

**Маслов Юрий Александрович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ  
И ТЕПЛООБМЕНА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР  
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ЕЕ СТРУКТУРЫ НА  
ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:

**Москва-2010**

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном  
университете "МИФИ"

Научный руководитель: кандидат технических наук, с.н.с.,  
Харитонов Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
заведующий отделом ИБРАЭ РАН,  
Семенов В. Н.  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник НИЯУ МИФИ,  
Выговский С.Б.

Ведущая организация: ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Защита состоится «27» октября 2010 г. в 15 час. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д212.130.04 в НИЯУ МИФИ по адресу:  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,  
заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, д.ф.-м.н, профессор

Чернов И. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для решения актуальных задач ядерной энергетики, связанных с повышением мощности энергоблоков с ВВЭР-1000, а также с разработкой новых проектов легководных корпусных реакторов, необходимо усовершенствование методик обоснования теплогидравлических характеристик активных зон реакторов.

Активные зоны современных реакторов типа ВВЭР, комплектуемые бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС), являются существенно анизотропными структурами, в которых создаются условия для поперечной циркуляции теплоносителя. Заметные поперечные перетечки теплоносителя могут вызывать дистанционирующие решетки (ДР), межкассетные зазоры, решетки-интенсификаторы теплообмена и другие элементы конструкции, приводящие к локальному изменению гидравлического сопротивления. Они могут также проявляться вследствие пространственной неравномерности поля энерговыделения. Влияние поперечных составляющих скорости на тепломассоперенос в активной зоне усиливается при работе реакторной установки на неполном числе главных циркуляционных насосов (ГЦН), когда в потоке теплоносителя начинают преобладать силы естественной конвекции.

В настоящее время реализуется несколько подходов к моделированию тепломассопереноса в активных зонах с бесчехловыми ТВС. Существующие коды для анализа теплогидравлики активных зон ядерных реакторов в основном используют так называемую поканальную методику расчета, которая может обоснованно применяться только в случаях, когда поперечный перенос незначителен. Методики расчета на основе модели пористого тела лишены таких ограничений при описании трехмерного тепломассопереноса и рассматриваются как перспективные для расчета течений с произвольной ориентацией потока теплоносителя в ТВС. В последнее время в практику гидродинамических расчетов внедряются CFD-коды, с помощью которых рассчитывают распределение локальных скоростей потока с использованием различных моделей турбулентности. Однако для расчета сложных течений CFD-коды требуют значительно больших вычислительных мощностей по сравнению с моделью по-

ристого тела и поканальными методиками. При этом необходима проверка достоверности полученных результатов путем сопоставления с экспериментальными данными по локальным характеристикам потока.

Упомянутое выше определяет актуальность разработки эффективного метода моделирования трехмерных процессов теплопереноса в активных зонах реакторов типа ВВЭР с использованием модели анизотропного пористого тела, которая позволяет учесть основные физические особенности сложных турбулентных течений в стержневых сборках.

Целью работы являлась разработка в приближении анизотропного пористого тела модели для описания трехмерных процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне реакторов ВВЭР и создание на ее основе программного комплекса ТРЕТОН. Для этого были решены следующие задачи:

- разработан и протестирован двухуровневый алгоритм численного решения задачи гидродинамики и теплообмена в активной зоне;
- разработана методика описания гидравлического сопротивления и отклоняющего воздействия на поток теплоносителя перемешивающей решетки;
- выполнено численное исследование трехмерных теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР-1000 в эксплуатационных режимах с различными уровнями мощности;
- проведен теплогидравлический анализ вариантов размещения в ТВС перемешивающих решеток.

Достоверность результатов обеспечивается детальным анализом исходных данных; использованием апробированных моделей и достоверных замыкающих соотношений, основанных на новых экспериментальных данных по угловому обтеканию стержневыхборок; проведенным тестированием разработанного программного комплекса ТРЕТОН.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана трехмерная математическая модель гидродинамики и теплообмена в активной зоне реакторов типа ВВЭР, учитывающая анизотропию процессов переноса в ориентированных стержневых структурах;

– разработана новая методика описания отклоняющего воздействия и гидравлического сопротивления при обтекании потоком теплоносителя перемешивающих решеток;

– впервые получено аналитическое решение модельной задачи о распределении поля скорости теплоносителя в цилиндрической анизотропной структуре с объемным тепловыделением в условиях совместного действия сил вынужденной и естественной конвекции;

– получены новые данные о трехмерных полях температуры, давления и скорости теплоносителя в активной зоне ВВЭР-1000 в эксплуатационных режимах с различными уровнями мощности.

Практическая значимость работы заключается в реализации разработанной модели расчета процессов тепломассопереноса в активной зоне в программном комплексе ТРЕТОН. Корректный учет в модели трехмерного тепломассообмена в сборках стержневых ТВЭЛ позволяет обосновать снижение консерватизма при расчетном анализе безопасности эксплуатации реакторных установок.

Полученные в работе результаты представлены для практического использования на предприятиях атомной отрасли – ОАО «Концерн Росэнергоатом», ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ОАО ТВЭЛ. Результаты работы внедрены в учебный процесс НИЯУ МИФИ на кафедре теплофизики, включены в учебное пособие.

Основные положения, выносимые на защиту:

– разработанная модель расчета трехмерных процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне реакторов типа ВВЭР, учитывающая влияние анизотропии структуры активной зоны на процессы переноса;

– результаты реализации разработанной модели в программном комплексе ТРЕТОН, предназначенном для исследования полей температур, скоростей и давления теплоносителя в активной зоне реакторов типа ВВЭР;

– результаты численного моделирования теплогидравлических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 в различных режимах эксплуатации реактора.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: Научная сессия МИФИ

2006–2010; 4-я Курчатовская молодежная школа, Москва, 2006; Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену, Москва, 2006; МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2006 и 2008; МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2007 и 2009; Межотраслевой семинар «Теплофизика-2008», Обнинск, 2008.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 2 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК.

Личный вклад автора. Работа выполнена на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ. Постановка задачи исследования осуществлена совместно с научным руководителем. Разработка программного комплекса, проведение расчетов, обработка и анализ полученных данных выполнены автором самостоятельно или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников. Работа изложена на 153 страницах, включая 68 рисунков, 17 таблиц и список использованных источников из 60 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор методов расчета теплогидравлических характеристик активных зон реакторов, математических моделей и программных кодов, основанных на них, а также особенностей численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена при компоновке активной зоны реакторов типа ВВЭР бесчехловыми ТВС.

Обоснован выбор модели пористого тела для анализа процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов с бесчехловыми ТВС.

Во второй главе описана разработанная методика моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне.

Для описания трехмерных тепловых и гидродинамических процессов в активной зоне реакторов типа ВВЭР использована двухуровневая модель. В

этой модели в приближении анизотропного пористого тела описываются поля температур, скоростей и давлений во всей активной зоне (уровень "активная зона"). На последующем уровне "твэл" определяется распределение температур в тепловыделяющих элементах.

Уравнения сохранения массы, импульса, энергии и уравнение состояния теплоносителя в модели пористого тела имеют следующий вид:

$$\frac{\partial (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}})}{\partial \tau} + \text{div} (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} u_i)}{\partial \tau} + \text{div} (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} \bar{u} u_i) = \text{div} (\bar{\sigma}) f_i - \epsilon_{\text{тн}} \text{grad} p, \bar{e}_i + \epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} g_i, \quad (2)$$

$$c_{\text{тн}} \left( \frac{\partial (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} T_{\text{тн}})}{\partial \tau} + \text{div} (\epsilon_{\text{тн}} \rho_{\text{тн}} \bar{u} T_{\text{тн}}) \right) = -\text{div} (\bar{q}) + q_v, \quad (3)$$

$$\rho_{\text{тн}} = \rho_{\text{тн}} (\phi, T_{\text{тн}}), \quad (4)$$

где  $\epsilon_{\text{тн}} = V_{\text{тн}}/V$  – пористость по теплоносителю;  $\tau$  – время;  $\rho_{\text{тн}}$  – плотность теплоносителя;  $\vec{u}$  – вектор скорости теплоносителя;  $\bar{\sigma}$  – тензор напряжений, содержащий эффективную вязкость  $\mu_{\text{eff}}$ ;  $f_i$  –  $i$ -ая проекция силы сопротивления потоку жидкости;  $p$  – давление теплоносителя;  $i = x, y, z$  – координата;  $\bar{e}_i$  – единичный направляющий вектор  $i$ -ой координаты;  $g_i$  –  $i$ -ая проекция ускорения свободного падения;  $c_{\text{тн}}$  – теплоемкость теплоносителя;  $\bar{q}$  – вектор теплового потока, учитывающий эффективную теплопроводность  $\lambda_{\text{eff}}$ ;  $q_v$  – эффективная плотность энергосвободного выделения в теплоносителе.

Распределение температуры в твэлах описывается уравнением теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div} (\bar{\kappa} \text{grad} T) + q_v \quad (5)$$

с граничными условиями третьего рода.

Анизотропия структуры активной зоны в модели учитывается использованием тензоров эффективной теплопроводности, вязкости и силы объемного сопротивления. Для решения системы уравнений (1–5) определены эффективные коэффициенты переноса. Они определялись с использованием как известных теоретических и экспериментальных данных, так и результатов специаль-

ных исследований. В модели использованы замыкающие соотношения, учитывающие зависимость силы объемного гидравлического сопротивления и эффективной вязкости от угла обтекания сборки потоком теплоносителя.

В случае обтекания стержневых структур в уравнении (2) наиболее значимыми являются члены, представляющие объемную силу сопротивления и силу давления. Это означает, что погрешности при описании силы объемного сопротивления и ее анизотропных свойств в максимальной степени отражаются на поле скорости.

Одной из особенностей анизотропной среды является то, что при обтекании ее потоком жидкости направление вектора силы сопротивления может не совпадать с направлением, обратным вектору скорости. Таким образом, коэффициент пропорциональности в соотношении  $\vec{f} = -K \vec{u}$  не может быть скалярной величиной. При поворотах системы координат компоненты векторов  $\vec{u}$  и  $\vec{f}$  будут изменяться и  $K$  должен быть тензорной величиной.

В настоящее время для улучшения теплотехнических характеристик ТВС в них устанавливаются специальные решетки, предназначенные для перемешивания теплоносителя. Каждая ячейка перемешивающей решетки (ПР) оказывает на поток ориентированное отклоняющее воздействие. В области ПР объемная сила сопротивления, действующая на жидкость со стороны твердого компонента, в общем случае может быть представлена в виде:

$$\vec{f} = -a \vec{u} - b \vec{n} = -a \vec{u} - b (\vec{u} \cdot \vec{n}) \vec{n}, \quad (6)$$

Второй член в уравнении (6) учитывает анизотропию сопротивления, которая задается вектором  $\vec{n}$ , определяющим направление отклоняющего воздействия ПР,  $a$  и  $b$  – скалярные коэффициенты.

В выбранной системе координат ось  $z$  ориентирована вдоль оси пучка (в направлении средней скорости потока теплоносителя). Сила гидравлического сопротивления  $\vec{f}$  может быть записана в тензорном виде:

$$\begin{aligned} f_x &= -k_{xx} u_x - k_{xy} u_y - k_{xz} u_z, \\ f_y &= -k_{yx} u_x - k_{yy} u_y - k_{yz} u_z, \\ f_z &= -k_{zx} u_x - k_{zy} u_y - k_{zz} u_z, \end{aligned} \quad (7)$$



где компоненты тензора сопротивления определяются параметрами  $a$ ,  $b$ ,  $\bar{n}$ :

$$\begin{aligned} k_{xx} &= a + b n_x n_x, & k_{yy} &= a + b n_y n_y, & k_{zz} &= a + b n_z n_z, \\ k_{xy} &= k_{yx} = b n_x n_y, & k_{xz} &= k_{zx} = b n_x n_z, & k_{yz} &= k_{zy} = b n_y n_z \end{aligned} \quad (8)$$

Значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $\bar{n}$  определяются индивидуально для каждого вида конструкции анизотропного сопротивления экспериментальным или расчетным путем.

В третьей главе приведено описание двухуровневого алгоритма расчета по разработанной модели в программном комплексе ТРЕТОН. Представлено описание основных процедур и модулей программы. На рис. 1 показана структурная схема программного комплекса ТРЕТОН.

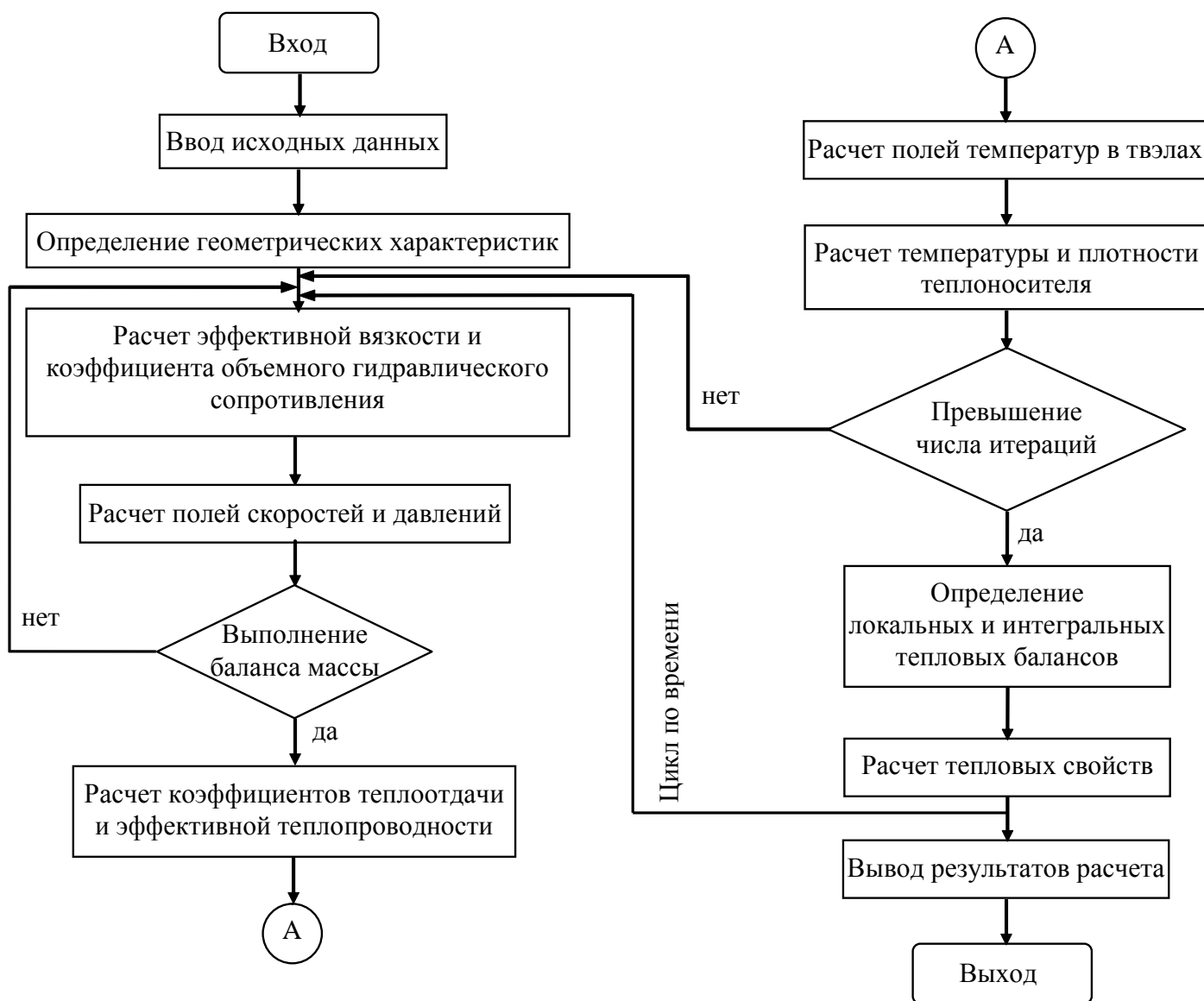


Рисунок 1 - Структурная схема программного комплекса ТРЕТОН

В четвертой главе приведены данные по тестированию разработанного программного комплекса.

**Задача о теплообмене в активной зоне с учетом естественной конвекции.** Для проверки точности учета эффектов естественной конвекции в программном комплексе ТРЕТОН аналитически была решена модельная задача о распределении поля скорости теплоносителя в цилиндрической анизотропной структуре, в которой действуют источники тепловыделения, при совместном действии вынужденной и естественной конвекции.

*Постановка модельной задачи.* В активной зоне высотой  $l$  и радиусом  $r_0$  действуют распределенные по радиусу по параболическому закону источники тепловыделения  $q_v(r)$ . На вход в активную зону поступает теплоноситель с температурой  $t_{ж}$ . Давление жидкости во входном и выходном коллекторах поддерживаются постоянными. Поля скоростей и температур принимаются стационарными и осесимметричными. Необходимо оценить возмущение, вносимое в поле скорости, обусловленное действием естественной конвекции при зависимости плотности теплоносителя от температуры.

*Возмущение поля скорости.* Получено выражение для безразмерных компонент отклонений скорости:

$$M_r = (k_r - 1)16L \sum_{k=1,3,5..} \left( \frac{I_1(\pi k R)}{I_1(\pi k R_0)} - \frac{R}{R_0} \right) \frac{\text{Sin}(\pi k Z)}{(\pi k)^3}, \quad (9)$$

$$M_z = \frac{1}{2} + (k_r - 1) \left[ \frac{1}{2} - 2L^2 R^2 Z - 2L \frac{\partial \varphi_2}{\partial Z} \right], \quad (10)$$

где  $\frac{\partial \varphi_2}{\partial Z} = \sum_{k=1,3,5..} \left[ \frac{4}{(\pi k)^2} \left( \frac{4}{(\pi k)^2} + R^2 \right) - \frac{8R_0}{(\pi k)^3} \frac{I_0(\pi k R)}{I_1(\pi k R_0)} \right] \cos(\pi k Z)$ .

Видно, что даже при равномерном распределении тепловыделения по радиусу ( $k_r = 1$ ) наблюдается неравномерность  $M_z = 0,5$  в распределении скоростей по высоте активной зоны за счет действия естественной конвекции.

*Сопоставление аналитического и численного решений.* Результаты сопоставления аналитического решения с полученными по программному комплексу ТРЕТОН распределениями скорости теплоносителя в активной зоне приведены на рис. 2 и 3.

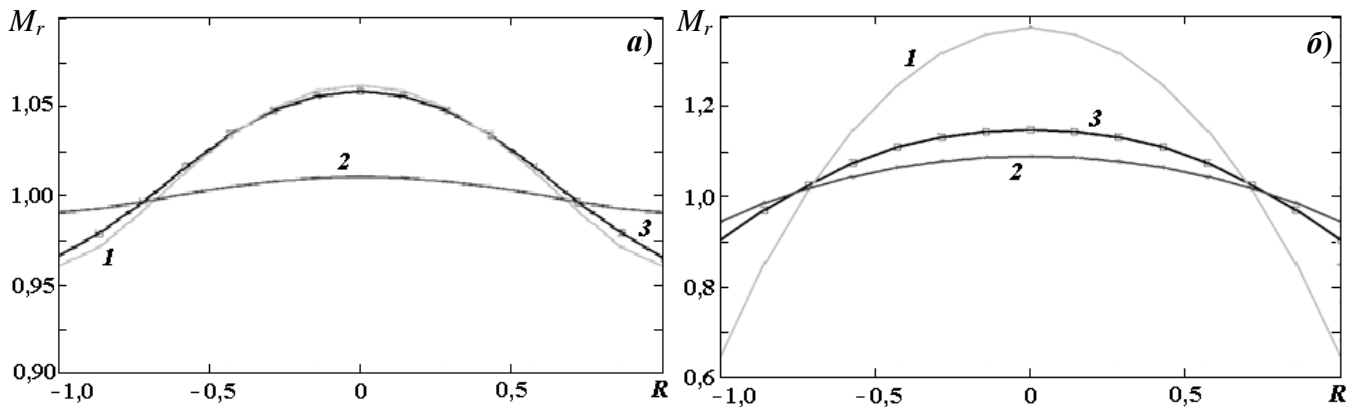


Рисунок 2 - Распределение безразмерных массовых скоростей теплоносителя по радиусу на входе (а) и выходе (б) из активной зоны: 1- максимальная оценка по аналитической модели, 2 – минимальная оценка по аналитической модели, 3 – расчет по программе ТРЕТОН

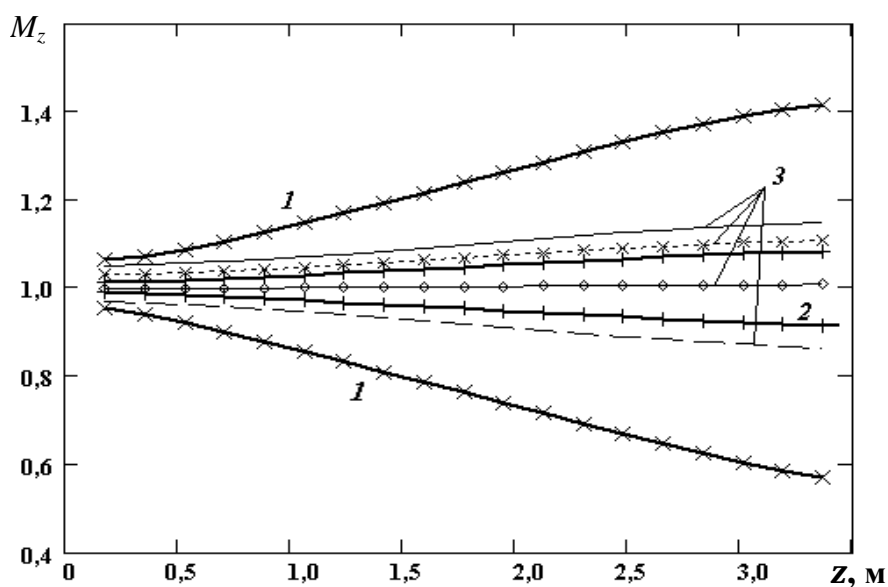


Рисунок 3 - Распределение безразмерных массовых скоростей теплоносителя по высоте активной зоны: 1- максимальная оценка по аналитической модели, 2 – минимальная оценка по аналитической модели, 3 – расчет по программе ТРЕТОН

За счет действия сил естественной конвекции, которые максимальны в области максимальных подогревов, т.е. по центру активной зоны, происходит перераспределение расходов теплоносителя. В центре скорость увеличивается, а на периферии активной зоны уменьшается. Причем это действие сказывается по всему объему активной зоны, так что и на входе устанавливается некоторая неравномерность скорости, но существенно меньшая, чем на выходе.

Сопоставление распределения скорости теплоносителя по радиусу, рассчитанного с помощью ТРЕТОН (кривые 3 на рис. 2), с результатами аналитических расчетов для предельных случаев, соответствующих заниженному

(кривая 1) и завышенному (кривая 2) значениям сопротивления поперечных перегородок теплоносителя, показывает, что расчетное распределение занимает промежуточное положение между предельными теоретическими оценками. Тот же вывод следует из анализа рис. 3, на котором показано развитие неравномерности скорости по высоте активной зоны на различных расстояниях от центра активной зоны.

В целом можно заключить, что программный комплекс ТРЕТОН корректно учитывает действие сил естественной конвекции при выполнении теплогидравлических расчетов.

**Задача о распределении полей температуры и скорости теплоносителя в активной зоне при номинальном режиме работы ВВЭР-1000.** С целью комплексного тестирования разработанного программного комплекса ТРЕТОН было проведено сравнение результатов расчетов полей температур и скоростей теплоносителя в активной зоне ВВЭР-1000 с данными независимого расчета по аттестованной программе NOSTRA. В расчетах моделировался стационарный режим работы реактора на номинальной мощности.

На рис. 4 и 5 в качестве примера показаны результаты расчета распределения подогрева теплоносителя и его расхода на выходе из каждой ТВС, соответственно.

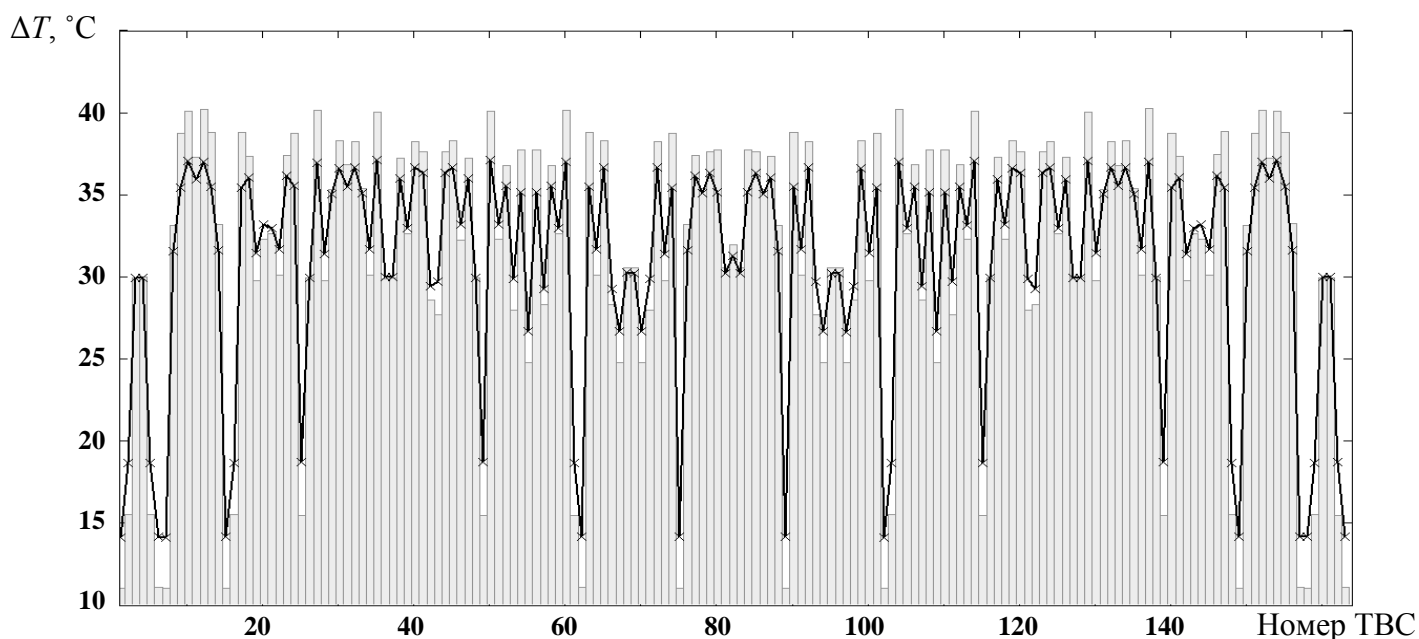


Рисунок 4 - Изменение подогрева теплоносителя по отдельным ТВС:

— ТРЕТОН; гистограмма — NOSTRA

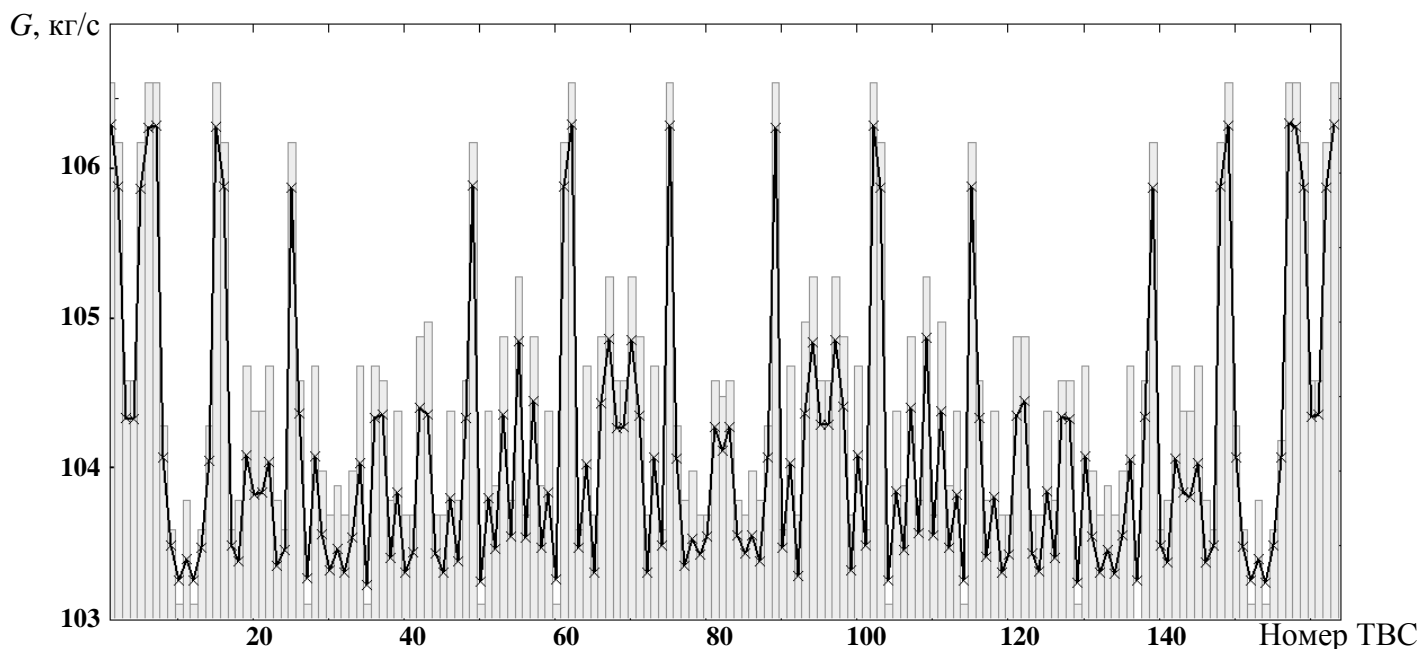


Рисунок 5 - Расход теплоносителя на выходе каждой ТВС:

————— — ТРЕТОН; гистограмма — NOSTRA

Получено хорошее совпадение результатов расчетов по обеим программам. При этом разброс рассчитанных по ТРЕТОН расходов и подогревов по каналам ниже, чем в расчетах по программе NOSTRA, т.к. в ТРЕТОН трехмерные процессы межкассетного теплопереноса учитываются во всей активной зоне, а не только во входном и выходном коллекторах, как в программе NOSTRA.

В пятой главе приведены результаты расчетных исследований трехмерных процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне реактора ВВЭР-1000.

**Теплогидравлические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 при работе реактора на повышенных уровнях мощности.** В связи с реализуемой в настоящее время программой повышения номинальной мощности энергоблоков с реактором ВВЭР-1000 были выполнены расчеты режимов работы активной зоны на мощности, форсированной до 104–120 % от номинальной, с номинальными параметрами теплоносителя на входе в зону.

С целью оценки интенсивности внутризонного перемешивания теплоносителя в зависимости от мощности реакторной установки было выполнено сопоставление с вариантами, в которых в активной зоне не учитывались процессы поперечного тепло- и массообмена между отдельными ТВС.

Полученные в расчетах максимальные значения температур теплоносителя, топлива и оболочки твэлов представлены в табл. 1. Зависимости максимального и среднего по активной зоне подогревов теплоносителя от тепловой мощности реактора показаны на рис. 6.

Таблица 1 - Максимальные температуры теплоносителя, топлива и оболочки твэлов при работе реактора на номинальном и повышенном уровнях мощности

Тепловая мощность реактора, МВт	3000	3120	3240	3360	3480	3600
Максимальная температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °С	324,09	326,57	327,99	329,37	330,56	331,73
Максимальная температура оболочки, °С	336,90	340,48	342,28	344,07	345,83	347,63
Максимальная температура топлива, °С	1282,57	1284,23	1323,03	1360,58	1398,91	1437,39

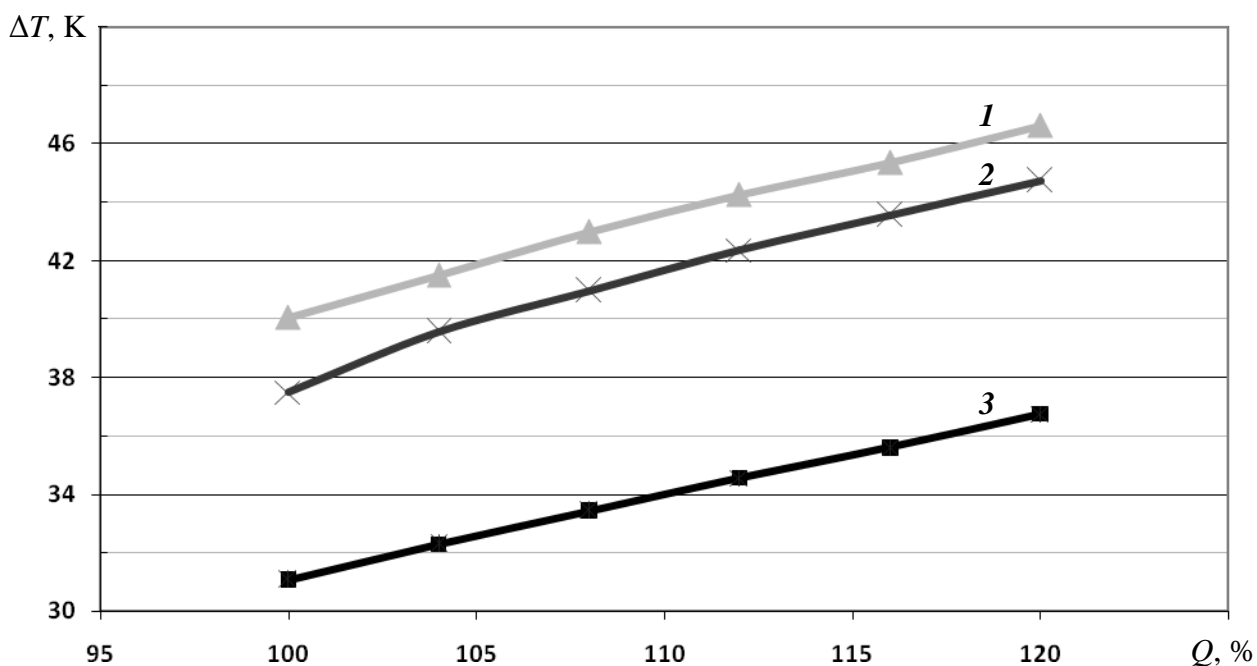


Рисунок 6 - Изменение максимального и среднего по активной зоне подогревов теплоносителя в зависимости от тепловой мощности реактора: 1 – максимальный подогрев теплоносителя в ТВС без учета межкассетного тепло- и массообмена; 2 – максимальный подогрев теплоносителя в ТВС с учетом межкассетного тепло- и массообмена; 3 – средний подогрев теплоносителя

Как видно из табл. 1, при 20 % превышении номинальной мощности реактора максимальная средняя по сечению ТВС температура теплоносителя на

выходе из активной зоны увеличивается по сравнению с номинальным режимом на 6,6 °С, но остается при этом более чем на 10 °С ниже температуры насыщения. Максимальные температуры топлива и оболочки твэлов при 20 % превышении номинальной мощности вырастают соответственно на 154,8 и 10,7 °С.

Вклад межкассетного тепло- и массообмена в выравнивание поля температур в активной зоне можно оценить путем сравнения результатов, полученных с учетом и без учета межкассетного взаимодействия. Как видно из рис. 6, межкассетный тепло- и массообмен приводит к снижению максимального подогрева теплоносителя примерно на 6–7 %.

**Теплогидравлические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 при работе реактора при пониженных уровнях мощности и расхода теплоносителя.** Проведены расчеты теплогидравлических параметров ВВЭР-1000 при частичном отключении петель охлаждения реактора. При расчетах эксплуатационного режима работы ВВЭР-1000, характеризуемого наименьшим уровнем расхода теплоносителя, было рассмотрено состояние реактора при работе на двух ГЦН, находящихся друг напротив друга.

В исходных данных для расчетов принимались во внимание соответствующее уменьшение мощности реактора и расхода теплоносителя, а также наличие неполного перемешивания теплоносителя в напорной камере реактора (табл. 2). Предполагалось, что весь «захоженный» теплоноситель поступает в одну из работающих петель. В результате на входе в активную зону устанавливаются две зоны с различными температурами.

Таблица 2 - Основные параметры исходного состояния активной зоны ВВЭР-1000 при работе на двух ГЦН, находящихся напротив друг друга

Количество петель в эксплуатации	2
Тепловая мощность реактора, МВт	1500
Расход теплоносителя через реактор (на входе), м <sup>3</sup> /ч	40700
Коэффициент протечек мимо активной зоны, %	3,0
Температура на входе в незахоженную часть реактора, °С	288,8
Температура на входе в захоженную часть реактора, °С	286,84
Давление на входе в активную зону, МПа	15,56

Расчетные распределения температур теплоносителя в поперечном сечении на входе и выходе из активной зоны приведены на рис. 7.

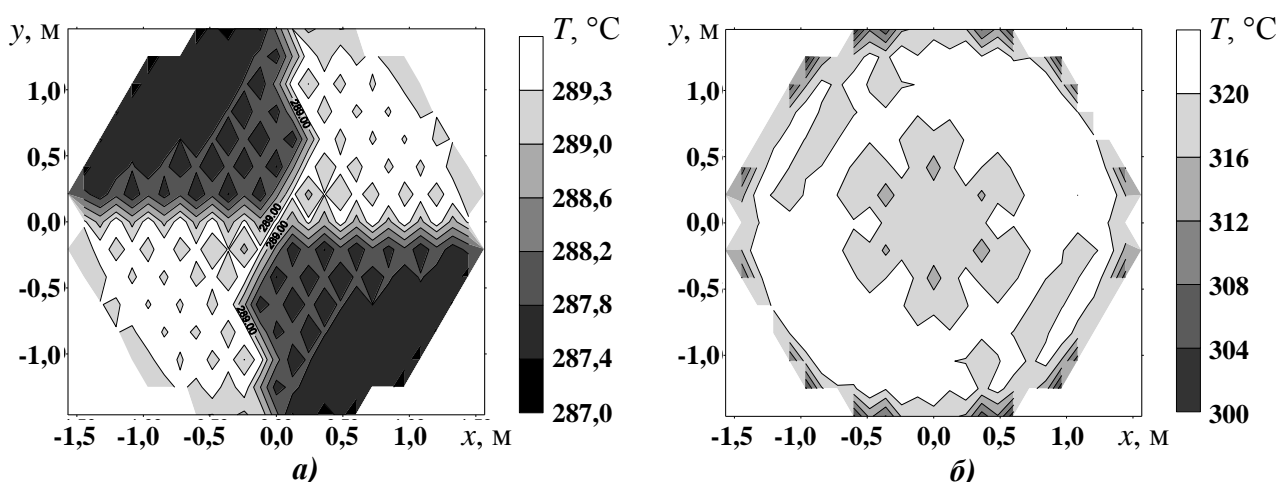


Рисунок 7 - Распределение температуры теплоносителя в поперечном сечении активной зоны на расстоянии 5,9 см от входа (а) и выхода (б)

В распределении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны остается перекося температурного поля, обусловленный неравномерностью поля температур на входе. Однако существенно большее различие подогревов теплоносителя на выходе зоны по сравнению с распределением на входе связано с влиянием неравномерности поля энерговыделения.

Полученные в расчетах максимальные температуры теплоносителя, оболочки и топлива составили 322,3, 333,2 и 813,2 °C соответственно. Результаты подтверждают возможность работы реактора ВВЭР-1000 на двух ГЦН. Корректный учет межкассетного тепло- и массообмена позволяет снизить консервативность расчета температур теплоносителя и оболочки ТВЭЛОВ.

**Теплогидравлические характеристики ТВС и активной зоны ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток.** В разрабатываемых в настоящее время конструкциях ТВС с целью улучшения их теплотехнических характеристик используются различные типы интенсификаторов теплообмена. С целью оценки эффективности применения решеток для перемешивания теплоносителя для снижения энтальпии потока в областях активной зоны с существенной неравномерностью энерговыделения было проведено расчетное моделирование отклоняющего воздействия на поток перемешивающих решеток секторного типа разработки ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (рис. 8). Соответствующим выбором ориентации ячеек в решетке реализуется «секторная» межкассетная



схема перемешивания, при которой в трех из шести секторов в сечении ТВС поток теплоносителя направляется в центр ТВС, в трех других – от центра. Это позволяет организовать замкнутые контуры циркуляции теплоносителя между каждыми тремя соседними ТВС.

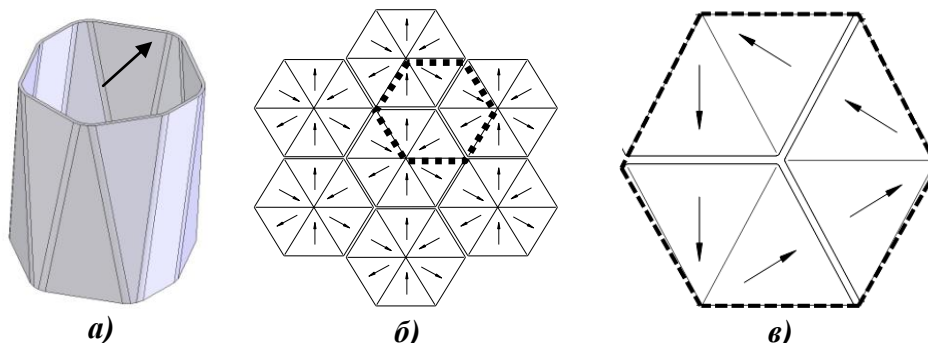


Рисунок 8 - Конструкция перемешивающей решетки: а) ячейка решетки, б) схема секторного перемешивания в ТВС и между ТВС (в)

В расчетах было установлено, что перемешивающая решетка обеспечивает заметную круговую циркуляцию теплоносителя. Поперечные скорости теплоносителя на выходе из ПР достигают 0,70 м/с. Изменение скорости закрутки потока в регулярной части ТВС после ПР показано на рис. 9. Закрутка потока на выходе из рассматриваемого участка (на входе в следующую ДР) сохраняется на уровне 25 см/с.

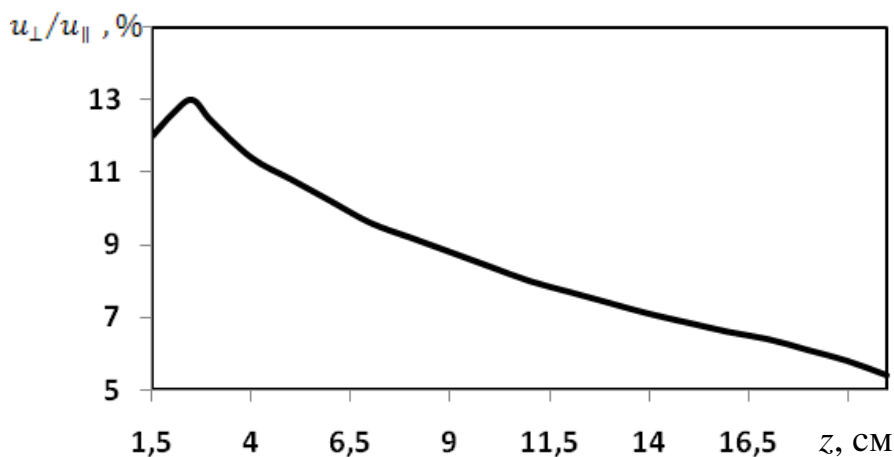


Рисунок 9 - Изменение отношения поперечной и продольной скоростей теплоносителя по высоте рассматриваемого фрагмента ТВС

Были проведены расчеты, в которых исследовалось влияние количества и места расположения ПР на поля температур и скоростей теплоносителя в ТВС. В расчетах использовался профиль энерговыделения с максимумом в верхней половине ТВС для выявления максимального эффекта от применения

ПР. Мощность ТВС равна 24,2 МВт, что соответствует максимальной величине энерговыделения в ТВС по всей активной зоне.

Рассмотрены шесть вариантов конструктивного исполнения ТВС: 1-й вариант соответствует существующей конструкции ТВС без ПР; во 2-м варианте произведена замена всех ДР на ПР (использован для оценки максимального влияния перемешивания); 3-й вариант – 3 ПР на выходе из ТВС на расстоянии 100 мм после каждой ДР; 4-й, 5-й и 6-й варианты – по 2 ПР в верхней части ТВС на расстоянии 140 мм после 9-й, 8-й и 7-й ДР соответственно.

В областях расположения ПР полученное в расчетах поле температур в поперечном сечении становится более равномерным, при этом максимальные значения температуры теплоносителя и оболочки твэла становятся ниже. В тоже время применение ПР практически не оказывает влияния на распределение максимальной температуры топлива по высоте. Полученные температуры не превышают допустимых значений. В табл. 3 представлены результаты количественного сопоставления рассмотренных вариантов конструкции ТВС по критериям теплотехнической надежности ТВС и активной зоны реактора ВВЭР.

Таблица 3 - Основные тепловые характеристики рассмотренных вариантов ТВС

Параметр	Вариант конструкции ТВС					
	1	2	3	4	5	6
Макс. температура топлива, °С	1351	1348	1351	1350	1347	1348
Макс. температура внешней оболочки твэлов, °С	346,6	344,9	349,8	349,2	342,2	346,0
Макс. подогрев теплоносителя, °С	45,2	39,3	41,7	41,6	41,3	41,4
Отношение макс. подогрева теплоносителя к среднему подогреву	1,14	1,02	1,05	1,06	1,05	1,05
Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи	3,26	3,52	3,14	3,20	3,63	3,44
Изменение макс. подогрева по отношению к базовому варианту, %	0	-13,0	-7,7	-8,0	-8,6	-8,4
Изменение макс. температуры оболочки твэлов по отношению к базовому варианту, %	0	-0,5	0,9	0,8	-1,3	-0,2
Изменение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи по отношению к базовому варианту, %	0	8,0	-3,7	-1,8	11,3	5,5

Приведенные в табл. 3 результаты свидетельствуют о наличии положительного эффекта от применения рассмотренного варианта конструкции ПР. В зависимости от места расположения ПР в ТВС можно на 6–7% снизить максимальный подогрев теплоносителя. Влияние ПР на максимальную температуру оболочки твэлов и коэффициент запаса до кризиса теплообмена не столь однозначно. При малой неравномерности поля энерговыделения, наблюдаемой в ТВС с максимальной мощностью, в 3-м и 4-м вариантах имеет место небольшое ухудшение этих величин по сравнению с базовым вариантом. В данных вариантах конструкции ТВС ПР располагаются в области максимального энерговыделения. Падение продольной скорости в элементах ПР приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, что увеличивает перепад температур между твэлом и теплоносителем, рост которого не компенсируется выравниванием температуры теплоносителя с помощью ПР. Для ТВС с более высоким коэффициентом неравномерности энерговыделения снижение максимальной температуры теплоносителя существенно выше, что приводит к отсутствию данных отрицательных эффектов.

Сравнение результатов расчетов для конструкций ТВС, приведенных в табл. 3, позволило выбрать оптимальные варианты конструкции ТВС (5-й и 6-й), обеспечивающие наибольший эффект по снижению максимального подогрева теплоносителя и увеличению коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи. Эти варианты были использованы для анализа работы реактора на уровне мощности в 104% (табл. 4).

Таблица 4 - Основные тепловые характеристики рассмотренных вариантов ТВС при работе на 104% номинальной мощности

Параметр	Вариант конструкции ТВС		
	1	5	6
Макс. температура топлива, °С	1402	1398	1398
Макс. температура внешней оболочки твэлов, °С	356,7	352,2	356,1
Макс. подогрев теплоносителя, °С	49,2	44,7	44,3
Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи	2,38	2,73	2,65
Изменение макс. подогрева по отношению к базовому варианту, %	0	-9,1	-10,0
Изменение макс. температуры оболочки твэлов по отношению к базовому варианту, %	0	-1,3	-0,2
Изменение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи по отношению к базовому варианту, %	0	14,7	11,4

Из представленных в табл. 4 данных видно, что применение ПР позволяет повысить теплотехническую надежность работы ТВС и обеспечивает допустимый запас до кризиса теплоотдачи при работе реактора на повышенном уровне мощности.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе приближения пористого тела разработана новая трехмерная модель тепломассопереноса в анизотропных структурах активных зон реакторов типа ВВЭР с бесчехловыми тепловыделяющими сборками, в которой использованы замыкающие соотношения, учитывающие зависимость компонент тензоров силы объемного гидравлического сопротивления и эффективной вязкости от угла обтекания сборки потоком теплоносителя.

2. Разработанная модель реализована в виде расчетного программного комплекса ТРЕТОН, предназначенного для двухуровневого численного моделирования трехмерных нестационарных теплогидравлических процессов в активной зоне реакторов ВВЭР, и проведено его тестирование.

3. В результате расчетного моделирования трехмерных полей температуры, скорости и давления теплоносителя в активной зоне ВВЭР-1000 показано, что учет поперечного тепломассопереноса по всей высоте активной зоны приводит к снижению значения максимального подогрева теплоносителя примерно на 6-7 % от среднего подогрева.

4. При исследовании особенностей теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР-1000 при работе на пониженных уровнях мощности и расхода теплоносителя показано, что в распределении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны остается перекосяк, вызванный неравномерностью поля температур на входе, при этом существенно большее различие подогревов теплоносителя в сечении ТВС связано с влиянием неравномерности поля энерговыделения.

5. Предложена методика описания пространственно-распределенных гидравлических характеристик перемешивающих решеток, учитывающая гидравлическое сопротивление и отклоняющее воздействие ПР на поток теплоно-

сителя. Данные параметры могут быть определены по результатам экспериментальных исследований или с использованием численного моделирования.

6. В расчетных исследованиях перемешивающей решетки с наклонными каналами «секторного» типа разработки ОКБ «ГИДРОПРЕСС», обеспечивающей циркуляцию теплоносителя между тремя соседними ТВС, показано, что такой вариант конструкции ПР обеспечивает на выходе из решетки появление поперечной составляющей скорости на уровне 15 % от продольной. Определено затухание поперечной скорости теплоносителя в тепловыделяющей сборке после прохождения ПР, которая уменьшается в 2 раза на расстоянии 15 см от решетки.

7. Проведенное исследование влияния количества и места расположения в ТВС перемешивающих решеток на максимальный подогрев теплоносителя, максимальные температуры топлива и оболочки твэлов, коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи показало, что применение ПР обеспечивает возможность повышения теплотехнической надежности ТВС.

#### Основные публикации по теме диссертации:

1. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Шумский Б.Е. Моделирование теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР-1000 // Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. – М.: МИФИ. – 2006. – Т.8. – С. 140–141.

2. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Аналитическое решение для поля скоростей движения жидкости при совместном действии вынужденной и свободной конвекции в анизотропной пористой структуре // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: МЭИ. – 2006. – Т.7. – С. 235–238.

3. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Моделирование теплогидравлических процессов в ТВС и активной зоне реактора ВВЭР-1000 // Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. – М.: МИФИ. – 2007. – Т.8. – С. 42–44.

4. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Описание анизотропных свойств тепломассопереноса при трехмерном моделировании ак-

тивной зоны ВВЭР // Труды 5-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ФГУП ОКБ «Гидропресс», г. Подольск. 29 мая – 1 июня 2007 г. Статья №114. Электронное издание.

5. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Шумский Б.Е. Моделирование теплогидравлических процессов в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при повышенных уровнях мощности // Научная сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов. – М.: МИФИ. – 2008. – Т.1. – С. 17-18.

6. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Исследование циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа // Сборник Трудов 6-й Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва. 21–23 мая 2008 г. С. 202–206.

7. Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Одинцов А.А., Харитонов В.С., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Мальчевский Д.В. Расчетные исследования циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа // Вопросы атомной науки и техники, серия «Обеспечение безопасности АЭС». 2008. Вып. 23. С.97–102.

8. Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С. Программный комплекс ТРЕТОН для моделирования трехмерных теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР // Теплофизика-2008. Обнинск. 15-17 октября 2008 г. Электронное издание.

9. Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рябов Н.О. Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ / Лабораторный практикум. – М.: МИФИ, 2008. – 156 с.

10. Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Одинцов А.А., Харитонов В.С. Циркуляция теплоносителя в ТВС с перемешивающими решетками в реакторе ВВЭР // Сборник научных трудов научной сессии НИЯУ МИФИ. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2009. – Т.1. – С. 6–11.

11. Давиденко Н.Н., Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Шумский Б.Е. Моделирование трехмерных теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР с помощью программного комплекса ТРЕТОН // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. Вып. 3. С. 139–151.