

***ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС***

***В***

***ЯДЕРНО-***

***ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ***

***УСТАНОВКАХ***

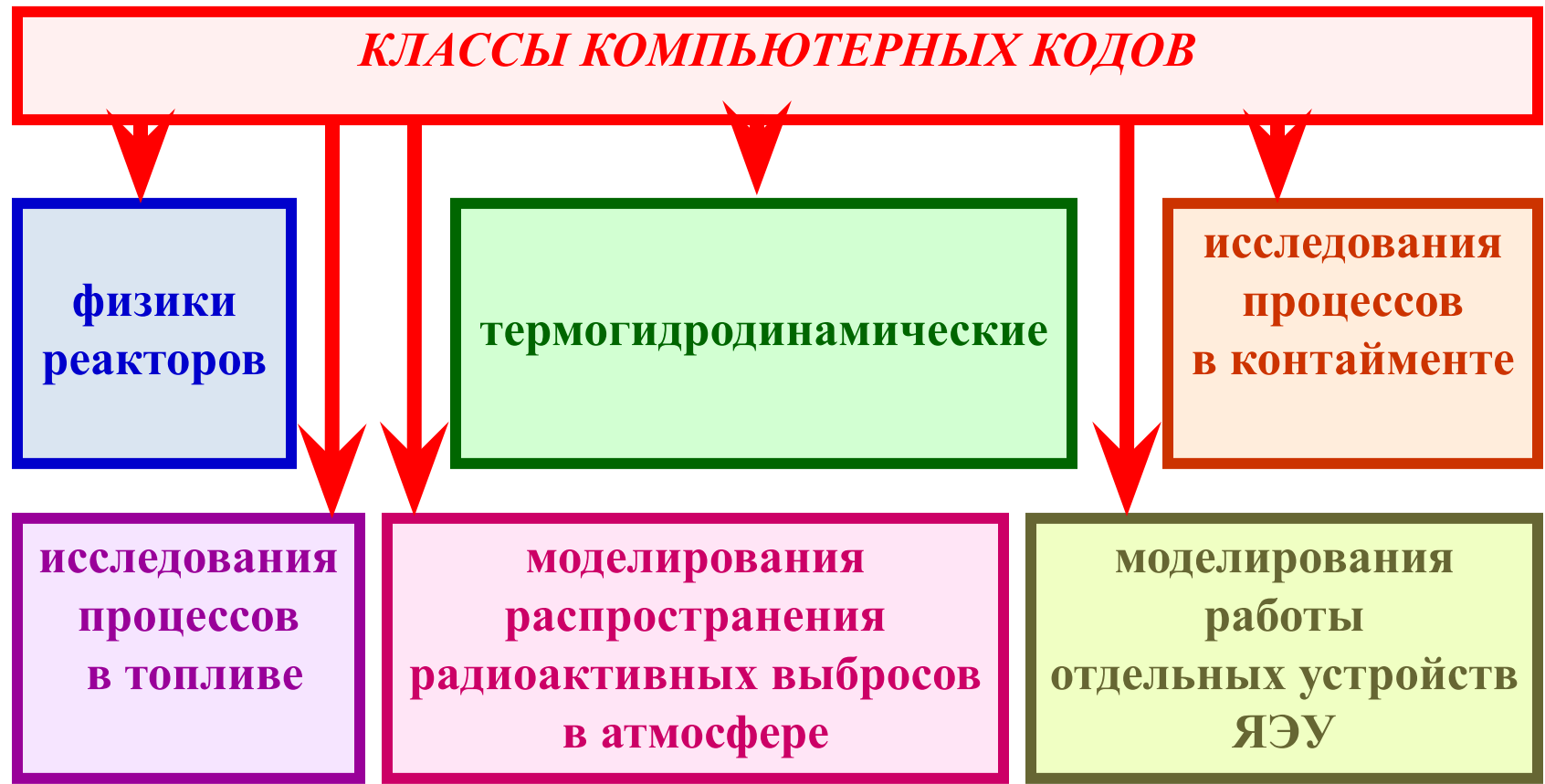
# *ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ*

*Тема №12*

**Особенности процессов  
гидродинамики и теплообмена  
в активных зонах реакторов**

*Методы  
теплофизического расчёта  
стержневых ТВС*

Состав множества компьютерных кодов, необходимых для анализа сценариев нештатных переходных и аварийных режимов работы ЯЭУ



<b>A</b> теплоноситель	<i>A1</i> <i>ЖМ</i>	<i>A2</i> <i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>A3</i> <i>D<sub>2</sub>O</i>	<i>A4</i> <i>газ</i>	
<b>B</b> конструкция	<i>B1</i> <i>РУ</i>	<i>B2</i> <i>система РУ</i>	<i>B3</i> <i>КЭС</i>	<i>B4</i> <i>узел</i>	
<b>C</b> режимы	<i>C1</i> <i>СР НЭ</i>	<i>C2</i> <i>ПР НЭ</i>	<i>C3</i> <i>ПР ННЭ</i>	<i>C4</i> <i>ПА</i>	<i>C5</i> <i>ЗПА</i>
<b>D</b> уровень детализации	<i>Для кодов подкласса B4</i>				

Термогидродинамический расчёт ТВС проводится с целью определения параметров потока теплоносителя, охлаждающего сборку.

На рисунках 1 и 2 представлены тепловыделяющие сборки реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, соответственно.

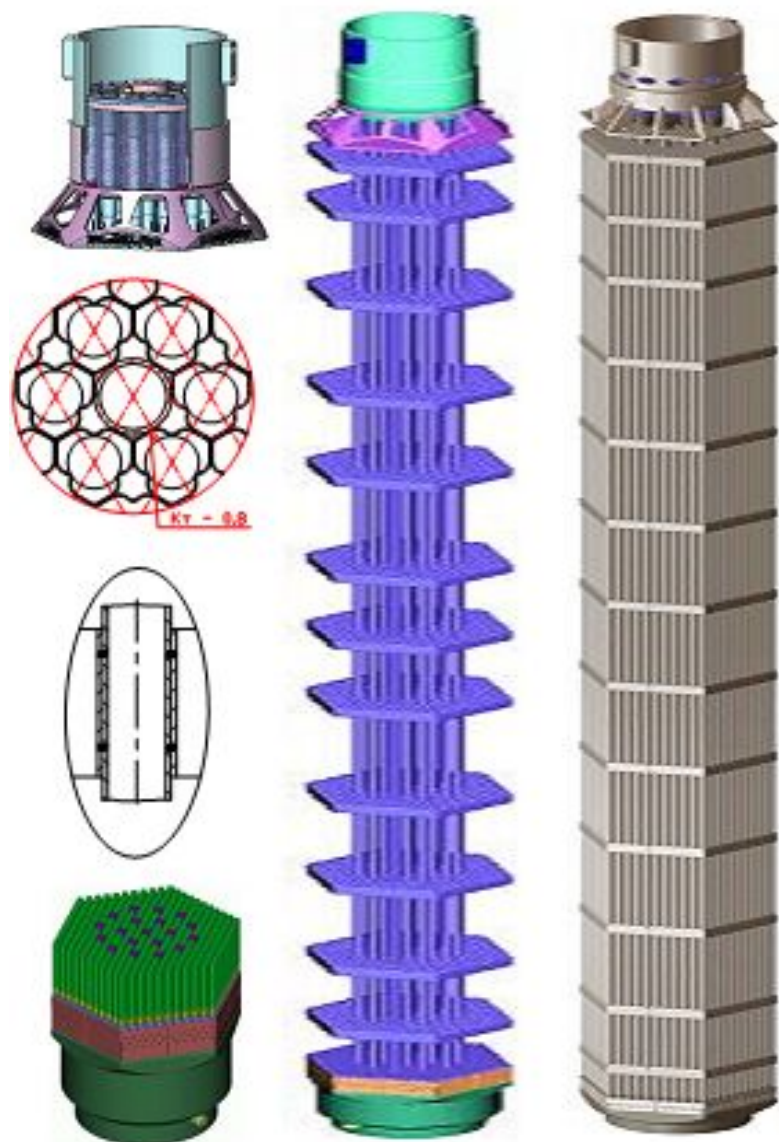
Широкий спектр задач теплогидравлических расчётов стержневых тепловыделяющихборок решается с помощью методов, основанных на **субканальном приближении**.

Идея его сводится к следующему. Пространство сборки (рисунок 3), занятое теплоносителем, представляет собой многосвязную область, которую можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных субканалов сложной формы.

Субканалом называем часть занятого теплоносителем пространства сборки.

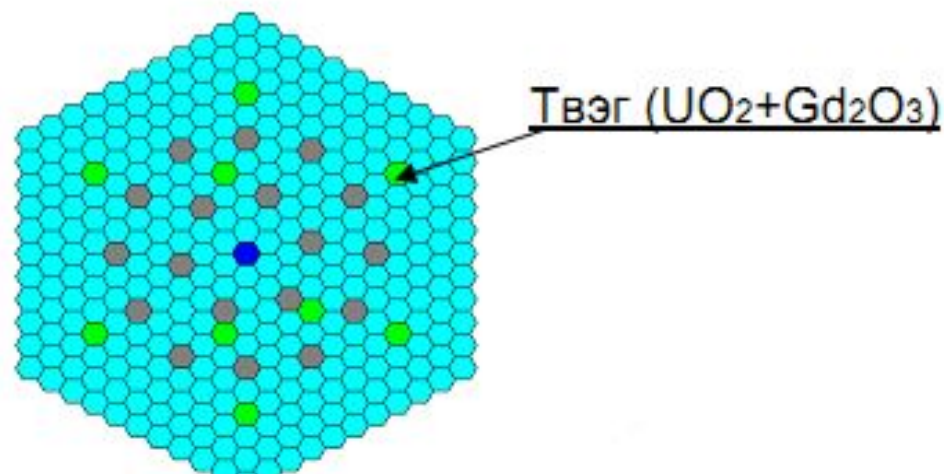
# Тепловыделяющая сборка

07



ТВС состоит из следующих основных элементов: головка; хвостовик; дистанционирующая решетка; пучок 312 твэлов и твэгов, размещенных в жестком сварном каркасе ДР/НК.

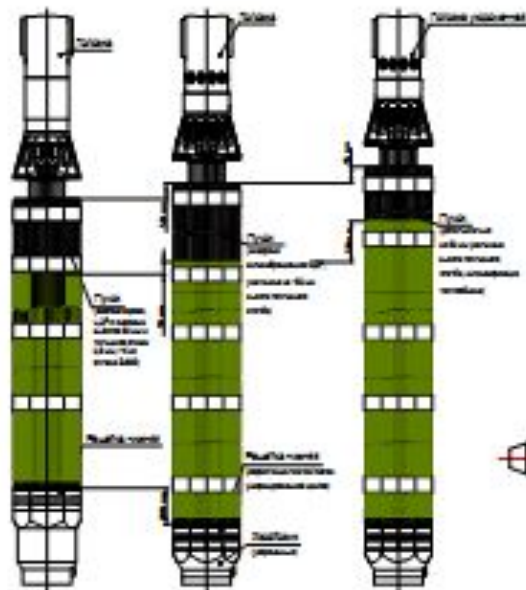
Тепловыделяющие сборки ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 практически идентичны по конструкции. Основное отличие - высота топливного столба (3680 мм для ВВЭР-1000 и 3730 мм для ВВЭР-1200).



# Тепловыделяющий элемент

08

ТВС-2 ТВС-2М ТВС-2006



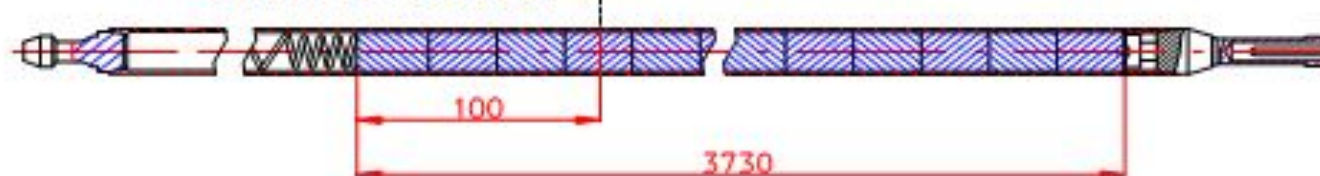
Твэл ТВС-2



Твэл ТВС-2М



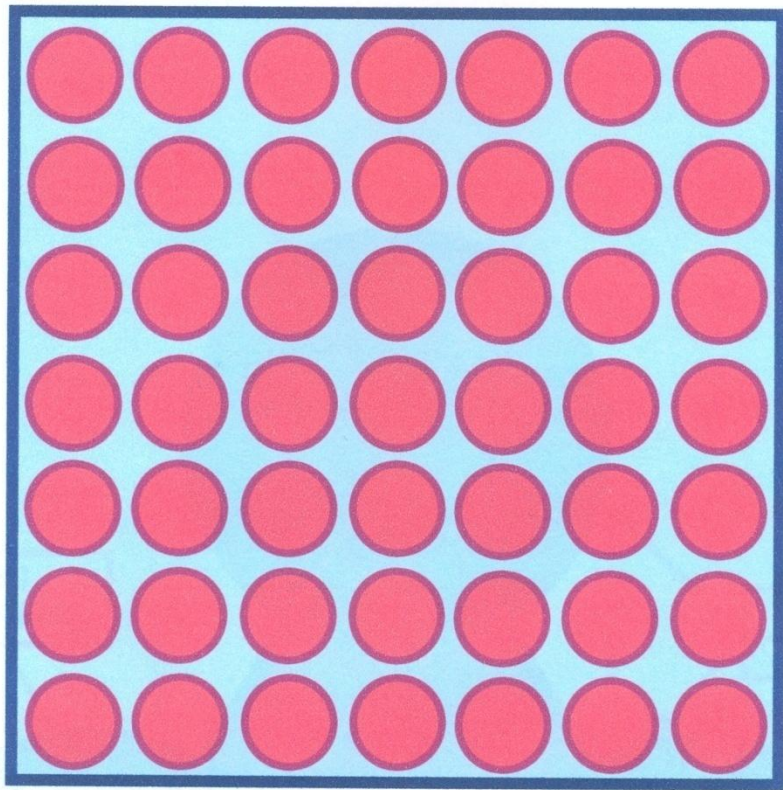
Твэл ТВС-2006



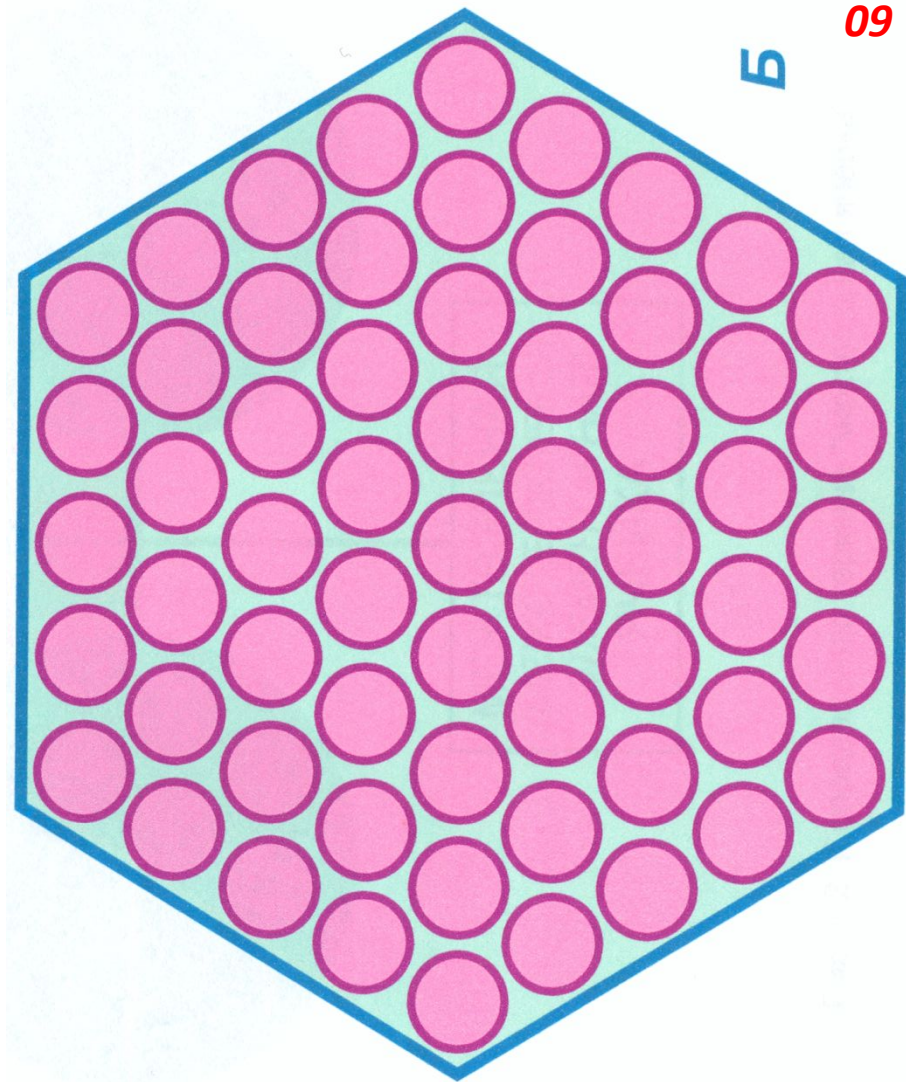
Диаметр оболочки нар./внутр., мм	9,1/7,73 (вариант 9.1/7,93)
Диаметр таблетки нар./внутр, мм	7,6/1,2 (вариант 7,8/0)

Таблетка 7,8x0 мм при длине столба 3730 мм обеспечит необходимую длительность кампании в 18-месячном топливном цикле.





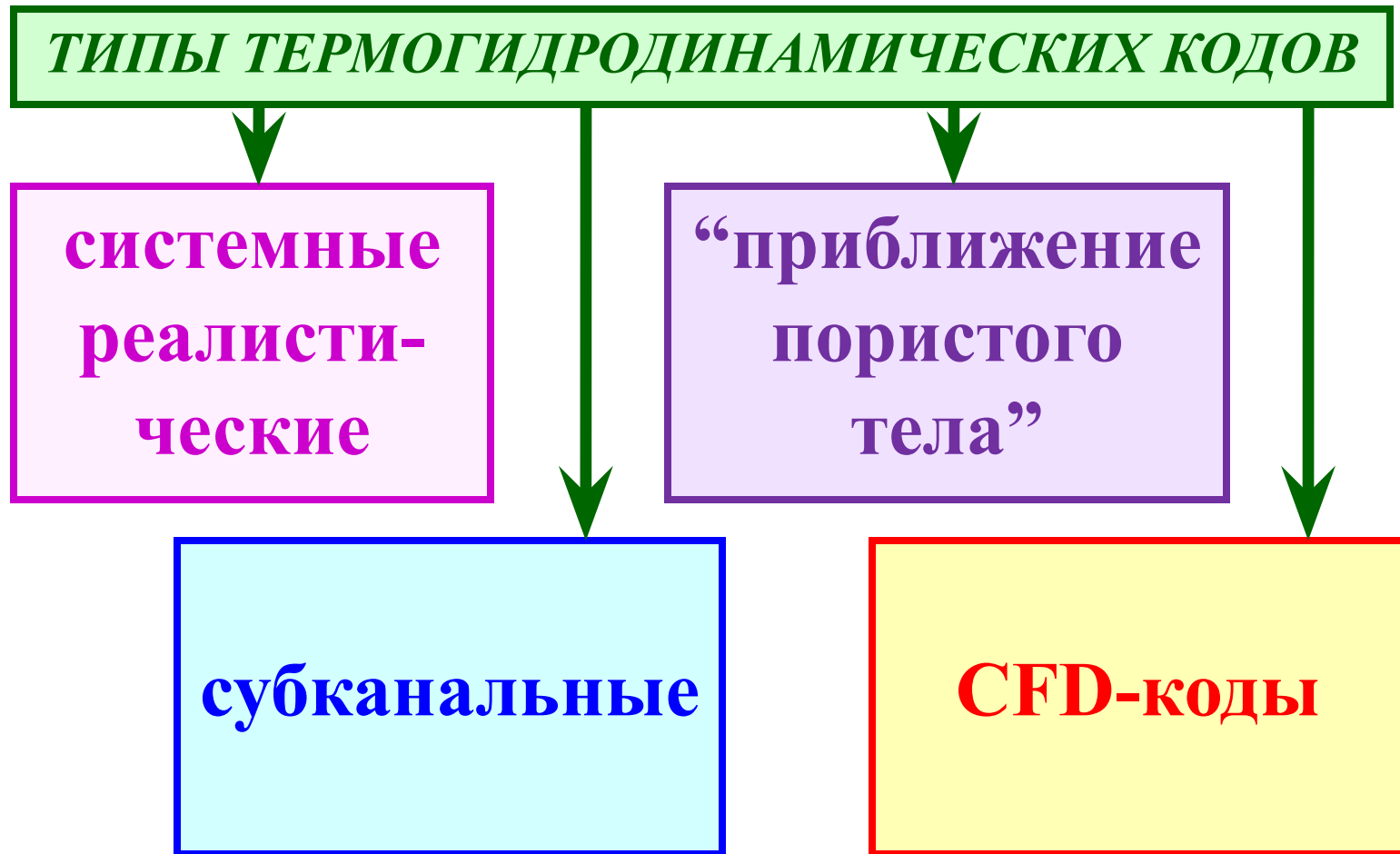
A



09

Б

Рисунок 3 – Поперечные сечения сборок стержней с квадратной (А) и гексагональной (Б) решётками



**коды  
для ТГ-расчёта  
стержневых  
ТВС**

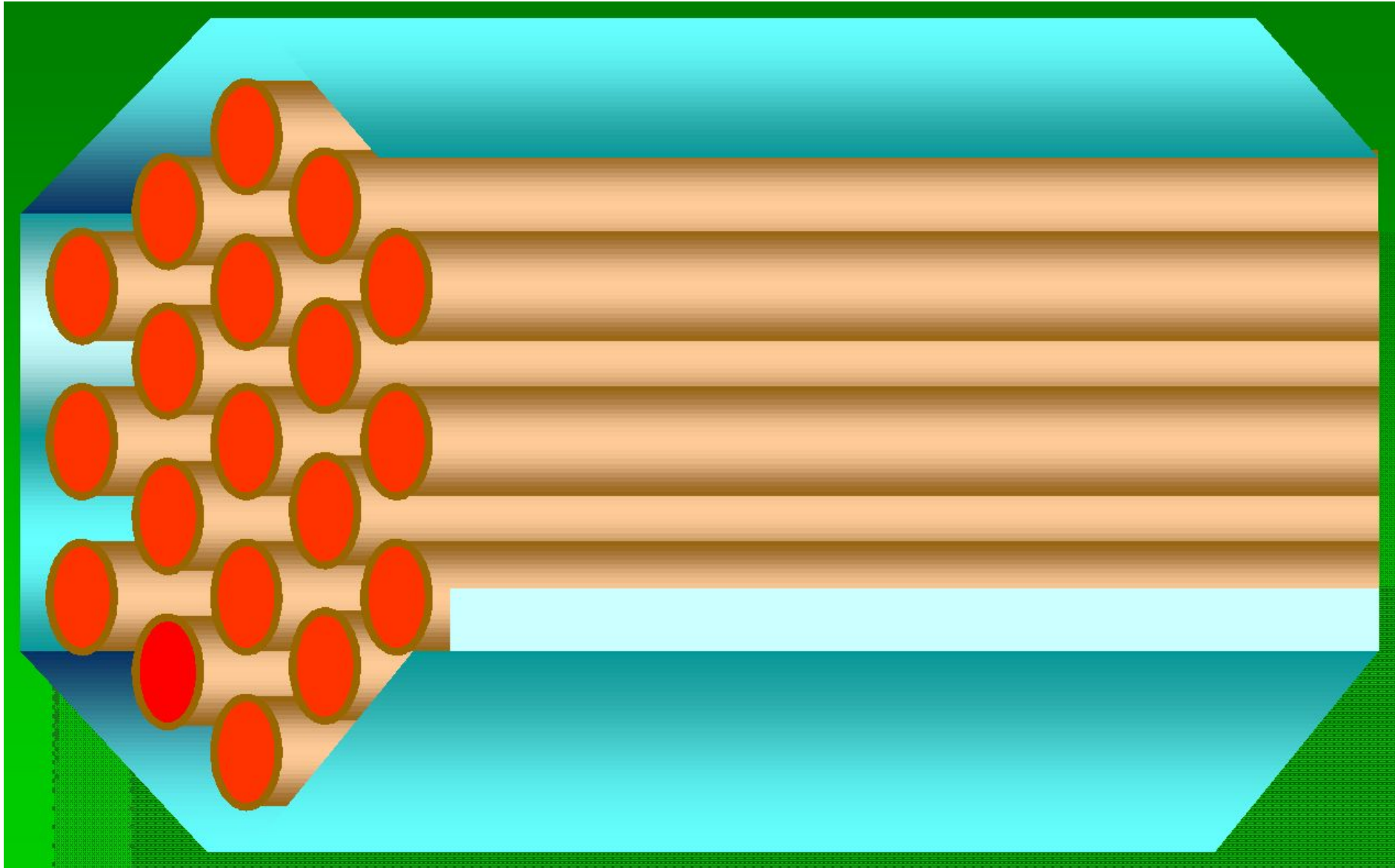
**расчёт  
локально-  
усреднённых  
параметров**

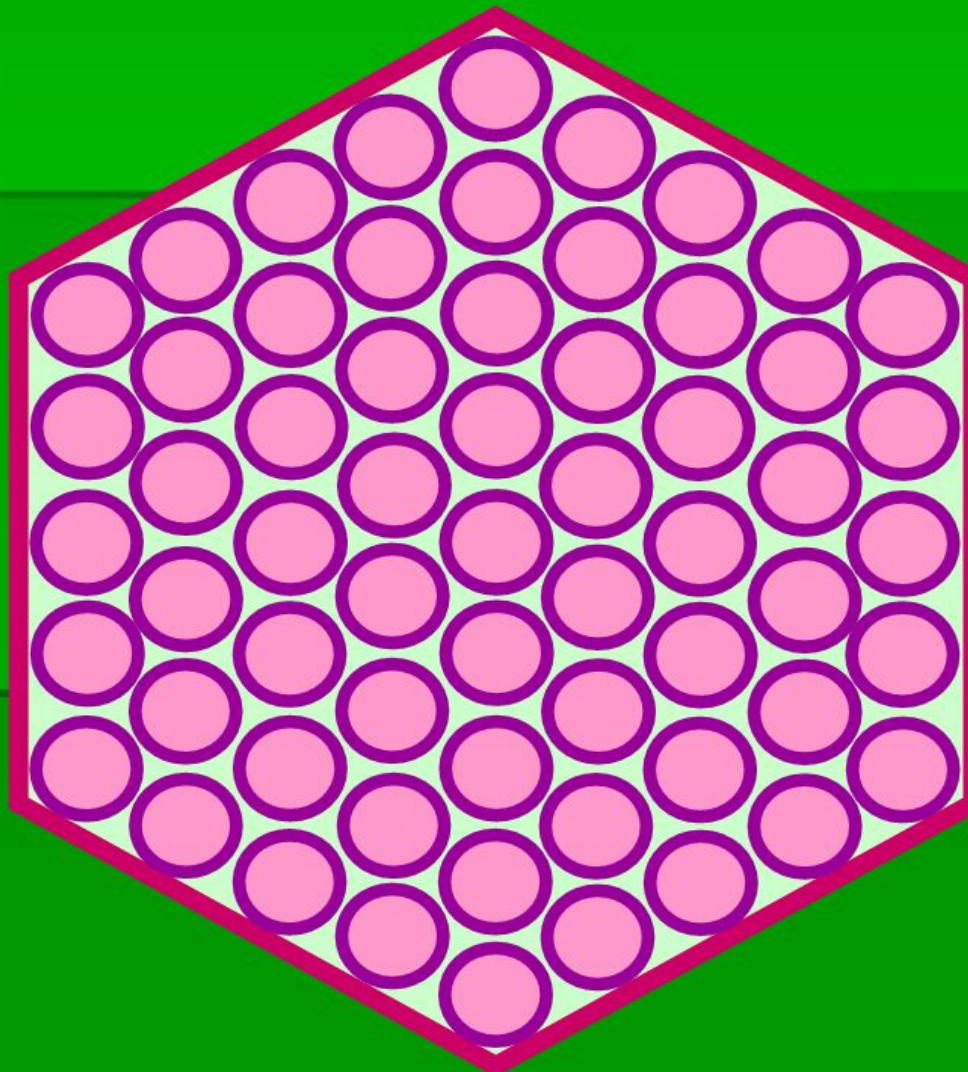
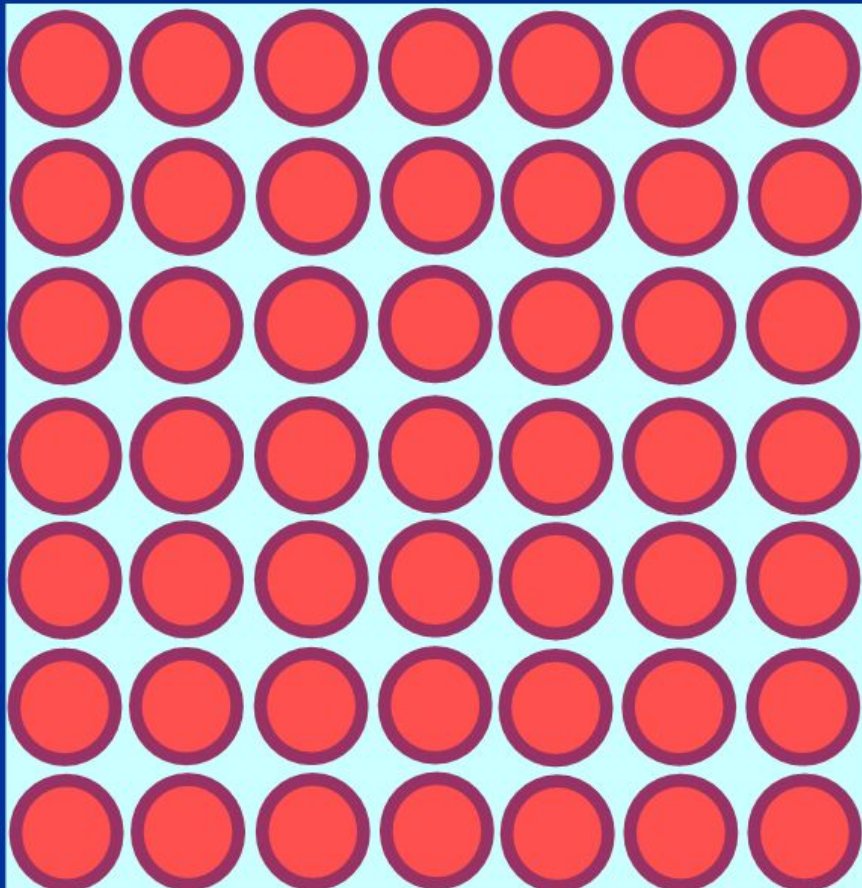
**расчёт  
локальной  
структуры  
потока**

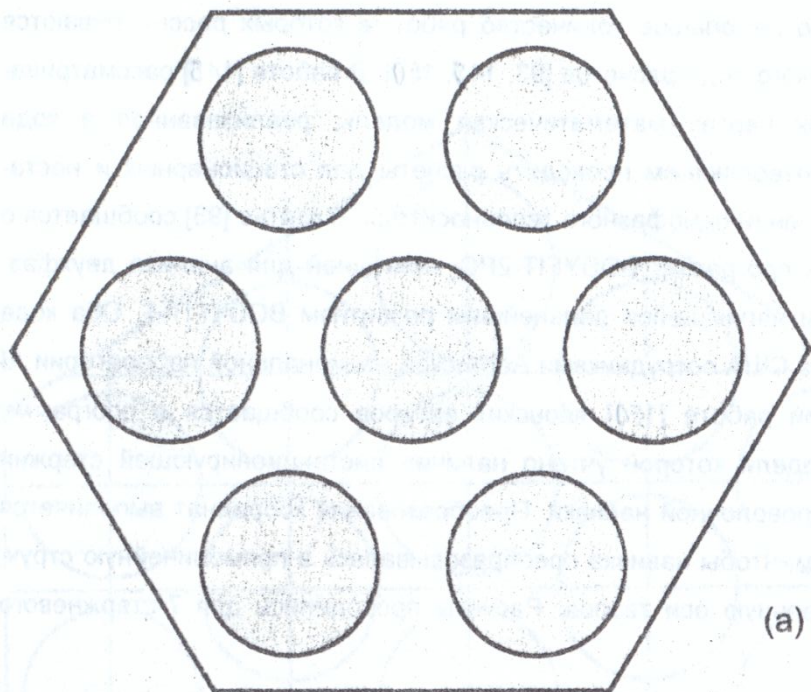
**прибли-  
жение  
пористого  
тела**

**суб-  
канальное  
прибли-  
жение**

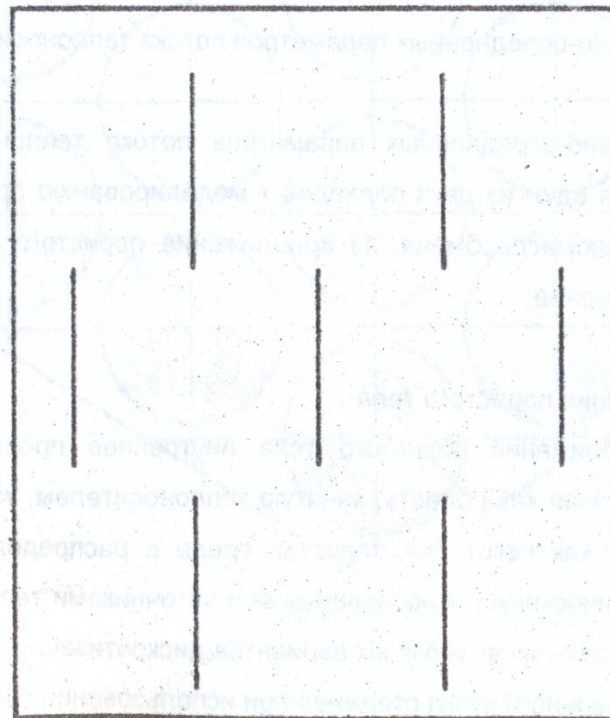






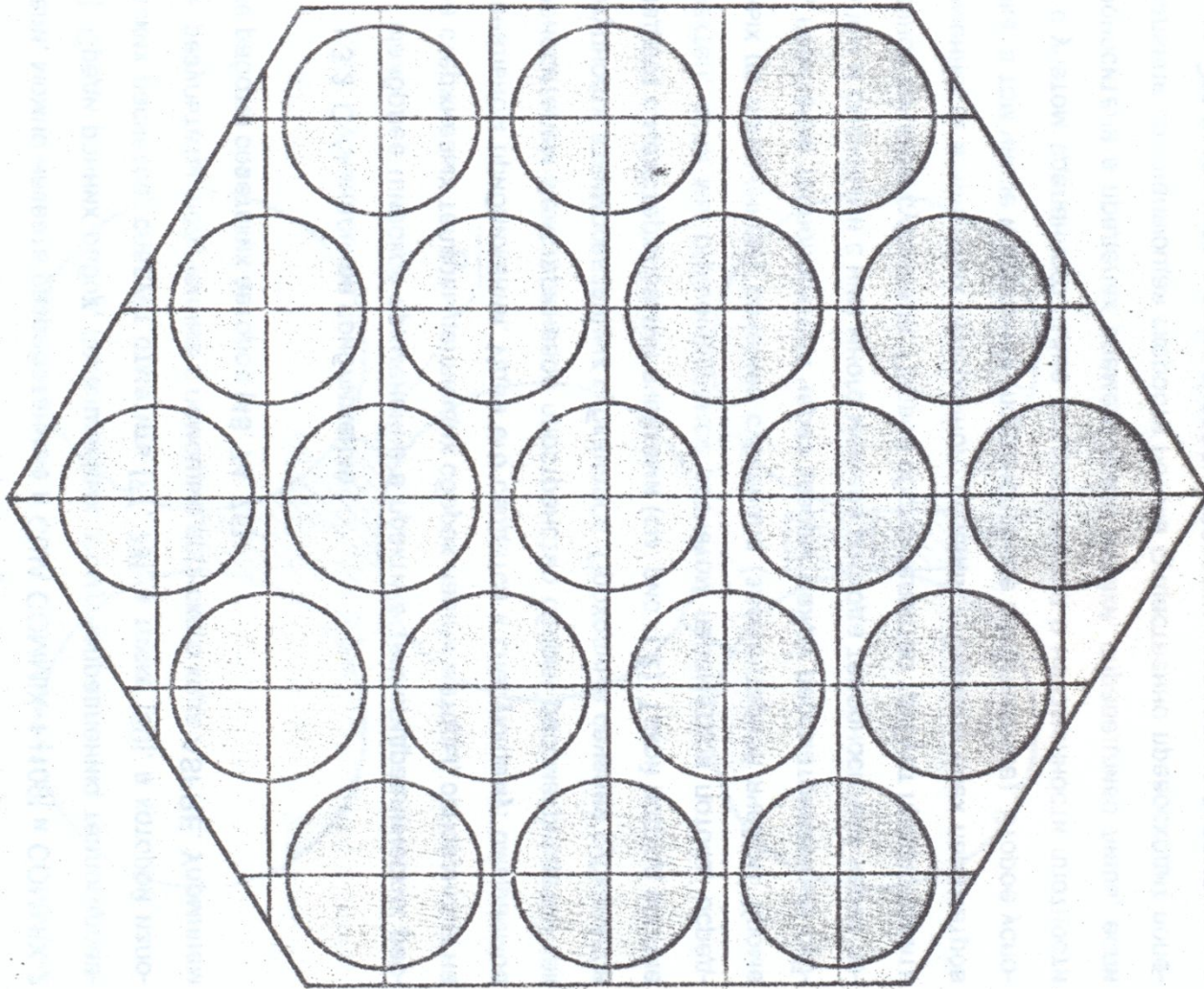


(a)



(б)

Исходная (а) и трансформированная (рассчитываемая) (б) области в методе согласованного с формой границы преобразования координат



Пример дискретизации пучка стержней в методе, основанном на приближении пористого тела

При выборе способа дискретизации межстержневого пространства пучка на субканалы следует руководствоваться следующими соображениями:

1) взаимодействие через границы между субканалами должно быть минимальным;

2) должна быть возможной разумная аппроксимация функций, описывающих характеристики теплоносителя внутри субканала.

Заметим, что пучки твэлов являются гидравлически "тесными": относительный шаг  $t$  решётки стержней, определяемый как отношение расстояния  $s$  между центрами соседних стержней (шага решётки) к диаметру  $d$  стержня, много меньше 2,0, т.е.:

$$t \equiv \frac{s}{d} < 2.0 \quad . \quad (1.1)$$

Как правило,  $t \leq 1.4$ .

Для ТВС реакторов на быстрых нейтронах,  $t \leq 1.2$ . Шаг решётки в сборках активной зоны меньше, чем в сборках зоны воспроизводства.

Применительно к таким пучкам стержней вышеуказанным условиям соответствует разбиение на субканалы, совпадающие в поперечном сечении с межтвэльными ячейками (рисунок 4).



Таким образом, субканал – часть занятого теплоносителем пространства сборки, ограниченная (рисунки 5а, 5б и 6а и 6б) или поверхностями смежных твэлов и воображаемыми плоскостями, проходящими через оси этих стержней (центральный субканал), или внутренней поверхностью обечайки, поверхностями смежных твэлов периферийного ряда и воображаемыми плоскостями, проходящими через оси этих стержней перпендикулярно обечайке (боковой субканал), или внутренней поверхностью обечайки, поверхностью твэла периферийного ряда и воображаемыми плоскостями, проходящими через оси стержней перпендикулярно смежным граням обечайки (угловой субканал).

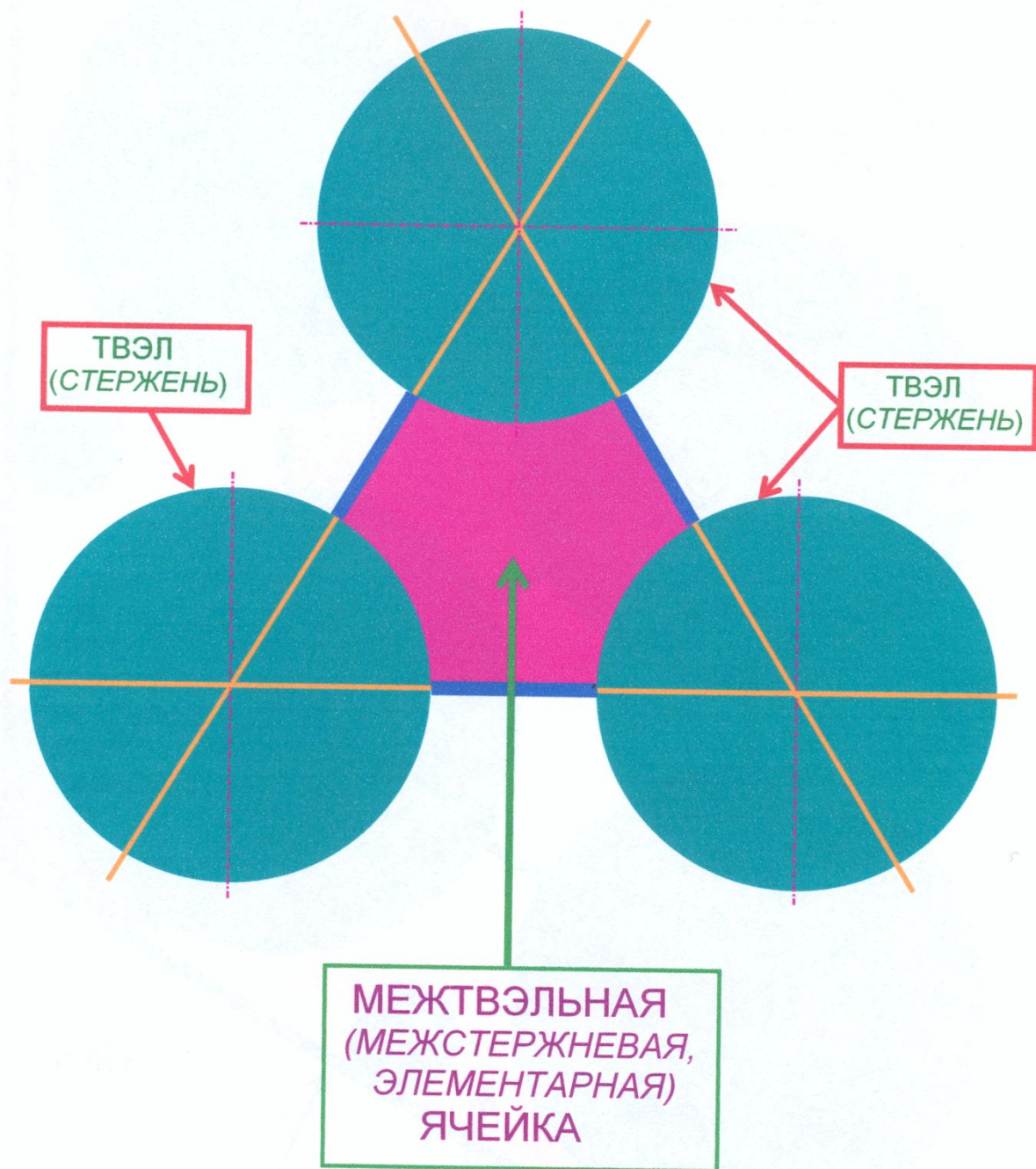


Рисунок 4 –  
К определению  
термина «меж-  
ТВЭЛЬНАЯ ячейка»

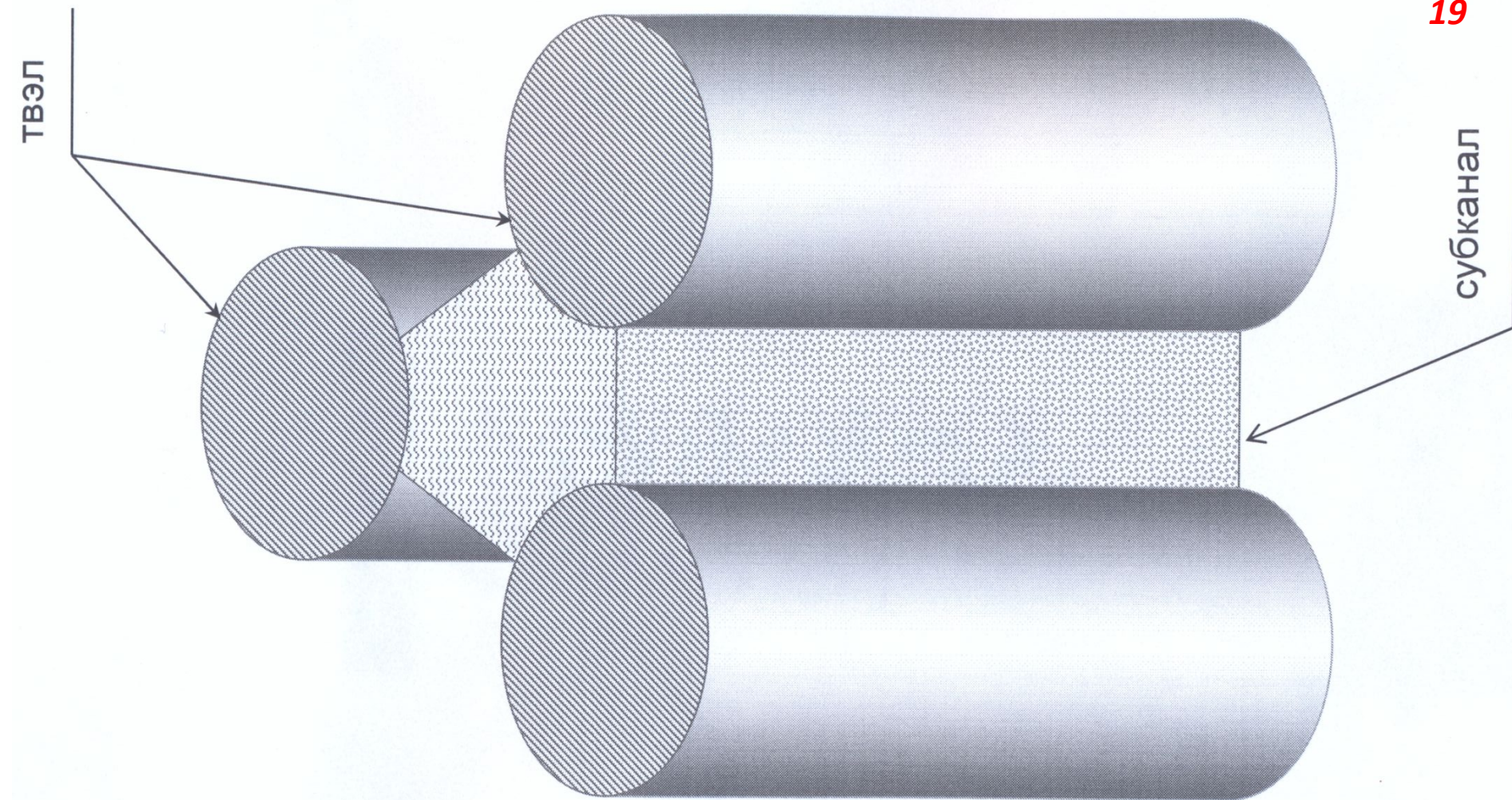


Рисунок 5а – Фрагмент из участков трёх твэлов, расположенных в гексагональной упаковке, и заключённого между ними субканала

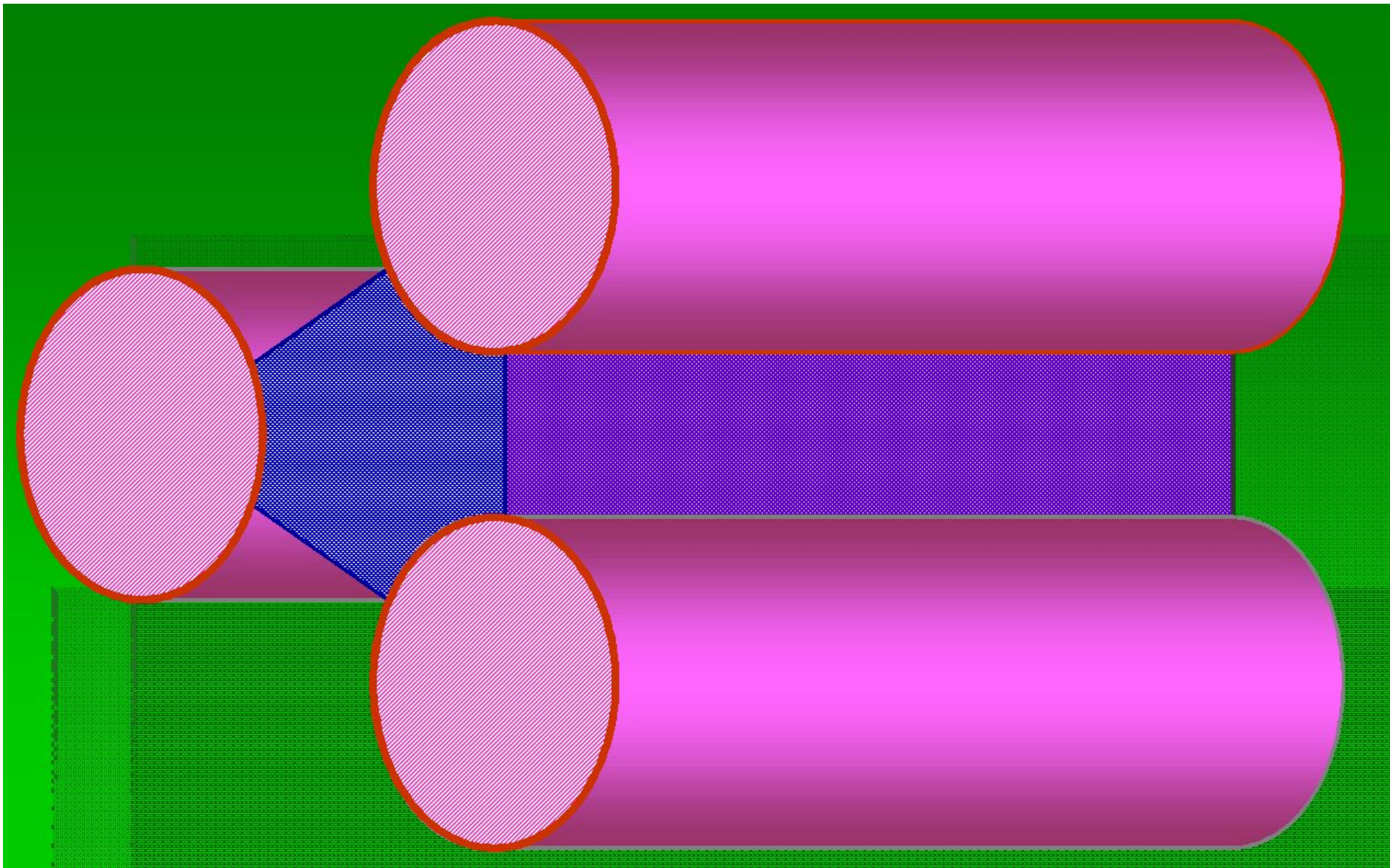


Рисунок 5б – Фрагмент из участков трёх твэлов, расположенных в гексагональной упаковке, и заключённого между ними субканала

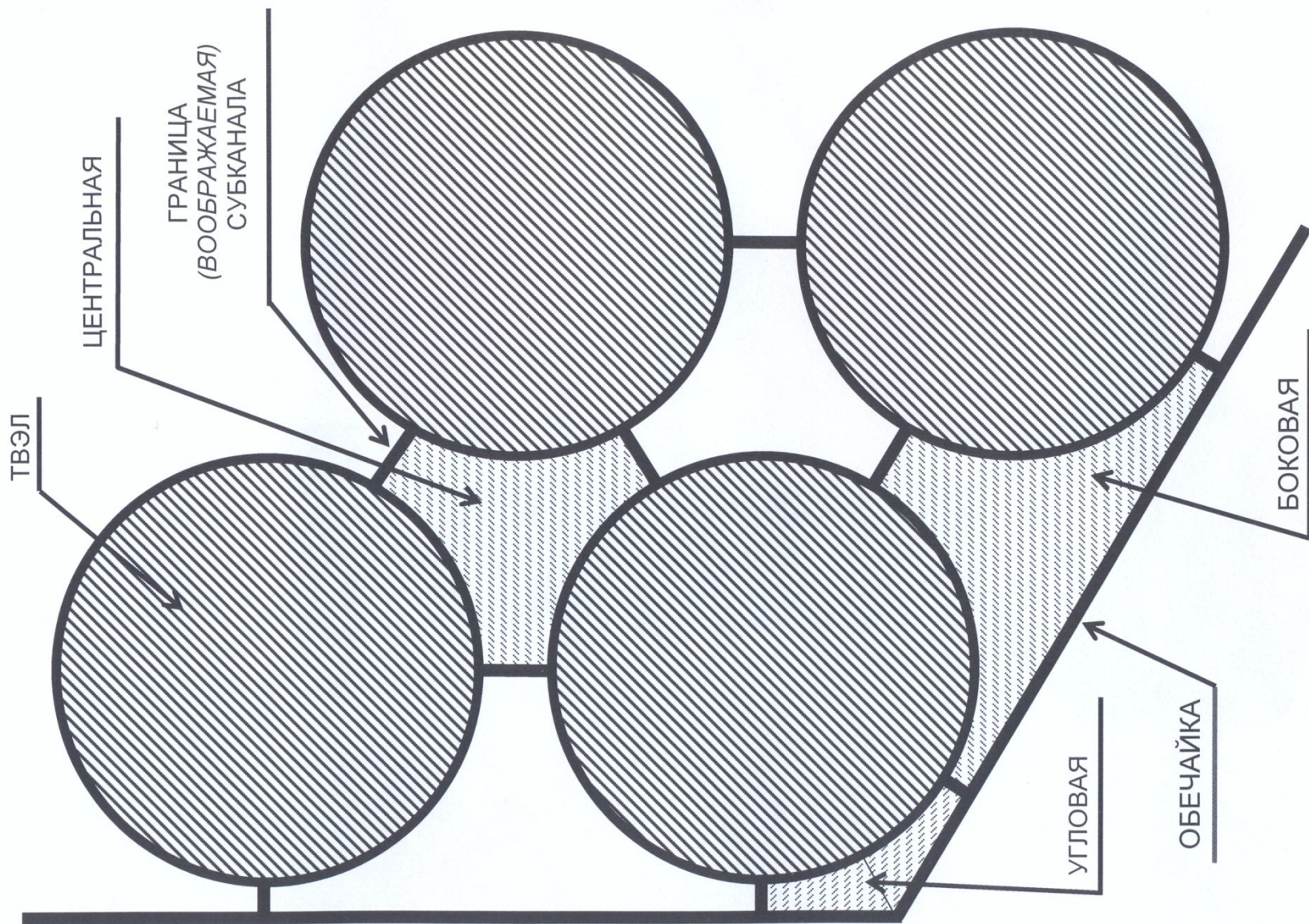
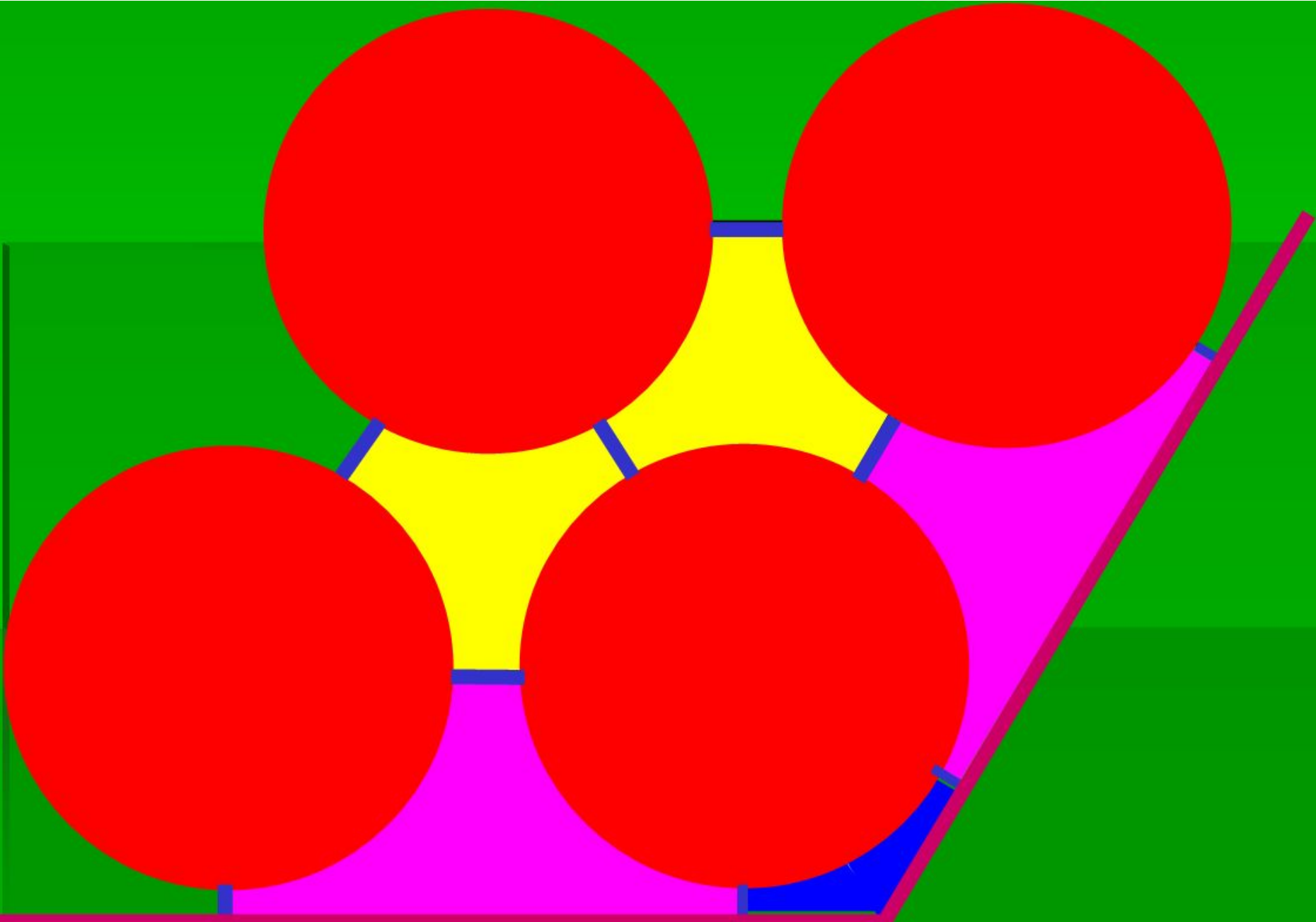


Рисунок 6а – Центральная, боковая и угловая межтвэльные ячейки



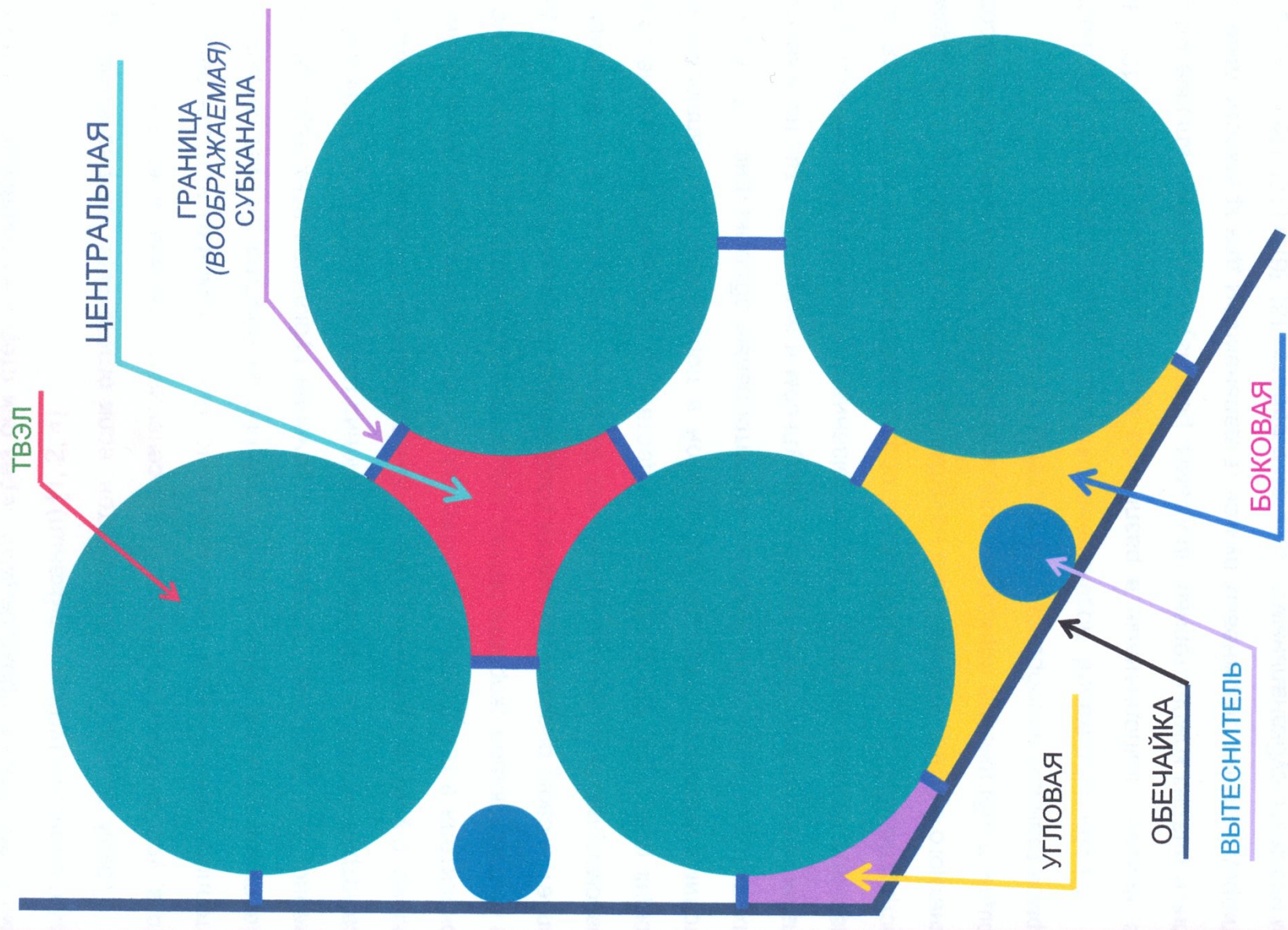


Рисунок 6б – Центральная, боковая и угловая межтвэльные ячейки

Такой подход вполне корректен, если ограничиваться

- расчётом параметров потока, усредненных по поперечному сечению субканала,

и

- полагать, что перетечки теплоносителя через межстержневые зазоры намного меньше расхода через поперечное сечение субканала.

Первое обстоятельство требует предположить неизменность в пределах поперечного сечения субканала всех термодинамических параметров потока, в том числе и давления (погранслоное приближение).



Второе условие, с учётом сделанного выше предположения о неизменности плотности теплоносителя в пределах элементарной ячейки, справедливо лишь, если аксиальная составляющая скорости потока существенно превосходит поперечные.

Это позволяет, в свою очередь, провести разделение переменных в уравнении движения и рассматривать отдельно уравнения баланса продольной и поперечных составляющих импульса.

Как следствие, существенно упрощается решение задачи. Необходимо отметить, что для аксиальной и поперечной составляющих импульса приходится использовать различные контрольные объёмы (рисунок 7).

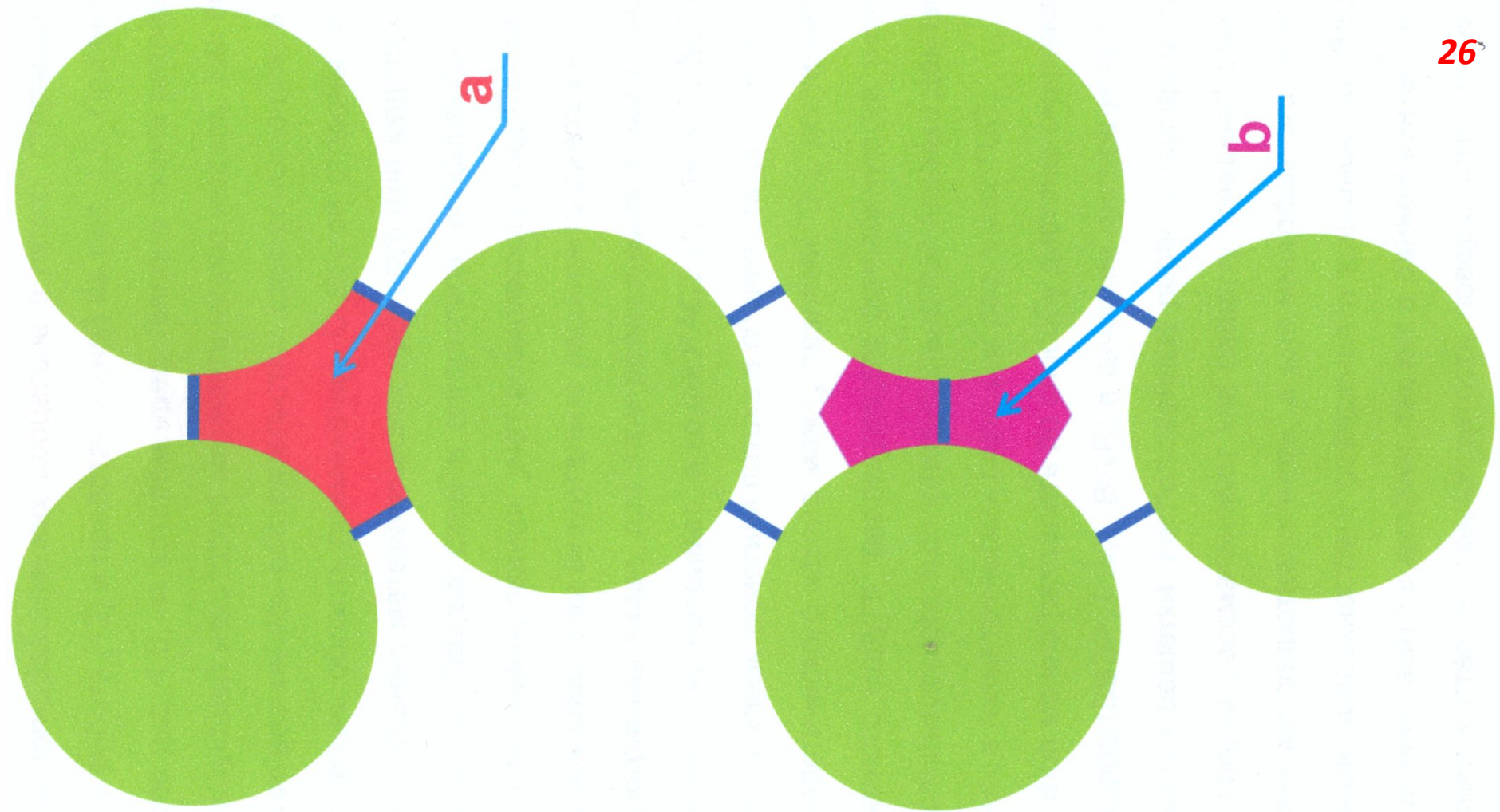


Рисунок 7 – Поперечные сечения контрольных объёмов, используемых при решении субканальных уравнений баланса массы, энергии и аксиальной составляющей импульса (a) и поперечных составляющих импульса (b)

Между субканалами происходит обмен массой, импульсом и энергией – так называемое "***межканальное перемешивание***".

Перемешивание обусловлено различными факторами конструктивного и режимного характера (рисунок 8).



**Классификация механизмов межканального обмена**

По полноте и точности описания процессов гидродинамики и теплообмена субканальные коды можно классифицировать на основании анализа реализованных в них математических моделей.

Причину этого легко понять, рассмотрев рисунок 9, на котором представлена схема разработки программы для ЭВМ, реализующей некоторую математическую модель.

Как видно, при разработке кода могут возникнуть обстоятельства, ограничивающие, в сравнении с используемой моделью, область применения. С другой стороны, использование некоторых дополнительных математических процедур или моделей, применение более совершенных численных схем и алгоритмов, использование более прогрессивных языков программирования, учёт возможностей новых трансляторов и операционных систем способны значительно расширить диапазон решаемых с помощью данной программы задач, при этом реализуемая в ней модель не претерпит никаких изменений.



Рисунок 9 – Этапы разработки компьютерного кода, реализующего выбранную математическую модель

Математические модели теплогидравлических процессов в пучках стержней будем классифицировать согласно схеме, представленной на рисунке 10.

Пучки твэлов можно разделить по способу дистанционирования.

В ТВС водоводяных реакторов (ВВЭР, PWR, BWR) в качестве дистанционирующих элементов обычно используют решётки, расположенные перпендикулярно пучку.

В этом случае твэльную сборку рассматривают как решётку стержней с дополнительными местными сопротивлениями, а для многофазного теплоносителя ещё и дополнительными поверхностями осаждения и конденсации.

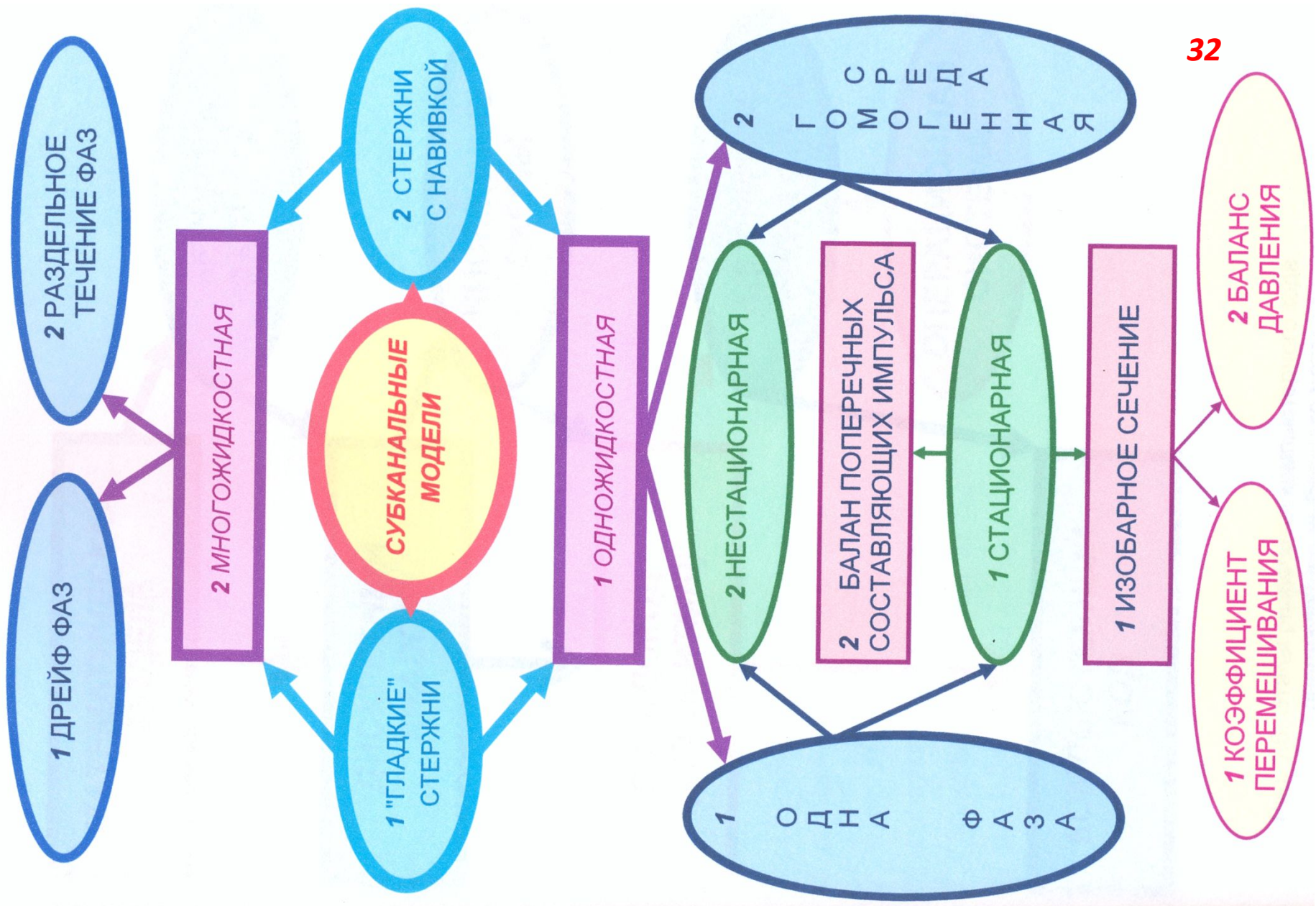


Рисунок 10 – Схема классификации субканальных моделей



В топливных сборках реакторов на быстрых нейтронах (БН, LMFBR) твэлы дистанционируются, как правило, спиральными проволочными навивками (реже – спиральными рёбрами). Корректное описание течения теплоносителя в областях с такой геометрией – сложная задача. Наличие же спиральной навивки – главный фактор, влияющий на распределение параметров теплоносителя.

Математическая модель разрабатывается для исследования конкретного типа сборки. Это объясняется хотя бы тем, что кроме решаемых уравнений модель включает в себя, в частности, соотношения, описывающие теплофизические свойства теплоносителя.

Очевидно, что изначально следует разделить модели на два класса: пучки со стержнями без навивки и пучки с твэлами с навивкой.

Количество "комплектов" решаемых уравнений сохранения зависит от того, рассматривается ли теплоноситель как одна фаза (жидкость) или же как многофазная (многожидкостная) среда. Поэтому в рамках каждого из выбранных классов выделим семейства "одножидкостных" и "многожидкостных" моделей.

В названных семействах следует определить по два рода моделей.

"Одножидкостные" модели описывают процессы в однофазном теплоносителе или/и в двухфазном, рассматриваемом как гомогенная среда.

Модели "многожидкостные" используют одно из приближений:

- 1) "дрейф фаз" ("скорость дрейфа" );
- 2) "раздельное течение фаз". Каждую же из групп "одножидкостного" семейства классифицируем по типу решаемых систем уравнений на стационарные и нестационарные.

Стационарные модели разделим на три группы:

- 1) использующие приближение «изобарного сечения» и коэффициенты межканального перемешивания,
- 2) использующие приближение «изобарного сечения»,
- 3) свободные от перечисленных ограничений и включающие в себя уравнение баланса поперечных составляющих импульса.

Коэффициент межканального перемешивания субстанцией  $\Psi$  между субканалом  $i$  и смежным с ним субканалом  $j$  определим, аналогично [17, 18], как отношение поперечного потока субстанции  $\Psi$  через имеющий единичную длину участок межстержневого зазора к потоку субстанции  $\Psi$  в осевом направлении через поперечное сечение субканала  $i$ , а именно

35

$$\mu_{ij}^{\Psi} \equiv \frac{\Phi_{ij}^{\Psi}}{\Phi_i^{\Psi}} .$$

где  $\mu_{ij}^{\Psi}$  – коэффициент межканального перемешивания субстанцией  $\Psi$  между субканалом  $i$  и смежным с ним субканалом  $j$ ;

$\Phi_{ij}^{\Psi}$  – поперечный поток субстанции  $\Psi$  через имеющий единичную длину

участок межстержневого зазора;  $\Phi_i^{\Psi}$  – поток субстанции  $\Psi$  в осевом направлении через поперечное сечение субканала  $i$ .

Вопросу корректного определения коэффициентов межканального перемешивания на основе обработки данных натуральных экспериментов уделено большое внимание в работах Физико-энергетического института (ГНЦ "ФЭИ", г. Обнинск, Россия) [18–29].

## ***Основные тенденции в развитии субканальных моделей***

Существует большое количество субканальных моделей.

Это разнообразие объясняется, с одной стороны, тем, что работы выполнялись в различное время, и по мере того, как совершенствовались знания закономерностей течения и теплообмена в ТВС, математические методы и вычислительная техника, появлялись новые улучшенные модели для решения одних и тех же задач применительно к одним и тем же техническим системам.

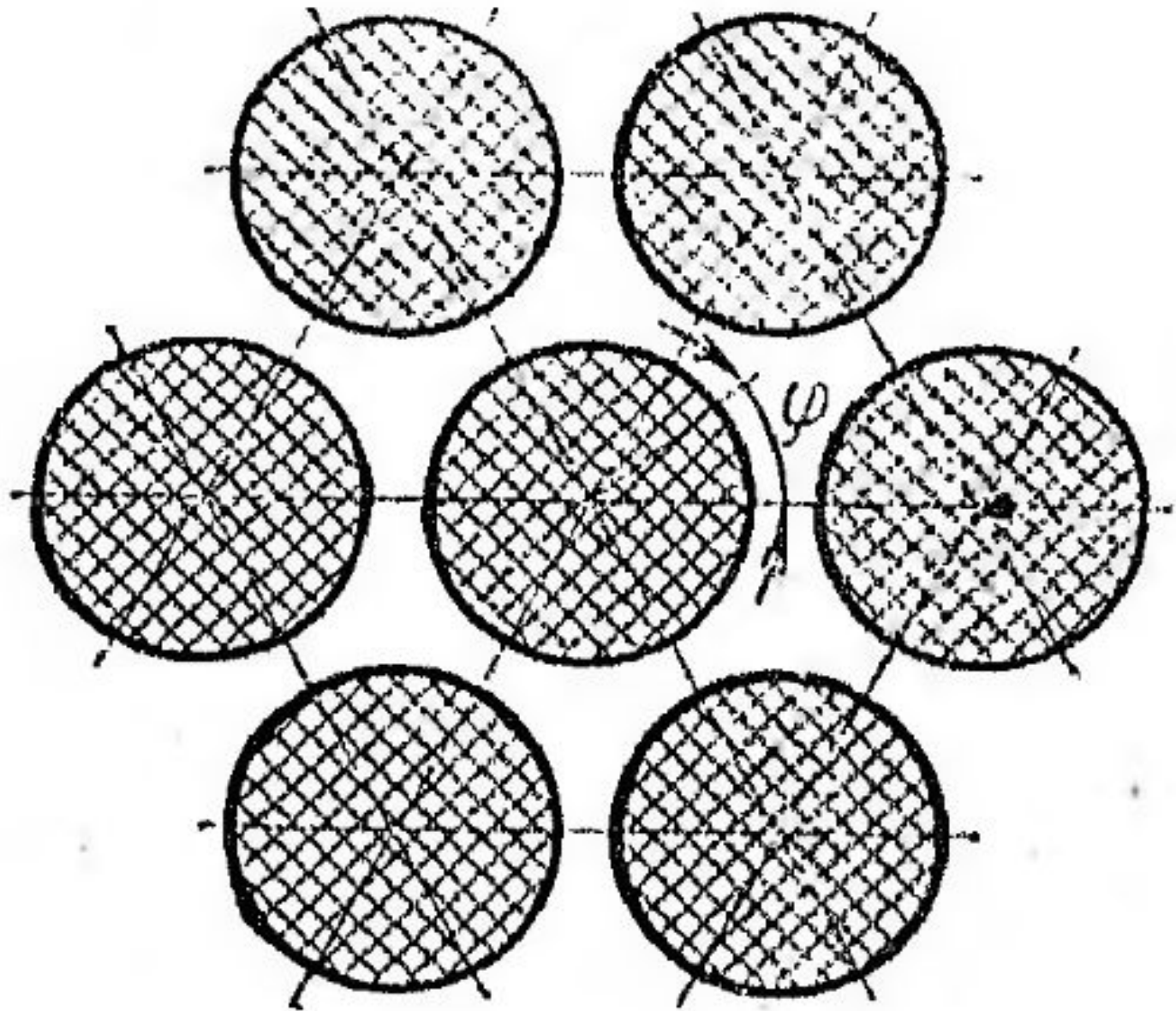
Другая причина – в различных исследовательских центрах разных стран решались аналогичные друг другу задачи. Однако следует заметить, что такое дублирование работ на самом деле является кажущимся. Дело в том, что самостоятельное решение задачи – это, по сути, независимая проверка результатов, полученных исследователями в другой лаборатории, что является необходимым условием при принятии решения о справедливости или ошибочности того либо иного научного результата. Следует отметить, что множество моделей существенно меньше множества реализующих их компьютерных кодов. Причину этого легко понять, рассмотрев рисунок 9.

Очевидно, что даже при анализе одного типа аппаратов допустимо иметь набор математических моделей различной степени сложности (и, следовательно, диапазона применимости), чтобы избежать необходимости исследовать достаточно простые процессы с помощью сложных моделей.

Необходимо также не забывать, что математическая модель – это не только система решаемых уравнений, а совокупность названной системы, замыкающих соотношений, начальных и граничных условий. Предсказательная способность модели во многом определяется точностью используемых в ней замыкающих соотношений. По мере их совершенствования модернизируются и ранее сделанные разработки.

Чтобы иметь возможность исследовать весь диапазон режимов работы и аварийных ситуаций в ТВС водоохлаждаемого реактора необходима многожидкостная модель в приближении раздельного течения фаз ("1222"). Компьютерные коды такого класса активно разрабатываются исследователями из разных стран.

Основные усилия направлены на совершенствование соотношений, описывающих процессы гидродинамики и теплообмена на границах раздела фаз. Большое внимание уделяется разработке моделей конструктивных элементов, присутствующих в ТВС (например, дистанционирующих решёток) и существенно влияющих на гидродинамические характеристики потока.



# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ РЕАКТОРА

39

## ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

В переходных режимах и в различные моменты кампании реактора изменяется энерговыделение по высоте активной зоны.

Перемещение регулирующих стержней изменяет профиль тепловыделения как это качественно показано на рисунке 1.

Введение регулирующего стержня в активную зону уменьшает поток нейтронов и, следовательно, тепловыделение.

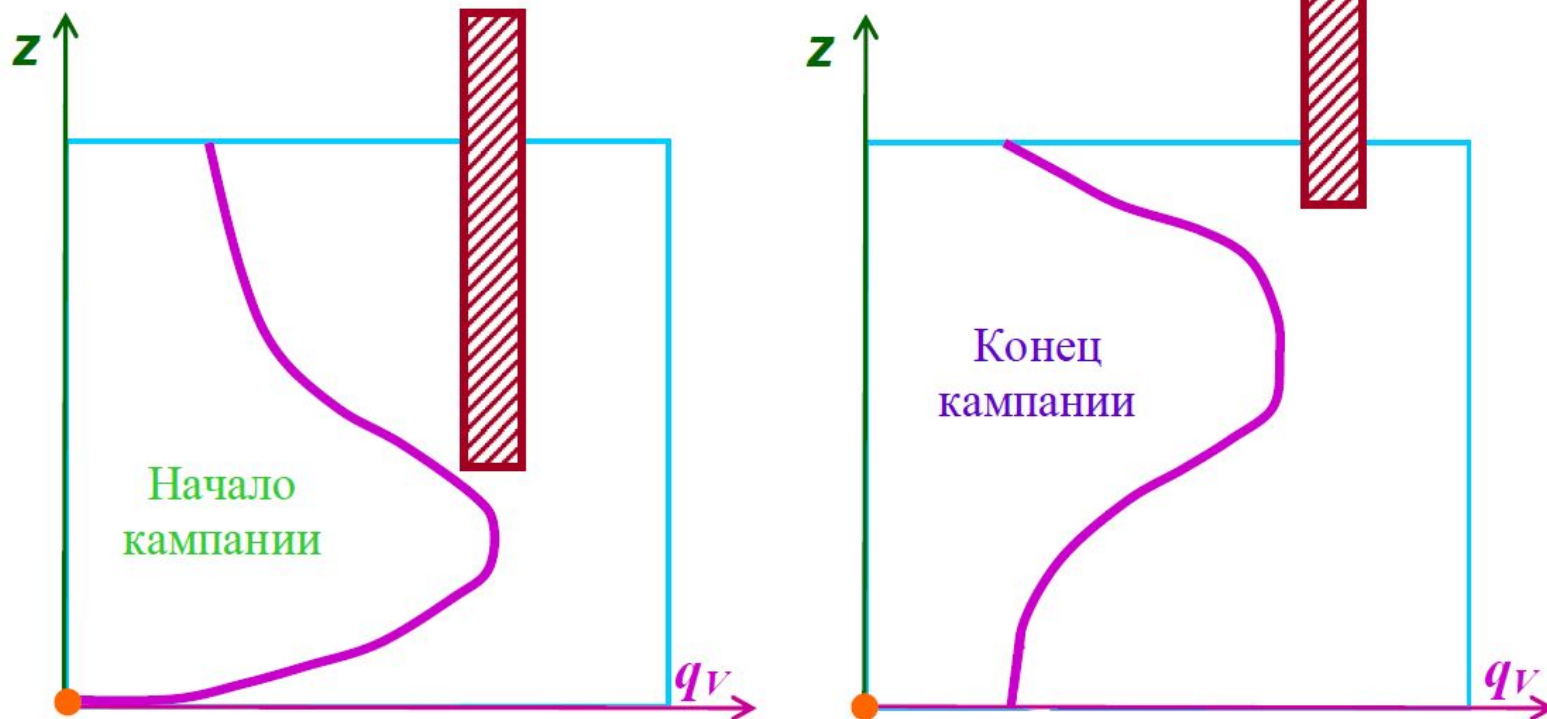


Рисунок 1 – Распределение объёмного энерговыделения по высоте активной зоны

В переходных процессах наибольшие деформации поля энерговыделения возникают при умеренном снижении мощности (40÷50%) и последующем восстановлении до номинальной.

Пример такого распределения для ВВЭР-1000 показан на рисунке 2. Это довольно медленные процессы, в которых тепловые характеристики следуют за физическими параметрами реактора.



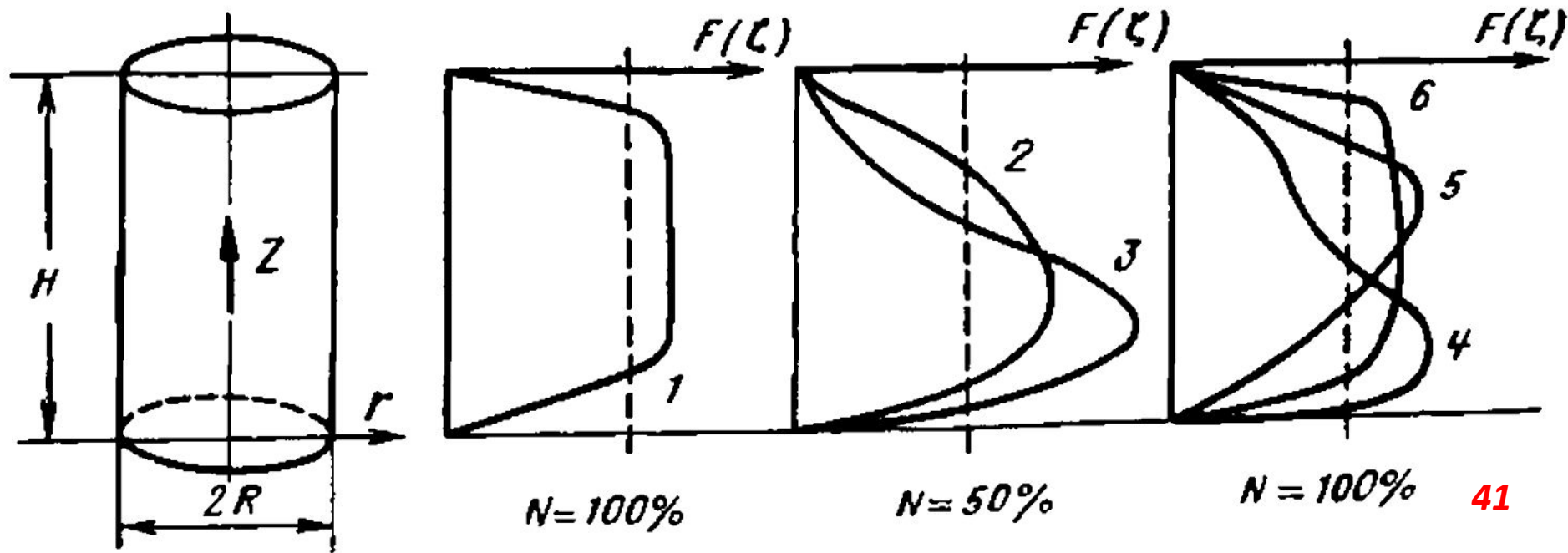


Рисунок 2 – Изменение распределения энерговыделения в реакторе ВВЭР-1000 в режимах разной мощности:

**1** – 100%;

**2** – 0 ч, 50%;

**3** – 4.62 ч, 50%; работа 5.3 ч на 50% мощности;

**4** – 5.3 ч, 100%; **5** – 10.6 ч, 100%; **6** – 15.8 ч, 100%.

$$\zeta = Z/H, \quad F(\zeta) = q(\zeta)/q.$$

При быстрых процессах принципиальным моментом является тот факт, что тепловые характеристики активной зоны изменяются медленнее, чем физические.

Так, при выбросе из активной зоны одной ТВС мощность ВВЭР-440 возрастает в 15 раз за время 0.1 с, а тепловой поток увеличивается всего в 1.34 раза (рисунок 3).

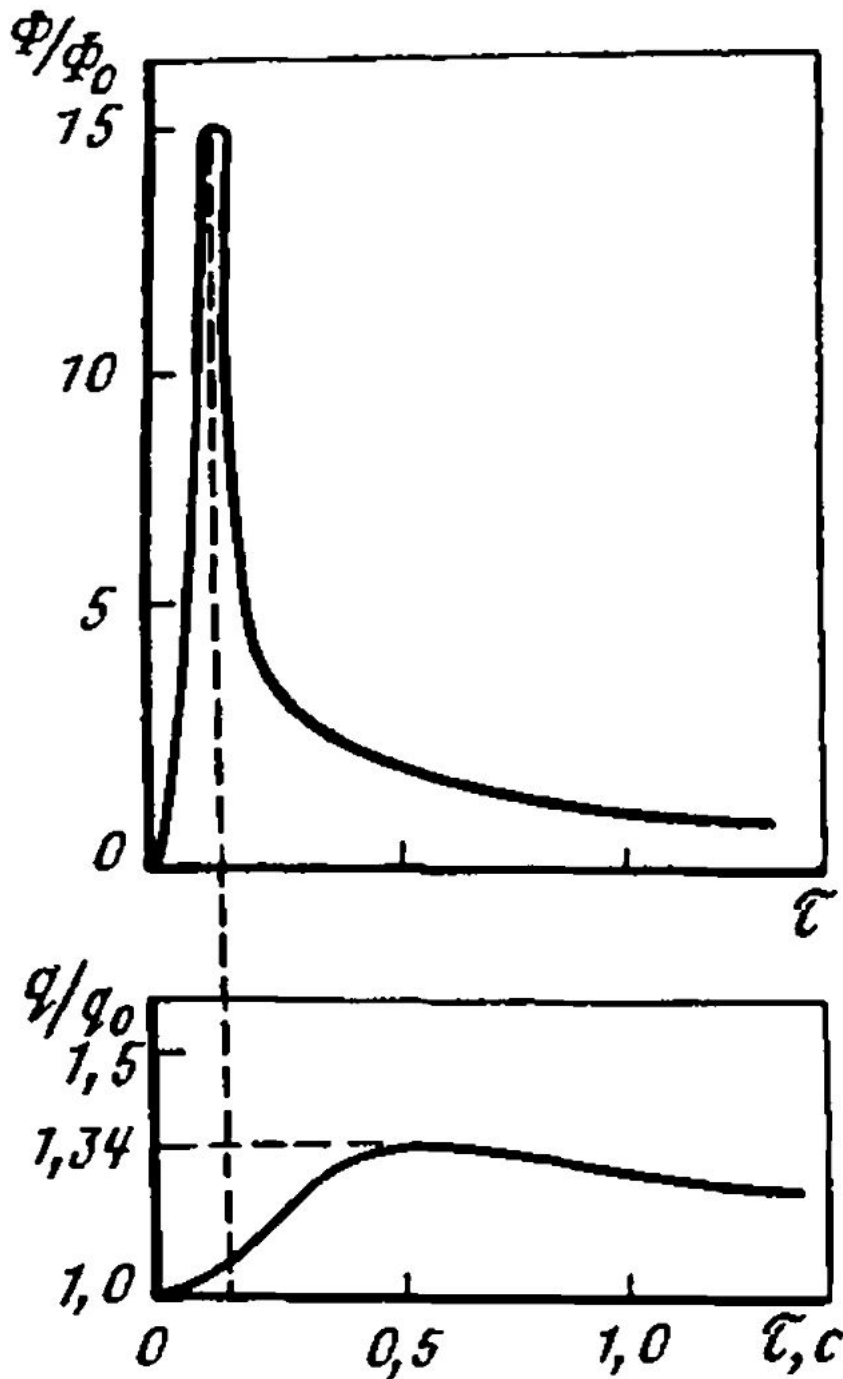
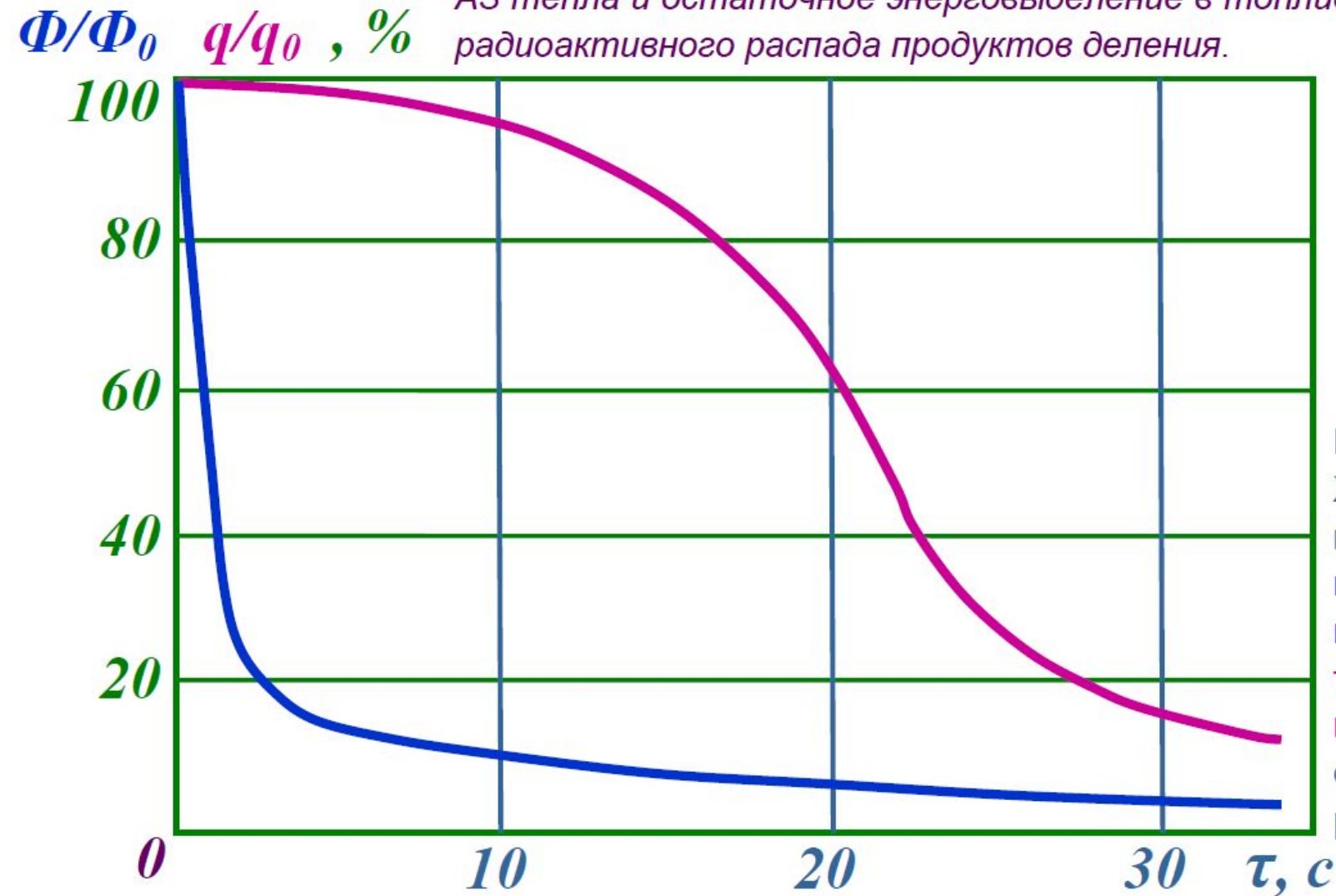


Рисунок 3 – Изменение потока нейтронов ( $\Phi$ ) и плотности теплового потока ( $q$ ) в ВВЭР-440 при удалении одной ТВС за время 0.1 с

При любом останове реактора тепловая мощность спадает медленнее плотности нейтронного потока (рисунок 4). Причина этого – значительные количества аккумулированного в АЗ тепла и остаточное энерговыделение в топливе вследствие радиоактивного распада продуктов деления.



43

Рисунок 4 – Характерные кривые спада нейтронной мощности и теплового потока после останова реактора

- Высокая температура,
- низкая теплопроводность,
  - достаточно высокая теплоёмкость

диоксида урана приводят к тому, что в топливе аккумулируется большое количество тепла.

При аварийных остановках реактора, связанных с ухудшением теплоотвода, это тепло может повысить температуру оболочки твэла до недопустимого значения.

При использовании металлического урана или керметного топлива, обладающих более высокой теплопроводностью, чем диоксид урана, количество тепла, запасённое в твэле, значительно меньше, и температура оболочки твэла при отключении реактора оказывается в пределах допустимой.

Остаточное тепловыделение в реакторе после его останова обусловлено *двумя процессами*.

- В начальные моменты времени (до 100 с) после останова продолжаются процессы деления на запаздывающих нейтронах.

- В дальнейшем основной вклад вносит тепловыделение от распадающихся радиоактивных осколков деления. Периоды полураспада осколков составляют от нескольких секунд до тысяч лет, поэтому в остановленном реакторе и в отработавшем топливе после прекращения деления ядер будет выделяться энергия распада осколков. Это вызывает необходимость постоянного охлаждения реактора после останова, а также охлаждения отработавшего топлива в хранилищах.

Если реактор до выключения работал в течение времени  $\tau_c$  на мощности  $N_0$ , то мощность остаточного тепловыделения  $N$  уменьшается по закону

$$\frac{N}{N_0} \approx 0.065 \cdot \left[ \tau^{-0.2} - (\tau + \tau_c)^{-0.2} \right] . \quad 45$$

В таблице показано, как с течением времени после останова спадает мощность остаточного тепловыделения.

<b>Время после останова</b>	<b><math>N/N_0</math>, %</b>
<i>1 с</i>	<i>6.5</i>
<i>10 с</i>	<i>5.1</i>
<i>100 с</i>	<i>3.2</i>
<i>1000 с</i>	<i>1.9</i>
<i>1 ч</i>	<i>1.4</i>
<i>10 ч</i>	<i>0.75</i>
<i>100 ч</i>	<i>0.33</i>
<i>1000 ч</i>	<i>0.11</i>
<i>1 год</i>	<i>0.023</i>

Приведенные в таблице значения мощности малы по сравнению с номинальными значениями. Но они значительны в абсолютных величинах.

Так, в *реакторе с электрической мощностью 1000 МВт*, который долго работал на полной мощности, *мощность остаточного тепловыделения через час после остановки составит 48 МВт, через сутки около 15 МВт, через год около 0,8 МВт*.

Отсюда следует необходимость постоянного охлаждения остановленного реактора.

# ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Под термином "переходные процессы" подразумеваются процессы перехода элементов реактора с одного температурного уровня на другой.

Расчёт (оценочный) большинства таких процессов, например, с уменьшением расхода, может быть выполнен на основе квазистационарных подходов.

Для таких расчётов необходимо знать тепловой поток и расход в каждый момент времени. Коэффициенты теплообмена рассчитываются по зависимостям для соответствующего стационарного режима, что не приводит к большим ошибкам, так как изменения коэффициентов теплообмена обычно относительно невелики.

Далее приведены выражения для оценки основных параметров таких процессов.

Большинство твэлов ядерных реакторов имеют вид цилиндрических стержней. Распределение температуры в цилиндре с плотностью объёмных источников тепла  $q_V [Вт/м^3]$  имеет вид

$$t(r) = t_{\text{пов}} + \frac{q_v R^2}{8\lambda} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] . \quad (1)$$

Плотность теплового потока на поверхности:

$$q = q_v \frac{R}{2}$$

Средняя по объёму температура цилиндра:

$$\bar{t} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R t(r) 2\pi r dr . \quad (2)$$



Подставив (1) в (2), получим:

49

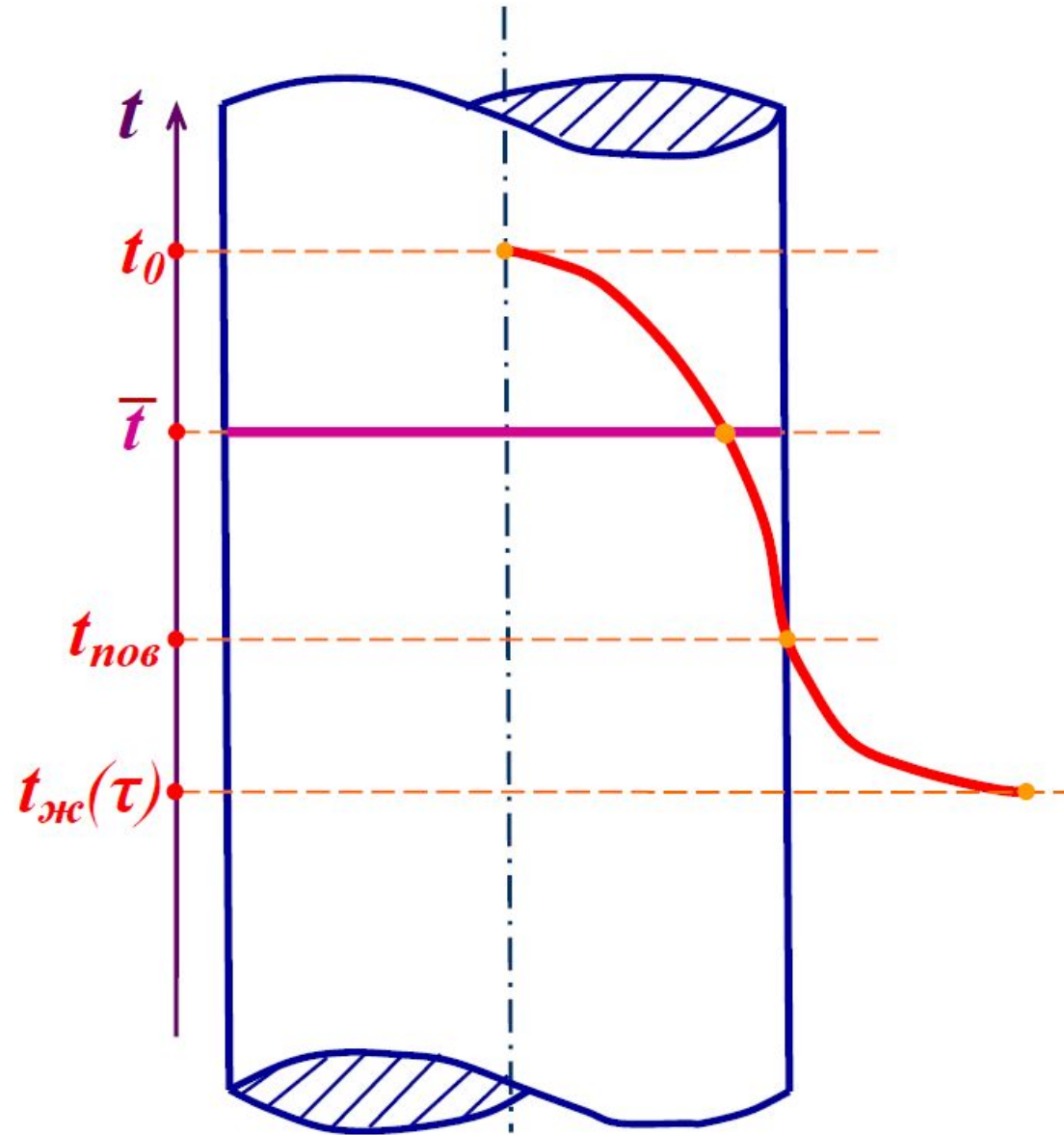
$$\bar{t} = t_{\text{пов}} + \frac{q_v R^2}{8\lambda} \quad . \quad (3)$$

Среднее термическое сопротивление цилиндрического твэла без оболочки:

$$\xi_T \equiv \frac{1}{\alpha} = \frac{\bar{t} - t_{\text{пов}}}{q} = \frac{R}{4\lambda} \quad . \quad (4)$$

Уравнение теплового баланса для элемента с внутренним тепловыделением (для нестационарного процесса), усредненное по объему, запишем в виде:

$$c\rho V \frac{dt}{d\tau} = q \cdot V - q \cdot F_{\text{пов}} \quad . \quad (5)$$



Рассмотрим упрощённую задачу (рисунок 5).

Пусть цилиндрический твэл радиуса  $R$  без оболочки с плотностью тепловыделения, описываемого законом

$$q_V = q_{V,0} \cdot F(\tau)$$

омывается теплоносителем с переменной температурой  $t_{жс}(\tau)$  и постоянным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

Тогда

$$q_V = \alpha \cdot [t_{нов} - t_{жс}(\tau)] .$$

Рисунок 5 – Распределение температуры в твэле без оболочки

С другой стороны, плотность теплового потока на поверхности цилиндрического твэла без оболочки можно выразить через термическое сопротивление:

$$q = \frac{4 \lambda}{R} [\bar{t} - t_{\text{пов}}] .$$

Сопоставив эти два уравнения, получим

$$q = \frac{\bar{t} - t_{\text{ж}}(\tau)}{\frac{R}{4 \lambda} + \frac{1}{\alpha}} . \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), получим

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{q_{V,0}}{c_p \rho} F(\tau) - \frac{\bar{t} - t_{\text{ж}}(\tau)}{\tau_0} . \quad (7)$$

$$\tau_0 = \left[ \frac{R}{4\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right] \frac{R c \rho}{2} \quad - \text{постоянная времени, определяющая динамические характеристики цилиндрического твэла.}$$

(8)

Можем записать  $\tau_0 = \tau_{вн} + \tau_н$ , где стоящие в правой части слагаемые это, соответственно, постоянные времени для процессов внутри твэла и процессов теплообмена с теплоносителем («наружных процессов»):

$$\tau_{вн} = \frac{c \rho R^2}{8 \lambda} = \frac{R^2}{8} \quad \tau_н = \frac{R c \rho}{2 \alpha} \quad (9)$$

**Критериальное число Био** – критерий краевого подобия, характеризующий связь между полем температур в твёрдом теле и условиями теплоотдачи на его поверхности, являясь мерой внутреннего и внешнего термического сопротивления (термического сопротивления стенки и термического сопротивления на границе стенки с потоком):

$$Bi \equiv \frac{\alpha L}{\lambda_{\text{wall}}},$$

где  $L$  – характерный размер.

$$\begin{aligned}
\tau_0 &= \left[ \frac{R \alpha}{4 \lambda} + 1 \right] \frac{R c \rho}{2} \frac{1}{\alpha} = \frac{R c \rho}{\alpha} \frac{Bi + 4}{8} = \\
&= \frac{R c \rho \lambda}{\alpha \lambda} \frac{Bi + 4}{8} = \frac{R^2 \lambda}{R} \frac{Bi + 4}{8} = \\
&= \frac{R^2}{a Bi} \frac{Bi + 4}{8} = \frac{R^2}{a} \frac{Bi + 4}{8 Bi} \quad .
\end{aligned}$$

В чём физический смысл постоянной времени?

Если начальное состояние твэла стационарное (то есть  $F(0)=1$ ;  $dt/d\tau=0$ ), то из (7) следует

$$\bar{t} = t_{\text{ж}}(0) + \frac{q_{v,0}}{c \cdot \rho \cdot F} \tau_0 \quad .$$

Пусть в момент  $\tau=0$  температура скачком увеличивается на

$\Delta t_{\text{ж}}$ .  
Температура твэла при этом будет изменяться по закону

$$\bar{t} = t_{\text{ж}} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right] \quad .$$

Аналогично, для мгновенного изменения энерговыделения на  $\Delta F$  имеем

$$\overline{\Delta t} = \frac{q_{V,0}}{c \cdot \rho} \cdot \tau_0 \cdot \Delta F \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right] .$$

Таким образом,  $\tau_0$  есть постоянная экспоненты, описывающей изменение температуры твэла после скачкообразного изменения входных параметров (температуры теплоносителя или энерговыделения).



Для линейного по времени изменения температуры теплоносителя  $\Delta t_{ж} = m\tau$  изменение температуры твэла

$$\bar{t} = m\tau - m\tau_0 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right] .$$

Максимальное отставание температуры твэла от температуры теплоносителя при  $\tau \rightarrow \infty$  составляет  $m \cdot \tau_0$ , то есть это отставание равно изменению температуры теплоносителя за время  $\tau_0$  (см. рисунок 6).

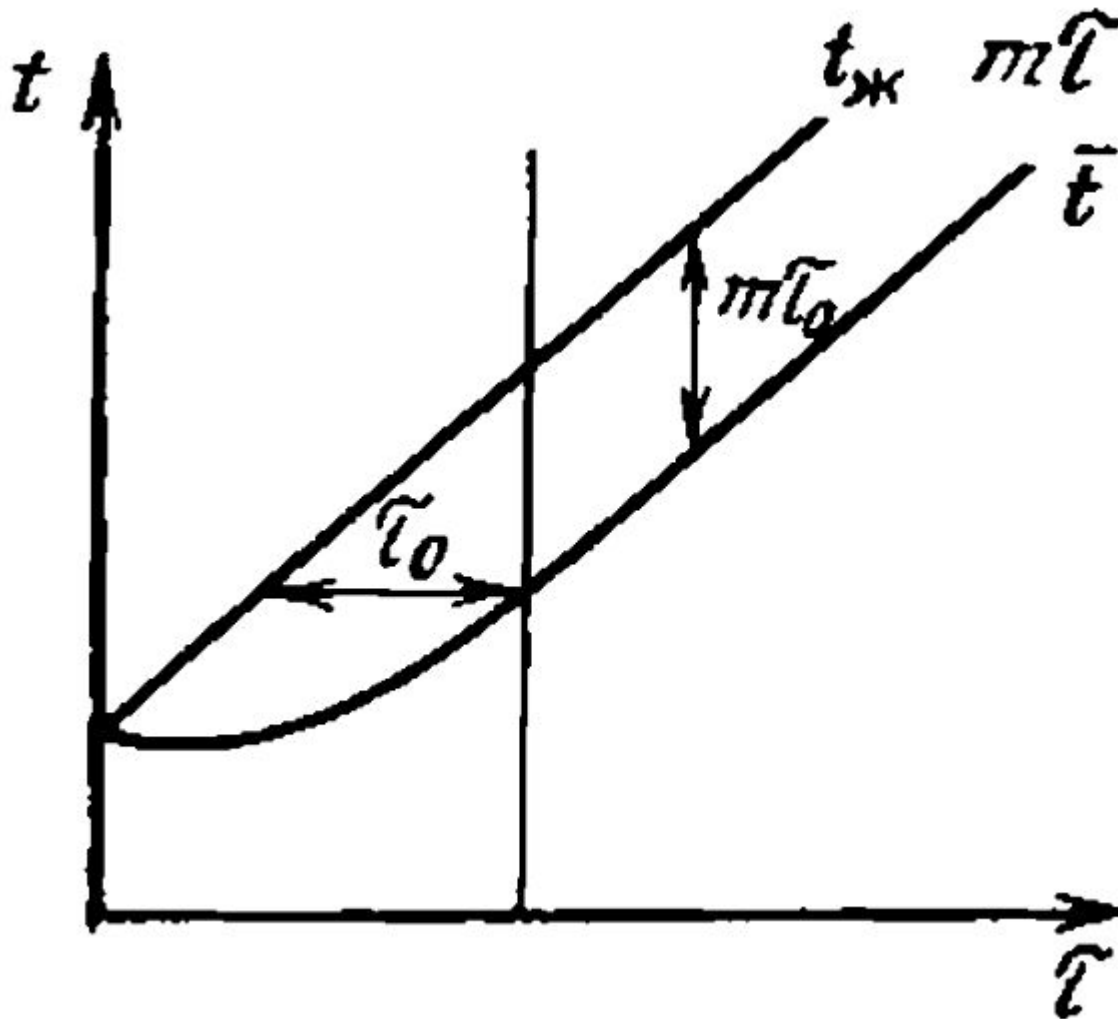


Рисунок 6 – Изменение средней температуры цилиндрического твэла без оболочки при линейном изменении температуры теплоносителя

Постоянную времени для тел любой формы можно записать в общем виде

$$\tau_{\theta} = R \ c \rho \frac{V}{F} \quad , \quad (10)$$

где  $V$  и  $F$  — объём и площадь поверхности теплообмена тела,  $R_T$  — суммарное термическое сопротивление переносу тепла от тела к теплоносителю, включающее среднее значение внутреннего термического сопротивления тела.

Постоянная времени реального цилиндрического твэла, имеющего оболочку и газовый зазор между топливом и оболочкой, учитывает их термические сопротивления. Приближенное выражение имеет вид:

$$\tau_0 \cong \left( \frac{R}{4\lambda} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}} + \frac{1}{\alpha} \right) \frac{c \rho R}{2} \quad . \quad (11)$$

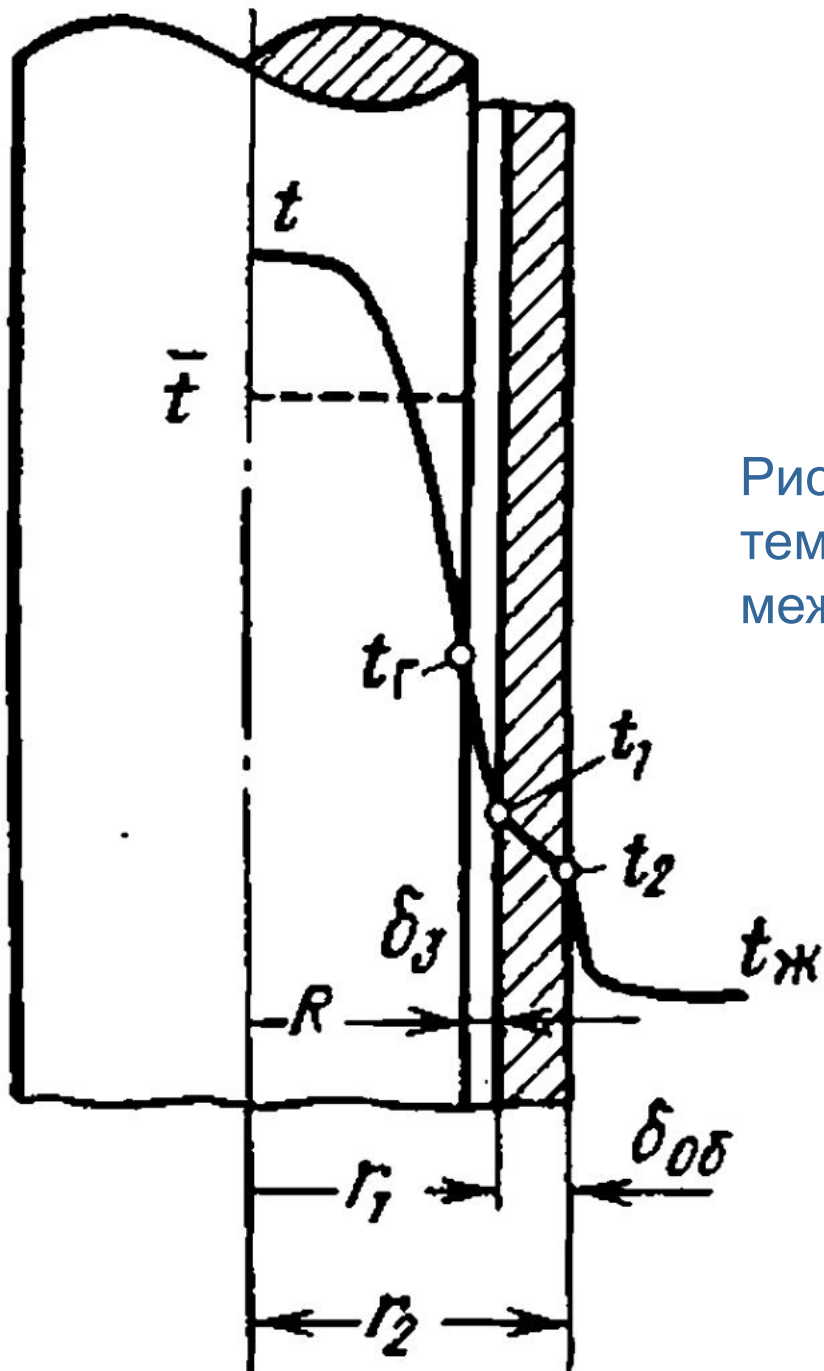


Рисунок 7 – Распределение температуры в твэле с газовым зазором между топливом и оболочкой

Рассмотрим теперь задачу охлаждения разогретой без учёта ее внутреннего тепловыделения. 61

Пусть АЗ охлаждается жидкостью с расходом  $M$  и постоянной температурой  $t$ . Начальная температура топлива  $t_0$ , теплоёмкость топлива  $C_T = V_T \rho_T c_T$ ; теплоёмкость теплоносителя  $C_{жс} = V \rho c = SH \rho c$ .

Здесь  $V_T$  – объём топлива;  $S, H$  – площадь проходного сечения и высота ТВС, соответственно.

Из уравнения теплового баланса можно найти изменение температуры за интервал времени  $d\tau$ :

$$-(C_T + C_{жс}) dt = M c t d\tau, \quad (12)$$

Заметим, что  $M c = w S \rho c = (w C) / H$ , поэтому выражение (12) может быть переписано в виде

$$\frac{dt}{t} = - \frac{C}{C_T + C} \frac{w}{H} d\tau, \quad (12a)$$

где  $H/w = \tau_{mp}$  – время транспорта теплоносителя через активную зону.

Выполнив интегрирование, получим

$$t = t_0 \cdot \exp\left(-\frac{C}{C_T + C} \frac{\tau}{\tau_{mp}}\right). \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим характерные времена запаздывания для ВВЭР-440.

Основные параметры:

объём топлива  $V_T=4.5 \text{ м}^3$ ;

радиус топливной таблетки  $R=3.775 \text{ мм}$ ;

высота топливного столба  $H=2.5 \text{ м}$ ;

объём теплоносителя  $V=7.56 \text{ м}^3$ ;

скорость теплоносителя  $w=3.4 \text{ м/с}$ ;

коэффициент теплообмена  $\alpha_{cp}=2260 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

свойства топлива:

$\rho_T=1 \cdot 10^4 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c_T=330 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_T=2.3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

свойства теплоносителя:  $\rho=750 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c=5460 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Время запаздывания –  $\tau_{вн}$  – вследствие внутреннего термического сопротивления твэла можно оценить так:

$$\tau_{вн} = \frac{R^2}{8 \cdot a_T} = \frac{R^2 c_T \rho_T}{8 \cdot \lambda_T} = \frac{(3.775 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 330 \cdot 10^4}{8 \cdot 2.3} \approx 2.56 \text{ с} .$$

Время запаздывания, обусловленное наружным термическим сопротивлением (граница раздела «топливо–теплоноситель»), можно оценить следующим образом:

$$\tau_{н} = \frac{R_{ст} \rho_T}{2 \cdot \alpha_{эф}} = \frac{3.775 \cdot 10^{-3} \cdot 330 \cdot 10^4}{2 \cdot 2.26 \cdot 10^3} \approx 2.76 \text{ с} .$$

Общее время запаздывания

$$\tau_0 = \tau_{вн} + \tau_{н} = (2.56 + 2.76) \text{ с} = 5.32 \text{ с} .$$

Время прохождения теплоносителя через активную зону:

$$\tau_{mp} = H/w = 2.5/3.4 \approx 0.735 \text{ с.}$$

Теплоёмкость топлива:

$$C_T = c_T \rho_T V_T = 330 \cdot 10^4 \cdot 4.5 = 1.485 \cdot 10^7 \text{ Дж/К.}$$

Теплоёмкость теплоносителя:

$$C = c_p V = 5460 \cdot 750 \cdot 7.56 \approx 3.096 \cdot 10^7 \text{ Дж/К.}$$

Отношение теплоёмкостей равно

$$(C+C_T)/C = 1+C_T/C = 1+1.485 \cdot 10^7/3.096 \cdot 10^7 \approx 1.48.$$

С учётом отношения теплоёмкостей время запаздывания получим такую оценку времени запаздывания:

$$\tau_3 = \tau_{mp} \cdot (C+C_T)/C = 0.735 \cdot 1.48 \approx 1.09 \text{ с.}$$



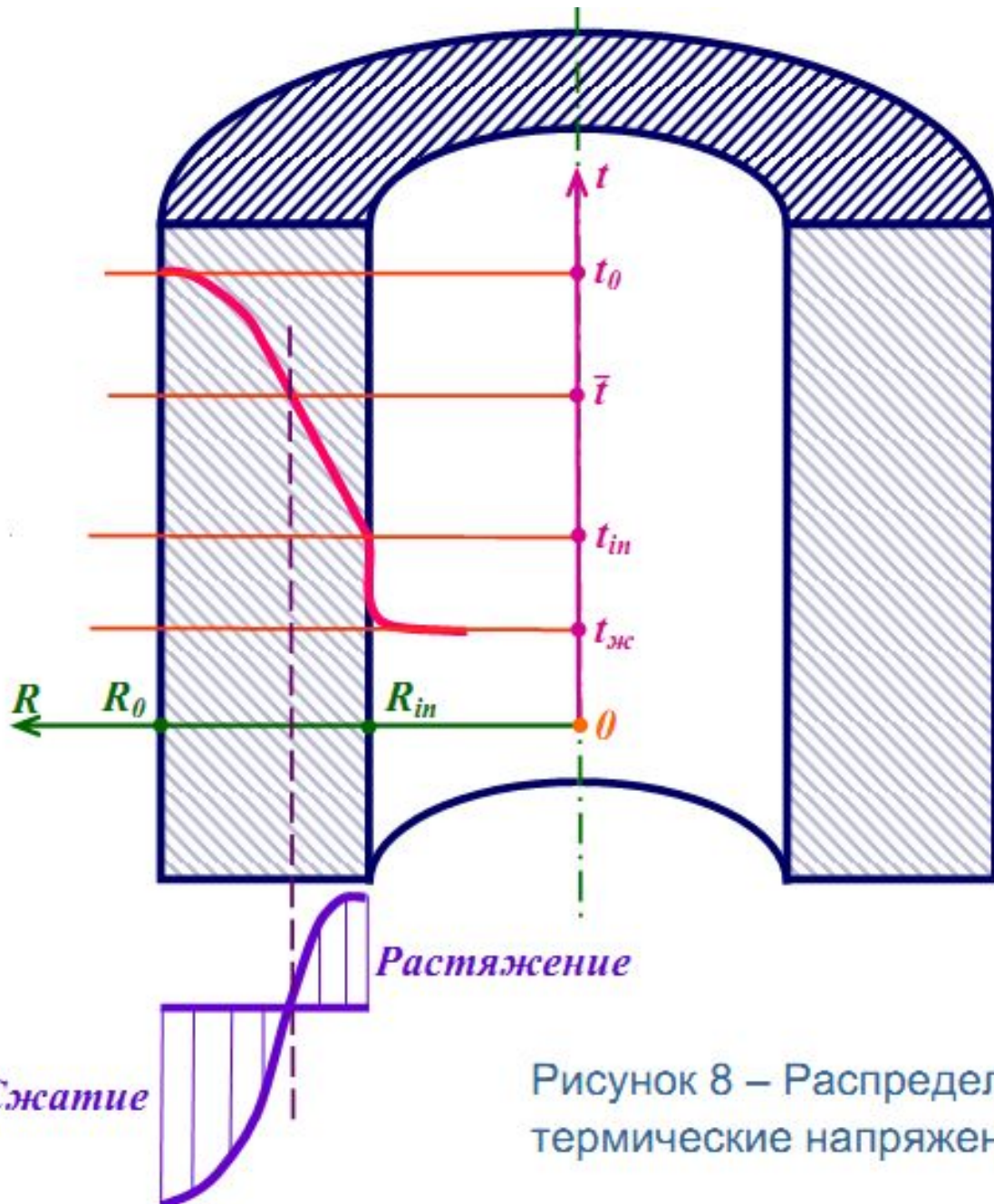
## ТЕПЛОВЫЕ УДАРЫ И ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

*В переходных режимах температура в разных частях конструктивных элементов изменяется с разной скоростью.*

*Резкие изменения температуры теплоносителя приводят к изменениям перепадов температуры в конструкциях, что вызывает возникновение термических напряжений, которые называют тепловыми ударами.*

Величина напряжений зависит от многих факторов:

*скорости изменения температуры теплоносителя,  
коэффициентов теплообмена,  
теплофизических свойств материала конструкции,  
толщины стенок  
и др.*



Рассматриваем  
стенку  
изолированного трубопровода,  
имеющего  
начальную температуру  $t_0$ .

Рисунок 8 – Распределение температуры и термические напряжения по сечению стенки трубы

При быстром снижении температуры теплоносителя внутренние слои трубы охлаждаются быстрее, чем наружные.

Распределение температуры приобретает вид, показанный на рисунке 8.

67

Если средняя температура стенки  $\bar{t}$  то слои, имеющие температуру выше средней, оказываются сжатыми, а ниже средней растянутыми.

Значение напряжений оценивается по формуле

$$\sigma = \frac{\beta E}{1 - \mu} [\bar{t} - t(r)] \quad , \quad (14)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного расширения;

$E$  – модуль упругости;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\bar{t}$  – средняя температура стенки:

$$\bar{t} = \frac{1}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} t(r) r \, dr \quad . \quad (15)$$

Максимальные напряжения возникают на поверхностях конструктивных элементов.

Под термином "тепловой удар" понимается однократное изменение температуры поверхности.

Однако в потоке теплоносителя существуют колебания температуры, которые необходимо учитывать, особенно при больших тепловых потоках.

Колебания температуры (пульсации) оказывают влияние на коррозионные процессы, поскольку приводят к разрушению защитных пленок на поверхности и могут вызвать усталостные напряжения.

Причинами пульсаций температуры могут быть:

- колебания мощности;
- турбулентные пульсации, которые определяются внутренней структурой потока;
- неустановившиеся конвективные течения, особенно в патрубках, тройниках и т.д. при наличии значительных градиентов температуры;
- смена режимов кипения (в месте кризиса, при переходе к пленочному кипению).

Для определения температурных напряжений необходимо найти распределение температуры в стенке толщиной  $h$ , на одной из поверхностей которой задают пульсации температуры, на другой – теплообмен с греющим теплоносителем при постоянном коэффициенте теплообмена.

Термоупругие нестационарные напряжения на поверхности можно определить по известным соотношениям из теории упругости.

## ***ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ РАССЛОЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ***

В переходных, а особенно в аварийных режимах практически всегда наблюдается расслоение (стратификация) теплоносителя по плотности в зависимости от температуры.

Разные температуры вызывают появление термогравитационных сил, которые изменяют картину течения и температурный режим потока.

Разница температуры между горячей и холодной областями в переходных режимах практически всегда равна изменению температуры в переходных режимах установки и может достигать сотен градусов.

Опасность стратифицированных течений – большой градиент температуры в узкой области, что может вызвать чрезмерные термические напряжения в конструкциях.

72

Расслоение теплоносителя может происходить в верхней камере у реакторов различного типа (ВВЭР, БН) в режимах с уменьшением энерговыделения.

Нагретые слои оказываются в верхней части камеры, более холодные – в нижней.

Устойчивая стратификация препятствует развитию естественной конвекции.

Между горячей и холодной областями имеется тонкий горизонтальный слой, в котором реализуется весь перепад температуры между верхней и нижней практически изотермическими областями (рисунок 9).

Это обстоятельство необходимо учитывать при установке датчиков измерения температуры, иначе возможны грубые ошибки в оценке её уровней в переходных режимах.



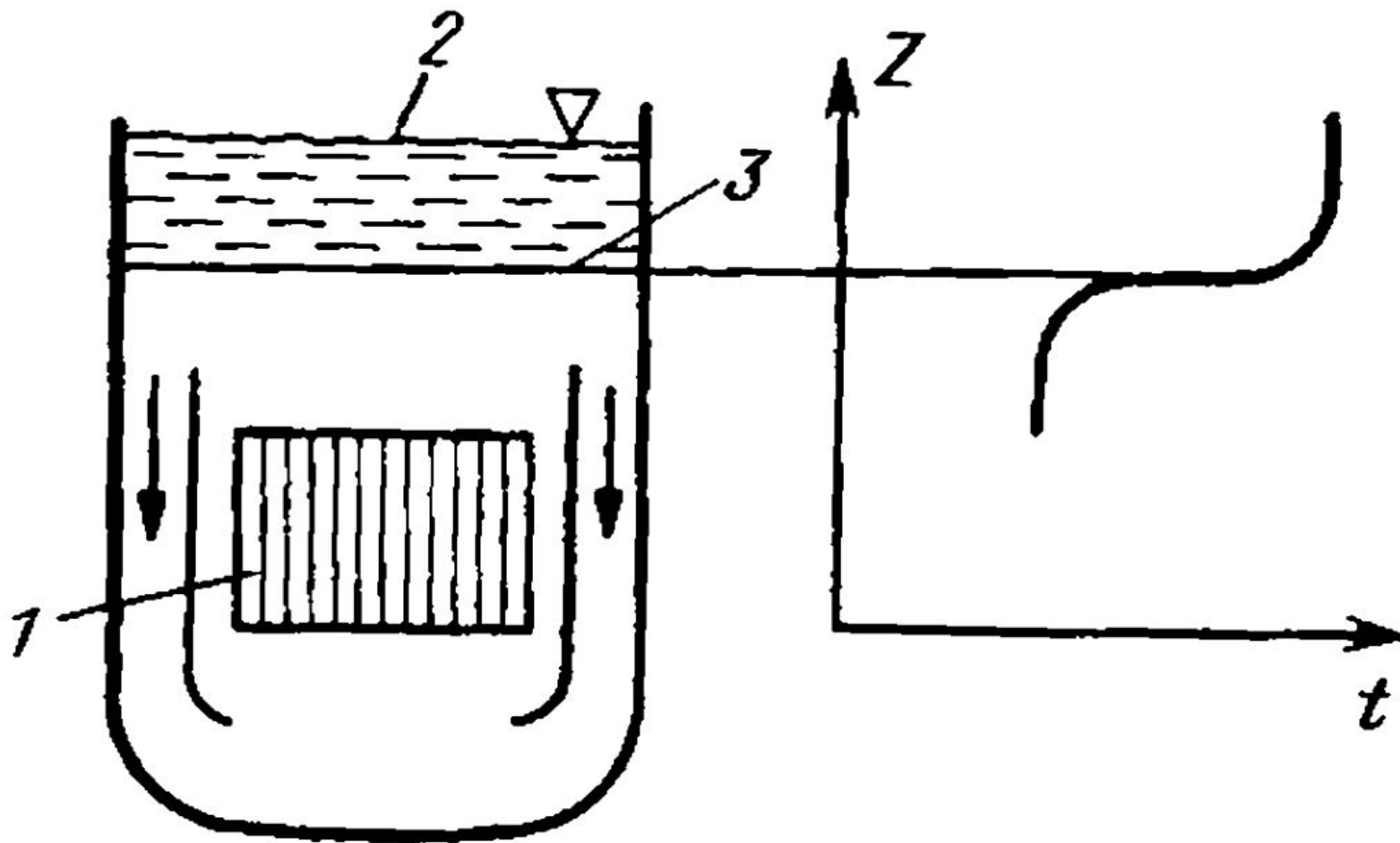


Рисунок 9 – Расслоение теплоносителя в верхней камере реактора:

1 – активная зона;

2 – уровень теплоносителя;

3 – граница горячей и холодной зон.

Тепло, передаваемое через поверхность раздела между горячей и холодной областями, быстро размывается турбулентными вихрями, и градиент температуры на поверхности раздела практически не меняется во времени. Числом подобия, определяющим устойчивость стратифицированных течений, в которых силы плавучести играют главную роль, является число Ричардсона:

$$Ri = g\beta \frac{\frac{\partial t}{\partial z}}{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} . \quad (16)$$

При  $Ri > 0.5$  граница раздела устойчива, при меньших  $Ri$  на поверхности раздела появляются колебания, амплитуда которых увеличивается с увеличением скорости.

Числами подобия, определяющими характер течений являются также числа Фруда и Рейнольдса:

$$\text{Fr} = \frac{w^2}{g\beta \Delta t L}, \quad \text{Re} = \frac{w L}{\nu}.$$

Другим примером расслоенных течений является *режим подачи холодной воды в трубопровод одной из петли первого контура ВВЭР в аварийном режиме при утечке теплоносителя.*

Структура течения теплоносителя в этом случае состоит из двух встречных потоков (рисунок 10).

Горячая жидкость распространяется на длину  $L$  в одну сторону, холодная течёт в другую.

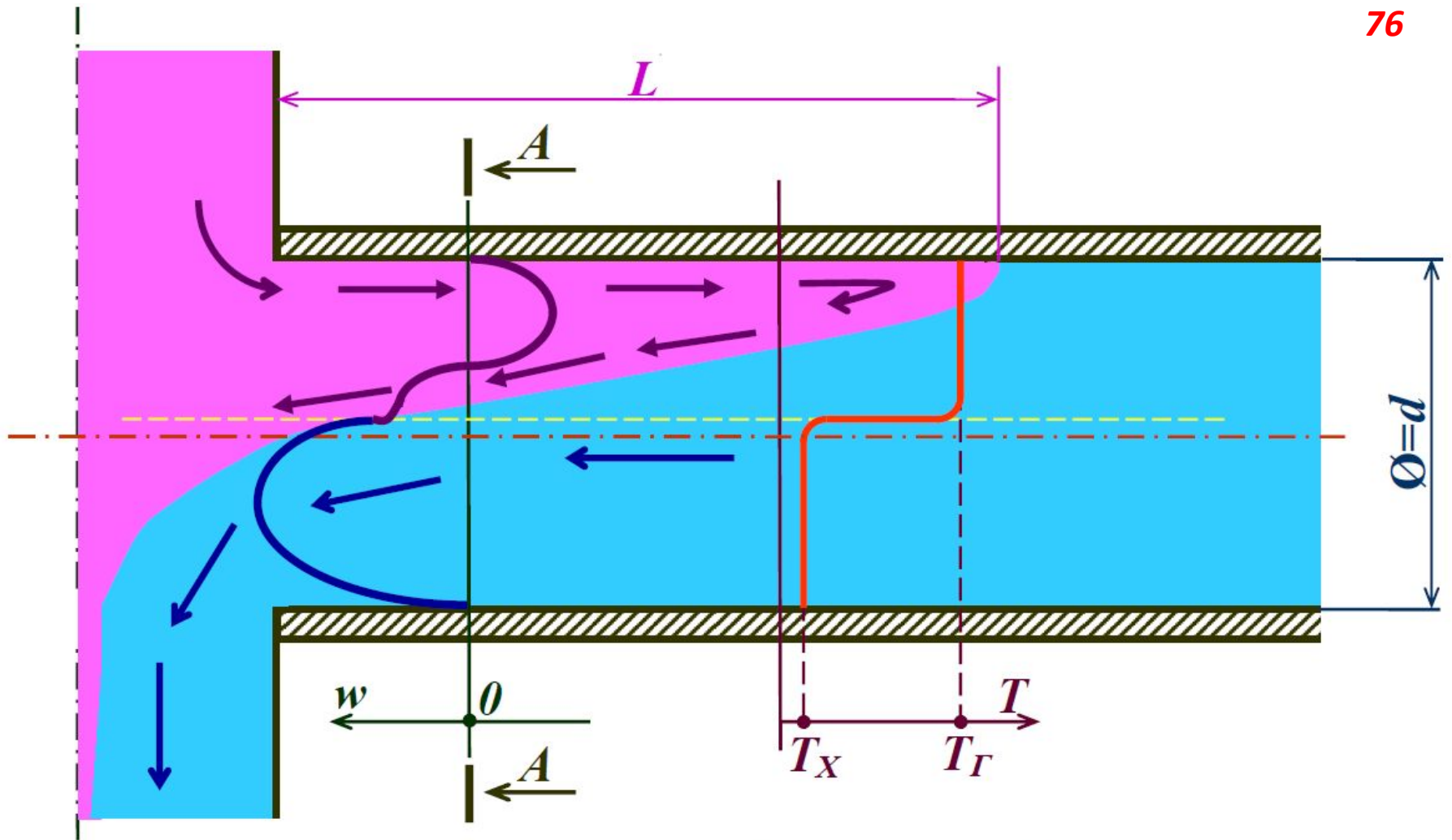


Рисунок 10 – Характер течения горячей и холодной жидкости при подаче холодной жидкости в трубопровод:  $w$  – распределение скорости в сечении  $A-A$ ;  $T$  – распределение температур в том же сечении

1. Характер распределения температуры в цилиндрическом твэле с зазором между топливом и оболочкой (изобразить графически).

*ДЗЯКУЙ  
ЗА ЎВАГУ*

*СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ*

*THANK FOR  
YOUR ATTENTION*