

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС

В

ЯДЕРНО-

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ

УСТАНОВКАХ

***ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС
В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВКАХ***

Тема № 14

**Тепломассообмен в ЯЭУ
при аварийных ситуациях**

Независимо от типа реактора, если в нем нарушаются соотношения между выделяемой и отводимой мощностью (при уменьшении последней), происходит разогрев элементов активной зоны.

Источником аварийной ситуации могут быть

- *блокировки проходного сечения ТВС;*
- *прекращение расхода теплоносителя вследствие разрыва трубопровода или потери теплоносителя;*
- *рост реактивности вследствие самопроизвольного извлечения органа СУЗ.*

На схеме показана примерная последовательность явлений, которые могут реализоваться в этом случае.

*Схема
последовательности
основных процессов
при тяжёлой аварии*



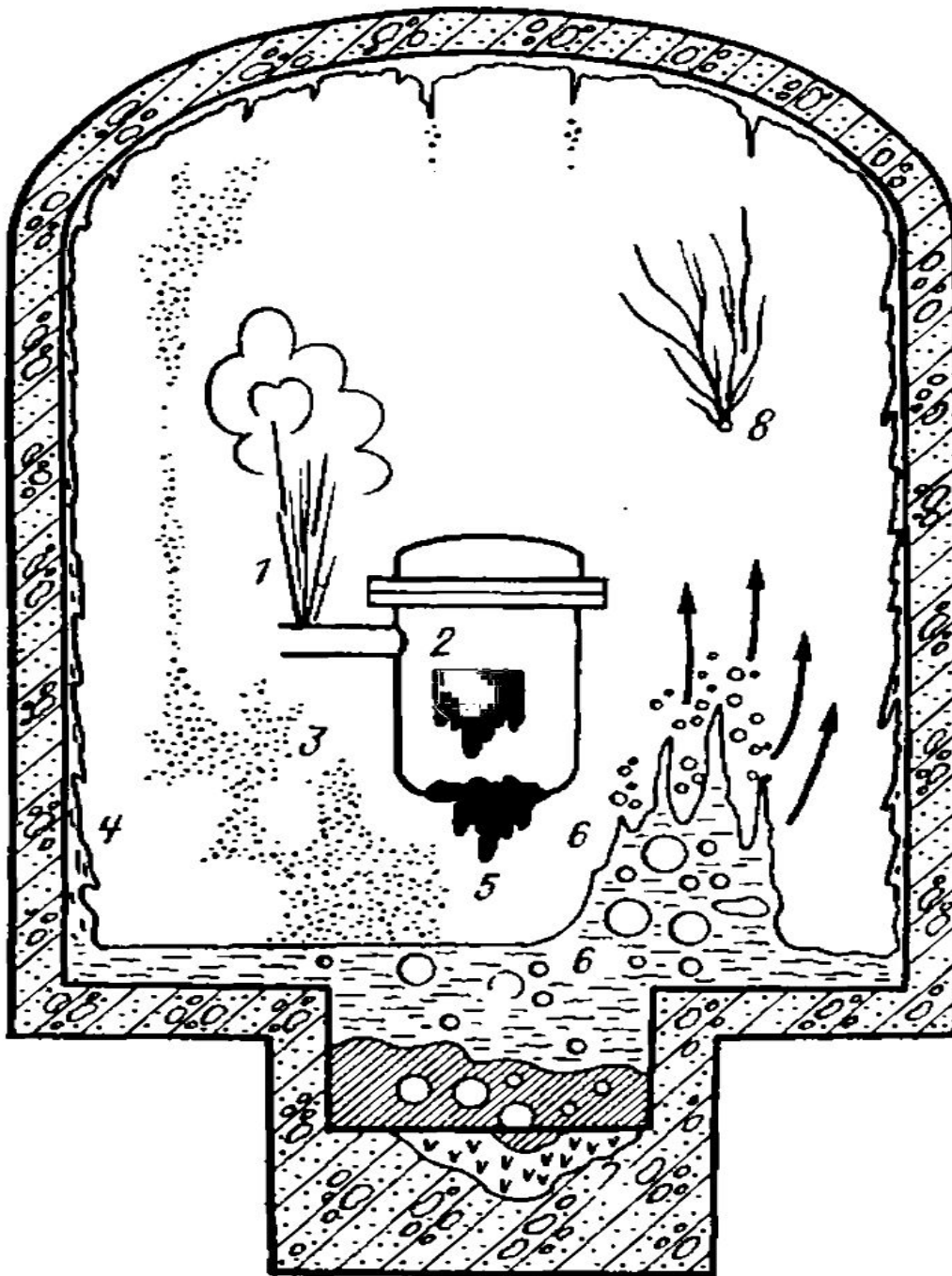


Рисунок 1 – Возможные процессы при аварии водо-охлаждаемого реактора с расплавлением активной зоны:

- 1 – течь в 1-м контуре;
- 2 – расплавление активной зоны;
- 3 – аэрозоли в защитной оболочке;
- 4 – конденсация пара на поверхностях внутри защитной оболочки;
- 5 – разрушение корпуса;
- 6 – паровой взрыв;
- 7 – взаимодействие кору-ма с бетоном;

Режимы теплообмена определяются тепловыми и гидродинамическими условиями (массовая скорость, паросодержание, температура оболочки и др.), которые зависят от истории (сценария) аварии.

Среди проблем безопасности ядерных реакторов типа ВВЭР наиболее важными являются проблемы, связанные с авариями при потере теплоносителя.

При рассмотрении *таких аварий* можно выделить **три** этапа:

- 1) разгерметизация и осушение активной зоны;
- 2) заполнение (повторный залив) активной зоны теплоносителем с помощью системы аварийного охлаждения;
- 3) повторное смачивание ТВЭЛОВ.

РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЯ (10÷15 с).

Главный вопрос оценки этого режима состоит в определении расхода теплоносителя через разрыв элемента первого контура.

Для этого необходимо знать критическую скорость истечения из разрыва, уровень мощности и интенсивность теплообмена в активной зоне.

Критическая скорость при истечении двухфазного потока сильно зависит от режима течения, то есть от истинного объёмного паросодержания и геометрии разрыва.

Эта задача – гидродинамическая.

При истечении теплоносителя из реактора, охлаждаемого *недогретой водой, давление очень быстро падает до значения, соответствующего давлению насыщения при данной температуре, образуется большое количество пара.*

Направление течения теплоносителя в активной зоне неоднократно изменяется на обратное, расход может остановиться, паросодержание изменяется в широких пределах.

Поэтому на оболочке твэла может наступить кризис теплообмена, произойти осушение твэлов.

Расчёт температуры оболочки во всех этих режимах – одна из главных задач в обосновании безопасности реактора.

ЗАТОПНЕНИЕ (ЗАЛИВ) АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Вода из системы аварийного охлаждения проходит через холодный участок и опускной зазор в корпусе.

Эта вода вступает в контакт с образующимся паром.

Перемешивание воды и пара носит прерывистый характер.

При соприкосновении воды с паром происходит быстрая конденсация, создается разрежение, затем интенсивность конденсации снижается, давление возрастает.

Эти явления приводят к пульсациям расхода с большой амплитудой, что может вызвать гидравлические удары.

Возможны режимы захлебывания, когда встречный поток пара препятствует поступлению воды в активную зону.

потенциальными источниками
аварийного выделения энергии могут быть:

- ◆ *остаточные тепловыделения, обусловленные радиоактивным распадом продуктов деления, составляющие 6÷7% $N_{ном}$ в первые секунды после остановки;*
- ◆ *экзотермические химические реакции между материалами активной зоны;*
- ◆ *тепло, запасенное водой и конструкционными материалами реакторной установки.*

ВВЭР-1000 имеет следующие характеристики:

- средняя температура теплоносителя первого контура – 303°С;
- средняя температура топлива – 870°С;
- энергия, аккумулированная в теплоносителе МДж – $3,8 \cdot 10^5$;
- энергия, аккумулированная в твэлах МДж – $1,4 \cdot 10^4$.

Взаимодействие циркония с водой при высоких температурах идет в соответствии с уравнением экзотермической реакции:



Реакция начинается при температурах примерно $800\div 950^\circ\text{C}$.
При 1200°C реакция становится самоподдерживающейся.

При реакции с водой выделяется 6530 кДж/кг, при реакции с кислородом около 12 кДж/кг, водорода образуется примерно 500 л/кг.

ПОВТОРНОЕ СМАЧИВАНИЕ

При этом вода входит в активную зону из нижней или верхней камеры. При ее продвижении образуется пар с большим количеством капель.

Фронт смачивания перемещается прерывисто из-за неравномерного распределения потока теплоносителя и неравномерного распределения зазоров в кассете.

Вода, выброшенная из активной зоны, при заливе снизу может снова вернуться в нее. Этот возврат приводит к смачиванию ТВЭЛОВ. Характерное изменение температуры оболочки во времени показано на рисунке 2.

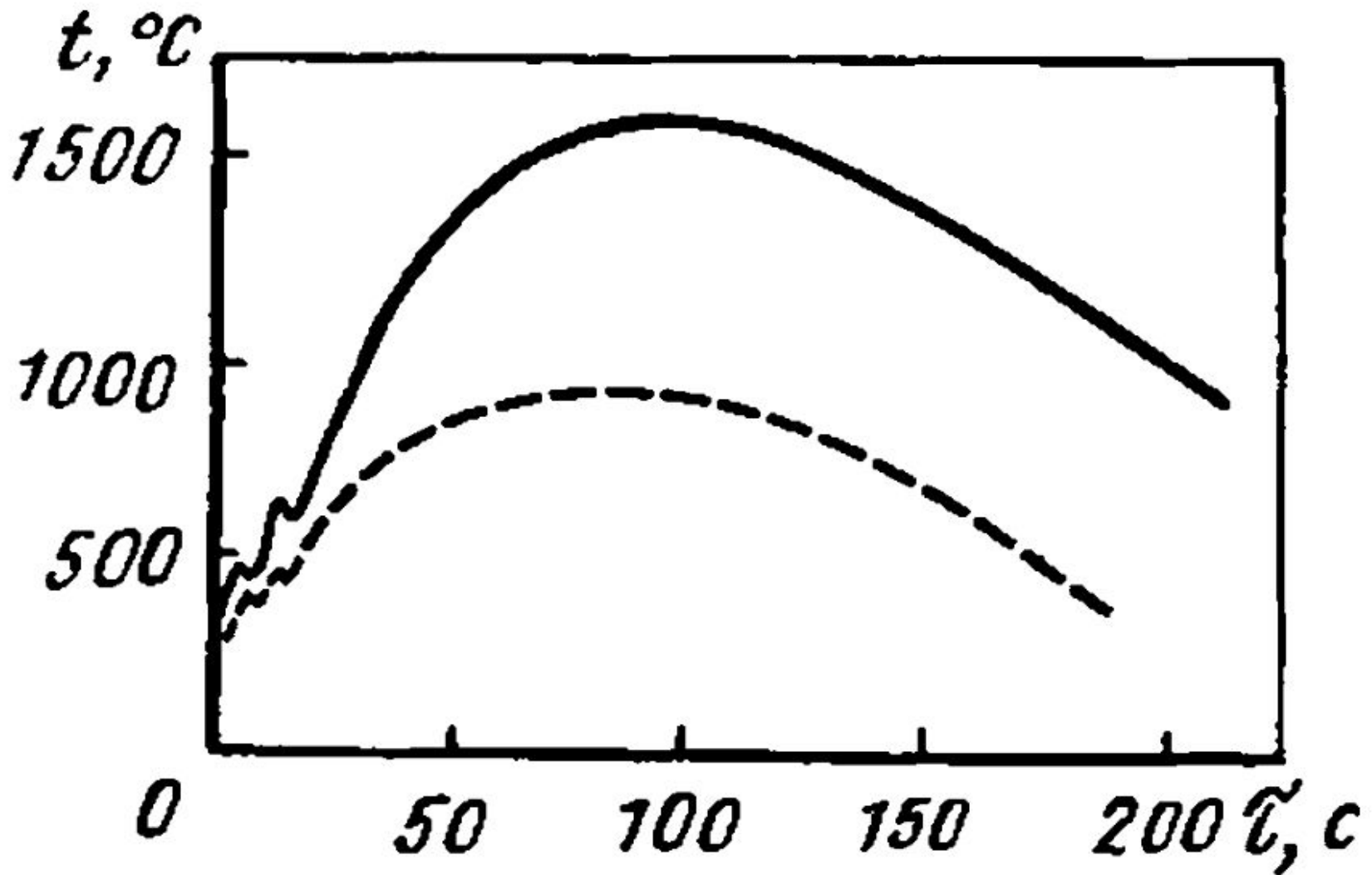


Рисунок 2 – Изменение температуры оболочки твэла при разрыве трубопровода

первого контура водоохлаждаемого реактора:

--- керамическое топливо (UO_2);

— керметное топливо с высокой теплопроводностью

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

При истечении теплоносителя из контура, давление падает до значения, соответствующего давлению насыщения при данной температуре.

Жидкость у поверхности нагрева может оказаться перегретой настолько, что ее температура будет превосходить температуру гомогенного парообразования, в то время как центры парообразования не успели активизироваться.

Вследствие одновременного резкого роста паровых пузырей образуется сплошной паровой слой, то есть обращённый кольцевой режим – жидкое ядро отделено от поверхности паровой плёнкой.

Таким образом, возможно наступление кризиса либо из-за испарения перегретой жидкости, либо из-за уменьшения расхода.

Поскольку можно сделать много предположений о месте и виде разрыва трубопровода или другой разгерметизации, трудно точно определить область режимов и условия, которые возникнут при аварии.

Когда теплоноситель истекает из контура, возникает обратная циркуляция, затем по мере опорожнения контура снова меняется направление потока и, наконец, расход уменьшается до очень низких значений (рисунок 3).

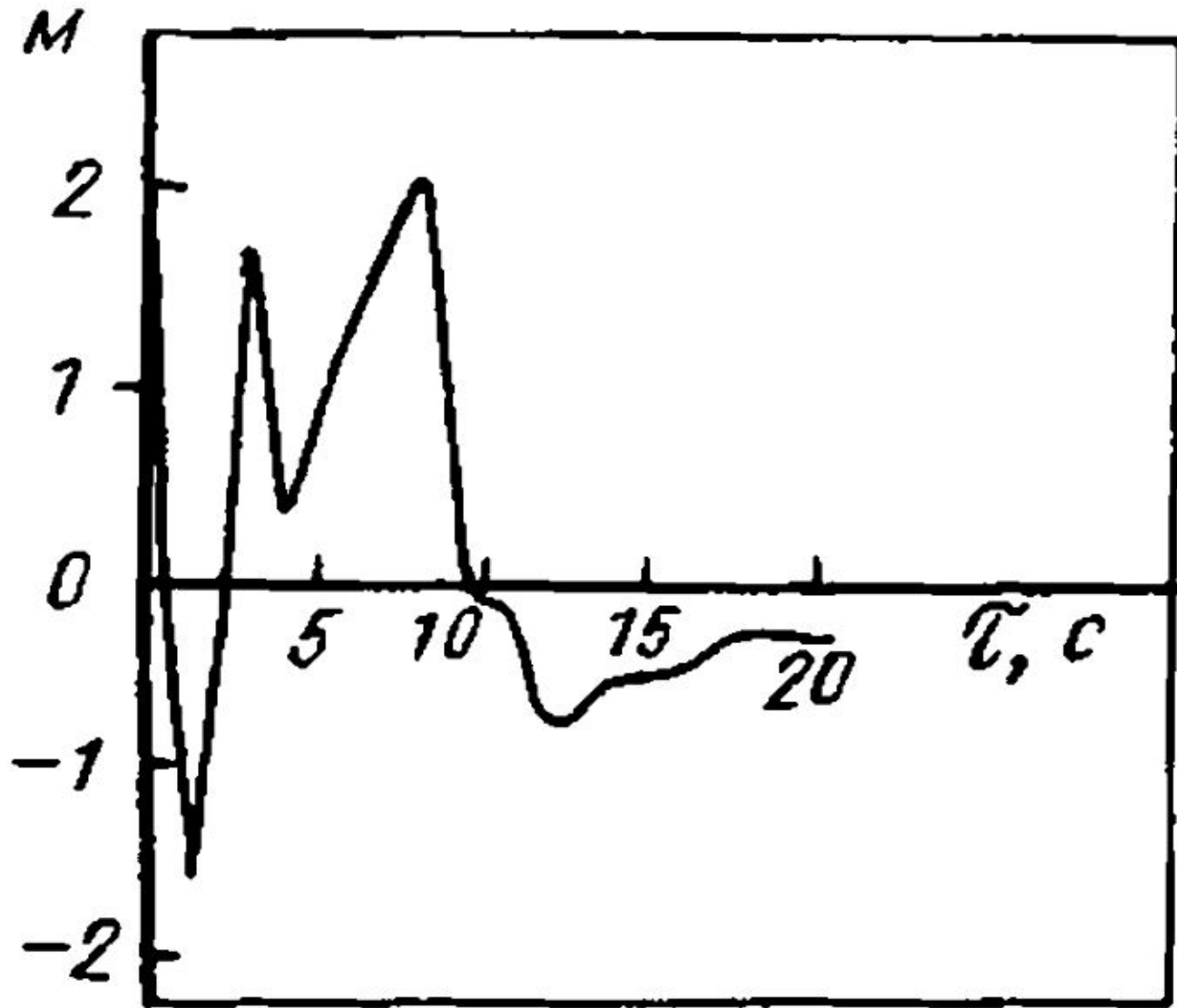


Рисунок 3 – Изменение расхода в активной зоне водоохлаждаемого реактора при аварии с потерей теплоносителя

Гидродинамические процессы при разгерметизации приводят к следующим режимам теплообмена ТВЭЛов:

- 1) конвективный теплообмен с жидкостью;
- 2) пузырьковое кипение;
- 3) кризис теплообмена;
- 4) закризисный теплообмен;
- 5) конвективный теплообмен с паром.

Значение коэффициента теплообмена α при нормальных условиях составляет примерно $(2 \div 4) \cdot 10^4$ Вт/(м²·К).

После наступления кризиса α уменьшается на порядок и более. Такое ухудшение интенсивности теплообмена может привести к тому, что в течение нескольких секунд температура оболочки возрастет до средней температуры топлива (рисунок 4), несмотря на снижение нейтронной мощности реактора.

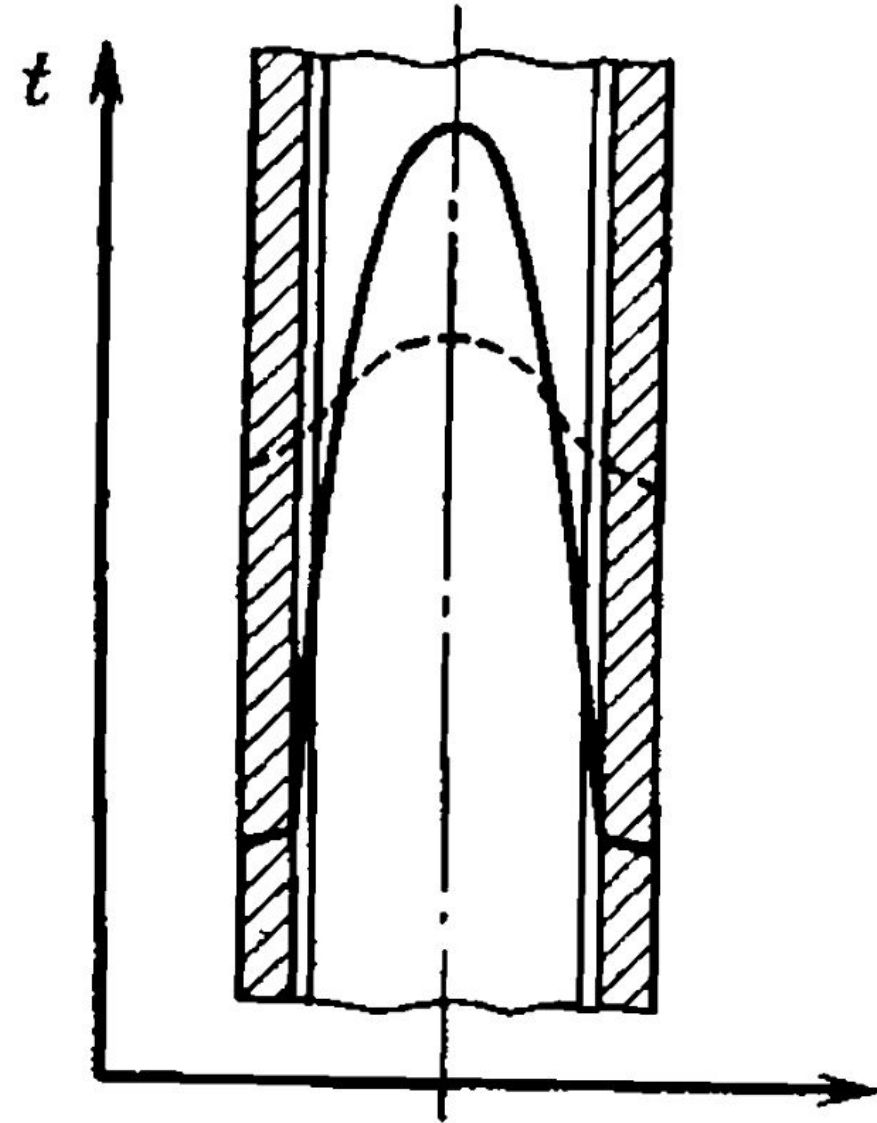


Рисунок 4 – Поле температуры
в ТВЭЛ

до (-----)

и

после (—)

аварийного

останова

реактора

В стадии *разгерметизации* при нестационарных условиях происходит вскипание в объёме теплоносителя, приводящее к высоким значениям истинного объёмного паросодержания.

Однако при *малой течи*, когда давление падает медленно, роль объёмного вскипания невелика, и механизм наступления кризиса связан с переходом пузырькового кипения в пленочное.

В случае же *больших течей*, приводящих к интенсивному объёмному вскипанию, наиболее вероятен механизм с испарением пленки жидкости.

Для расчета критической плотности теплового потока в первом приближении можно использовать соотношения, полученные для стационарных условий или с некоторыми поправками.

Плотность теплового потока, который отводит испаряющаяся пленка, в нестационарных условиях можно оценить по соотношению:

$$q = 3,15(0,84 - x) \text{ [МВт/м}^2 \text{]}$$

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ И ПОВТОРНОМ СМАЧИВАНИИ

На заключительной стадии истечения охлаждающая вода из системы аварийного охлаждения (САОЗ) поступает в активную зону.

К этому времени твэлы частично или полностью осушены, и температура оболочек может достигать 1000°C .

Основная задача САОЗ – обеспечение таких условий охлаждения, чтобы температура оболочки не превысила предельную (1200°C).

После начала залива (или возобновлении расхода) температура оболочки твэла может продолжать нарастать, хотя и с уменьшающейся скоростью, за счет остаточного тепловыделения и тепла аккумулированного в топливе (рисунок 5).

При этом скорость инерции тепла в топливе все еще превышает скорость отвода тепла.

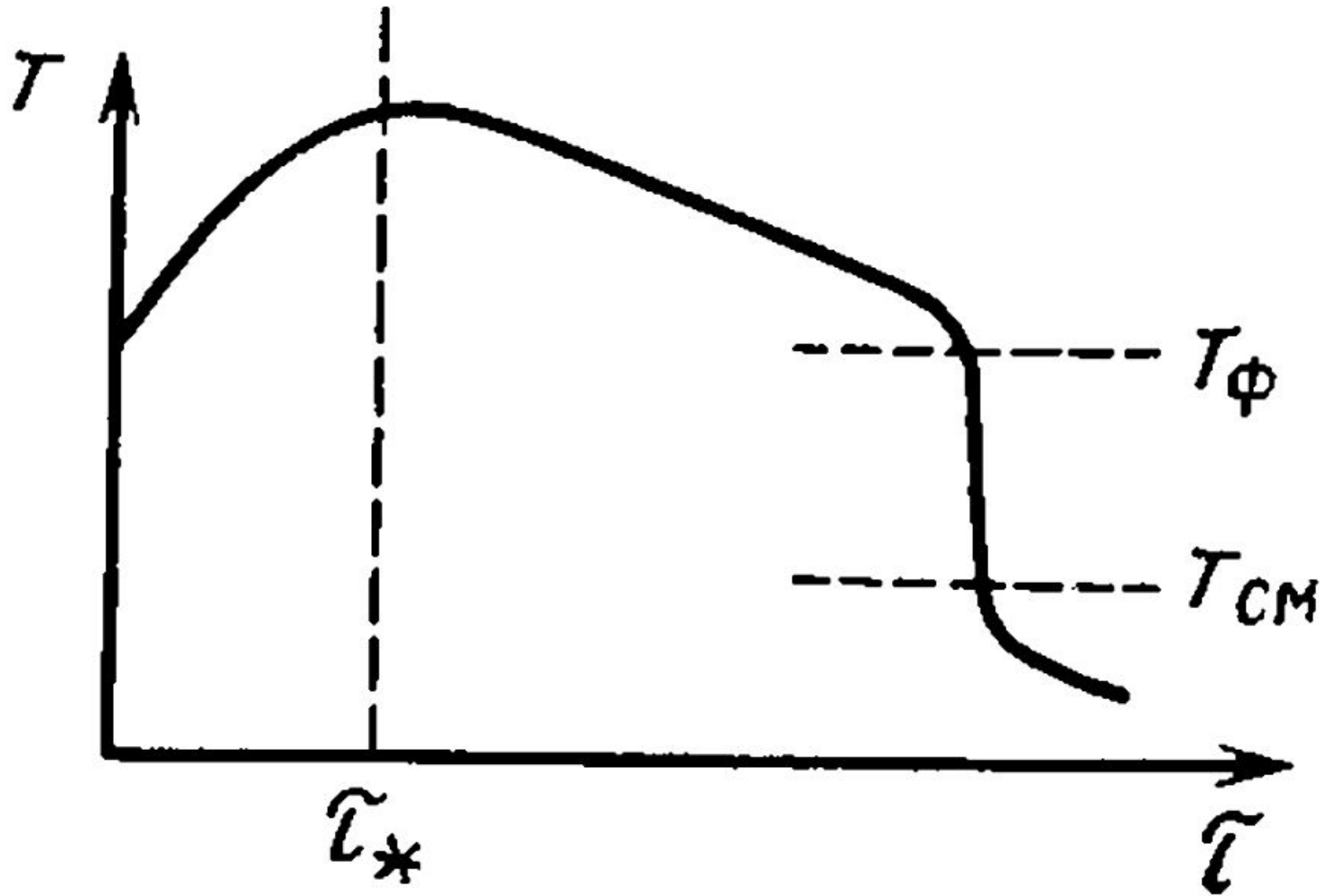


Рисунок 5 – Изменение температуры оболочки твэла в режиме послеаварийного охлаждения: t – время после заливки зоны; t^* – время достижения максимального значения температуры (время опрокидывания); $T_{ф}$ – температура фронта охлаждения; $T_{см}$ – температура смачивания.

Когда фронт охлаждения достигает поверхности, происходит охлаждение типа закалки из-за орошения поверхности каплями жидкости.

При дальнейшем понижении температуры наступает повторное смачивание поверхности жидкостью, то есть восстанавливается контакт жидкости с поверхностью.

Процессы теплообмена в каждой зоне разогретого твэла связаны с

- направлением потока теплоносителя,
 - скоростью потока теплоносителя
- и
- температурой поверхности в области фронта смачивания.

Схема режимов теплообмена при аварийном заполнении активной зоны снизу показана на рисунке 6.

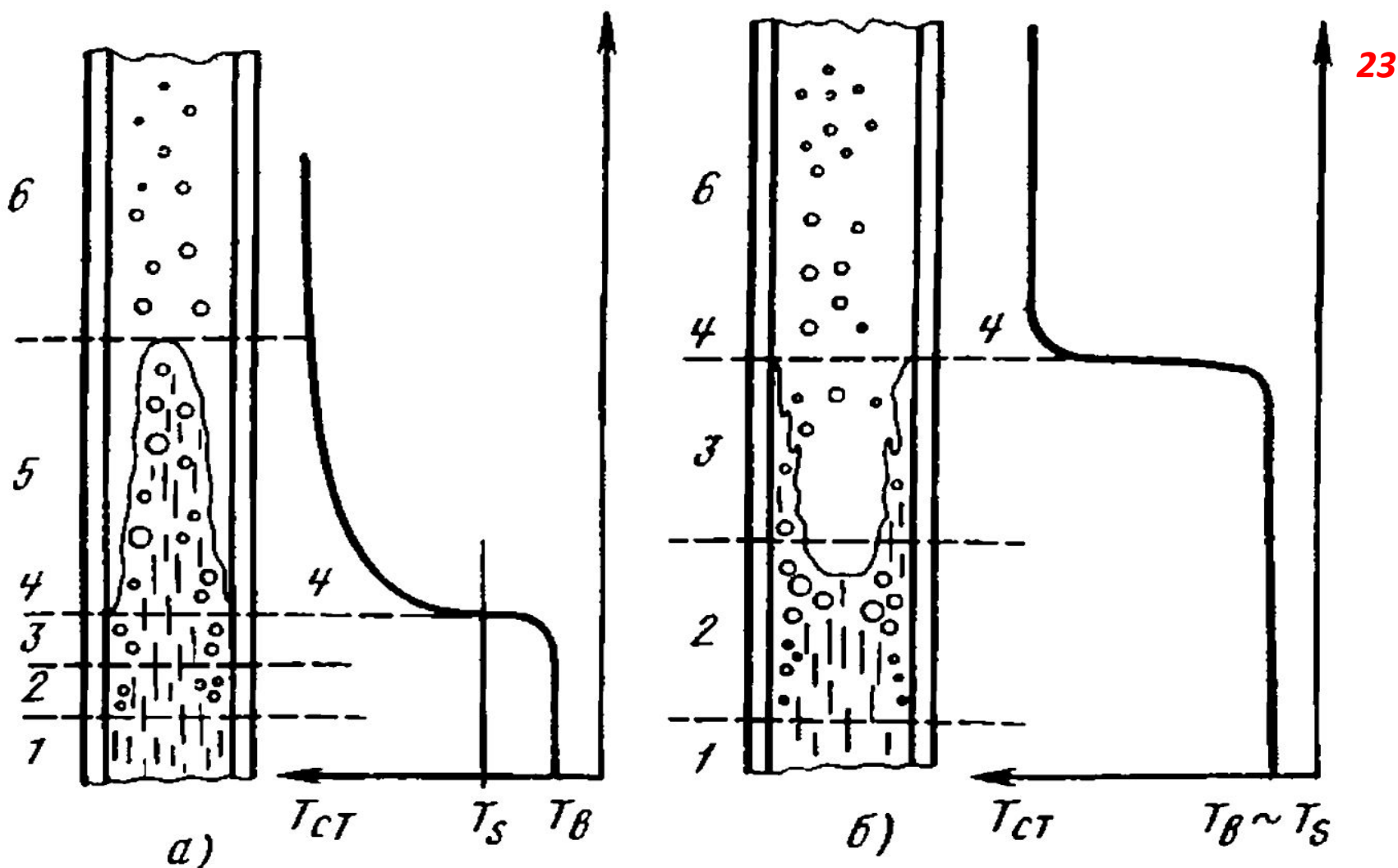


Рисунок 6 – Режимы теплообмена при аварийном заполнении активной зоны снизу:
а) – быстрое заполнение ($T_{BX} < T_S$) – большие массовые скорости заполнения;
б) – медленное заполнение ($T_{BX} \approx T_S$) – малые массовые скорости заполнения;
1 – зона вынужденной конвекции; **2** – неразвитого пузырькового кипения; **3** – зона развитого кипения; **4** – фронт смачивания; **5** – зона пленочного кипения (обращенный кольцевой режим); **6** – зона пленочного кипения (дисперсный режим).

В основном они (режимы) соответствуют течению жидкости и парожидкостной смеси в вертикальном парогенерирующем канале, где существуют увлажнённые и неувлажнённые участки поверхности.

В неувлажнённой области различают три вида теплообмена:

- пленочное кипение,
- охлаждение разбрызгиванием капель,
- переходное кипение.

Все эти три вида называют *закризисным теплообменом*.

Режимы теплообмена и распределения температуры при повторном смачивании поверхности стекающей пленкой жидкости при заливе осушенной зоны **сверху** иллюстрируются на рисунке 7.

При заливе сверху возможны режимы "захлебывания", когда образуется встречный поток пара и пленка тормозится или даже увлекается потоком пара вверх, своего рода "паровая блокировка".

Фронт смачивания определяется сечением, где достигается кризис теплообмена.

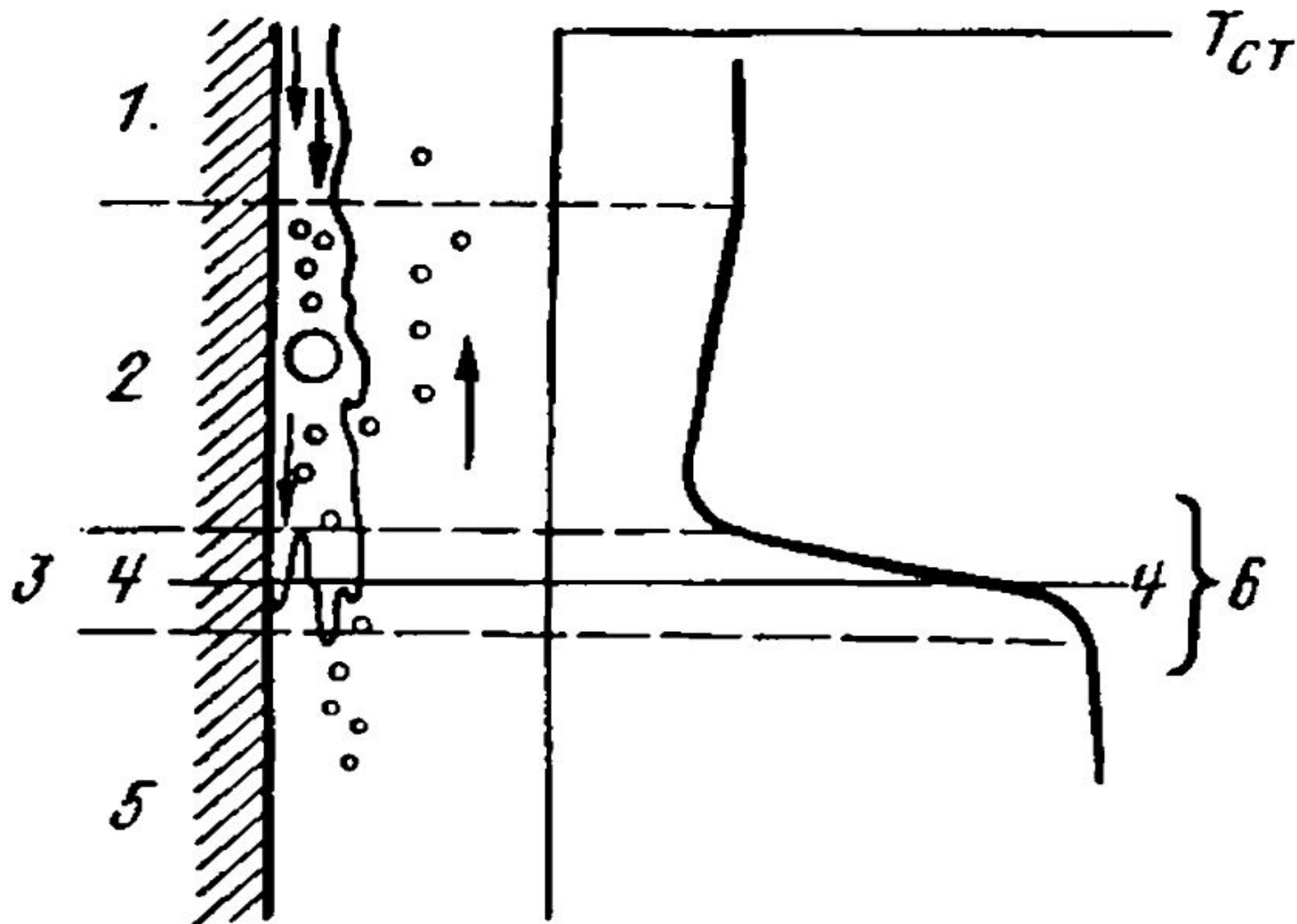


Рисунок 7 – Режимы теплообмена и распределения температуры при повторном смачивании нагретой поверхности стекающей пленкой жидкости:
 1 – зона конвекции; 2 – зона пузырькового кипения (капли увлекаются паром);
 3 – зона пульсирующей пароводяной смеси; 4 – фронт смачивания; 5 – зона пленочного кипения; 6 – область влияния аксиальной теплопроводности

Температура топлива в процессе залива активной зоны в основном определяется следующими параметрами:

- коэффициентом теплообмена от оболочки ТВЭЛ к воде (α') или к пару (α'');
- коэффициентами гидравлического сопротивления трения и местного (включая возможные блокировки);
- начальной температурой топлива;
- аксиальной теплопроводностью, благодаря которой тепло из горячей области стержня с одной стороны фронта смачивания, где теплообмен низкий, передается в другую часть, где теплообмен высокий.

Температуру стенки, K , на фронте смачивания при малых массовых скоростях (без тепловыделения в стенке) можно описать выражением

$$T_{\phi} = T_s + 180 \left[1 - \left(\frac{P}{P_k} \right)^2 \right] .$$

Наличие тепловыделения в стенке увеличивает температуру фронта на десятки градусов и снижает скорость движения фронта.

Оценку температур поверхности за фронтом смачивания, где происходит охлаждение поверхности паром с каплями жидкости, можно выполнить по формулам для кризисного теплообмена.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА ТОПЛИВА С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ. ПАРОВОЙ ВЗРЫВ

Проблема взаимодействия расплава материалов активной зоны (кориума) с теплоносителем — комплексная задача, в которой переплетаются вопросы теплообмена, физики плавления, химического взаимодействия между различными материалами активной зоны в широком диапазоне температур.

Это очевидно из перечня явлений, составляющих собственно тяжелую аварию АЭС с расплавлением активной зоны реактора с охлаждением водой: прекращение (или сокращение) охлаждения; перегрев топлива; окисление оболочек твэлов, химическая реакция циркония с паром, выделение водорода; расплавление оболочек и топлива, образование кориума; взаимодействие кориума с теплоносителем; фрагментация расплава, образование ударных волн, паровой взрыв; охлаждение фрагментов разрушенной активной зоны.

Паровой взрыв – резкое (быстрое) за время ~ 1 мс образование больших количеств пара, сопровождающееся местным повышением давления, вследствие перехода тепловой энергии (затрачиваемой на испарение жидкости и расширение пара) в механическую.

Для возникновения и развития крупномасштабного парового взрыва необходимо:

1) образование такой смеси расплава и теплоносителя ячеистой структуры, которая была бы достаточно компактной, чтобы волна давления могла распространиться внутри нее;

смесь должна иметь достаточное количество теплоносителя для образования пара;

2) должен присутствовать спусковой механизм – импульс давления, который привел бы к срыву пленки пара на каплях расплава, резкой интенсификации теплообмена.

Максимальная интенсивность взаимодействия реализуется при соотношении объемов расплава и воды $1.5 \div 2.0$ (рисунок 8).

При других соотношениях интенсивность меньше:
либо мало расплава, следовательно мало количество запасенного тепла;
либо мало воды для реализации парового взрыва.

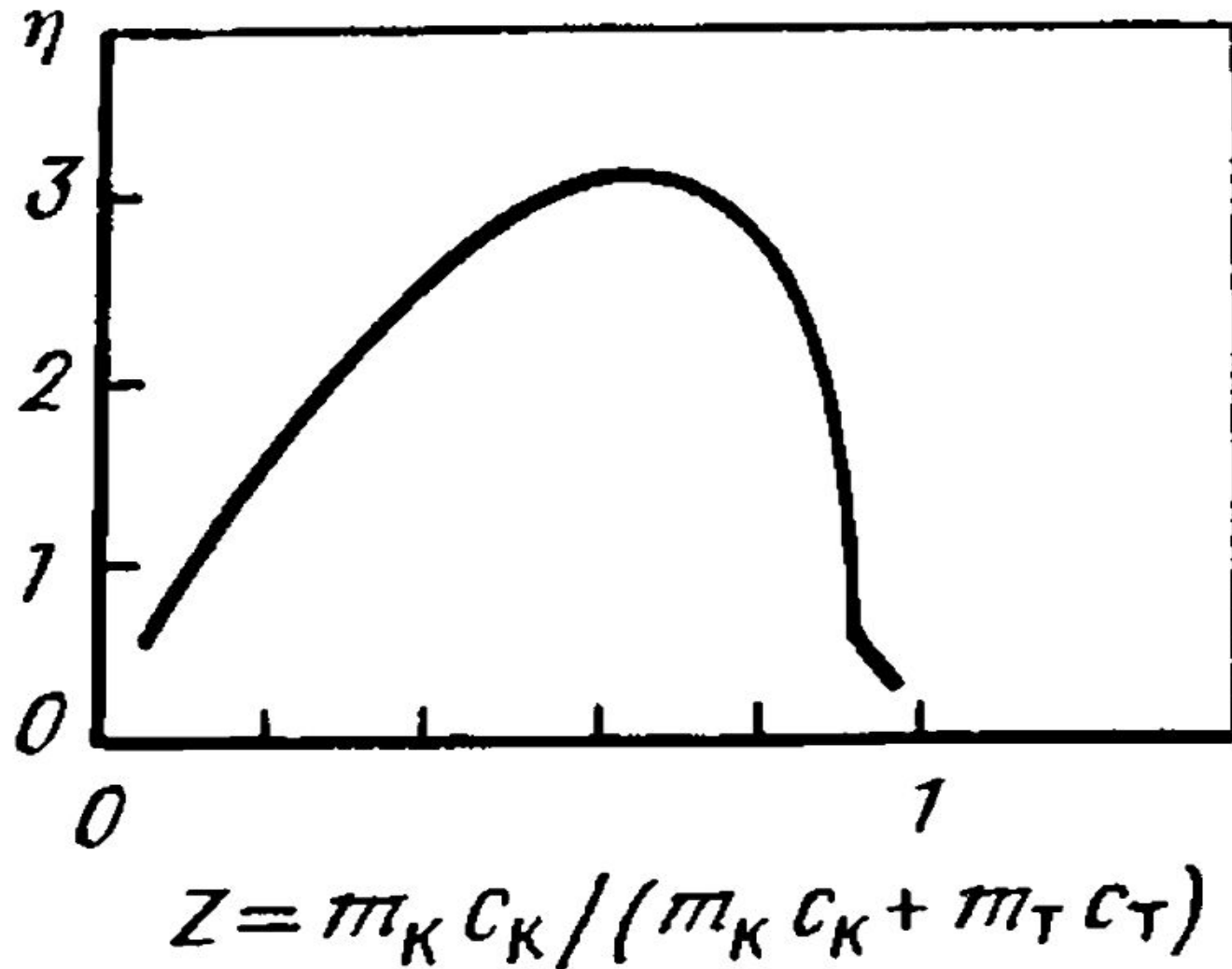


Рисунок 8 – Зависимость **коэффициента конверсии** (доли тепловой энергии перешедшей в механическую) при паровых взрывах от соотношения объёмных теплоемкостей кориума (κ) и теплоносителя (T).

Величина поверхности теплообмена сильно зависит от степени дробления (фрагментации) расплава. Именно фрагментация расплава приводит к увеличению площади контакта в $10^6 \div 10^8$ раз и интенсивной генерации пара за $10^{-3} \div 10^{-4}$ с.

Механизмы фрагментации расплава связаны с локальными тепловыми и гидродинамическими явлениями на границе расплава и теплоносителя.

Периодический рост и схлопывание паровых пузырей, разница в скоростях капли и расплава приводят к возникновению сил, вызывающих дробление капель.

Образующиеся ударные волны при взаимодействии с каплями расплава также приводят к дроблению капель (рисунок 9).

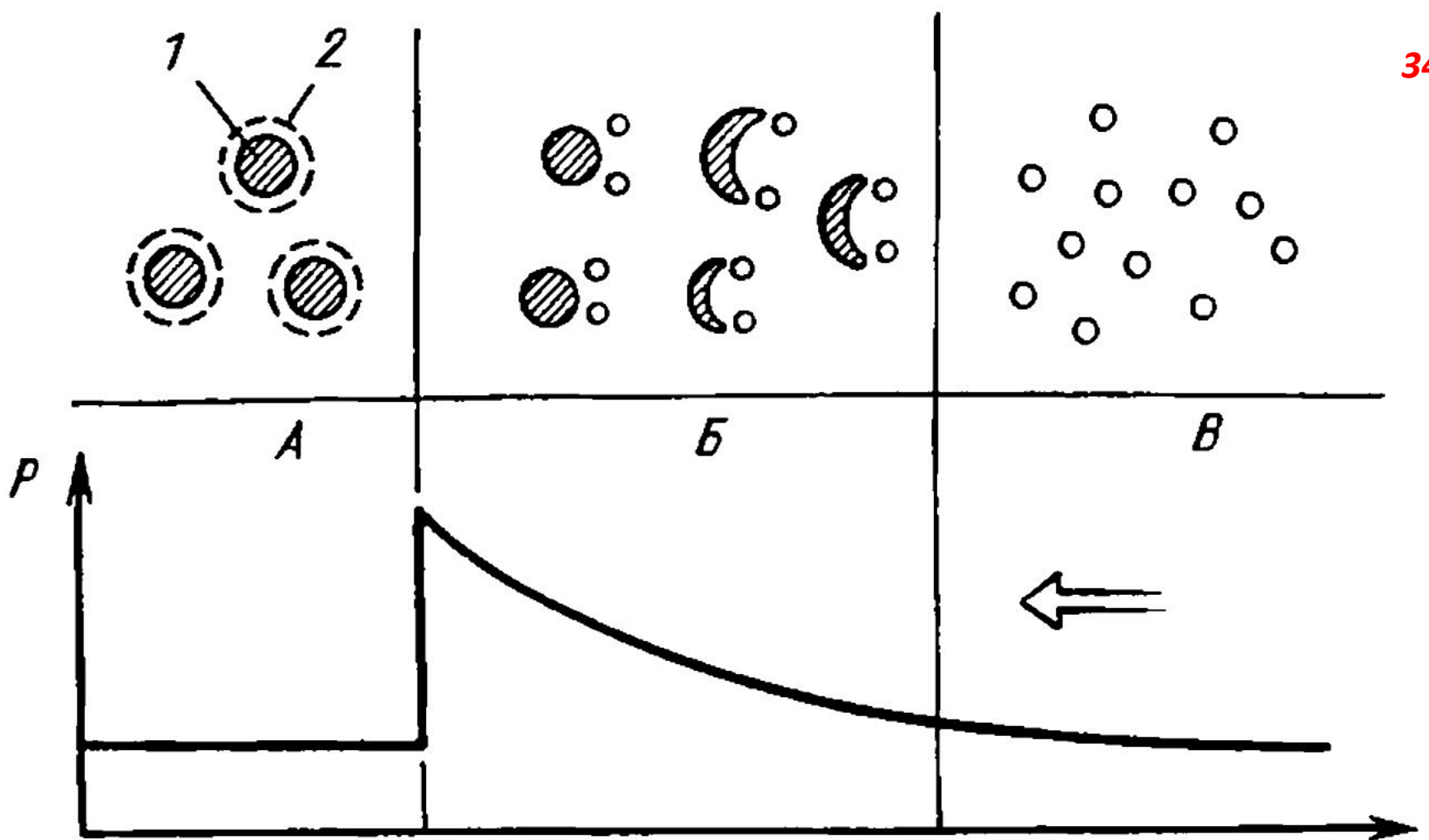


Рисунок 9 – Фрагментация капель в ударной волне:

А – зона исходной смеси;

Б – зона взрывного превращения;

В – зона расширения смеси;

1 — капля; **2** — паровая оболочка.

В явлении парового взрыва выделяются четыре стадии (фазы) :

- 1) **"фаза задержки"** — смешение теплоносителя и крупных капель расплава, образование паровой пленки на поверхности расплава;
- 2) **фаза интенсивного взаимодействия** — прорыв пленки пара, фрагментация капель, возникновение ударной волны;
- 3) **фаза распространения парового взрыва** — распространение фронта ударной волны, размельчение капель расплава за счет ударной волны, интенсификация перемешивания, увеличение энергии волны (2, 3 – собственно фаза парового взрыва);
- 4) **фаза затухания импульсов давления, кипения на застывших фрагментах.**

Сказанное выше иллюстрирует рисунок 10.

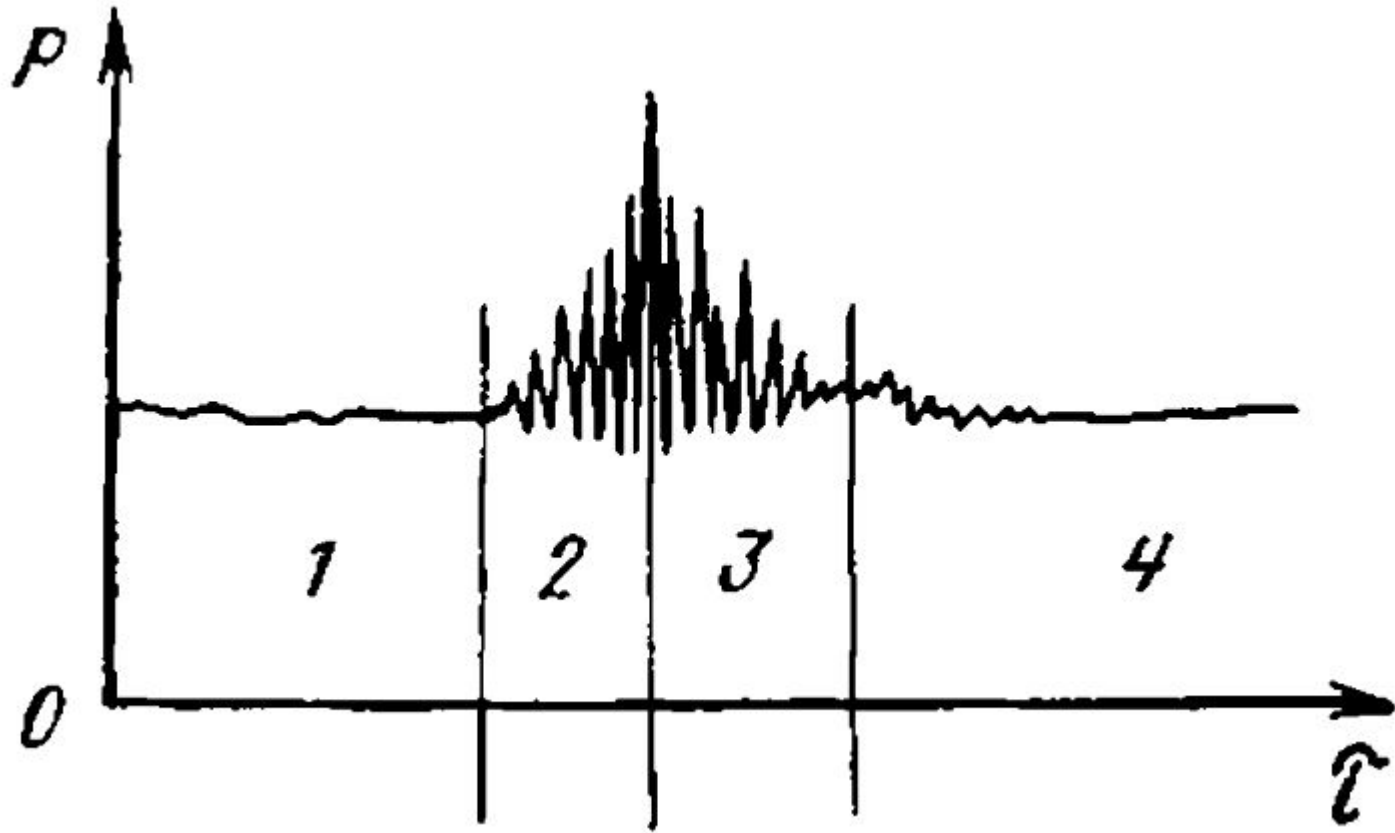


Рисунок 10 – Импульсы давления в разных фазах парового взрыва:

1 – фаза задержки;

2 – фаза интенсивного взаимодействия;

3 – фаза парового взрыва и
распространения фронта ударной волны;

4 – фаза затухания.

Один из главных вопросов оценки парового взрыва – знание того, как быстро отводится тепло от расплавленной частицы. Характер остывания одиночной расплавленной капли сферической формы иллюстрируется рисунком 11.

Коэффициент теплообмена при пленочном кипении (1) приблизительно равен $3 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и лишь при импульсе давления может увеличиваться на порядок.

При наступлении пузырькового кипения интенсивность теплообмена повышается и температура капли резко снижается (3).

Длительность фазы парового взрыва пропорциональна корню кубическому из массы расплава, то есть пропорциональна размерам системы.

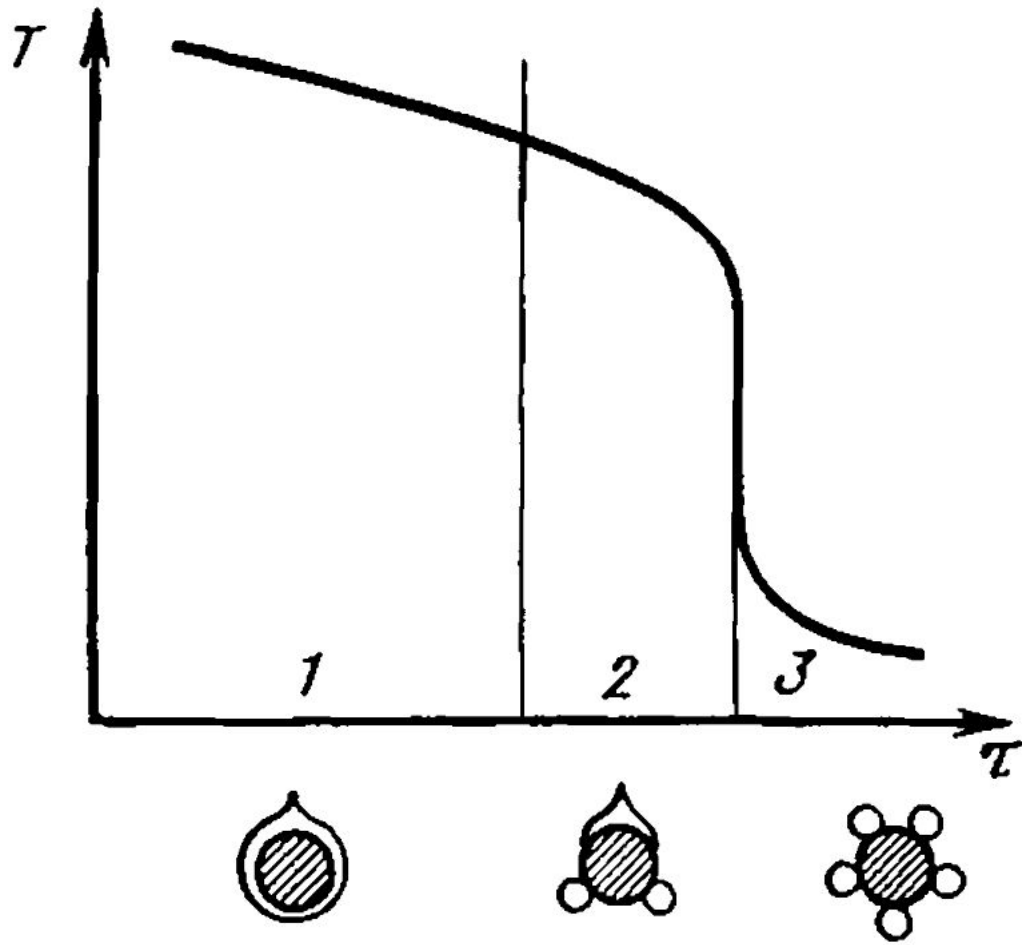


Рисунок 11 – Остывание одиночной расплавленной частицы:

1 – плёночное кипение;

2 – переходное кипение;

3 – пузырьковое кипение (коллапс паровой плёнки).

ОХЛАЖДЕНИЕ РАСПЛАВЛЕННОГО КОРИУМА И КОРПУСА РЕАКТОРА

Если при аварии возникает "озеро" расплавленного однородного кориума, то внутри него возникают токи естественной конвекции, интенсивность которых зависит от чисел ***Gr***, ***Pr*** или их произведения.

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu a} .$$

Для жидкости с внутренним тепловыделением ***Q*** используется критерий ***Ra₁***:

$$Ra_1 \text{ как } \frac{g\beta Q L^3}{\nu a \lambda} , \quad \Delta = \frac{QL^2}{\lambda}$$

Режим естественной конвекции для расплавленного топлива характеризуется большими числами $Ra_f \approx 10^5 \div 10^{10}$, а интенсивность теплообмена зависит от расположения поверхности (рисунок 12).

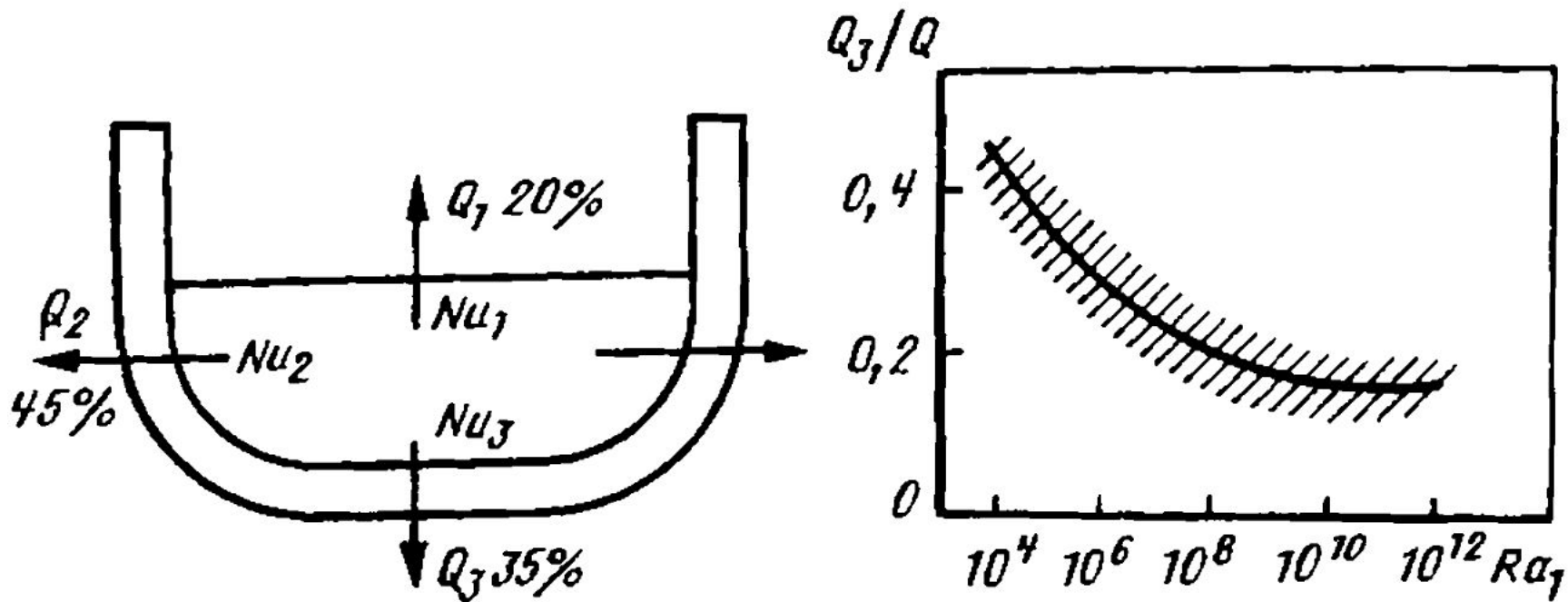


Рисунок 12 – Ориентировочные значения потоков тепла и интенсивности теплообмена Nu_1 , Nu_2 , Nu_3

Ориентировочные значения чисел Нуссельта, учитывающих естественную конвекцию в расплаве, описываются выражениями:

$$\overline{Nu}_1 = \overline{Nu}_2 \approx 0.3 Ra_1^{0.25} \quad , \quad \overline{Nu}_3 \approx Ra_1^{0.1} \quad .$$

Следует полагать, что озеро расплава не будет однородным. Более вероятно расслоение составляющих компонентов расплава по плотности (рисунок 13).

Поэтому результаты расчётов отвода тепла чувствительны к изменению различных параметров и будут зависеть от предположений о толщинах и теплофизических свойствах различных слоёв и обладают значительной степенью неопределенности.

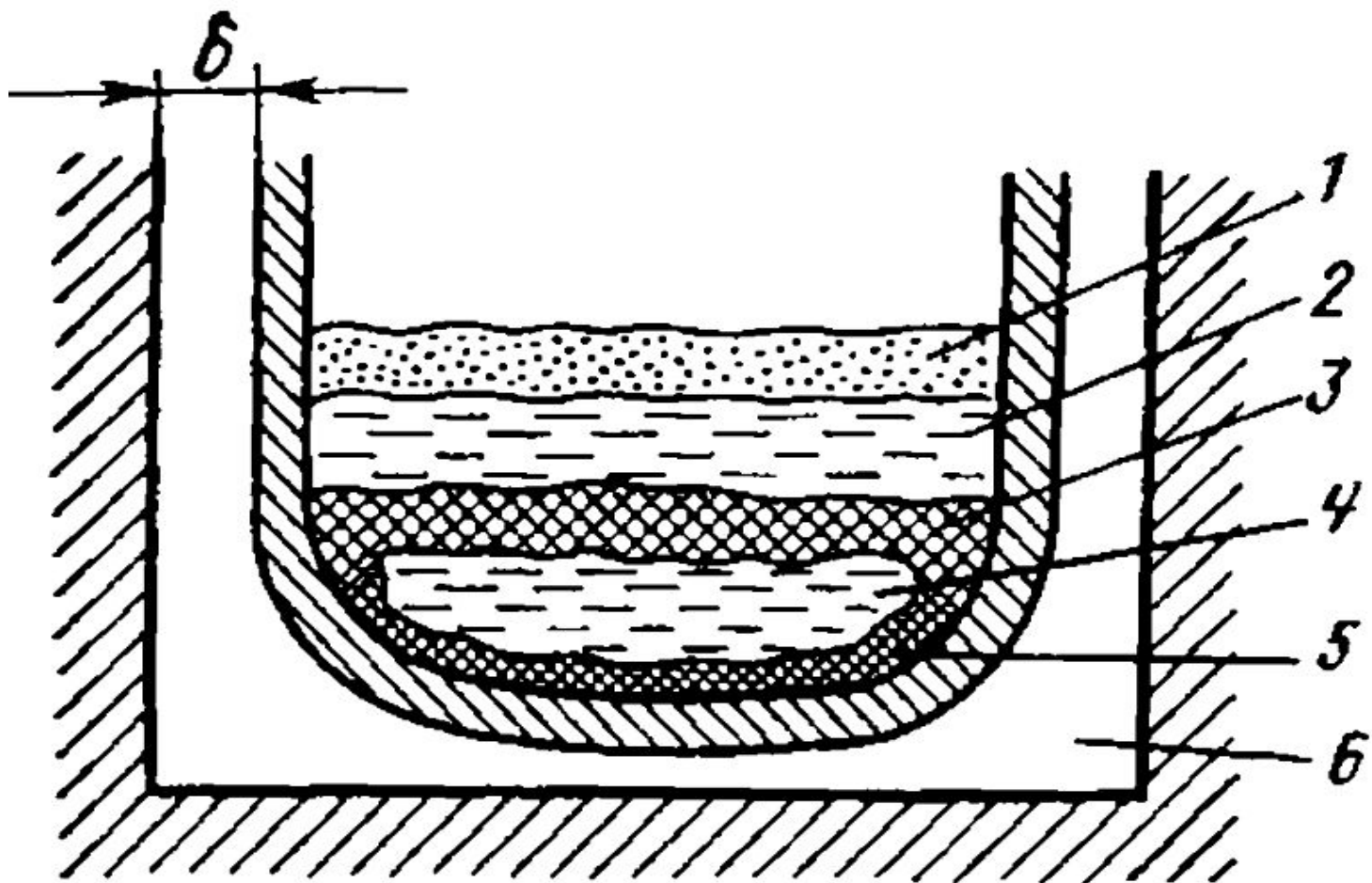


Рисунок 13 – *Возможное расслоение продуктов расплава активной зоны:*

1 – смесь углерода, V_4C при 1400°C ; **2** – сталь около 2000°C ($T_{\text{пл}}=1400^\circ\text{C}$); **3** – кориум около 2000°C ($T_{\text{пл}}=1800^\circ\text{C}$); **4** – жидкий кориум около 2800°C ; **5** – гарнисаж (корка твердого кориума) 1600°C ; **6** – шахта

Для обеспечения сохранения целостности корпуса реактора при аварии с расплавлением активной зоны необходимо интенсивное охлаждение корпуса.

Это может быть достигнуто охлаждением корпуса водой снаружи.

Целостность корпуса обеспечивается, во-первых, достаточной прочностью материала корпуса, и, во-вторых, приемлемыми термическими напряжениями.

Для оценки надежности необходимо рассчитать среднюю температуру стенки корпуса и перепад температуры в ней в различных местах.

На кривой поверхности корпуса возможно существование различных режимов теплообмена (рисунок 14).

Условия теплообмена зависят и от размера щели между корпусом и шахтой реактора δ .

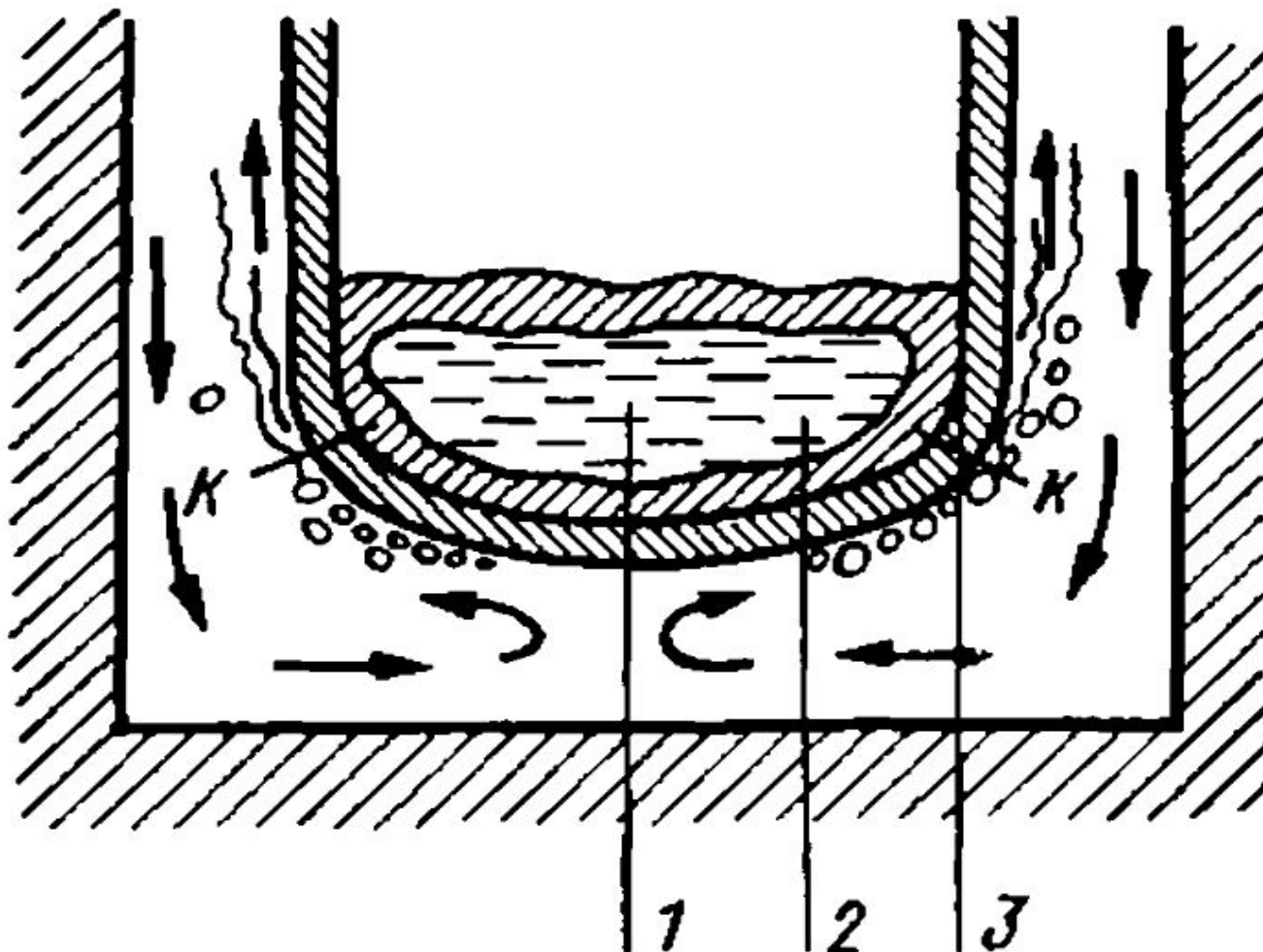


Рисунок 14 – Режимы теплообмена на наружной поверхности корпуса реактора:
1 – конвекция; 2 – пузырьковое кипение; 3 – пленочное кипение; K – место кризиса.

Определение перехода к пленочному кипению связано с оценкой критической плотности теплового потока на криволинейной поверхности.

Оценки показывают, что запас до кризиса в лобовой точке днища может составить 200 %, а на боковых поверхностях корпуса всего 20÷30%.

Таким образом, *боковые поверхности будут находиться в более тяжелых условиях.*

Теплообмен при пленочном кипении на наклонной поверхности улучшается с увеличением угла наклона и примерно подчиняется соотношению

$$\frac{\alpha}{\alpha_{90^{\circ}}} \cong (\sin \theta)^{1/3} ,$$

где $\alpha_{90^{\circ}}$ – коэффициент теплообмена при плёночном кипении на вертикальной поверхности (рисунок 15).

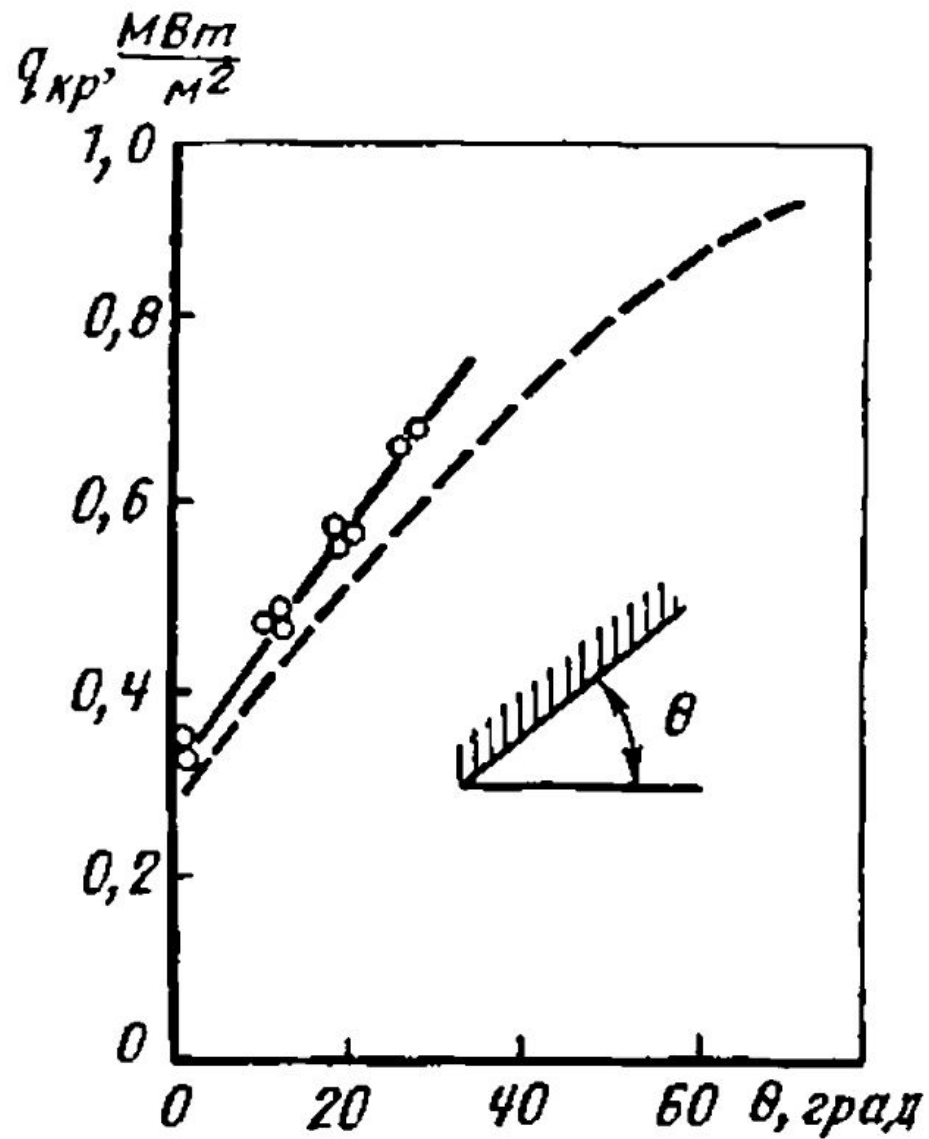


Рисунок 15 – Критический тепловой поток на наклонной поверхности теплообмена:
 ———— — расчёт;
 ооо—ооо — эксперимент.

КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ГИДРОУДАРЫ

Природа конденсационных гидроударов связана с быстрой конденсацией пара в контуре, содержащем двухфазную среду.

Это может происходить:

- *при впрыске недогретой до температуры насыщения воды в трубу, заполненную паром;*
- *впрыске пара в недогретую жидкость;*
- *встречном потоке пара и жидкости;*
- *разгоняемой паром водяной пробки (снаряда);*
- *вскипании перегретой жидкости;*
- *других подобных процессах.*

При движении в трубе, первоначально недогретой до температуры насыщения жидкости, последняя нагревается за счёт тепла конденсации пара на поверхности жидкости и за счёт теплообмена с нагретой стенкой трубы (рисунок 16).



Рисунок 16 – Образование жидкостного снаряда при встречном потоке недогретой жидкости и пара

Разная интенсивность конденсации приводит к перепаду давления ($P_1 - P_2$) и возникновению потока пара навстречу поступающей жидкости.

При этом возникает волна жидкости, перекрывающая сечение трубы.

Эта волна делит паровое пространство трубы на две области с различной интенсивностью конденсации пара. В результате жидкость, содержащаяся в волне, разгоняется за счет возникающего перепада давления с последующим гидроударом при ее торможении.

Скачок давления при торможении жидкостного снаряда:

$$\Delta P_1 = \rho c W \quad ,$$

здесь ρ , c – плотность и скорость звука в жидкости; W – скорость движения снаряда:

$$W = \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \frac{S}{M}}$$

где ΔP – разница давлений по обе стороны снаряда; S , L – площадь сечения и длина канала; M – масса снаряда.

Образование жидкого снаряда может происходить при возникновении в трубе расслоенного течения жидкости и паровой фазы, когда на поверхности раздела фаз возникают волны и жидкие пробки.

Снаряды образуются также при взаимодействии потока жидкости с препятствиями на его пути (повороты и проч.).

Главным фактором, определяющим величину гидроудара, являются **условия, обеспечивающие интенсивность конденсации**, которая определяется комплексом процессов теплообмена.

Другим параметром является **температура поступающей в трубу жидкости**. С уменьшением недогрева жидкости величина интенсивности гидроударов уменьшается, что связано с уменьшением скорости конденсации на поверхности жидкости.

Вопросы, выносимые на зачёт

1. Возможные причины нарушения нормального теплообмена в активной зоне, проводящие к возникновению аварийных ситуаций.
2. Возможные процессы при аварии с расплавлением активной зоны (для водоохлаждаемого реактора).
3. Аварии с потерей теплоносителя: основные этапы (краткая характеристика).
4. Потенциальные источники аварийного выделения энергии в ВВЭР.

*ДЗЯКУЙ
ЗА ЎВАГУ*

*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ*

*THANK FOR
YOUR ATTENTION*