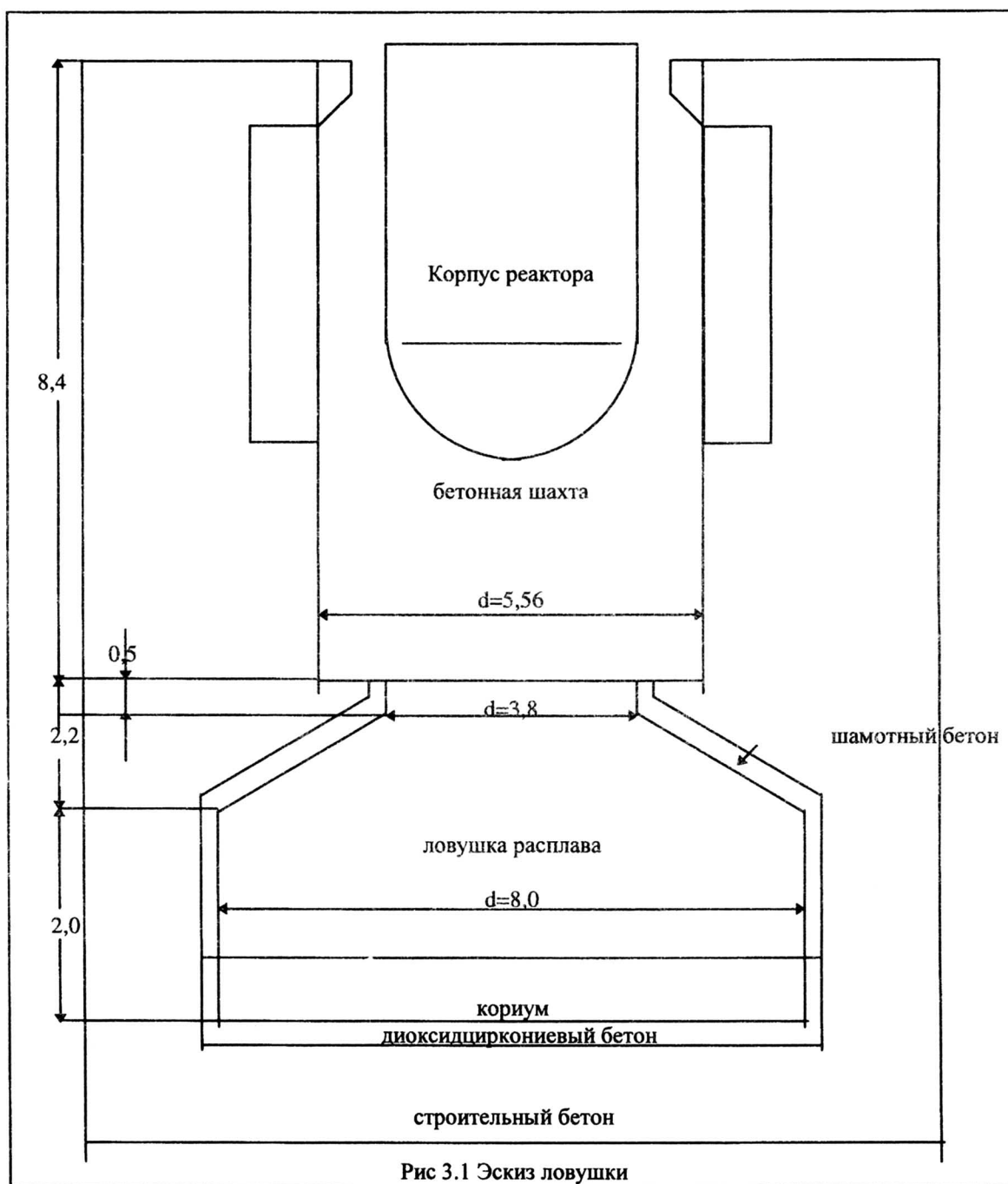
Рассматривается конструкция ловушки плоским дном с защитным слоем из диоксидциркониевого бетона. Приводятся результаты численного моделирования теплового режима в ловушке при условии быстрого растекания расплавленного кориума по основанию.

#### **3.1 Конструкция ловушки**

Для удержания расплавленных топливосодержащих масс во внекорпусном пространстве после аварии с разрушением корпуса реактора рассматривается возможность использования конструкции ловушки [48] с плоским дном, общей площадью растекания  $80-100 \text{ м}^2$ , располагаемой под реактором. Для защиты от механических ударов, смягчения термоударов, защиты от случайного попадания воды до начала поступления кориума, ловушка закрывается сверху слоем металла. Для обеспечения эффективного стационарного отвода тепла после равномерного растекания кориума, предполагается заливка поверхности расплава водой. Поскольку за время между выпадением расплава в ловушку и заливкой его водой возможен сильный разогрев окружающих стен и перекрытий за счет излучения от расплава, предусматривается их тепловая защита огнеупорными материалами.

Дно и стенки ловушки выполняются из жаропрочного материала на основе диоксида циркония - диоксидциркониевого гидратационного твердения бетона (ЦГБ) [41-47], разработанного в НИЦ ТИВ ОИВТ РАН. Такой бетон представляет собой двухфазную зернистую керамику каркасного строения с пористостью около 20 %, содержащую 94 % мас. диоксида циркония, стабилизированного иттрием. Жаропрочные свойства бетона (температура плавления бетона - 2900К, кипения 4600К), приемлемая стоимость и технологичность изготовления позволяют использовать его в качестве защитного материала для покрытия внутренней поверхности ловушки. Проведено исследование теплофизических характеристик бетона (процесса твердения, дегидратации, высокотемпературной прочности, теплопроводности, термостойкости). Бетон прошел успешное испытание в МГД-установках с температурой продуктов сгорания 2900К. Использование для создания ловушки бетонной технологии существенно упрощает ее изготовление и существенно расширяет возможности выбора ее конструкции по сравнению с керамикой, которая как и другие оксидные материалы, малodeформируема, соответственно хрупка и имеет ограниченную термостойкость, дорогостояща. При использовании диоксидциркониевого бетона не исключается возможность использования в ней и керамических

элементов. Проведенные исследования диоксидциркониевого бетона показали, что использование этого материала перспективно для создания ловушки расплава кориума, работающей в условиях пассивного охлаждения.



Эскиз ловушки изображен на рис. 3.1 Ловушка представляет собой полость под корпусом реактора радиусом 5м. Дно и стенки ловушки на высоте 1м покрыты жаропрочным бетоном на основе диоксида циркония. Верхняя часть боковых стенок и потолок облицованы шамотным бетоном. Между жаропрочной облицовкой и строительным бетоном проложены охлаждающие трубы с температурой проточной воды 80С.

Корпус реактора имеет днище эллиптической формы. Толщина днища и вертикальных стен 20 см. Корпус изготовлен из нержавеющей стали.

Рассматривается сценарий глобальной аварии корпуса, когда на дно ловушки выпадает около 180 т расплава кориума ( $UO_2$ ,  $SS$ ,  $Zr$ ,  $ZrO_2$ ), который равномерно растекается по поверхности ловушки.

### 3.2 Оценки теплового поведения расплавленного кориума

Для обоснования концепции используемой ловушки необходимо рассмотрение режимов тепловых нагрузок на различных временных интервалах:

- период от начала выпадения кориума до момента заливки водой, характеризующийся интенсивным нагревом элементов ловушки, шахты и корпуса реактора за счет переизлучения с поверхности расплавленного кориума
- тепловой режим в течение нескольких часов после заливки водой
- тепловое поведение кориума при долговременном удержании

Ниже приведены результаты расчетов стадий теплового взаимодействия расплавленного кориума со стенками ловушки и бетонной шахты и этапа последующего взаимодействия. Проведены численные расчеты вариантов с варьированием основных параметров, оказывающих определяющее влияние на процесс взаимодействия.

#### 3.2.1 Расчет теплового взаимодействия расплавленного кориума со стенками ловушки и бетонной шахты.

Рассматривается процесс теплового взаимодействия расплавленного кориума со стенками ловушки и бетонной шахты в период от начала выпадения кориума до момента заливки водой, характеризующийся интенсивным нагревом элементов ловушки, шахты и корпуса реактора за счет переизлучения с поверхности расплавленного кориума (время порядка 1-1.5 часа)

Расчетная область включает в себя расплав, днище и стенки ловушки, выполненные из жаропрочного бетона, верхнюю облицовку из шамотного бетона, стены из строительного бетона, корпус реактора из нержавеющей стали.

Предполагается, что в момент выпадения кориума на поверхность ловушки выполнены следующие начальные условия.

- температура выпавшего кориума - 2500C
- температура бетонной шахты и самой ловушки - 30C
- температура корпуса реактора - 700C

На верхней границе области заданы адиабатические граничные условия. На внешней и нижней границах бетонной шахты - условие конвективного и радиационного теплообмена.

Свойства материалов используемые в расчетах, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Свойства материалов

| Свойства<br>Материалы    | Плотность<br>кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент<br>теплопроводности<br>Вт/(м К) | Удельная<br>теплоемкость<br>Дж/(кг К) | Температура<br>разложения<br>К | Энтальпия<br>разложения<br>(плавления)<br>кДж/кг |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| Диоксидциркониевый бетон | 4400                           | 1.2                                         | 450                                   | 2900                           | 400                                              |
| Шамотный бетон           | 1900                           | 1.3                                         | 330                                   | 1800                           | 500                                              |
| Строительный бетон       | 2400                           | 1.9                                         | 840                                   | 1653                           | 2282                                             |
| Сталь                    | 7880                           | 30                                          | 550                                   | 1800                           | 250                                              |

Комплекс программ для расчета теплового режима ловушки включает в себя следующие модели

- теплопроводность в расплаве, бетоне и окружающих конструкциях
- переизлучение в полости, образованной поверхностью расплава и окружающим поверхностями
- модель разложения бетона

Нагрев стенок ловушки и корпуса реактора в основном происходит за счет теплопередачи излучением с поверхности кориума. Стенки всей конструкции образуют полость сложной формы. Модель теплообмена излучением между парами элементов поверхности полости включена в общий алгоритм расчета теплопередачи. Для расчета используется матрица угловых коэффициентов излучения, учитывающих взаиморасположение и площади элементов, составляющих замкнутую или незамкнутую полость. Границы полости в данной задаче включают днище реактора, стены шахты, горловину, границы ловушки и поверхность кориума, всего  $N$  элементов (кольцевых граничных сегментов):

$$\varphi_{12}=Q_{12}/Q_1, \varphi_{21}=Q_{21}/Q_2$$

где  $Q_{12}$  - энергия, излучаемая с площадки 2 на площадку 1,  $Q_{21}$  - энергия, излучаемая с площадки 1 на площадку 2. Матрица размером  $N \times N$  строится по специальной методике и вводится вместе с остальными данными в начале расчета.

Когда полость имеет вид узкой щели, как это имеет место между корпусом реактора и стенками шахты, применяется более простой алгоритм расчета теплопередачи через нелинейные внутренние граничные условия, задаваемые попарно между двумя соответственными элементами с каждой стороны:

$$q = \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4),$$

где  $q$  - поток тепла между площадками 1 и 2,  $\varepsilon_{12}$  - эффективный коэффициент переизлучения,  $\sigma$  - постоянная Стефана--Больцмана.

Температуры солидус и ликвидус кориума брались равными 1900 С и 2400 С соответственно. Для учета вероятных процессов конвекции в расплаве при температурах, превышающих температуру плавления кориума, его теплопроводность в области расплавления нелинейно возрастала в 3 -4 раза.

Свойства для бетонов брались в соответствии с данными таблицы 6.1. Принималось, что энтальпия разложения бетона соответствует интегралу

$$H = \int_{T_0}^{T_d} c_p(T) dT$$

от начальной температуры  $T_0$  до температуры полного разрушения  $T_d$ . (энтальпия разложения  $H=5 \cdot 10^5$  Дж/кг )

В качестве основных характеристик процесса взаимодействия рассматривалась динамика следующих величин:

- Распределение температур в расплаве и окружающих конструкциях
- Температура на поверхности кориума
- Температура на границе кориум/диоксидциркониевый бетон
- Температура на границе диоксидциркониевый бетон/строительный бетон
- Температура на вертикальных стенах: диоксидциркониевый бетон, шамотный бетон
- Температура на сводах ловушки (облицовка шамотным бетоном)
- Температура на днище и вертикальных стенах корпуса
- Эрозия стенок из шамотного и строительного бетона
- Тепловые потоки на поверхности расплава, стенках ловушки, корпусе

### 3.2.2 Результаты расчетов.

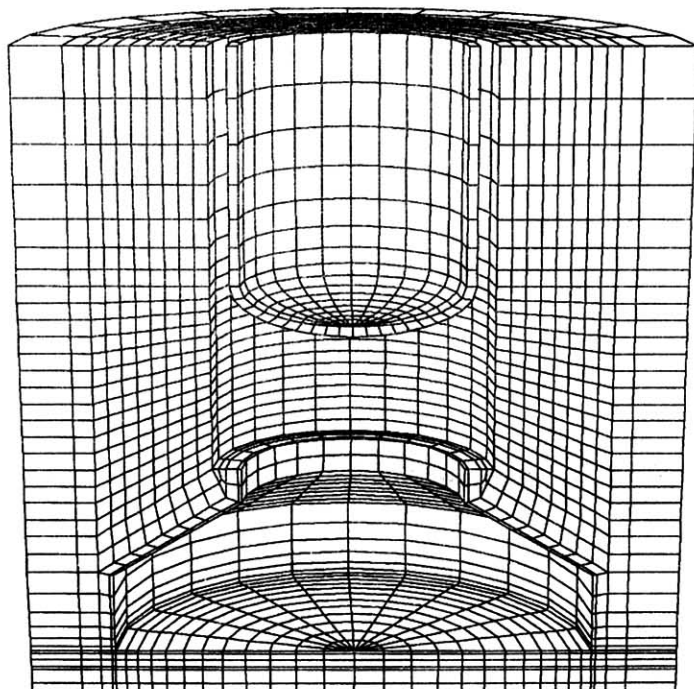
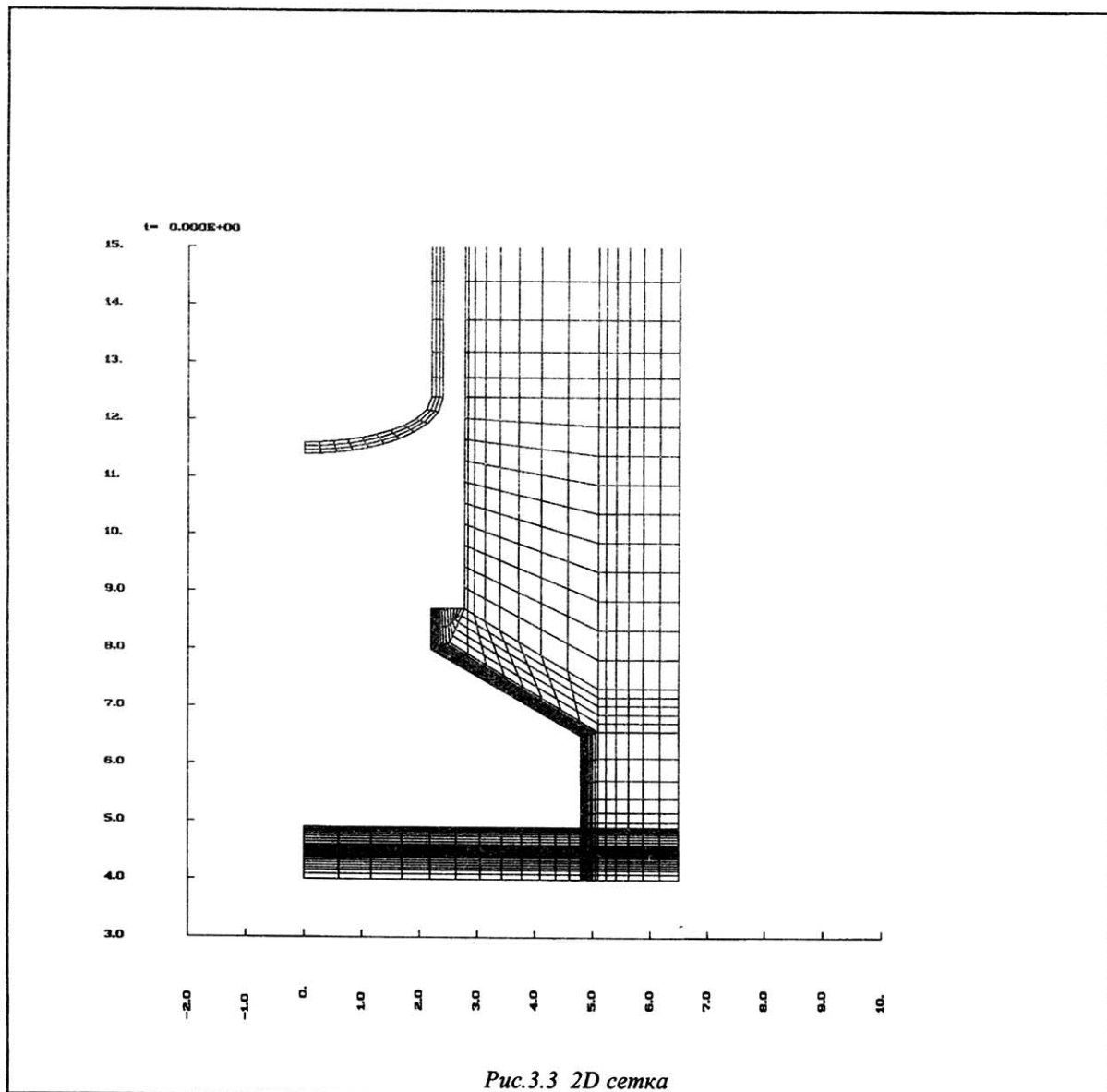


Рис. 3.2 3D сетка

После поступления в ловушку кориума объемом порядка  $22 \text{ м}^3$  и растекания по всей доступной поверхности (около  $80 \text{ м}^2$ ) равномерным слоем ( $0.3 \text{ м}$ ), за счет лучистого теплообмена происходит нагревание окружающих конструкций и охлаждение поверхности кориума. Температура кориума определяется балансом между внутренним тепловыделением и потоком тепла, уносимым с поверхности расплава, который зависит, в свою очередь, от температур окружения.

В качестве кривой тепловыделения использовалась кривая ANS [26]. Принято, что остаточное тепловыделение реактора  $3200 \text{ мВт}$  составляет  $1\%$  мощности, т.е. около  $30 \text{ мВт}$ . С учетом величины объема выпавшего расплава, внутреннее удельное тепловыделение в начальный момент времени составляет около  $1.4 \text{ МВт/м}^3$ .

3D дискретизация рассчитываемой установки, которая здесь использовалась для построения матрицы угловых коэффициентов излучения, и 2D расчетная сетка показаны на рис. 6.2 и 6.3.



Результаты расчетов температурного режима расплава, стен ловушки и бетонной шахты, корпуса реактора приведены на рис. 3.4-3.15. Процесс взаимодействия рассмотрен до момента заливки водой. Предполагается, что это время может составлять порядка 1-1.5 часа с момента выпадения кориума.

По графикам зависимости от времени в кориуме и в бетоне можно выделить две стадии процесса теплообмена в ловушке:

- $t=0-700\text{с}$  - спад температуры поверхности кориума, сначала быстрый, а затем медленный (рис.3.6), установление температуры на контактных границах, образование "корки" на поверхности кориума (слой ко с температурой в интервале плавления и ниже), быстрое ( $t=0-10\text{с}$ ) установление температур стенок полости ловушки на квазистационарном уровне;
- медленный нагрев поверхности кориума и стенок ловушки ( $t=700-5400\text{с}$ ). Замедление роста температуры стенок полости после  $t=400\text{с}$  по-видимому связано с началом плавления поверхности кориума. В корпусе реактора этот момент совпал с началом плавления стали.  $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

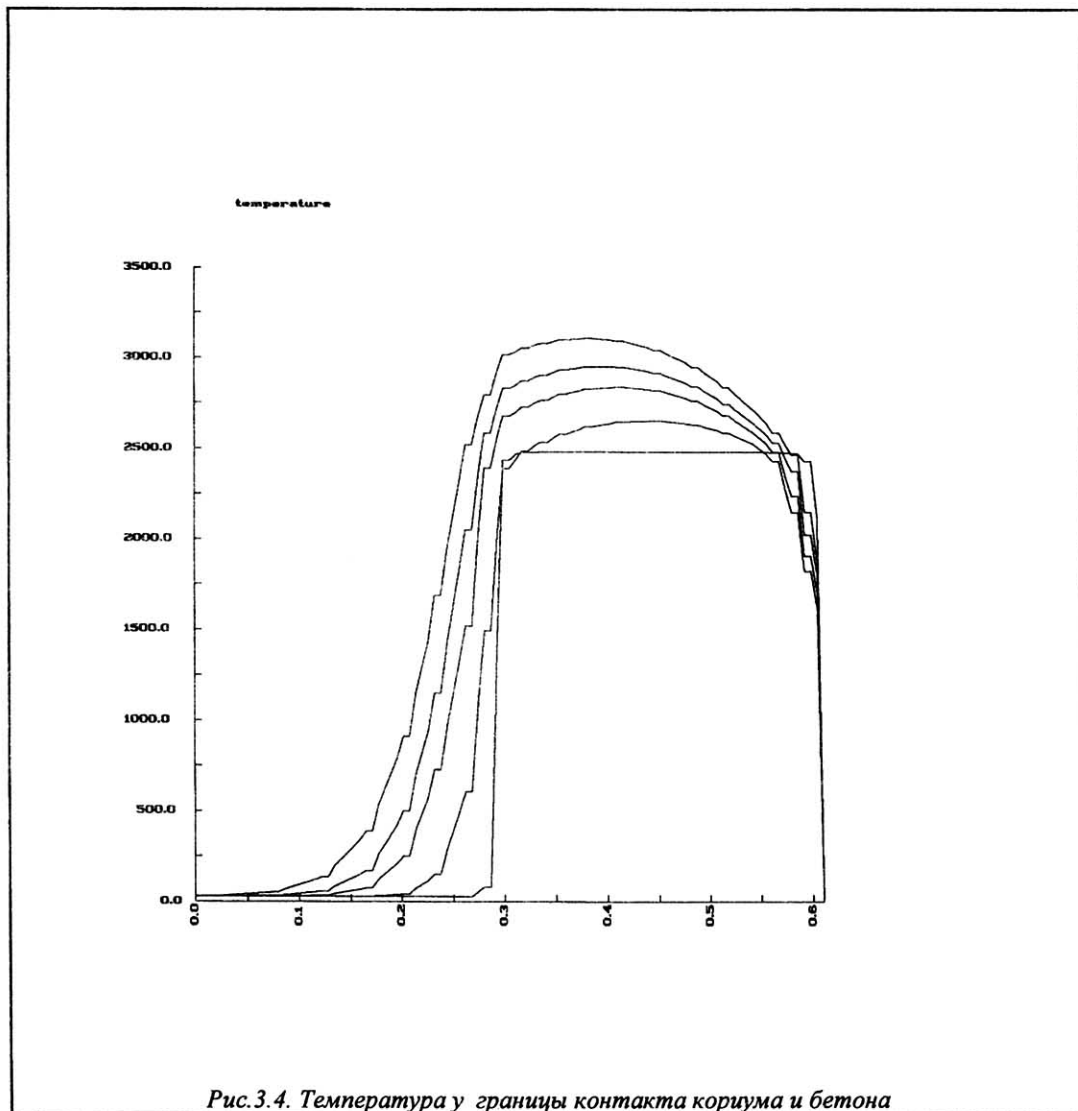


Рис.3.4. Температура у границы контакта кориума и бетона

На рис. 3.4 даны результаты расчета профиля распределения температуры по вертикали в кориуме и прилегающем снизу бетоне, взятые на оси области в моменты времени  $t=10\text{с}$ ,  $t=800\text{с}$ ,  $t=2400\text{с}$ ,  $t=3600\text{с}$ ,  $t=5400\text{с}$ . Температуры здесь и везде далее даются в  $^{\circ}\text{C}$ . Минимальный интервал на графиках зависимостей от времени  $10\text{с}$ .

Ниже приведены результаты расчетов температуры в кориуме, шамотном и строительном бетонах, тепловых потоках на границах материалов.

**Теплообмен в кориуме.** Температура и поток тепла с поверхности кориума являются результатом нелинейных процессов излучения, затвердевания/плавления и конвекции при постоянном объемном тепловыделении. На рис. 3.5-3.7 показано распределение температур в кориуме момент времени  $t=3000c$ , динамика изменения температур на верхней и нижней границах, тепловой поток с поверхности кориума. На минимальную (по времени) температуру поверхности сильное влияние оказывает теплосъем через горловину в относительно холодную верхнюю полость шахты.

Теплосодержание кориума в начальный момент времени составляет около  $2 \cdot 10^{11} Дж$ , полная мощность тепловыделения  $3.1 \cdot 10^7 Вт$ . Результаты расчетов показывают, что мощность теплового излучения с поверхности кориума в среду с температурой  $0-1000C$  первые несколько секунд составляет порядка  $7 \cdot 10^7 Вт$ . Средняя мощность теплового излучения с поверхности кориума на стадии 1 равна  $2.2 \cdot 10^7 Вт$ . Таким образом, кориум остывает как целое только в первые секунды, а затем, несмотря на падение температуры на верхней границе, он начинает нагреваться (ср. профили на рис.3.6), причем на стадии 2 с его поверхности уносится излучением около половины выделяемого тепла. За 1 час выделяется тепло, равное начальному теплосодержанию кориума, и половина его идет на дальнейший разогрев кориума и нижележащего бетона.

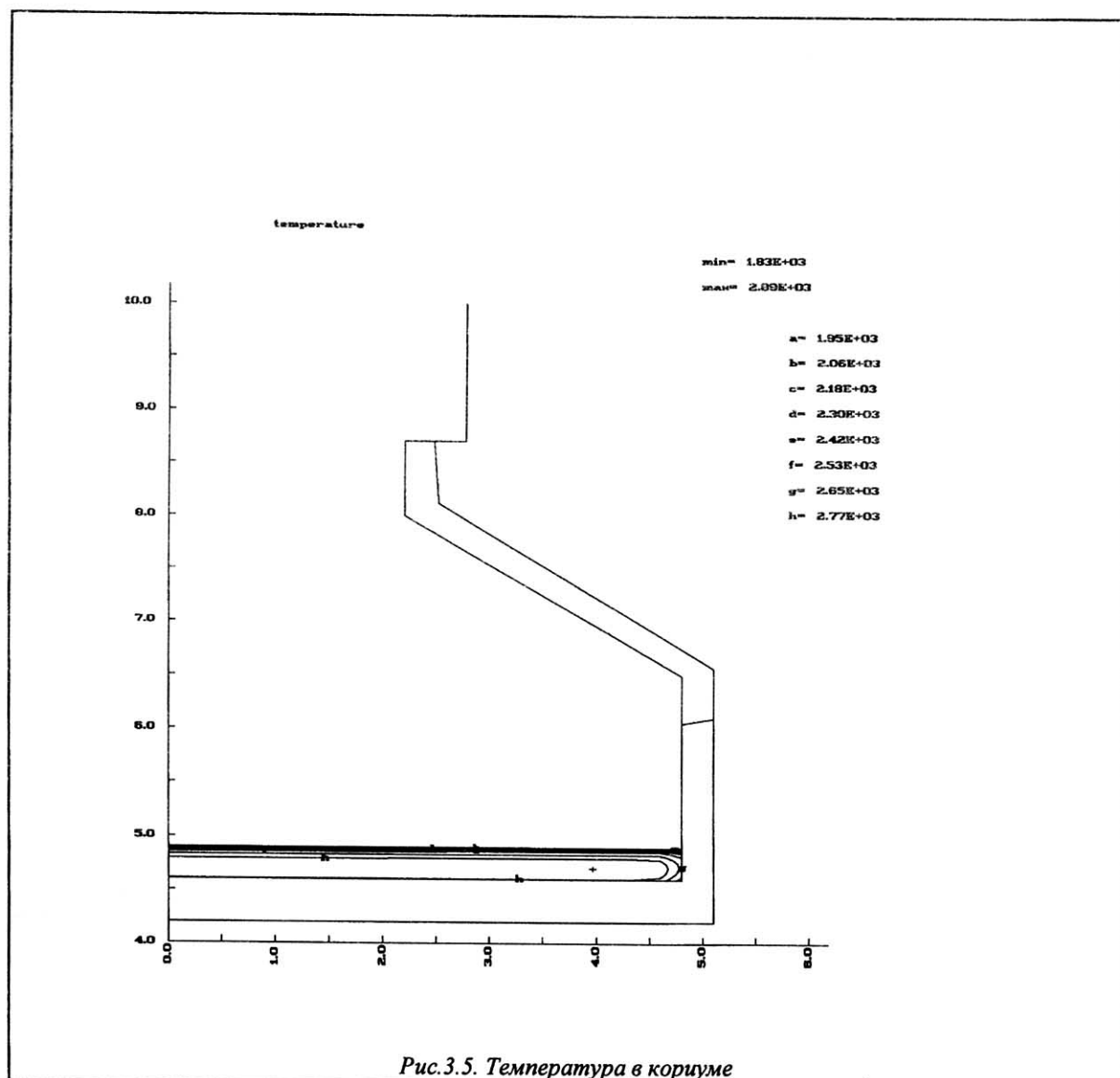


Рис.3.5. Температура в кориуме

**Диоксидциркониевый и шамотный бетоны..** Рис. 3.8 демонстрирует динамику изменения температуры в диоксидциркониевом бетоне на уровне 2 см от поверхности контакта с кориумом. Температура за первый час взаимодействия не превышает 2500С.

В условиях модели нагрева и разрушения бетона, описанной выше, профиль температуры по толщине шамотного бетона имеет вид, показанный на рис. 3.9. Продвижение границы разложения от поверхности полости вглубь бетона идет с практически постоянной скоростью (с учетом грубости сетки), равной  $7 \cdot 10^{-5}$  м/с. Она определяется потоком тепла и энтальпией  $H$  разрушения бетона. Для оценки скорости движения фронта может быть использована так называемая модель прямого разложения, когда предполагается, что весь тепловой поток идет только на разрушение бетона. В этом случае, скорость разложения  $v$  определяется из соотношения:

$$v = q / (\rho H),$$

где  $q$  - поток тепла, поступающий в бетон. Эта величина быстро принимает стационарное значение (см. зависимость от времени на рис.3.11)  $q = 0.7 - 0.8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Отсюда получаем оценку скорости  $v = 7 - 8 \cdot 10^{-5}$  м/с, совпадающую с численным результатом. Время проплавления 0.3м бетона равно 3800 - 4300 с.

**Температура в корпусе реактора и бетонной шахте.** В принимаемой модели теплосъем с корпуса практически отсутствует (теплосъем на стенки бетонной шахты мал из-за низкой теплопроводности бетона). В этих условиях корпус реактора постоянно нагревается, причем с высокой скоростью (рис.3.11), достигая температуры плавления за время порядка 1 часа. При этом температура на поверхности нижележащей части шахты достигает 1450 С, а затем ( $t = 5400$ с) подрастает до 1650С.

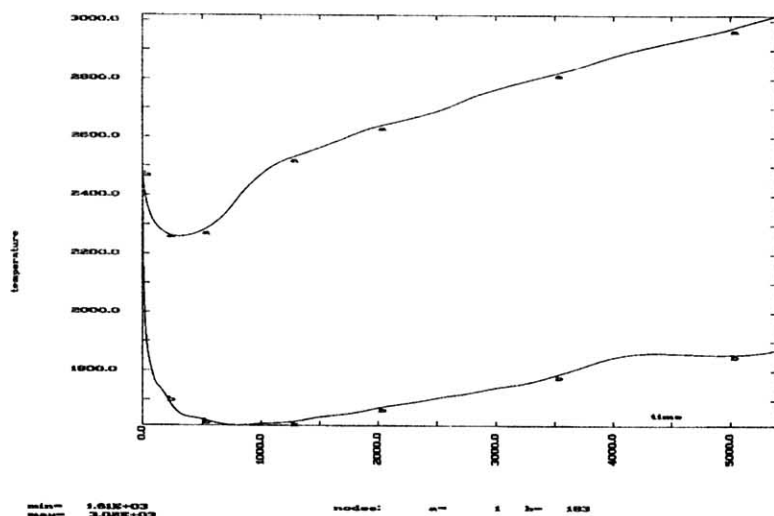
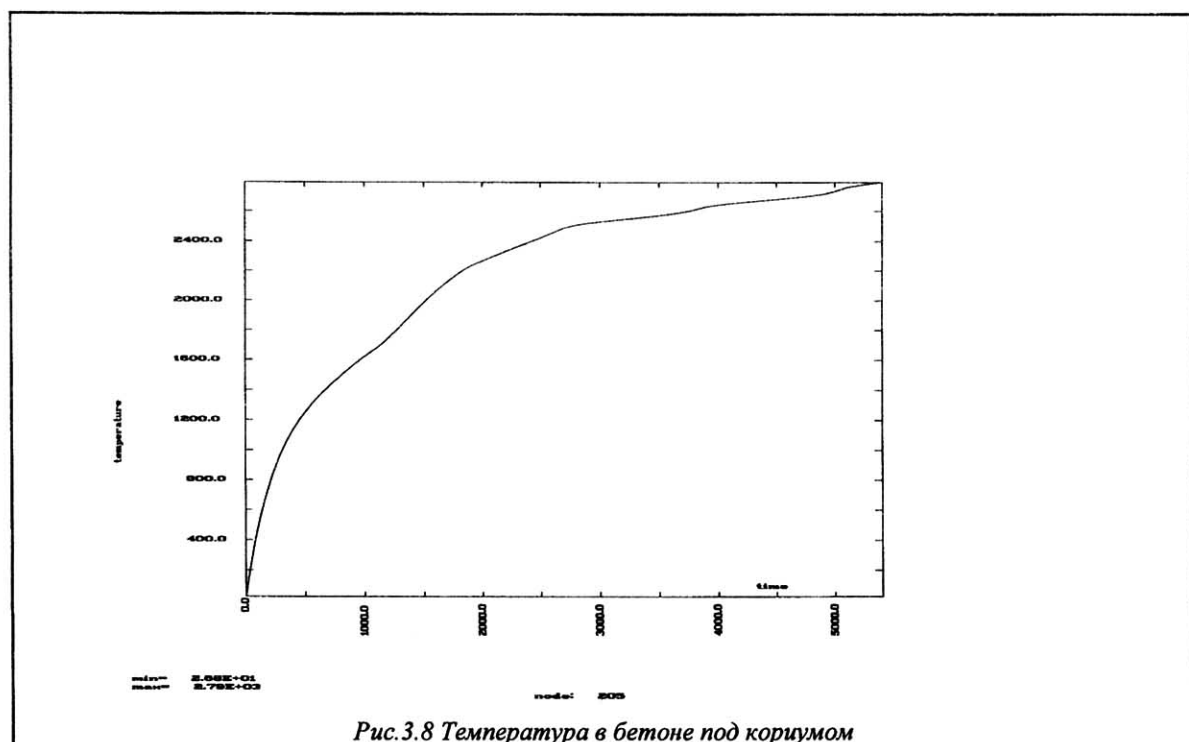
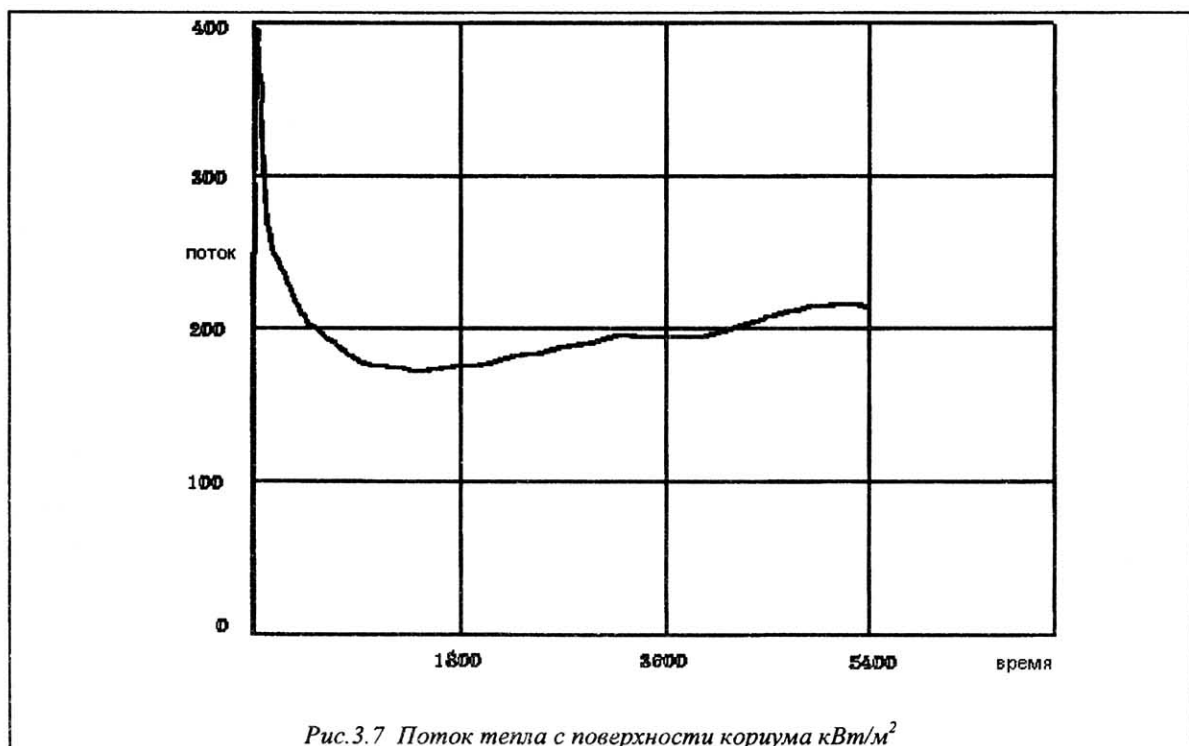


Рис.3.6 Температура верхней и нижней границы кориума



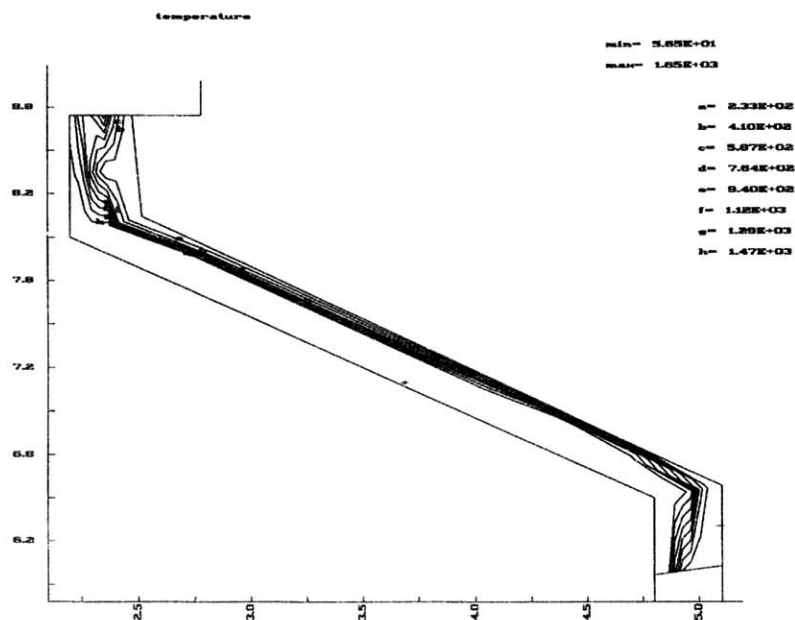


Рис.3.9. Температура в шамотном бетоне

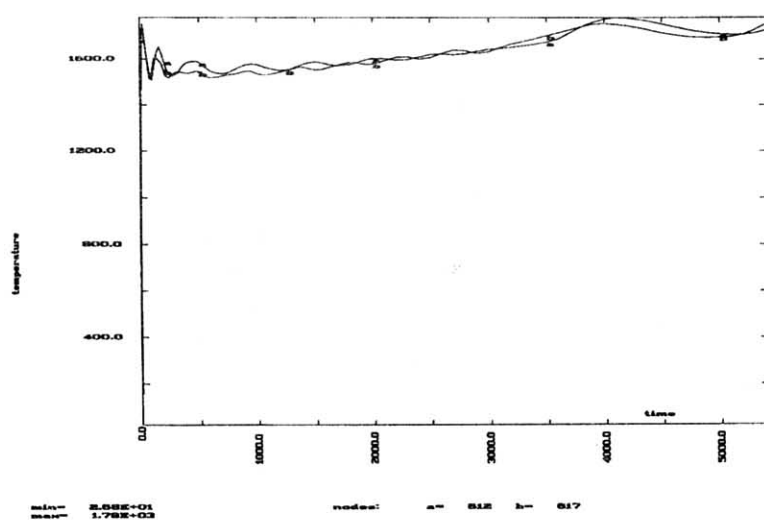


Рис.3.10 Температура в шамотном бетоне на границе полости

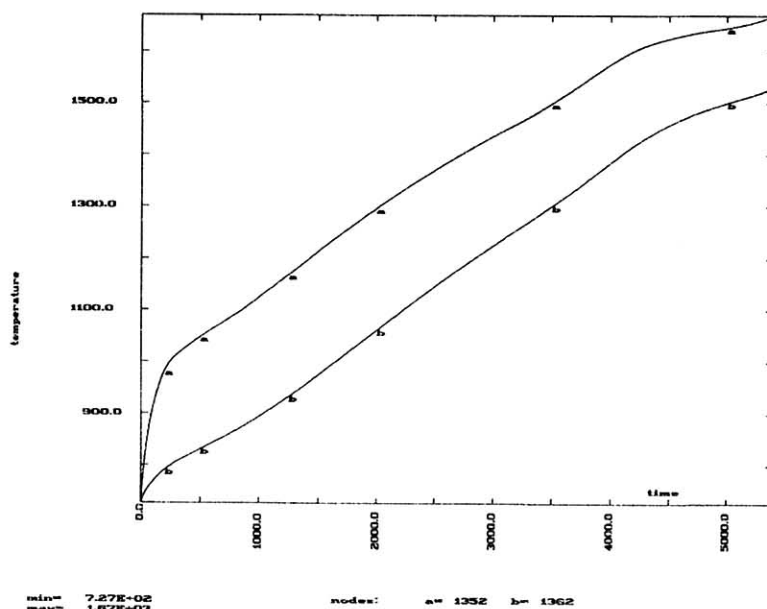


Рис.3.11. Температура в корпусе в боковой и нижней части

Расчеты теплового поведения стенки шамотного бетона на подробной сетке с использованием 1D модели. Численное моделирование теплового режима устройства ловушки на базе 2D тепловой модели с учетом переизлучения позволяет оценить величину теплового потока на своды ловушки из шамотного бетона. Как показывают расчеты, величина теплового потока составляет около  $0.8 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Используя эту величину в качестве параметра, можно более детально рассмотреть процесс разрушения шамотного бетона и оценить характерное время разложения облицовки (0.3м) и возникающий градиент температур в бетоне на более подробных временной и пространственной сетках.

Численные оценки задачи о распространении тепла в бетоне и разложении бетона проводились на базе тепловой модели в одномерном приближении с граничным условием в виде заданного теплового потока на границе бетона. Расчеты проводились на пространственной сетке с числом узлов 400 в направлении движения фронта плавления и временным шагом 0.1 с.

На рис. 3.12 показано распределение температур в бетоне на момент времени 3160 сек. Видно, что в силу плохой проводимости бетона, зона градиента температур в диапазоне 1000-2092К достаточно узкая и составляет около 3см (при исходных размерах слоя 0.3м), а область перепада температур 1500-2000К сконцентрирована на расстоянии порядка 1-1.5 см и почти не меняется во времени. Таким образом, начиная с некоторого момента практически все тепло затрачивается на разложение бетона. В этом случае может быть использована модель прямого разложения бетона.

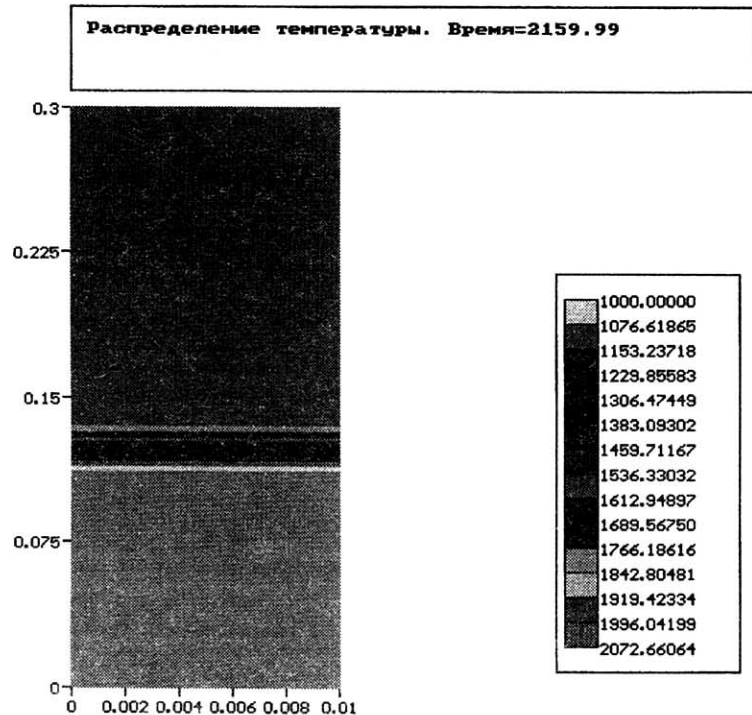


Рис. 3.12 Распределение температур в бетоне

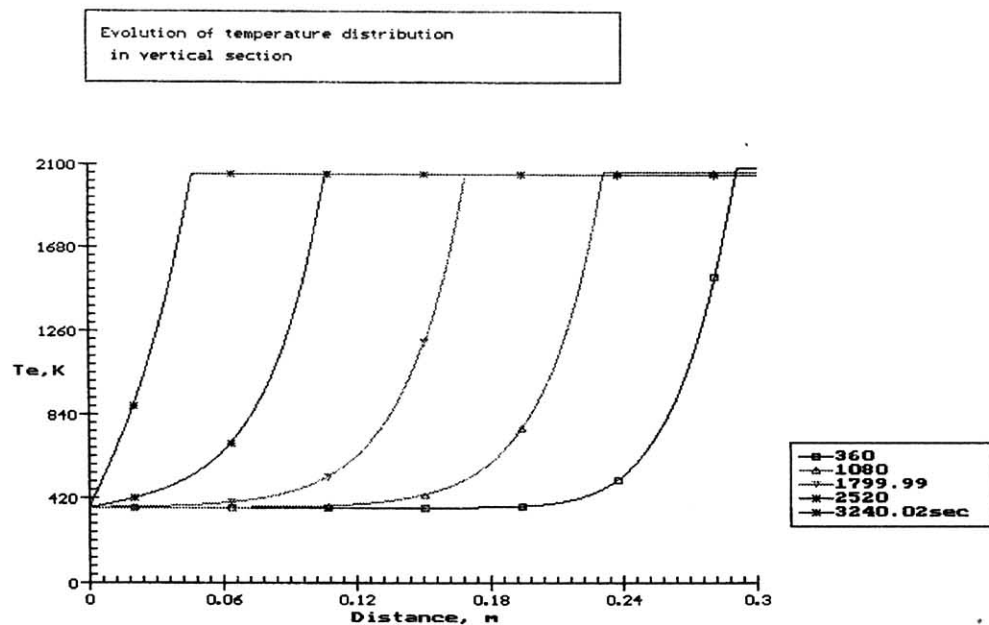


Рис. 3.13 Распределение температур в вертикальном сечении

Эволюция температуры в бетоне для пяти моментов времени приведена на графике 3.13. Фронт движется с близкой к постоянной скоростью. Оценка скорости движения фронта разложения, исходя из полученной зависимости, дает величину близкую к оценке по формуле прямого разложения - за 1ч разлагается весь защитный слой толщиной 0.3 м.

Таким образом, за времена порядка 1 часа происходит разложение слоя шамотного бетона на сводах ловушки. Вслед за ним начинает разлагаться строительный бетон, находящийся непосредственно за шамотной облицовкой.

### 3.2.3 Основные результаты расчета стадии разогрева ловушки.

Результаты проведенных расчетов теплового режима ловушки показывают, что в заданных геометрических условиях и принятом сценарии выпадения кориума, в течение короткого времени за счет переизлучения с поверхности кориума происходит быстрый разогрев элементов конструкции ловушки, шахты и корпуса реактора. Свода ловушки из шамотного бетона довольно быстро (минуты) достигают температуры разложения бетона и начинается разложение бетона со скоростью 0.25м/ч.

В течение первых 20 мин поверхность кориума охлаждается до температур 1600С, после чего начинает возрастать и к 1 часу достигает уровня 1800С. При этом температура на дне кориума возрастает до 2700С. В дальнейшем температура кориума продолжает возрастать. Вблизи верхней излучающей границы кориума имеется слой с температурой, лежащей ниже температуры плавления кориума, что можно интерпретировать как наличие корки, образующейся за счет теплосъема излучением при высокой температуре. На углах и поверхности расплава температура кориума ниже солидуса. Можно предположить, что в геометрии, например, 4-угольной ловушки теплосъем с периферии (с углов) в среднем будет еще выше и среди конструкций с плоским дном различной формы рассмотренная осесимметричная конфигурация дает самые высокие температуры.

Корпус реактора также прогревается достаточно быстро: днище корпуса начинает плавиться к моменту времени  $t=3600$ , температура на вертикальной части корпуса к этому времени ниже и составляет около 1300С. Плавление вертикальной части начинается к 1.5 часа после выпадения кориума.

### 3.3 Теплоотвод за счет кипения воды

Для оценки работы ловушки на этапе после заливки водой рассмотрим задачу в постановке, когда над горизонтальным слоем кориума расположен слой воды, и теплопередача с верхней поверхности кориума осуществляется за счет кипения.

Для описания кривой кипения - зависимости теплового потока  $q$  от разности температур  $T_u - T_{sat}$ , где  $T_u$  - температура верхней поверхности кориума,  $T_{sat}$  - температура кипения воды при давлении в ловушке, можно использовать известные корреляции (например, [49]). Так, в режиме пузырькового кипения (тепловой поток меньше критического) зависимость  $q$  от  $T_u$  записывается следующим образом:

$$q = q_{CHF} \left[ \frac{T_u - T_{sat}}{\Delta T_{CHF}} \right]^{3.03}, \quad (3.1)$$

где критический тепловой поток  $q_{CHF}$  и разность температур  $T_u - T_{sat}$ , соответствующие критическому тепловому потоку, определяются из следующих эмпирических соотношений:

$$q_{CHF} = 150 \cdot 10^2 (10P)^{0.415} / (1 + 5.97 \cdot 10^{-3} (10P)^{1.117}),$$

$$\Delta T_{CHF} = 171 (10P)^{0.894} / (1 + 7.58 \cdot 10^{-3} (10P)^{0.965}). \quad (3.2)$$

После области переходного кипения за точкой Лайденфроста (точка минимума теплового потока) начинается режим пленочного кипения. Ввиду больших значений температуры верхней поверхности кориума  $T_u$  кипение воды над кориумом происходит в этом режиме. Тепловой поток в этой области

складывается из двух слагаемых: конвективного и радиационного тепловых потоков, так что для полного теплового потока  $q$  мы имеем соотношение

$$q = q_c \left[ \frac{q_c}{q} \right]^{1/3} + q_{rad}, \quad (3.3)$$

где  $q_{rad}$  - радиационный тепловой поток через паровой слой над верхней границей кориума,  $q_c$  - конвективный тепловой поток в отсутствие радиационного потока. Поскольку конвективный тепловой поток пропорционален  $d^3$ , где  $d$  - толщина парового слоя, а толщина парового слоя  $d$ , в свою очередь, пропорциональна  $q^{1/3}$ , где  $q$  - полный тепловой поток, то отсюда следует вид зависимости (3.3), где первый член в правой части представляет собой конвективный тепловой поток в присутствии радиационного.

Для параметра  $q_c$  мы имеем соотношение

$$q_c = q_{cL} \left[ \frac{T_u - T_{sat}}{\Delta T_L} \right]^{3/4},$$

где конвективный тепловой поток в точке Лайденфроста  $q_{cL}$  и разность температур  $T_u - T_{sat}$  в этой точке определяются из

$$q_{cL} = 1.88 (10P)^{0.894} / (1 + 7.58 \cdot 10^{-3} (10P)^{0.956}),$$

$$\Delta T_L = 85.6 (10P)^{0.848} / (1 + 1.38 \cdot 10^{-1} (10P)^{0.0750}).$$

Радиационный тепловой поток равен

$$q_{rad} = \sigma \epsilon_{uw} (T_u^4 - T_{sat}^4),$$

где  $\epsilon_{uw}$  - приведенный коэффициент серости с учетом переотражений между поверхностями кориума и воды;  $\epsilon_{uw} = (1/\epsilon_u + 1/\epsilon_w - 1)^{-1}$ ;  $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_w$  - излучательные способности верхней поверхности.

Сделаем оценку суммарного теплового потока при кипении воды для температуры поверхности кориума  $T_u = 2000K$ . Используя выражения (3.3), получим:  $q \approx 80 \text{ Вт/см}^2$ .

Таблица 3.2 Значения суммарного теплового потока  $q$  и коэффициента теплоотдачи  $h$ .

| $T_u, K$                                                  | 500  | 700  | 900  | 1100 | 1300 | 1500 | 1700 | 1900 | 2100 | 2300 | 2500 |
|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $q, \text{Вт/см}^2$<br>$\epsilon_{uw}=0.8$                | 2.91 | 6.39 | 10.3 | 15.5 | 22.9 | 33.7 | 49.1 | 70.6 | 100  | 139  | 189  |
| $q, \text{Вт/см}^2$<br>$\epsilon_{uw}=0.5$                | 2.86 | 6.10 | 9.43 | 13.5 | 18.7 | 26.0 | 36.0 | 49.8 | 68.3 | 92.7 | 124  |
| $h, \text{Вт/см}^2 K$<br>$10^{-4}$<br>$\epsilon_{uw}=0.8$ | 230  | 200  | 200  | 210  | 250  | 300  | 370  | 460  | 580  | 720  | 890  |
| $h, \text{Вт/см}^2 K$<br>$10^{-4}$<br>$\epsilon_{uw}=0.5$ | 220  | 190  | 180  | 190  | 200  | 230  | 270  | 330  | 400  | 480  | 580  |

В таблице 3.2 показаны значения суммарного теплового потока  $q$  при кипении и соответствующего ему коэффициента теплоотдачи  $h = q / (T_u - T_{sat})$  для различных значений температуры верхней поверхности кориума  $T_u$ . Расчеты проводились для двух значений эффективного коэффициента серости  $\epsilon_{uw} = 0.5, 0.8$ .

При таком тепловом потоке скорость выкипания воды с единицы поверхности составит  $A = q/\lambda \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ з/с см}^2$ .

### 3.4 Интегральная мощность остаточного тепловыделения

После прекращения цепной реакции реакторное топливо продолжает оставаться источником теплоты за счет естественного радиоактивного распада продуктов деления, накопленных за время работы реактора в нормальном режиме (остаточное тепловыделение). Мощность остаточного тепловыделения и ее временная динамика определяются изотопным составом накопленных продуктов, зависящих от типа реактора, ядерного топлива и режимов предыдущей работы реактора.

Характерная зависимость спада интегральной и удельной мощности остаточного тепловыделения после прекращения цепной реакции приведена в табл. 3.3 для водо-водяного реактора с тепловой мощностью 3200 МВт (электрическая мощность около 111 МВт) и обогащением топлива по изотопу урана-235 на уровне 3.2% при полной массе загрузки топлива из диоксида урана 100 т. Данные соответствуют случаю остановки реактора после выхода на квазистационарный режим работы при трехгодичной топливной кампании.

Для аппроксимации кривой мощности остаточного тепловыделения кориума в простейших приближениях иногда используют следующую зависимость[51]:

$$Q(t) \approx Q_0 \cdot 61 \cdot 10^{-3} [(t - t_0)^{-0.2} - t_0^{-0.2}], \quad (3.4)$$

где  $Q_0$  - номинальная тепловая мощность реактора,  $t$  - текущее время после запуска реактора (дни),  $t_0$  - момент аварии (дни). Значения остаточного энерговыделения, получаемые из (3.1), также отображены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 Зависимость интегрального остаточного энерговыделения кориума от времени

| t, ч                       | 0.5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 10   | 12   | 24   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q, МВт                     | 33.8 | 29.5 | 22.5 | 20.2 | 19.4 | 17.9 | 17.2 | 15.0 |      |      |
| Q, МВт<br>$t_0 = 3$ года   | 37.5 | 32.0 | 27.3 | 24.8 | 23.1 | 21.9 | 20.9 | 18.4 | 17.6 | 14.7 |
| Q, МВт<br>$t_0 = 0.5$ года | 35.4 | 30.0 | 25.2 | 22.7 | 21.0 | 19.8 | 18.9 | 16.4 | 15.5 | 12.6 |

Приведенные зависимости позволяют сделать оценки температур кориума при долговременном удержании в ловушке.

Для моделирования поведения кориума при попадании в устройство ловушке необходимо рассмотреть чувствительность модели к основным параметрам и оценить их влияние на характер взаимодействия.

### 3.5 Параметрические расчеты теплового поведения слоя кориума на диоксидциркониевом бетоне

Для оценки теплового поведения кориума в ловушке и определения степени влияния параметров, определяющих его характеристики, рассмотрена локальная задача в следующей постановке: горизонтальный слой кориума лежит на слое бетона, снизу бетон охлаждается водой при температуре 100С, сверху слой кориума охлаждается за счет конвективного теплообмена (поток с поверхности  $q = \alpha$

( $T-T_s$ ),  $\alpha$  - коэффициент теплопередачи на границе,  $T$  - температура поверхности,  $T_s$  - температура окружения).

Среди наиболее важных параметров, определяющих тепловые характеристики слоя кориума на диоксидирикониевом бетоне, рассмотрено влияние следующих величин:

- Теплопроводность кориума
- Толщина слоя кориума
- Толщина бетонной подложки
- Теплопередача на верхней границе кориума

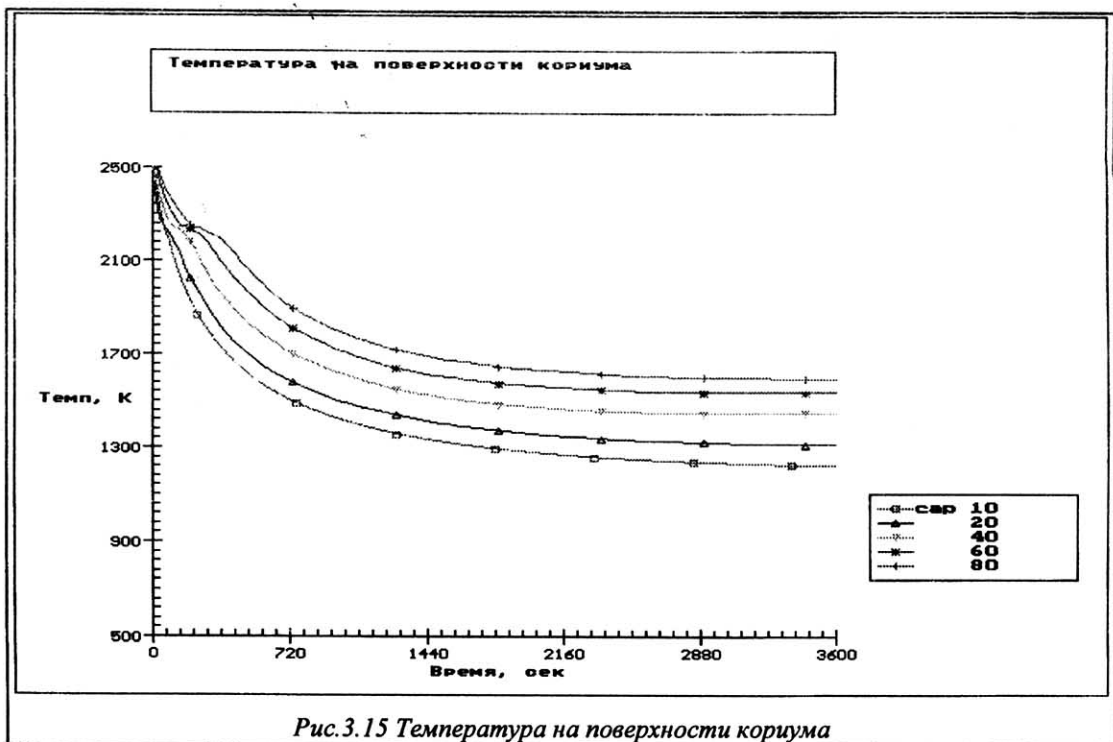
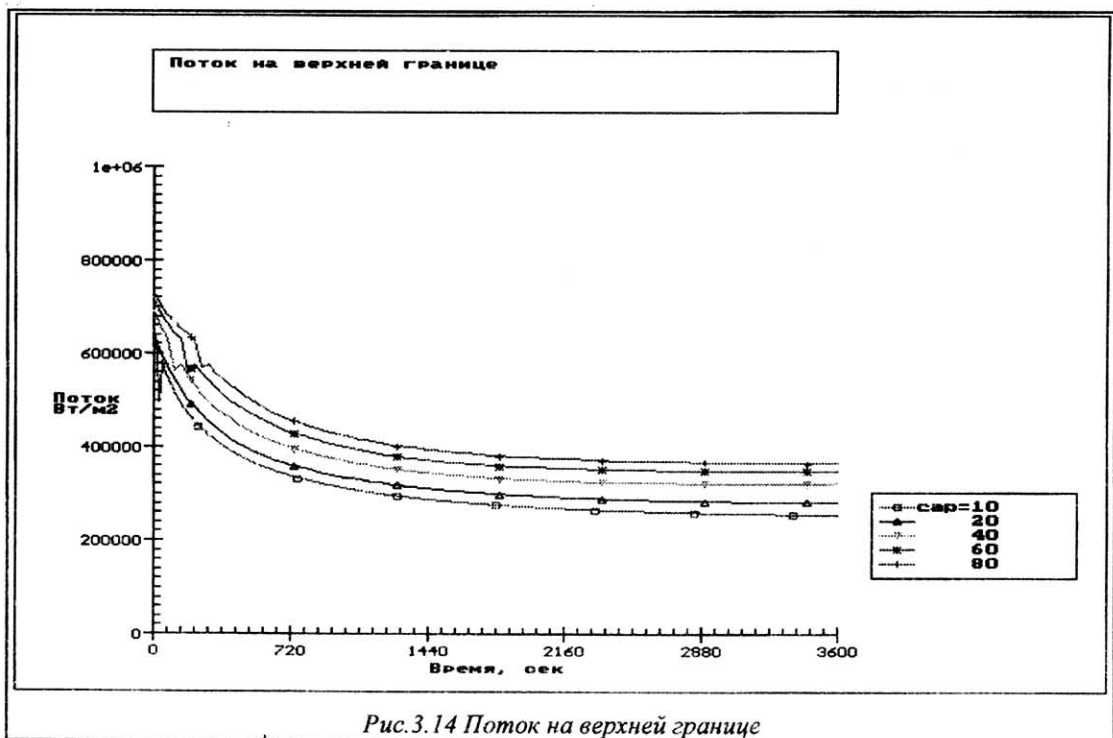
Проведена серия параметрических расчетов для оценки влияния каждого из указанных параметров. Значения варьируемых параметров приведены в таб. 3.4.

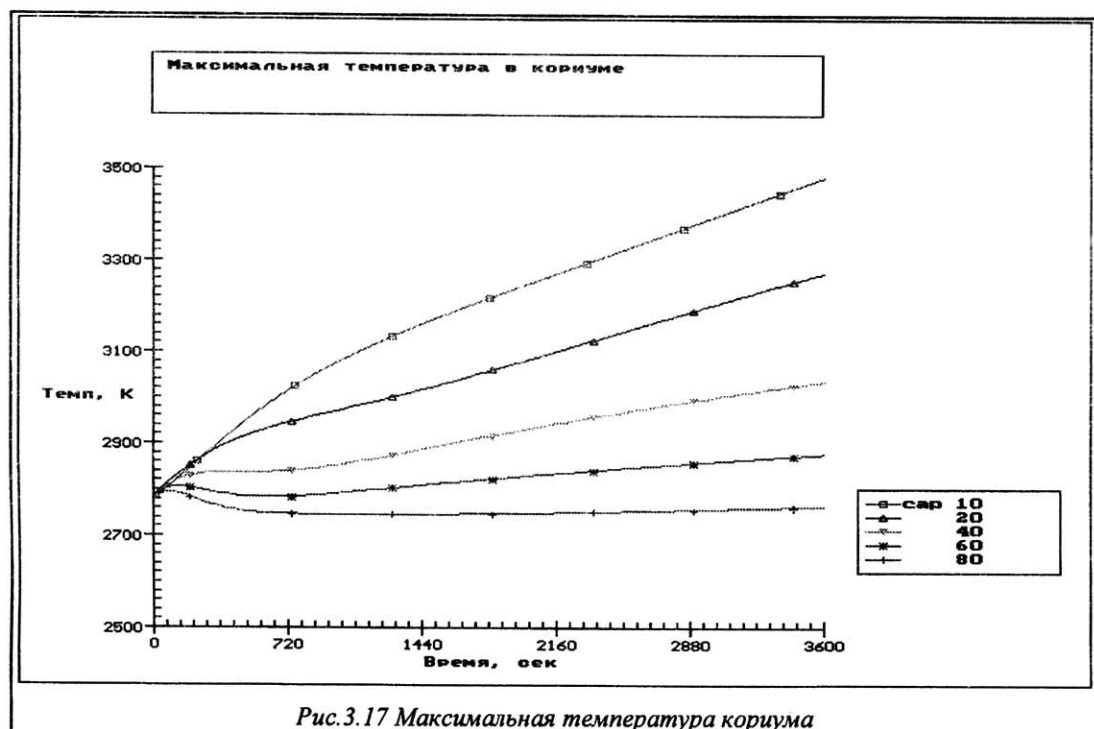
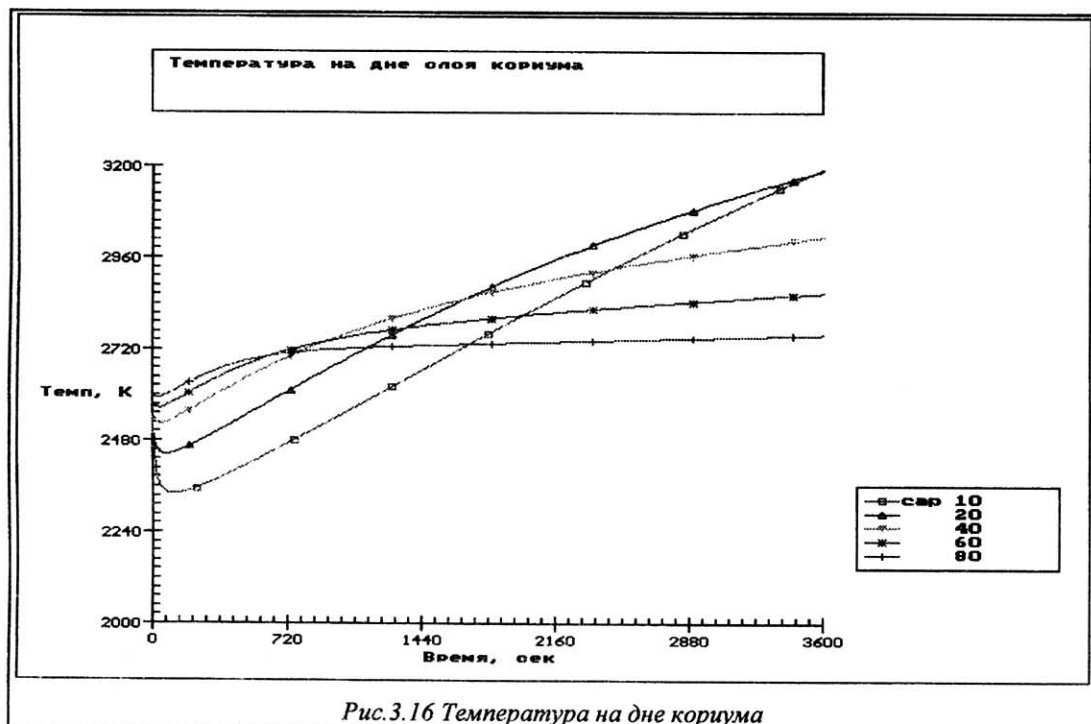
Таблица 3.4. Варьируемые параметры.

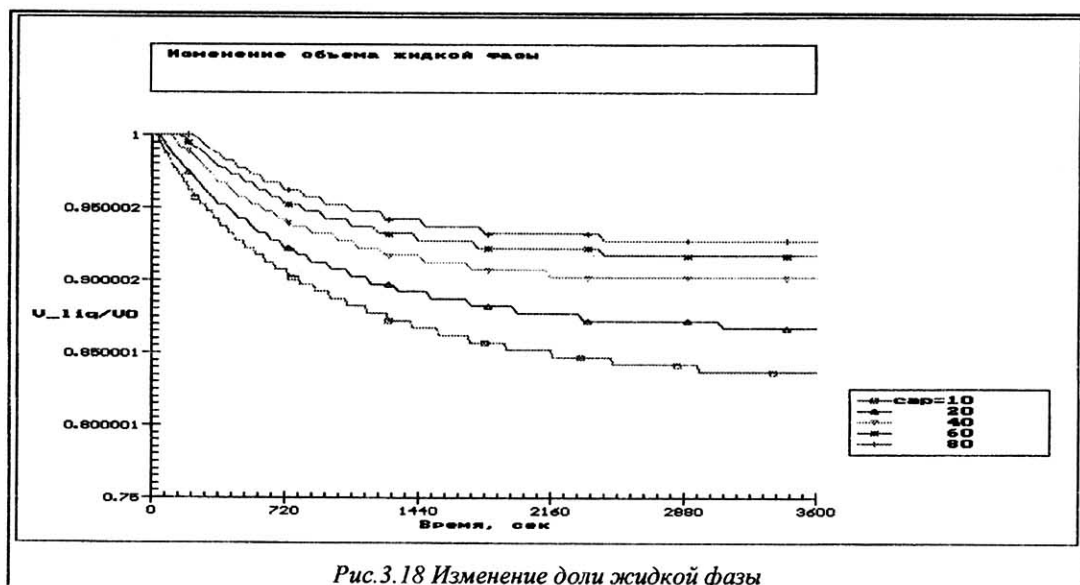
| Параметры                                     |     |     |      |      |    |
|-----------------------------------------------|-----|-----|------|------|----|
| Теплопроводность кориума, Вт/м К              | 10  | 20  | 40   | 60   | 80 |
| Толщина слоя кориума, м                       | 0.1 | 0.2 | 0.3  | 0.4  |    |
| Толщина бетона, м                             | 0.3 | 0.1 | 0.03 |      |    |
| Теплопередача на границе, Вт/м <sup>2</sup> К | 300 | 500 | 1000 | 2000 |    |

**Теплопроводность кориума.** Для учета влияния конвекции в горизонтальном слое кориума, варьировалась величина коэффициента теплопроводности кориума. Полагая базовой величиной теплопроводность  $\lambda=10 \text{ Вт/м К}$ , рассматривались следующие значения  $\lambda=20, 40, 60, 80 \text{ Вт/м К}$ . Теплопроводность в кориуме определяет теплопередачу внутри кориума и связанные с ней потери тепла с границ. Рост  $\lambda$  ведет к увеличению потока тепла с верхней границы и росту температуры поверхности за счет более интенсивного переноса тепла к границам. Динамика теплового потока на верхней границе для различных значений коэффициента теплопроводности показана на рис. 3.14. За первые полчаса поток выходит на уровень близкий к стационарному и для различных вариантов равен  $2.9-4.1 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . На нижней границе за время порядка 1 час тепловой поток практически равен нулю (тепловая волна не доходит до основания).

Изменение максимальной температуры, температур на дне и поверхности кориума приведены на рис. 3.15-3.17. Разница температур поверхности для максимального и минимального значений коэффициента теплопроводности составляет около  $150 \text{ К}$ . При малом  $\lambda$  происходит накопление тепла в слое. Температура на поверхности выходит, в зависимости от коэффициента теплопроводности, на стационарные уровни в диапазоне  $1200 \text{ К}-1600 \text{ К}$ . Увеличение  $\lambda$  приводит к выравниванию температур в слое. При  $\lambda=10$  разница между температурой на дне и поверхности кориума составляет  $1900 \text{ К}$ , при  $\lambda=80$  различие уменьшается до  $1100 \text{ К}$  (при  $t=3600 \text{ с}$ ). В начальный момент времени температура на дне кориума резко падает, затем за время 1 час выходит на максимальный уровень. Изменение объема жидкой фазы приведено на рис. 3.18. Для различных  $\lambda$  доля твердой фазы (корки на верхней границе) изменяется почти в два раза.

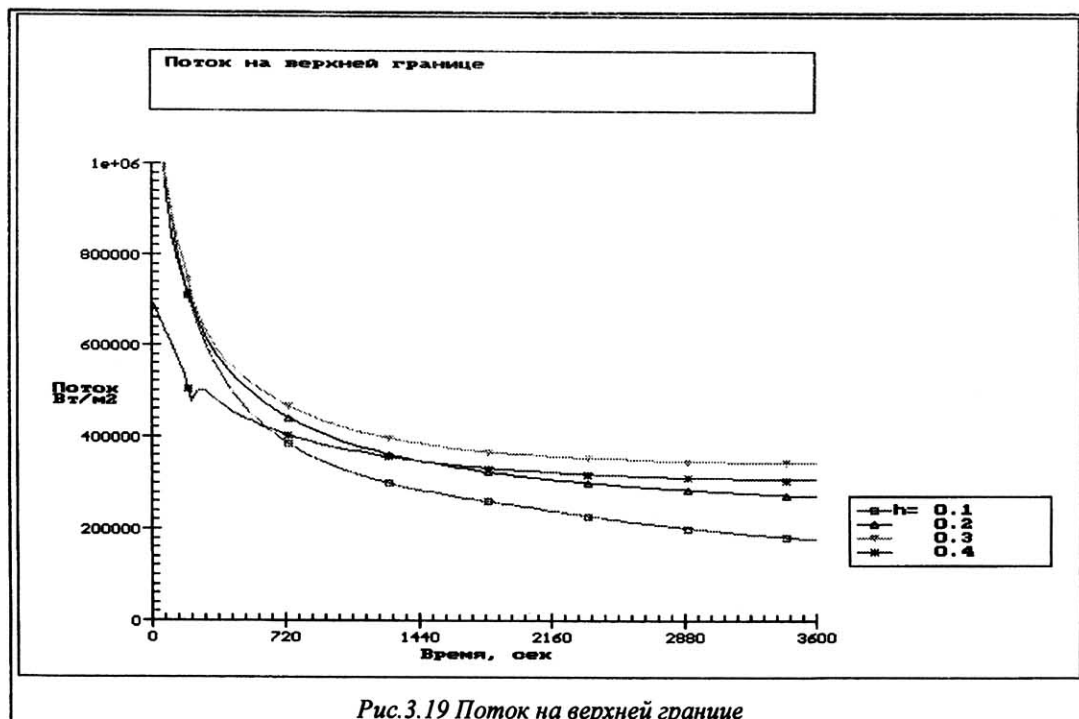


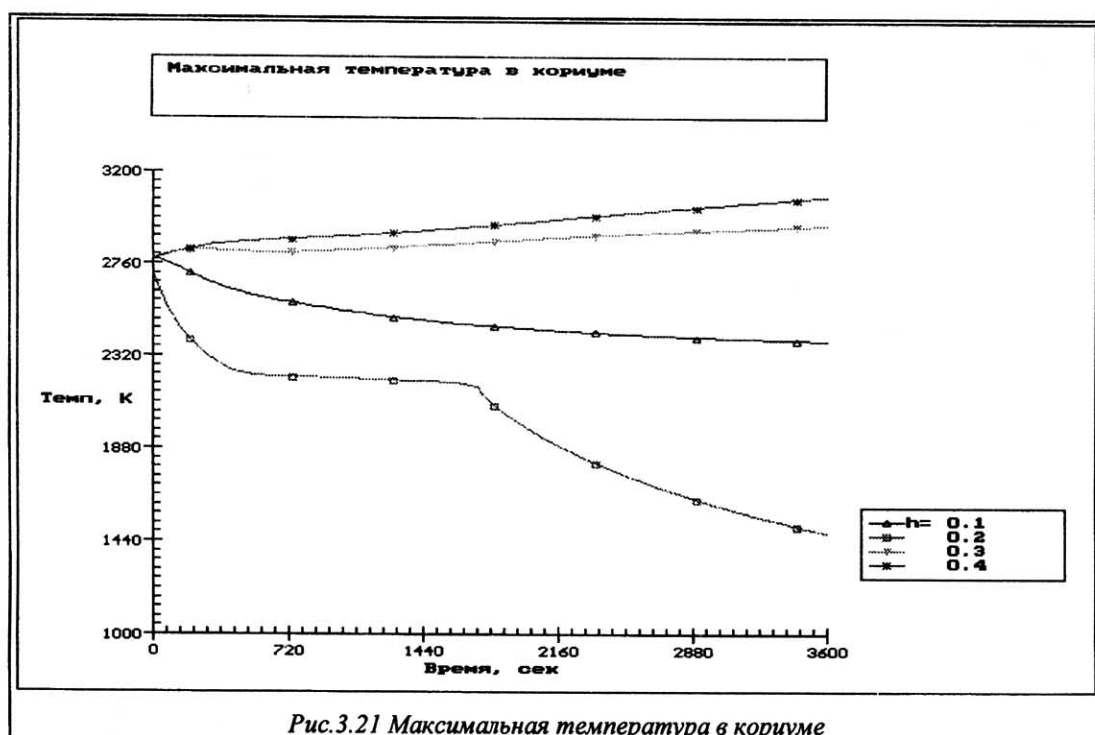
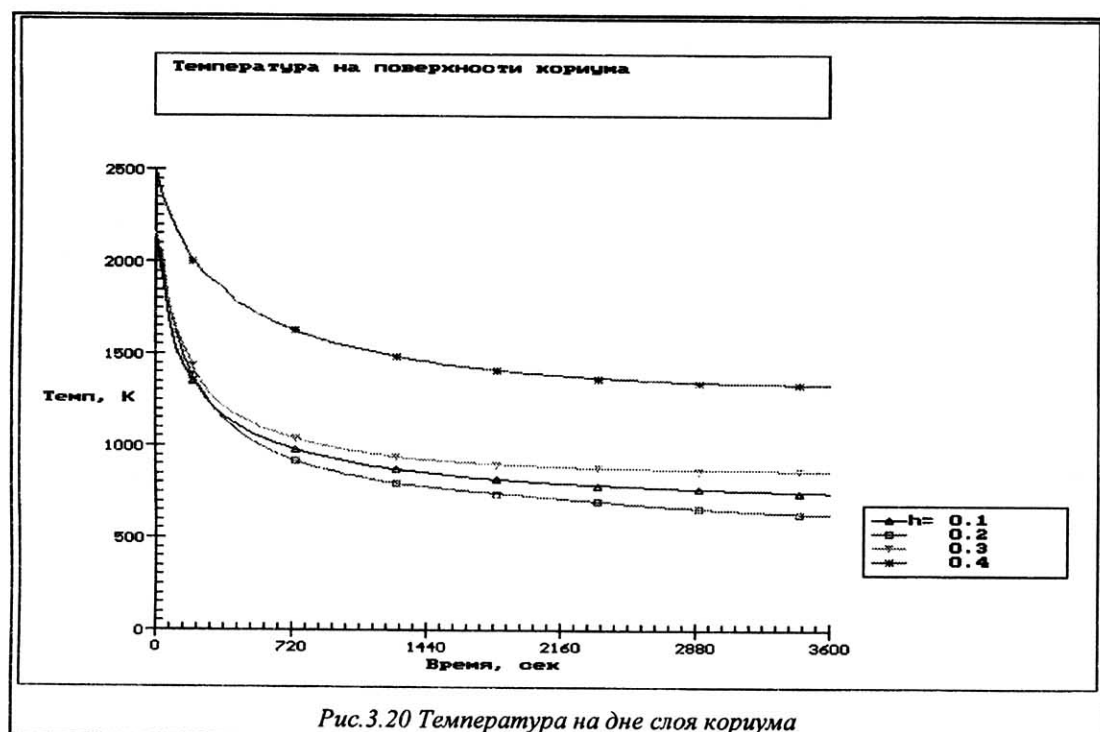


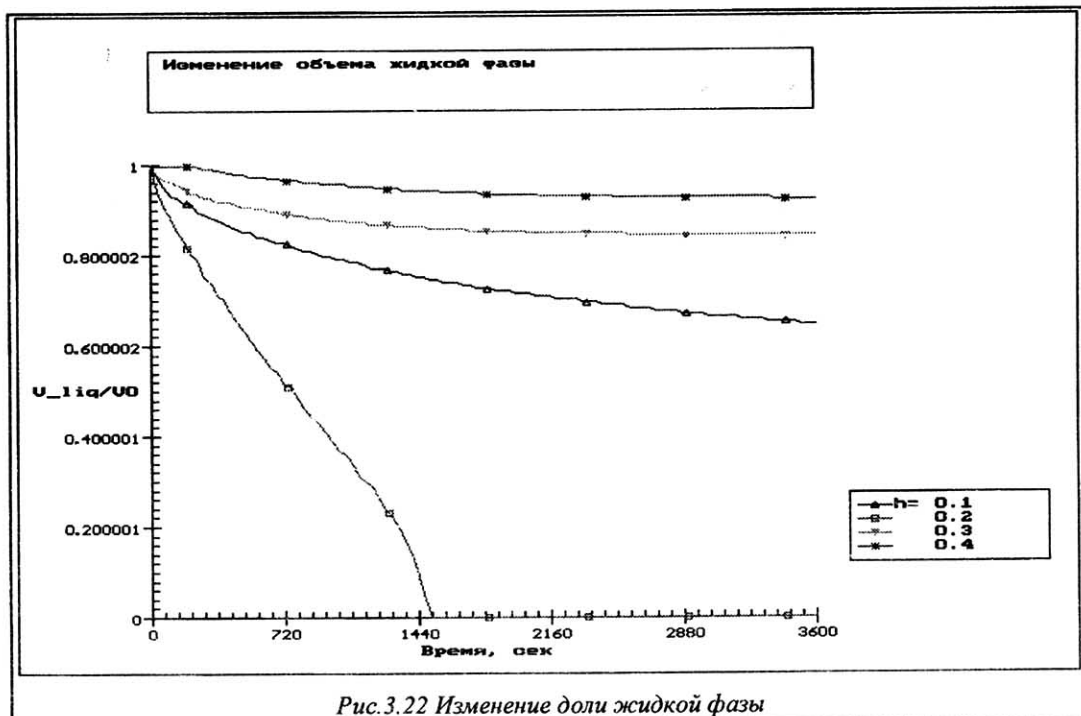


**Толщина слоя кориума.** В случае неполного выпадения кориума или неоднородного растекания по основанию ловушки, толщина слоя может быть меньше или наоборот превосходить расчетную толщину, которая в настоящей постановке соответствует  $0.3\text{ м}$ . Рассматривалось возможное отклонение толщины слоя от расчетной величины и его влияние на тепловые характеристики взаимодействия. Рассматривались четыре варианта с толщиной кориума  $0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{ м}$ .

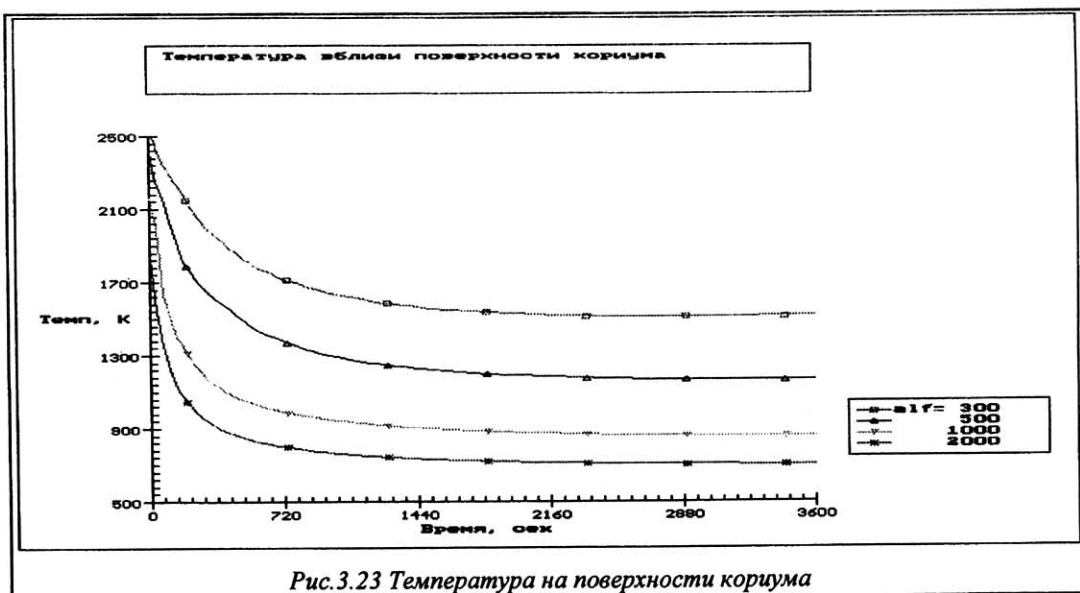
Результаты расчетов приведены на рис. 3.19-3.22. Поток, снимаемый сверху, незначительно зависит от толщины слоя (разница для максимального и минимального вариантов менее  $10^5\text{ Вт/м}$ ).

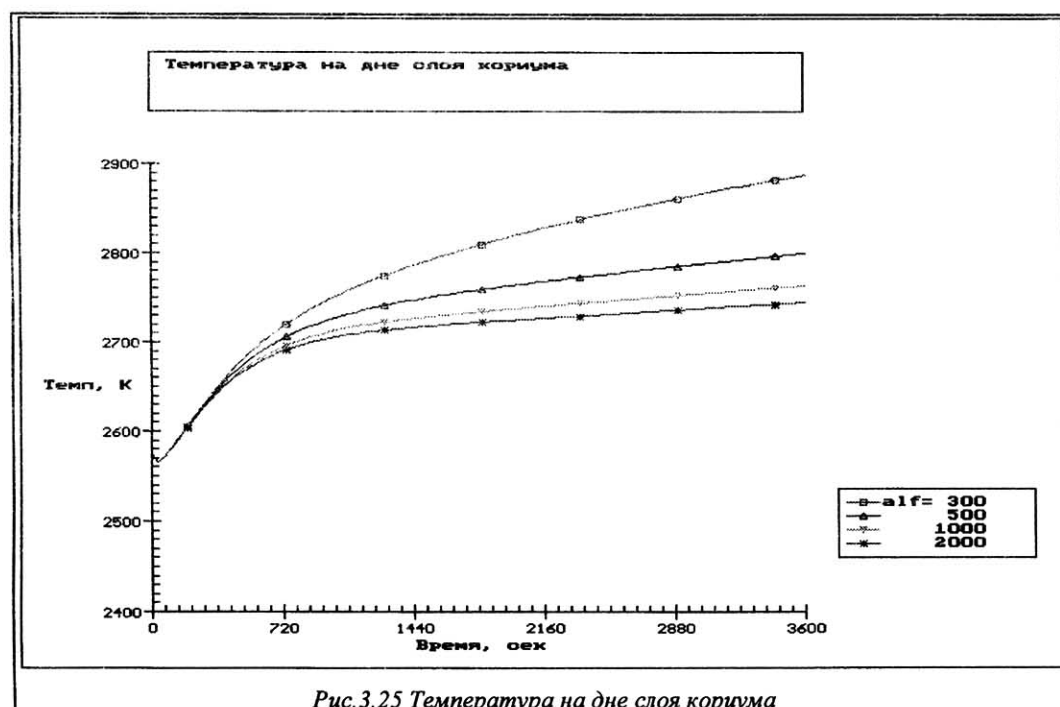
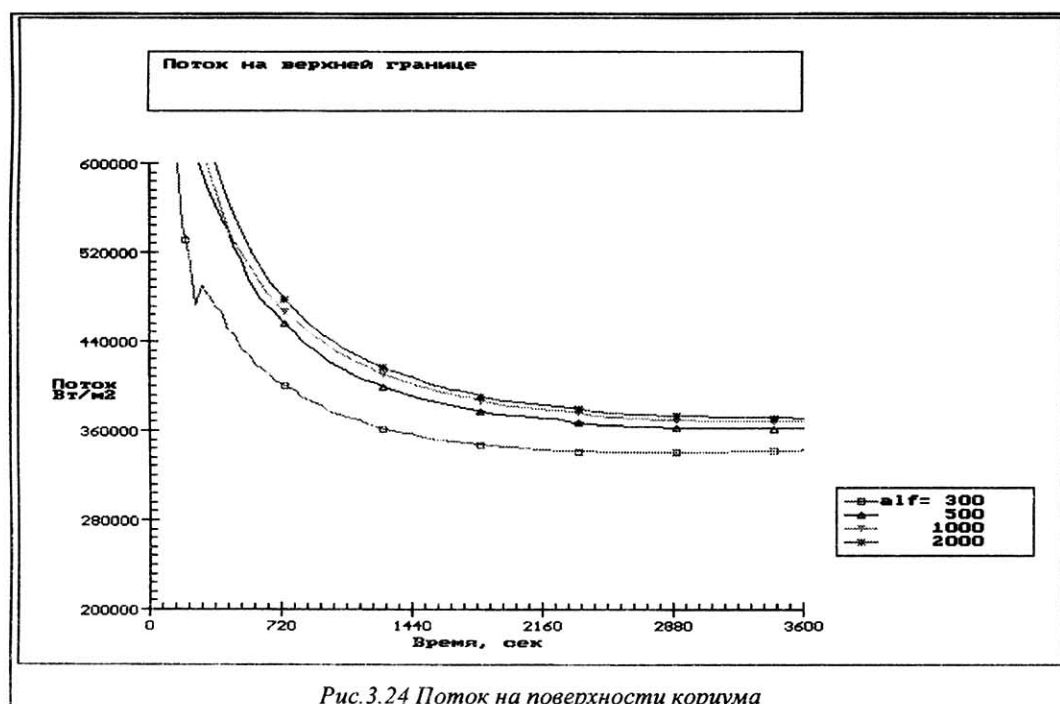


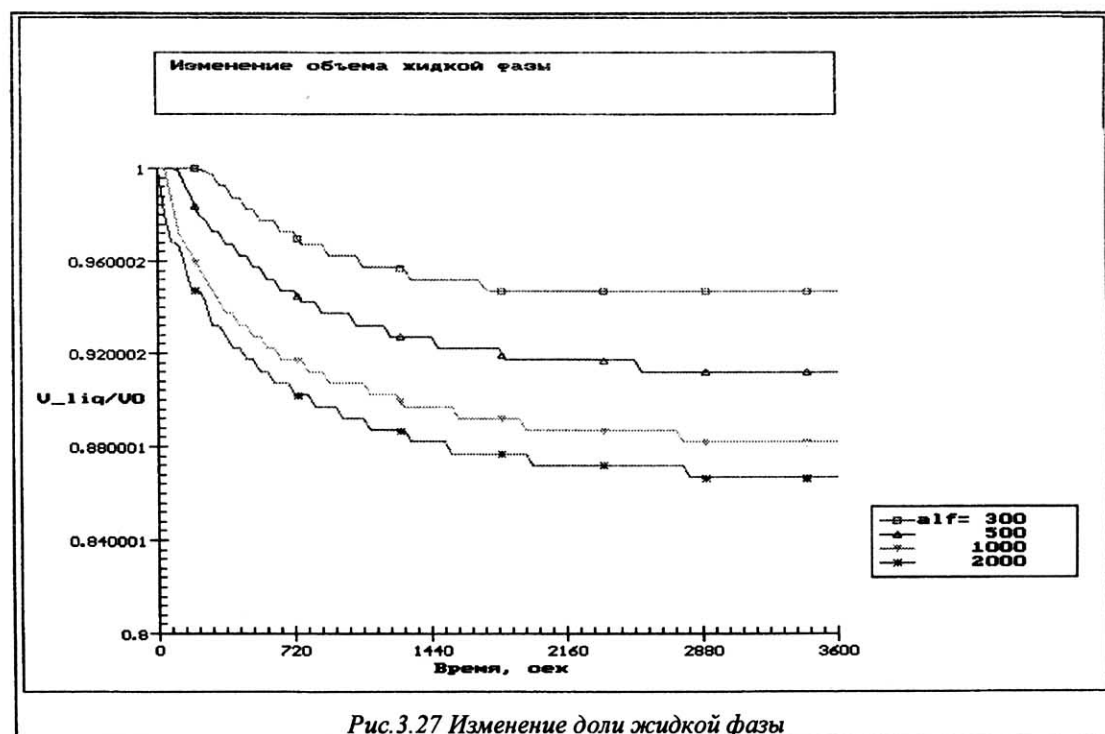
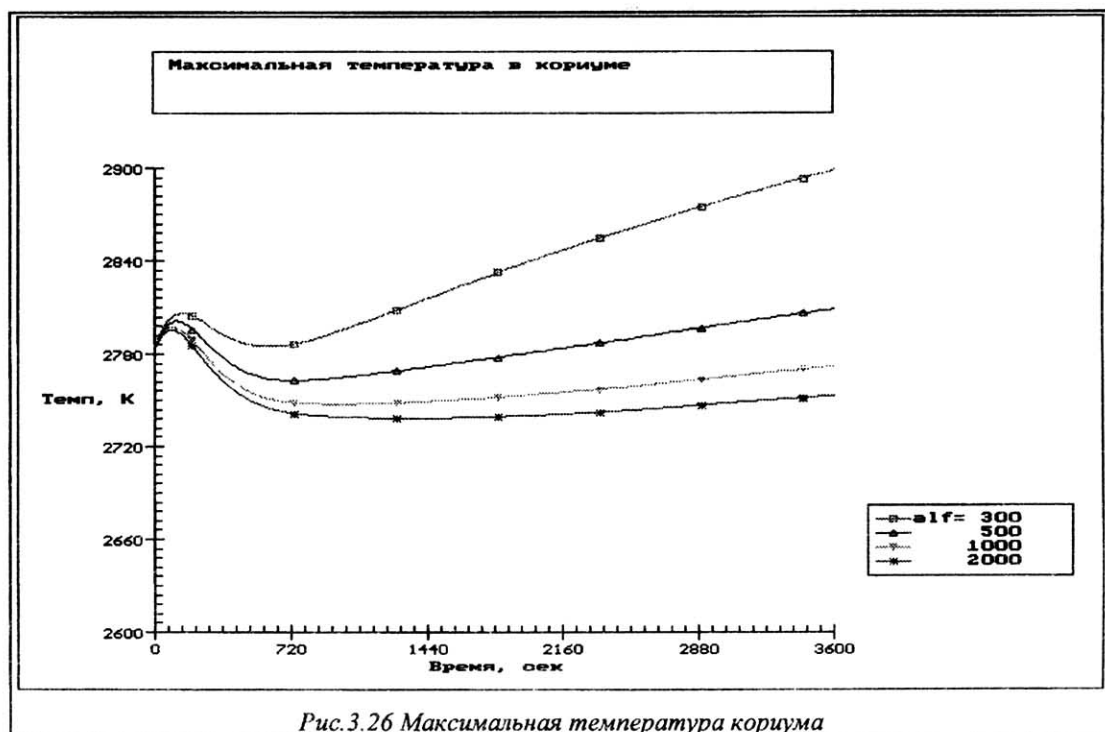




**Теплопередача на верхней границе кориума.** Для оценки влияния теплопередачи на верхней границе кориума ( $F = \alpha \Delta T$ ), рассмотрены четыре варианта с коэффициентами теплопередачи  $\alpha = 300$  Вт/м<sup>2</sup>/К, 500 Вт/м<sup>2</sup>/К, 1000 Вт/м<sup>2</sup>/К, 2000 Вт/м<sup>2</sup>/К. Динамика характерных величин в течение одного часа взаимодействия приведена на рис 3.23-3.24. Рис. 3.23 - 3.24 демонстрируют изменение во времени температуры поверхности кориума и теплового потока сверху. Значения температур и потоков за рассматриваемое время выходят на квазистационарные значения. При  $\alpha = 300$  Вт/м<sup>2</sup>/К температура дна кориума (рис. 3.25) приближается к температуре плавления  $ZrO_2$ . Динамика формирования корки показана на рис 3.27. В зависимости от степени охлаждения толщина корки может составлять от 4% до 13%.

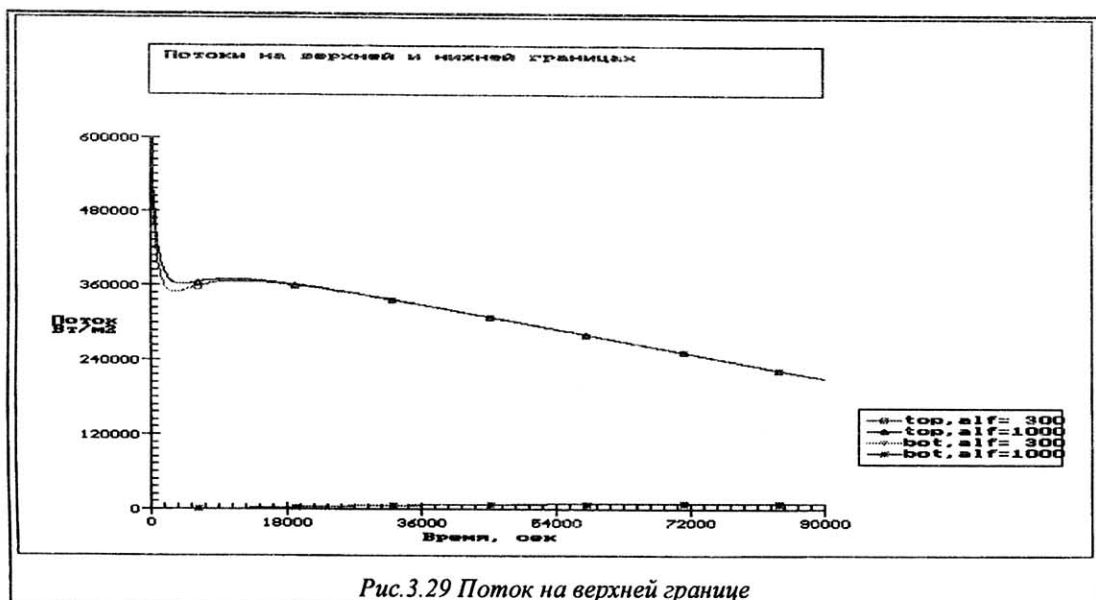
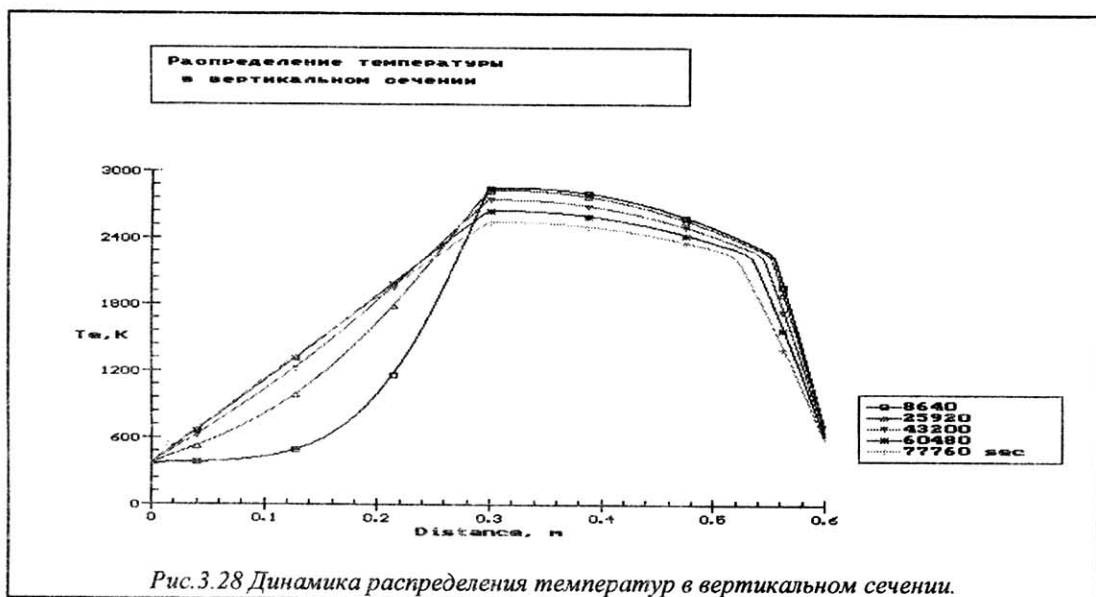






**Масштаб времени - сутки.** Для оценки теплового поведения кориума в течение суток, рассмотрены два варианта с варьированием коэффициента теплопередачи с поверхности кориума:  $\alpha_1 = 300 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ ,  $\alpha_2 = 1000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Результаты расчетов приведены на рис. 3.28-3.32. На рис. 3.28 показано распределение

температур в вертикальном сечении на пять моментов времени 8640с, 25920с, 43200с, 60480с, 77780с. На графике видно характерное распределение температур в трех зонах: бетоне, жидкой фазе кориума и в твердой фазе. В первые моменты времени наблюдается характерный параболический профиль теплового фронта в бетоне, переходящего к 43200 секунде в линейный. При этом величина градиента температур составляет около  $8 \cdot 10^3 \text{ K/м}$ . Динамика теплового потока на верхней границе кориума и нижней поверхности бетона приведена на рис. 3.29. Для варианта  $\alpha_1=300 \text{ Вт/м}^2\text{K}$  максимальное значение потока вверх на момент времени 18000 с- около  $3.6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ , в дальнейшем поток уменьшается до  $2.4 \cdot 10^5$ , для  $\alpha_2=1000 \text{ Вт/м}^2\text{K}$  соответствующие потоки отличаются незначительно. Температура на дне бетона (рис. 3.30) в максимуме не превосходит 3000K и к 90000с падает до 2500-2550K. Доля жидкой фазы для двух рассматриваемых вариантов отличается на величину порядка 10%. Падение температур на рассматриваемом масштабе времени объясняется уменьшением тепловыделения, согласно кривой тепловыделения.



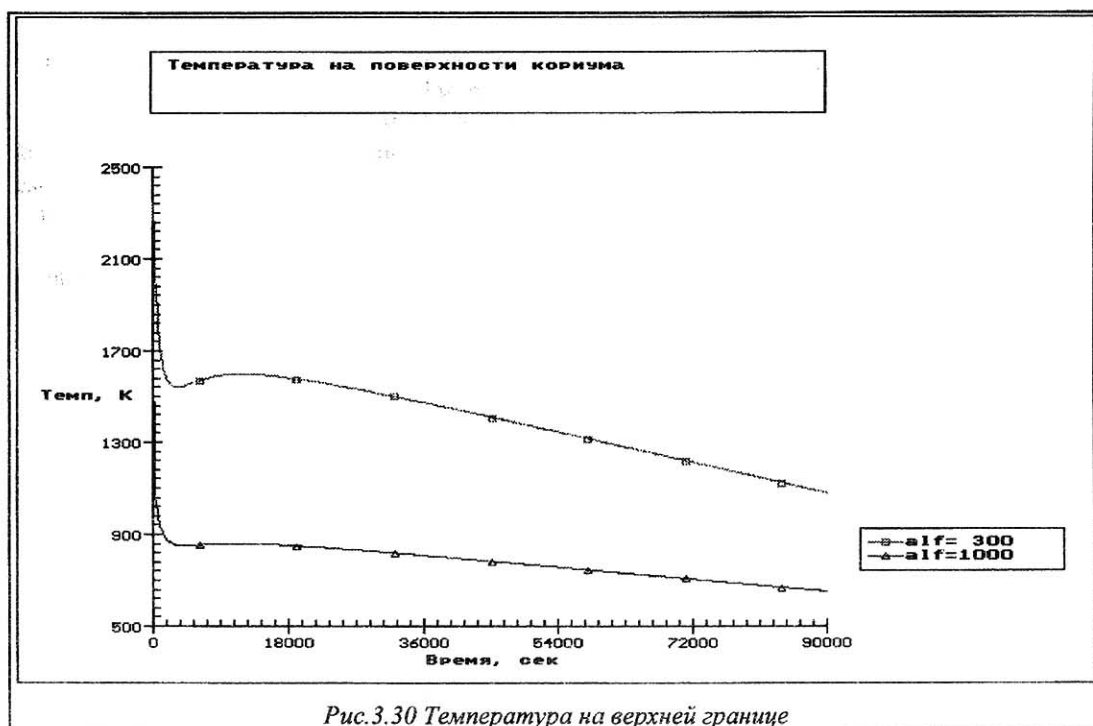


Рис.3.30 Температура на верхней границе

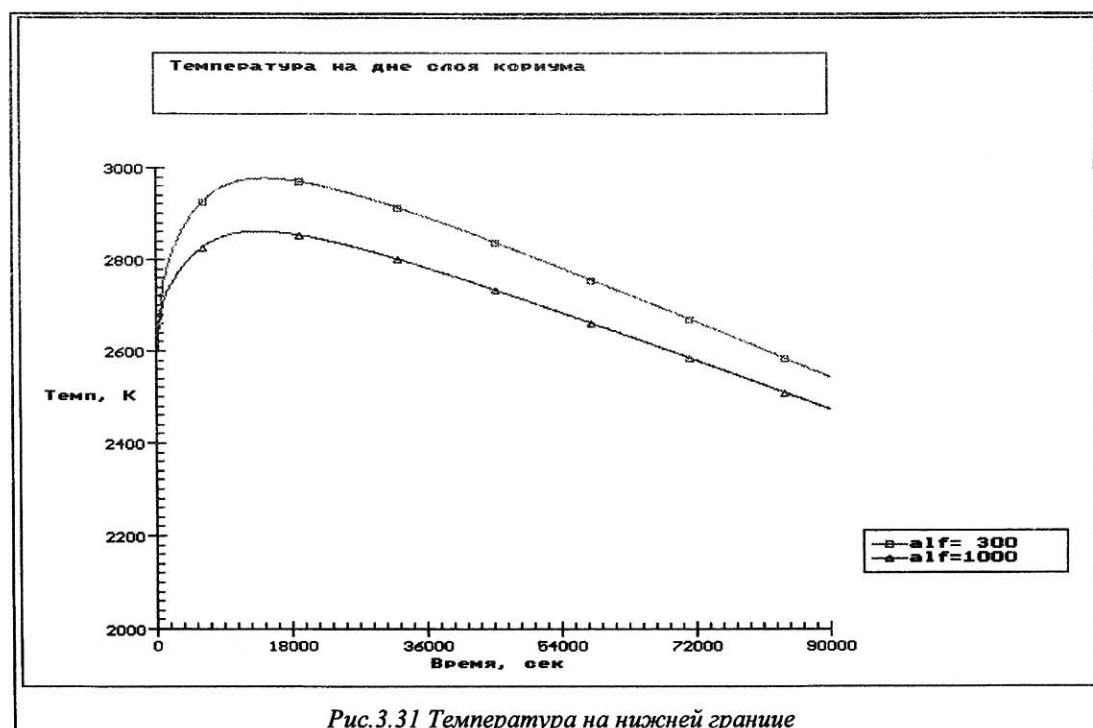


Рис.3.31 Температура на нижней границе

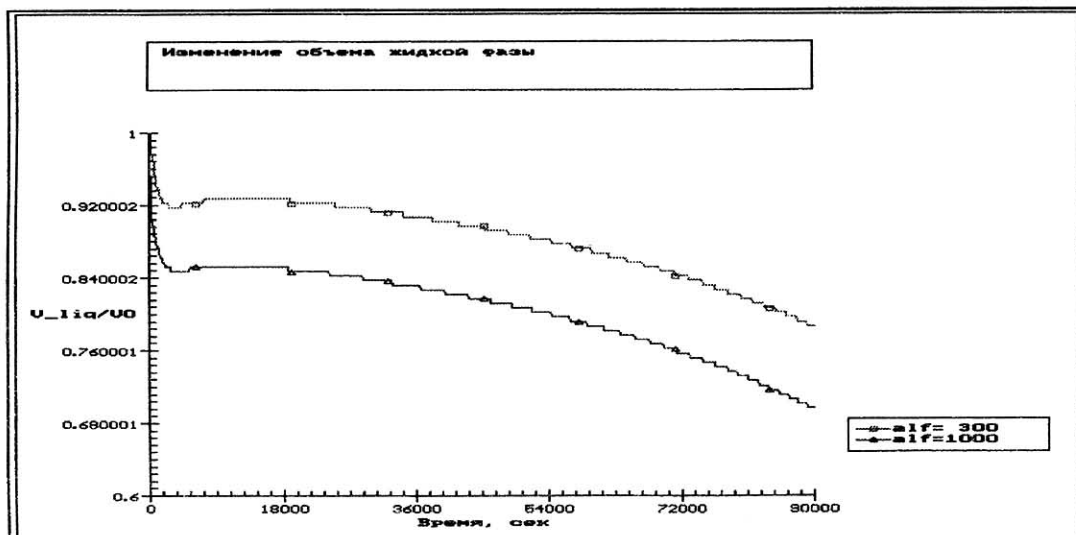


Рис.3.32 Изменение доли жидкой фазы

**Толщина бетона.** В ходе процесса взаимодействия в зависимости от свойств кориума и интенсивности охлаждения поверхности возможно прогревание границы кориум/бетон до температур, превышающих температуру плавления диоксидциркониевого бетона. Для оценки ситуаций с уменьшением толщины бетона рассмотрены три варианта  $h=0.3, 0.1$  и  $0.03$  м. Результаты расчетов приведены на рис. 3.33-3.34. Показаны температура на дне слоя кориума и поток на нижней (охлаждаемой) поверхности бетона. Можно видеть, что толщина бетона оказывает незначительное влияние на температуру верхней границы кориума (рис. 3.33). Заметное влияние на температуру дна расплава и на поток с бетонной подложки проявляется при толщине меньше  $0.03$  м (рис. 3.34, 3.35). Величина теплового потока вниз при этом приближается к  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> К, что становится сравнимо с потоком вверх.

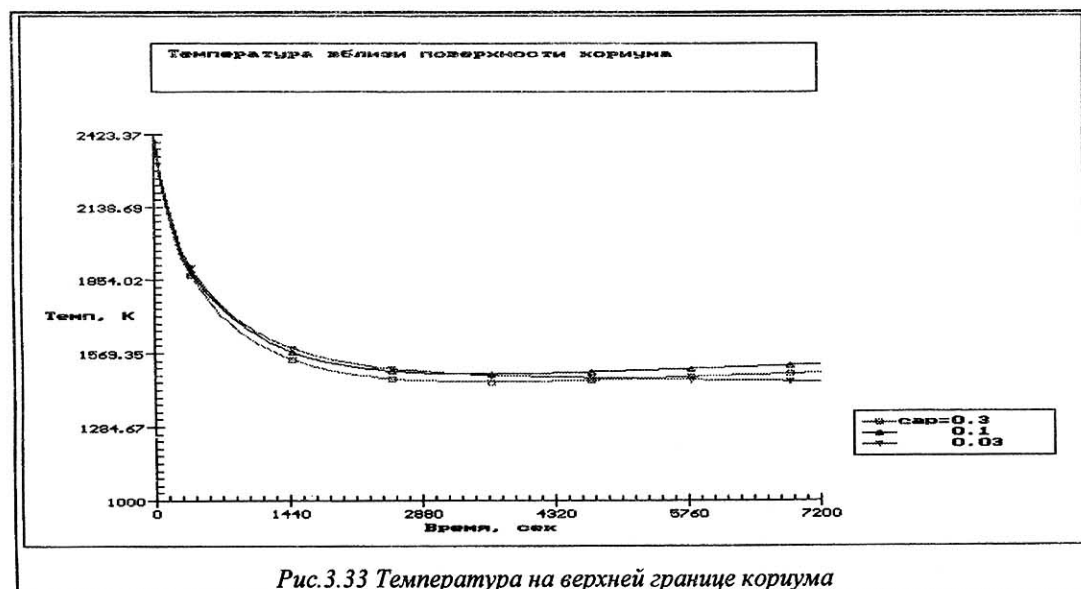
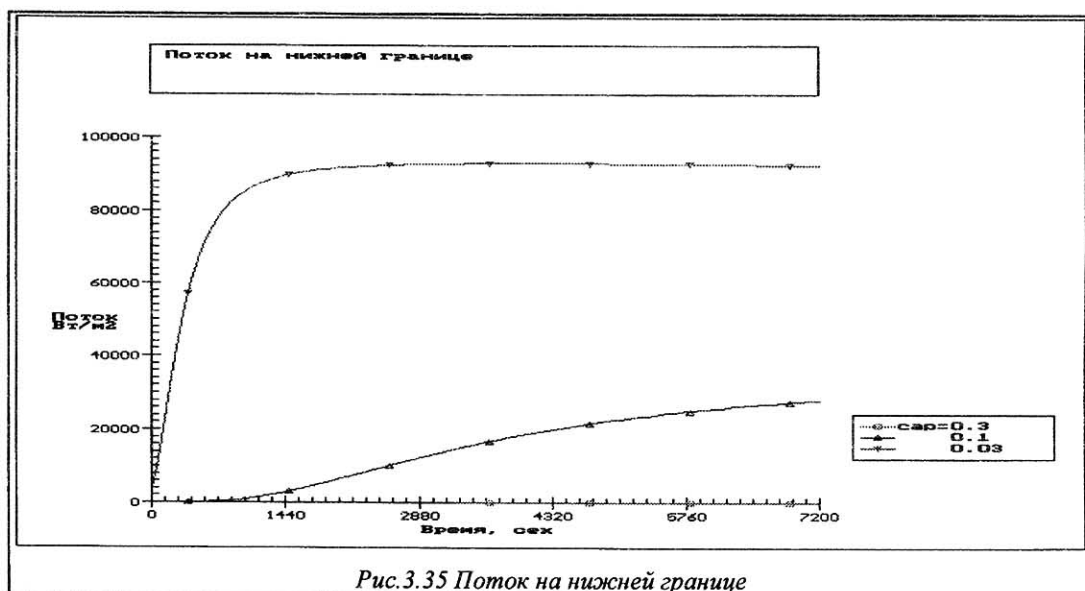
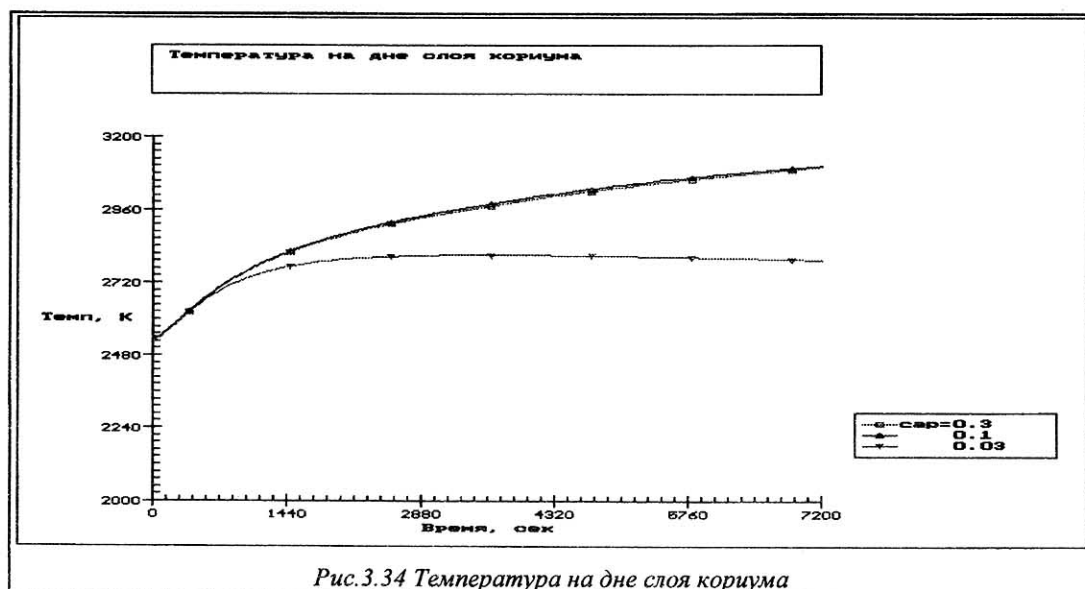


Рис.3.33 Температура на верхней границе кориума



### 3.6 Оценка влияния растекания

Характер поведения кориума в ловушке определяется в рядом параметров, среди них - толщина слоя кориума. Поскольку отклонение толщины слоя от расчетного возможно при неравномерном растекании кориума, было рассмотрено влияние процесса растекания на изменение толщины слоя. Численное моделирование стадии растекания расплавленного кориума в ловушках проводилось с использованием кода РАСПЛАВ [28]. При моделировании процесса растекания в коде согласованно рассматриваются ряд взаимодействующих физических процессов: гидродинамика растекающегося расплава, теплоперенос в расплавленном топливе с учетом внутреннего тепловыделения и различных режимов охлаждения на границах расплава, свойства материалов и их зависимость от температуры и состава, динамика разрушения бетонного основания с учетом процессов, протекающих при разложении бетона.

Рассматривался сценарий быстрого перемещения расплава на дно шахты реактора и растекание из исходного состояния. Предполагалось, что расплав представляет собой гомогенную смесь четырех компонент  $UO_2$ ,  $SS$ ,  $Zr$ ,  $ZrO_2$  (объем порядка  $22 \text{ м}^3$ ), когда все компоненты перемешаны и одновременно

поступают в шахту реактора. Свойства отдельных компонент и смеси в целом рассчитывались в соответствии с существующими моделями (аддитивные модели) [25].

Проведена серия расчетов с варьированием основных параметров задачи: начальной температуры расплава, температур солидус и ликвидус, теплофизических свойств, граничных условий. В качестве основных рассмотрены варианты с различными постановками граничных условий: лучистый теплообмен с окружающими конструкциями с различными значениями излучательной способности поверхности и охлаждением расплава водой.

Проведенный анализ проблемы позволяет выделить два возможных режима растекания расплава топлива.

1. При значительном перегреве расплава (выше температуры плавления  $UO_2$ , вязкость смеси достаточно мала. В этом случае происходит быстрое заполнение расплавом всей доступной области. Толщина расплавленного слоя при заданных конструкционных размерах составляет 0.3 - 0.35 м.

2. При температуре расплава, находящейся между температурами солидус и ликвидус (2200-2700K), вязкость может быть достаточно велика, так что время движения расплава значительно больше, чем в первом режиме. В этом случае поверхностный слой расплава охлаждается с образованием твердых корок. Последние ограничивают скорость движения расплава и область, занятую расплавом, так что фронт останавливается, не достигая конструкционных границ. Толщина слоя в этом случае составляет 0.4 - 0.45 м. Наблюдалась ситуация, когда топливо после некоторого перемещения на начальной стадии останавливалось за счет образования корок при интенсивном охлаждении, а затем после разогрева за счет внутреннего тепловыделения растекалось до конструкционных границ ловушки.

Неопределенности проведенных расчетов процессов растекания связаны прежде всего с неопределенностью начального состояния и свойств кориума, в частности с недостаточной обоснованностью модели вязкости. Второе обстоятельство связано с неопределенностью поведения корок на охлаждаемых поверхностях, т.к. их механическое поведение будет определять процессы торможения и остановки расплава.

## 4. Основные результаты.

**Анализ концепций ловушек.** Проведенный анализ литературы по проблеме ловушек расплавленного топлива вне корпуса реактора показывает, что в настоящее время разрабатываются несколько концепций, основанных на различных физических принципах, использующие различные геометрии разрабатываемых устройств. Последовательность событий, которая приводит к аварии корпуса реактора, зависит от сценария тяжелой аварии. Поскольку набор сценариев достаточно широк, возникают большие неопределенности в оценке начальных условий, характеристик выпавшего в ловушку кориума и граничных условий (условия в полости реактора или в более общем случае условия внутри контеймента), которые также зависят от сценария и также сложны для оценки. Открытым вопросом остается также вопрос о степени допустимости наиболее опасных явлений (таких как паровой взрыв) и наихудших условий, в которых должна работать ловушка. К текущему моменту отсутствуют полностью законченные и обоснованные проекты ловушек.

Среди проблем, требующих дальнейшего исследования и проработки - изучение входных данных для конструкций ловушки:

- Количество выпавшего кориума, скорость истечения;
- Размеры и форма осколков (размеры частиц или капель кориума, диаметр струи)
- Состав кориума;
- Продукты деления, остающиеся в материалах (остаточное тепловыделение);
- Температура материалов.

Для разработки концепций ловушки требуется дальнейшее исследование:

- Свойств кориума и поведения материалов при высоких температурах.

- Свойств материалов, которые могут быть использованы как защитные слои для коллектора ловушки и для ее удерживающей части.
- Процессы растекания кориума по плоской или наклонной поверхности. В большинстве концепций ловушек кориум растекается по транспортирующим системам. Для ловушек, использующих большие пространства, разрешение этой проблемы является критическим.
- Взаимодействия кориума с водой: оценка возможности парового взрыва.
- Радиационного теплообмена с окружающими конструкциями с учетом состава атмосферы
- Выхода продуктов деления в течение всего процесса перемещения кориума в ловушку, до полного его затвердевания.
- Теплопередачи через стенки конструкций, охлаждаемых с внешней стороны естественной конвекцией.

Для обоснования предлагаемых устройств удержания кориума, в настоящее время проводятся и планируется дальнейшее проведение экспериментальных исследований, разрабатываются компьютерные коды для моделирования соответствующих теплогидравлических процессов.

**Расчет теплового поведения ловушки.** Рассмотрена ловушка с плоским дном, основание и стенки которой выполнены из жаропрочного материала на основе диоксида циркония с температурой плавления выше  $2900\text{K}$ . На базе тепловой модели проведены оценочные численные расчеты теплового режима ловушки при выпадении в нее  $180\text{ т}$  кориума. Получены результаты для стадии первоначального взаимодействия расплавленного кориума со стенками ловушки и бетонной шахты и этапа последующего теплового поведения кориума и элементов конструкции ловушки. Проведены численные расчеты с варьированием основных параметров, определяющих процесс взаимодействия.

Мощность теплосъема излучением зависит от температуры окружения. Благодаря широкой горловине воронки ловушки открытым остается относительно холодный корпус реактора, принимающий большой поток тепла. Первые  $20$  минут поверхность кориума охлаждается до  $1600\text{C}$ , затем начинается рост. К этому времени температура на дне кориума возрастает до  $2700\text{C}$  и продолжает расти, так что через некоторое время возможно достижение температуры плавления диоксидциркониевого бетона. На верхней излучающей границы кориума образуется корка (фаза с температурой, лежащей ниже интервала плавления кориума) толщиной до нескольких сантиметров. Днище корпуса начинает плавиться к моменту времени  $t=3600\text{ с}$ , вертикальная часть корпуса - к  $1.5$  часам после выпадения кориума.

Результаты расчетов теплового режима ловушки показывают, что в заданных геометрических условиях и принятом сценарии быстрого выпадения и растекания кориума с поверхности кориума тепловым излучением снимается около  $50\%$  тепла, выделяемого в кориуме, происходит быстрый разогрев элементов конструкции ловушки, шахты и корпуса реактора. Своды ловушки из шамотного бетона за времена порядка десятков секунд достигают температуры разложения бетона, после чего начинается эрозия бетона со скоростью около  $0.25\text{--}0.3\text{ м/час}$ . При этом разложившийся бетон будет осыпаться в расплав, обогащая его своими компонентами, в том числе и оксидами, являющимися наиболее активными элементами по отношению к диоксидциркониевому бетону и способствующими его растворению. Поэтому в рассматриваемой геометрии может быть использована конструкция сухой ловушки, стенки которой изготовлены из стали, контактирующей с теплообменником или окруженной резервуаром с водой. При этом теплосъем с поверхности расплава осуществляется посредством переизлучения с холодными поверхностями стенок, охлаждаемых водой изнутри. В таком варианте понижается температура поверхности кориума, снижается тепловой поток на реактор, температура внутри кориума и на нижней поверхности, контактирующей с диоксидциркониевым бетоном, не достигая температуры разрушения бетона.

В серии параметрических расчетов задачи о тепловом взаимодействии горизонтального слоя кориума, лежащего на бетонной подложке, рассмотрено влияние теплопроводности кориума, толщины слоя кориума, толщины бетонной подложки, теплопередачи на верхней границе кориума. Проведены расчеты на различных временных масштабах от  $1$  часа до  $1$  суток. Получены зависимости от времени температур на поверхности и дне кориума, максимальной температуры кориума, тепловые потоки на границе, распределения температур в кориуме и бетоне. Проведены оценки влияния процесса растекания кориума.

Для адекватного моделирования поведения ловушки, кроме изучения тепловых режимов, внимание должно уделяться учету химического взаимодействия металлических и оксидных компонентов кориума с

диоксидциркониевым бетоном, приводящего к эрозии бетона при температурах ниже температуры плавления. В связи с этим необходимо исследование условий смягчения и предотвращения такого взаимодействия. Отдельно должен рассматриваться вопрос о воздействии механических и термических нагрузок на элементы конструкции ловушки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта МНТЦ П-064-094.

## 5. Литература

1. Szabo I. Survey of design principles and basic mechanisms of ex-vessel molten core retention devices. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany.
2. Valin F., Boncoeur M. Some investigations on core catcher materials. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany.
3. Weissshaupl H.A. Large spreading of core melt for melt retention/stabilization. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany
4. Fieg G., Moschke M., Werle H. Flow of thermite melts on superposed ceramic pans. Abstracts of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany
5. Fieg G., Moschke M., Werle H. Studies for the "staggered pans" corecatcher. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany.
6. Humbert J.M., David O., Norge P. Preliminary studies on a flat core catcher with promotion of radiative heat transfer. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany
7. Szabo I., Richard P., Bergmaschi Y., Seiler J.M. A multi crucible catcher concept: design consideration and basic calculational results. Abstracts of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany.
8. Tromm W., Alsmeyr H. Experiments for a core catcher concept based on water addition from below. Proceedings of 5th International Seminar on containment of nuclear reactors, 1993, Karlsruhe, Germany
9. Fish J.D., Piltch M., and Arelano. Demonstration of Passively- Colled Particle-Bed Core Retantion. Proc. LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon, 1982, p. III-327.
10. Turrichia A., How to avoid molten core/concrete interaction (and steam explosions. Proc. 2nd OECD (NEA) CSNI Specialists Meeting of Molten Debris-Concrete Interaction, Karlsruhe, April 1992 Kfk 5108, NEA.CSNI/R(92) 10 Nov 92 (Editor: H.Alsmayer) p.503
11. Parrozi F., Magallon D., Wider H.U., Fiorovanti D., Lombardi C. Feasibility of an experimental programme on the corium retention issue for alwr plants. Proceedings of the workshop OECD/CSNI/NEA on large molten pool heat transfer, Grenoble, March 1994, p.479
12. Cognet G., Bouchter J.C. VULCANO: A large scale UO<sub>2</sub> program to study corium behavior and cooling for future reactors. Proceedings of the workshop OECD/CSNI/NEA on large molten pool heat transfer, Grenoble, March 1994, p. 521
13. Bonnet J.M., Roughe S., Seiler J.M. large scale experiments for core melt retention, bali: corium pool thermalhydraulics, sultan: boiling under natural convection. Proceedings of the workshop OECD/CSNI/NEA on large molten pool heat transfer, Grenoble, March 1994, p. 503
14. Hirschmann H., Kottowski H.M., Tipping Ph.. Corvis achivments and international collaboration. Proceedings of the workshop OECD/CSNI/NEA on large molten pool heat transfer, Grenoble, March p. 513
15. Theofanus T.G., Amarasooriya W.H., Yan H., Ratnam V The Probability of Liner Failure in Mark 1 Containment. Nureg/CR-5423, 1990.
16. Alsmeyer H., Tromm W A Core Catcher Concept and Basic Eperimental results. pp. 101- 105.
17. Alsmeyer H., BETA -Experiments in verification of the WECHSL-Code: Experimental Results on the Melt-Concrete Interaction, Nucl. Eng. Des. 103 (1987), 115 -125.
18. Greene G.A., Ginsburg T., Tutu N. BNL Severe Accident Sequence Eperiments and Analysis Program. Trans. 12th Water Reactor Safety research Information Mtq., NUREG/CR-0057, 1984.
19. Malinovic B., Henry R.E., Sehgal B.R. Experiments Relating to BWR Mark 1 Shell-Core Debris Interaction. ANS Proceedings 1989 National Heat Transfer Conferences., Philadelphia, PA, August 26-30, 1989.
20. Greene G.A. Perkins K.R., Hodge S.A. Mark 1 Containment Drywell Impact of Core/Concrete Interactions on a Containment Integrity and Failure of the Drywell Liner Soure term evaluations for accident condition - proceedings of an international symposium on sourse term evaluation for accident conditions. Columbs, OH, Oktober 28-November 1, 1985, pp. 429, International Atomic Energy Agency, Viena ,1986.

21. Sehgal B.R., Spencer B.W.. Spreading of Melt in Reactor Containments (SMELTR). Presentation on Second DECD (NEA) CSNI Specialist meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, Karlsruhe, Germany, 1-3 April, 1992.
22. Farmer M.T., Sienicki J.J., Spencer B.W. The MELTSPREAD-1 code for Analysis of transient spreading in containment. ANS Winter Meeting Session on Thermal Hydraulics of Severe Accidents, Washington D.C. November 11-15, 1990
23. Courtaud M.. PWRs Severe Accident Research and Development Program of CEA DRN. 4th Annual Scientific\ Technical Conference of the Nuclear Safety. Nizhny Novgorod. 1993.
24. Veteau J.M. CORINE program. Proceedings of the workshop OECD/CSNI/NEA on large molten pool heat transfer, Grenoble, March 1994, p. 531
25. SCDAP/RELAP5/MOD2 CODE, Manual , Volume 4: MATPRO-A. Library for Material Properties for Light Water Reactors Accident Analysis. NUREG/CR - 5273, EGG-255, Vol.4 R3, 1990.
26. American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors. ANSI/ANS - 5.1 - 1979. August 28, 1979.
27. Bradley D.R., Gardner D.R. "CORCON-MOD3 User Manual". SAND92-0167, (NUREG/CR-5843), 1992.
28. Chudanov V.V., Popkov A.G., Strizhov V.F., Vabishchevich P.N., Aksenova A.E. Modeling of core spreading processes. Preprint NSI-13-93. Moscow: Nuclear Safety Institute, 1993.
29. Бояджиев Ч., Бешков В. Массоперенос в движущихся пленках. М.: Мир, 1988.
30. Вабищевич П.Н., Вабищевич Т.Н. Моделирование пленочных течений несжимаемых жидкостей. Препринт ИММ РАН N 22, 1993.
31. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1989.
32. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Головизнин В.М., Варенков В.В., Попков А.Г., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В. Комплекс программ "РАСПЛАВ" для анализа взаимодействия расплава с бетоном. Сб. Проблемы безопасного развития атомной энергетики. Москва: Наука, 1993.
33. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Киселев В.П., Попков А.Г., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В. Моделирование систем удержания расплава топлива. Сборник работ Проблемы Безопасного Развития Атомной Энергетики. М. Наука, 1990
34. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Головизнин В.М., Киселев В.П., Попков А.Г., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В. Моделирование проплавления корпуса реактора и опускания топлива в бетоне при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР с помощью комплекса программ РАСПЛАВ, М. 1989, 40 с, Препринт ИАЭ им. Курчатова N 4778/3
35. Goldstein S., Joly J., Juignet N.. some numerical algorithms and applications of the delfine computer program numerical methods in thermal problems. Proceedings of the first international Conference. Swansea, Wales, July, 1979
36. Varpeaux P., Millard A., Charass Th. castem 200 une approche moderne du calcul des structures. in Calcul des structures et intelligence artificielle. Ed. Pluralis, 1989.
37. M. Reinmann, S. Stiefel. The WECHSL - MOD2 CODE: A computer Program for the interaction of Core Melt with Concrete including Long Term Behavior. Kfk 4477, June 1989
38. M. Pilch and P.K. Mast. PLUGM: A computer Thermal Hydraulic Computer Model for Freezing Melt Flow in a Channel, SAND-1580, Sandia National Laboratories, April 1984
39. H. Alsmeyer, B. Kuczer, H. Werle, M. Burger, G. Cognet, E.H.P. Cordfunke, M. Fisher, F. Parozzi, B.D. Turland, J.M. Veteau. Overview on the results of the RCA project on molten core-concrete interaction, Brussel, 1995, 231-255
40. G. Heuser, H. Weisshaupl, H. Plank, Severe accident mitigation concept for the EPR and R&D-support. Heat and mass transfer in severe nuclear reactor accidents. Begel house. 1996. Pp. 284-300.
41. Боровкова Л.Б. и др. Бетон на основе диоксида циркония и вяжущего гидратационного твердения Огнеупоры. 1990. N4. С. 1.
42. Пахомов Е.П. и др. Испытания футеровки из бетона ЦГБ в высокотемпературном потоке продуктов сгорания. Огнеупоры. 1990. N5. С. 6.
43. Бородин Т.И. и др. Формирование зональной структуры футеровки на основе диоксида циркония. Огнеупоры. 1990. N6. С. 22.
44. Бакунов О.В. и др. Исследование высокотемпературной прочности на растяжение диоксидциркониевого бетона гидратационного твердения. Огнеупоры. 1990. N7. С. 11.
45. Бакунов О.В. и др. Сравнительное исследование высокотемпературной прочности на растяжение бетонов на основе диоксида циркония. Огнеупоры. 1990. N8. С. 16.
46. Боровкова Л.Б. и др. Совершенствование состава и исследование характеристик модифицированного диоксидциркониевого бетона гидратационного твердения для высокотемпературной футеровки. Огнеупоры. 1991. N3. С. 8.

- 47 Бакунов О.В. и др. Исследование прочности на растяжение диоксидциркониевого бетона гидратационного твердения в интервале 300 - 2300 К Огнеупоры. 1991. N5. С. 4.
48. Пахомов Е.П., Фортон В.Е. .Разработка ловушки корнума на основе диоксидциркониевого бетона. Симпозиум по ядерной безопасности. Япония. Октябрь 1996.
49. Cole R.K., Kelly D.P., Ellis M.A. CORCON-MOD2: A Computer Program for Analysis of Molten-Core-Concrete Interactions. Sandia National Laboratories, NTIS. August 1984. NRC Report NUREG/CR-3920.
50. American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors. ANSI/ANS-5.1-1979. August 29, 1979.
51. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д., Стрижов В.Ф. Физические модели тяжелых аварий на АЭС. М.. Наука, 1992.