

**ПРОВЕДЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-СКД ДЛЯ РАЗНЫХ СХЕМ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПРОЕКТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

**К. В. Карташов, Г. П. Богословская**

*Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И.Лейпунского, г. Обнинск, Россия*  
[kkartashov@ippe.ru](mailto:kkartashov@ippe.ru), [gpbogoslov@ippe.ru](mailto:gpbogoslov@ippe.ru)

Представлена программа МИФ-СКД поканального теплогидравлического расчета тепловыделяющей сборки активной зоны реактора на воде сверхкритических параметров. Результаты расчета по программе верифицированы экспериментах по течению воды сверхкритических параметров в круглой трубе и течении фреона-12 сверхкритических параметров в 7-ми стержневой сборке.

Представлены результаты теплогидравлических расчетов по поканальным программам SUP и МИФ-СКД. Программа SUP производит расчет сектора активной зоны по нейтронно-физическим данным рассчитанным с помощью программы ACADEM. Расчет по программе МИФ-СКД позволяет оценить теплогидравлические параметры отдельной ТВС. Программа была верифицирована на сериях экспериментальных данных.

Представлены результаты теплогидравлических расчетов отдельного сектора и ТВС в целом реакторной установки ВВЭР-СКД мощностью 1700 МВт (эл.) при разных схемах течения теплоносителя (одно- и двухходовая).

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема повышения экономических и экологических показателей водоохлаждаемых реакторов может быть решена путем увеличения давления в контуре.

В настоящее время, основываясь на многолетнем опыте тепловой энергетики и ряде проектов АЭС, проводятся оценки физических и теплогидравлических характеристик реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого водой сверхкритических параметров (СКД).

При давлениях выше критического отсутствует фазовый переход жидкость-пар. Тепло отводится в основном в области псевдокритической температуры, которая определяется как

температура, соответствующая максимуму теплоемкости. Для сверхкритического давления в 25 МПа эта температура ~ 385 °С. При СКД отсутствует такое явление, как критический тепловой поток, который в ВВЭР (PWR, BWR) может привести к разрушению твэлов.

Повышение начальных параметров теплоносителя влечет за собой более жесткие требования к конструкции и материалам.

Программа поканального теплогидравлического расчета с правильно организованной структурой, с учетом особенностей течения теплоносителя сверхкритических параметров позволяет в пределах инженерных погрешностей оценить распределения температур в ТВС РУ на СКД.

По нашему мнению, поканальный метод теплогидравлического расчета, применение которого требует значительно меньших расчетных времен и объемов, целесообразно использовать на стадии предварительных вариантных расчетов для оптимизации и обоснования конструкционных и режимных параметров отдельной ТВС и активной зоны в целом.

### **ПОКАНАЛЬНЫЙ МЕТОД ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА. ПРОГРАММА МИФ-СКД**

В рамках поканального метода решается система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанных для элементарных ячеек, на которые разбивается сечение ТВС. Входными данными являются: геометрические параметры сборки и отдельных твэлов, распределение энерговыделения по длине и радиусу ТВС, расход теплоносителя.

Программа поканального теплогидравлического расчета МИФ-СКД является модифицированной версией кода МИФ (межканальный обмен и формоизменение), разработанного ранее в ГНЦ РФ ФЭИ для расчета полей скорости и температуры в формоизмененных ТВС с жидкометаллическим теплоносителем [3].

Программа позволяет рассчитать температуру теплоносителя в любом сечении по высоте в каждой ячейке ТВС, температуру оболочки твэлов, распределение температуры чехла ТВС, учитывая при этом переменность свойств теплоносителя по длине ТВС, переменность скорости теплоносителя, неравномерность энерговыделения по длине и в поперечном сечении ТВС, наличие дистанционирующих устройств и другие факторы, деформацию чехла ТВС и твэльной

решетки, локальные неравномерности геометрических размеров и энерговыделения, стохастические отклонения параметров твэлов от номинального значения и другие факторы.

Закритическое давление снимает некоторые проблемы теплоотвода из реактора, присущие докритическому. В частности, при закритическом давлении отсутствует область совместного существования паровой и жидкой фазы – во всем используемом интервале вода представляется одной фазой, что позволяет проводить расчеты в гомогенном приближении.

В обзоре процессов теплообмена при СКД, представленного в [1], показано, что особенности этих процессов связаны с тремя моментами:

- 1) В околокритической области наблюдается сильное, немонотонное изменение теплофизических свойств с температурой, особенно теплоемкости, плотности, коэффициента объемного расширения и числа Прандтля;
- 2) Из-за изменения плотности по длине канала при подогреве наблюдается ускорение потока;
- 3) Происходит развитие естественной конвекции за счет архимедовых сил в связи с разницей плотностей в различных точках сечения потока.

Анализ гидравлического сопротивления и теплообмена в пучках стержней (с проволоочной навивкой и без) с учетом влияния переменности свойств теплоносителя позволил разработать систему замыкающих соотношений.

Так для неизотермического режима (с учетом изменения свойств по длине канала) в работе [2] рекомендована формула:

$$\xi = \left[ \frac{0,55}{\lg \frac{Re_x}{8}} \right]^2 \left( \frac{\rho_w}{\rho_f} \right)_x^{0,2} \left( \frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)_x^{0,2} \left( \frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)_x^{0,1} \pm 20\%. \quad (1)$$

Согласно обработке данных эксперимента, поведенного на пучке из 7-и стержней с витыми ребрами при  $P=24,5$  МПа [2] коэффициенты теплообмена подчиняются зависимости:

$$Nu = 0,021 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,7} \cdot \left( \frac{\rho_w}{\rho_f} \right)^{0,45} \left( \frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)^{0,2} \left( \frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)^{0,1} \left( 1 + \frac{2,5}{x/d_{\Gamma}} \right), \quad (2)$$

точность формулы  $\pm 20\%$ .

В этих формулах  $Re_x$  – число Рейнольдса в сечении;  $Pr_x$  – число Прандтля в сечении;  $\rho_{in}, \rho_w$  и  $\rho_f$  – плотность теплоносителя на входе, на стенке твэла и в ячейке соответственно;  $\mu_{in}$  и  $\mu_f$  – динамическая вязкость теплоносителя на входе и в ячейке соответственно;  $X$  – расстояние от входа в зону энерговыделения до расчетного сечения;  $d_f$  – гидравлический диаметр ячейки.

Программа МИФ-СКД построена по блочному принципу, каждая подпрограмма позволяет решать отдельные подзадачи. В частности, на каждом расчетном шаге для расчета свойств теплоносителя в зависимости от температуры используется «Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах 1997 года» [4].

Верификация программы МИФ-СКД проводилась на результатах двух серий экспериментов: 1) опыты при течении воды сверхкритических параметров в электрообогреваемой трубе внутренним диаметром 10 мм и длиной 1 и 4 м, установленной на стенде СКД ГНЦ РФ ФЭИ [5, 6] и 2) опыты при течении фреона-12 сверхкритических параметров в 7-ми стержневой сборке с диаметром трубок 9,5 мм, шагом решетки 11,3 мм и длиной обогрева 1000 мм [7].

Для верификации программы на опытных данных, полученных в пучке стержней при омывании фреоном сверхкритических параметров были выбраны три группы характерных режимов: (1) температура теплоносителя на входе и выходе рабочего участка ниже псевдокритической; (2) температура теплоносителя достигает критического значения между входом и выходом рабочего участка; (3) температура теплоносителя на протяжении хода в рабочем участке больше псевдокритической. При расчете свойства фреона -12 брались с официального сайта NIST.

В результате верификации было получено очень хорошее согласование опытных и расчетных профилей температуры, для разных режимов течения. Расхождения опытных и расчетных данных на выходе связано с наличием отложением, образовавшихся в верхней части рабочего участка в ходе проведения опытов.

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РУ ВВЭР-СКД

Основные характеристики активной зоны и ТВС быстрорезонансного реактора ВВЭР-СКД мощностью 1700МВт (эл.) приведены в Таблице 1 и 2, соответственно [8,9,10]. На данный момент рассматриваются две схемы течения теплоносителя: одно- и двухходовая.

Одноходовая схема, наиболее часто реализованная в реакторостроении, это типовая схема для реакторов с водой под давлением или кипящих водяных реакторов.

Двухходовая схема течения теплоносителя менее исследована, и в настоящее время рассматривается как наиболее целесообразная для создания реакторов с водой сверхкритических параметров. При использовании данной схемы в корпусных реакторах активная зона делится на две части центральную и периферийную. В периферийной части осуществляется опускное течение теплоносителя, в центральной части - подъемное течение. В нижней камере смешения происходит переход через псевдокритическую точку.

Таблица 1

Наименование	Значение
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	3830
Электрическая мощность, МВт	1700
Расход теплоносителя через реактор, кг/с	1890
Давление теплоносителя на выходе из реактора, абсолютное, МПа	24,5
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	270-290
Температура теплоносителя на выходе из реактора, номинальная, °С	540
Расчетная температура корпуса реактора, °С	350
Габаритные размеры реактора, высота/диаметр, м	21,1/5,32
Количество ТВС в активной зоне, шт.	241
Средняя энергонапряженность активной зоны, однозаходная/ двухзаходная, кВт/л	107/115
Высота топлива в холодном состоянии, однозаходная/двухзаходная, м	4,05/3,76
Срок эксплуатации ТВС в реакторе, лет	5
Интервал между перегрузками топлива, мес	12

Таблица 2.

Наименование	Значение
Размер ТВС «под ключ», мм	205
Количество твэлов в ТВС, шт.	252
Размер и толщина оболочки твэла, мм	Ø10,7×0,55
Диаметр топливной таблетки, мм	9,4
Шаг треугольной решетки твэлов, мм	12
Высота топливного столба, мм	
– однозаходная активная зона	4050
– двухзаходная активная зона	3760
Количество направляющих каналов, шт.	18
Труба центральная, шт.	1
Размер направляющих каналов и трубы центральной, мм	Ø12×0,55
Толщина чехла, мм	2,25
Масса ТВС, кг	
– однозаходная активная зона	760
– двухзаходная активная зона	705

## РАСЧЕТНОЕ СРАВНЕНИЕ ОДНО- И ДВУХХОДОВОЙ СХЕМ ТЕЧЕНИЯ

### ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В обзоре процессов теплообмена при СКД, представленного в [8], показано, что особенности этих процессов связаны с тремя моментами:

- 4) в околоскритической области наблюдается сильное, немонотонное изменение теплофизических свойств с температурой, особенно теплоемкости, плотности, коэффициента объемного расширения и числа Прандтля;
- 5) из-за изменения плотности по длине канала при подогреве наблюдается ускорение потока;
- 6) происходит развитие естественной конвекции за счет архимедовых сил в связи с разницей плотностей в различных точках сечения потока.

Порядок расчета заключался в следующем: сначала по программе ACADEM, разработанной во ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», проводился расчет нейтронно-физических характеристик сектора активной зоны (рис. 1 и 5), затем эти данные использовались как входные для программы SUP. В результате рассчитывались средние по сечению ТВС

теплогидравлические параметры сектора активной зоны (рис. 2 и 6). Затем по программе МИФ-СКД проводился детальный поканальный анализ теплогидравлических характеристик наиболее энергонапряженных ТВС.

### 1) одноходовая схема течения теплоносителя

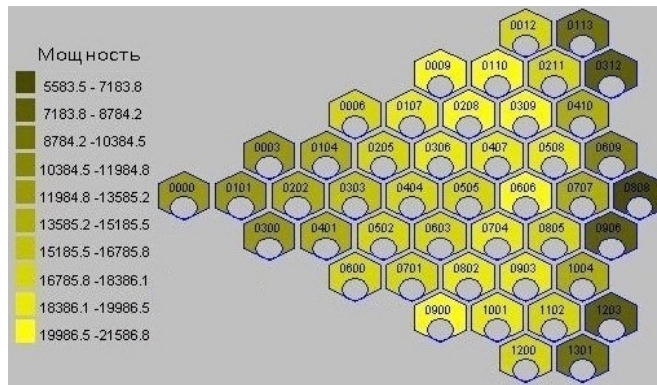


Рис.1. Предоставленное распределение нейтронно-физических характеристик

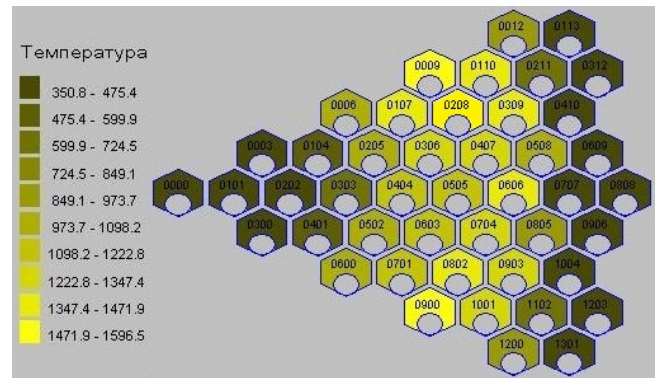


Рис. 2. Расчетное распределение температур в секторе активной зоны на выходе из сборок

Расчеты по программе SUP показали, что температуры теплоносителя на выходе из активной зоны для разных ТВС сильно различаются, что является следствием неоднородного распределения мощности ТВС в поперечном сечении активной зоны. При этом максимальная температура теплоносителя может превысить 1000 °С. В связи с этим возникает потребность в проведении дополнительных исследований и поиска новых кандидатных материалов для оболочек ТВЭЛОВ.

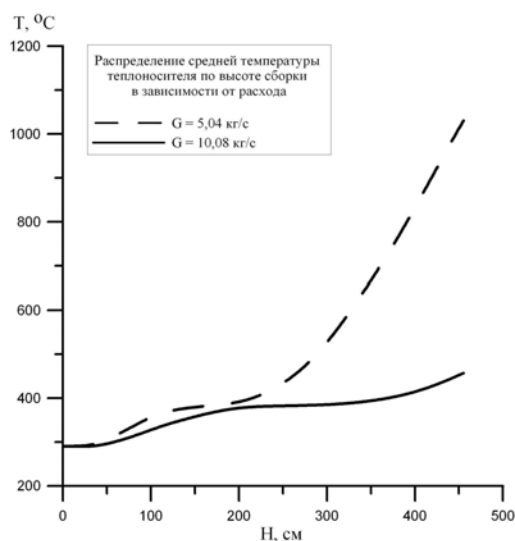


Рис.3. Распределение средней температуры теплоносителя по высоте ТВС в зависимости от

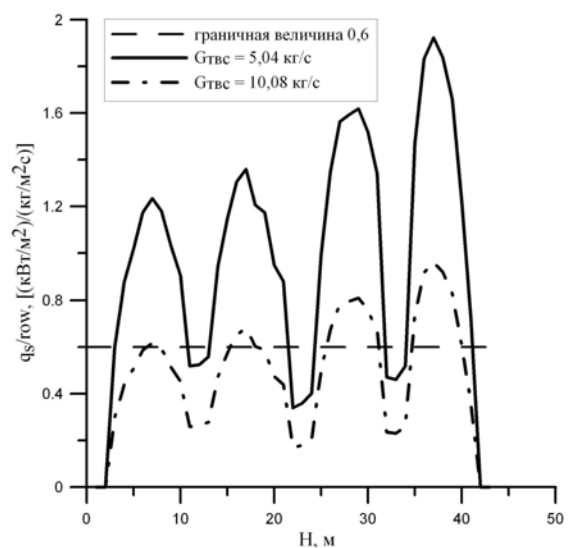


Рис.4. Сравнение отношений тепловых потоков к массовой скорости по высоте при

расхода

разных расходах

На рисунке 3 представлено распределение средней температуры теплоносителя по высоте одной из ТВС, проведенное с использованием программы МИФ-СКД. Следует отметить, что результаты расчетов средней температуры теплоносителя, выполненных по программам SUP и по программе МИФ-СКД, совпали. При увеличении расхода в два раза температура теплоносителя на выходе снижается до значений, укладывающихся в приемлемый диапазон. Рисунок 4 характеризует возможность появления режимов ухудшенного теплообмена в пределах активной зоны реактора на СКД. В качестве консервативной оценки по наступлению режимов с ухудшенным теплообменом выбрано соотношение  $q_s/tow = 0,6$  [1]. Как видно из рисунка 4, увеличение расхода через ТВС в два раза не предотвращает возможности их возникновения.

## 2) двухходовая схема течения теплоносителя

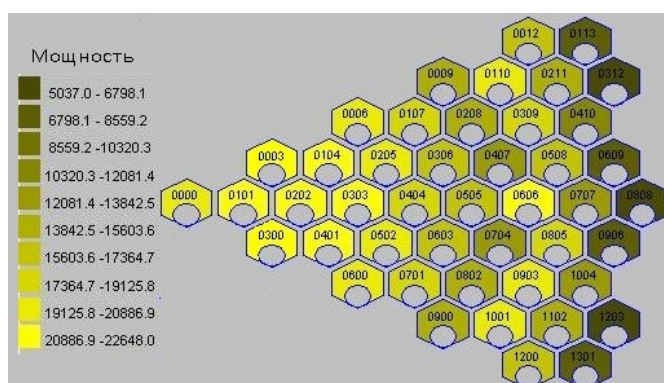


Рис.5. Предоставленное распределение нейтронно-физических характеристик

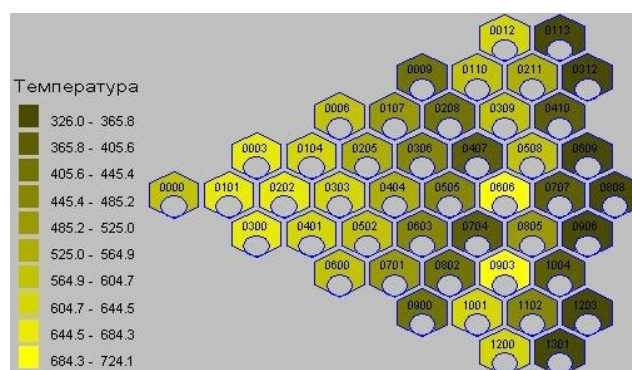


Рис. 6. Расчетное распределение температур в секторе активной зоны на выходе из сборок

Как известно, переход через псевдокритическую точку может сопровождаться резким изменением свойств и резким ухудшением теплообмена вблизи стенки твэла. Поэтому целесообразно локализовать переход через псевдокритическую точку не в пучке стержней, а в области нижней камеры. В связи с этим, течение теплоносителя в двухходовой схеме осуществляется следующим образом: в периферийных ТВС происходит опускное течение теплоносителя, в нижней части осуществляется переход через псевдокритическую точку, и затем через ТВС центральной части активной зоны реализуется подъемное течение.



Оценки по программе ACADEM показали, что максимальное отношение мощности ТВС в области перегрева сверх псевдокритической температуры равно 1,67. В этом приводит к небольшому разбросу температуры, а максимальная температура теплоносителя на выходе из активной зоны составляет порядка 724 °С.

На периферии (область нисходящего потока) отношение максимальное мощности ТВС к минимальной составляет 4,17 раз. Несмотря на это, максимальная температура теплоносителя на выходе из нисходящего участка не превышает 604 °С. Благодаря тому, что теплоноситель сначала подается в область нисходящего потока, необходимо рассмотреть вопрос использования профилирования подводящего патрубка или уменьшения мощностей ТВС, стоящих вблизи центральной области.

На рисунках 7 и 8 представлены результаты расчета по программе МИФ-СКД для одной из наиболее энергонапряженных ТВС.

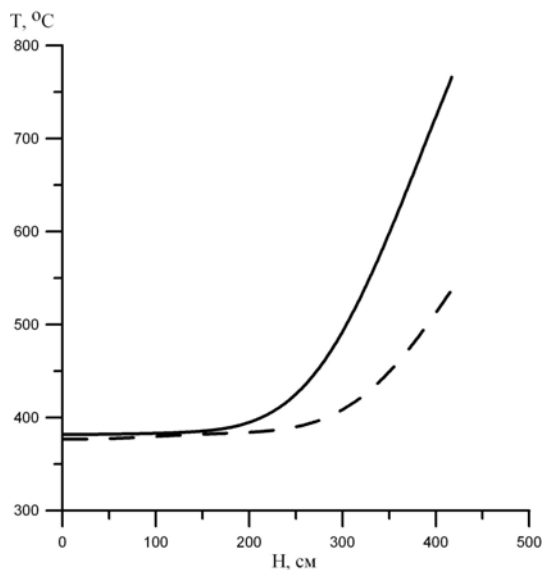


Рис.7. Распределение средней температуры теплоносителя по высоте ТВС в зависимости от расхода (сплошная линия – расход 15.7 кг/с, пунктирная – 20.9 кг/с)

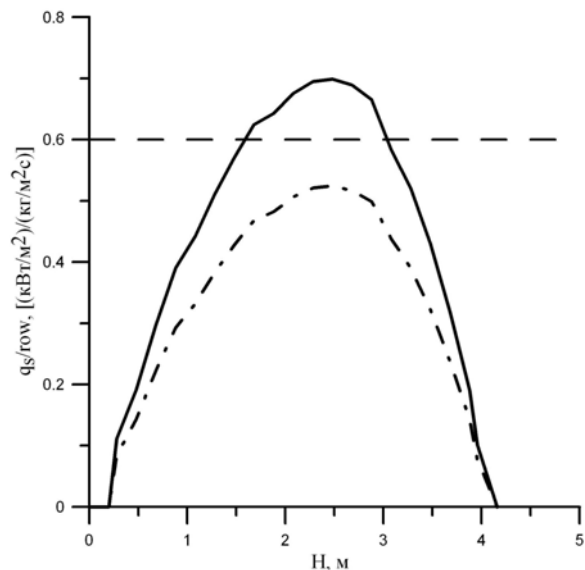


Рис.8. Сравнение отношений тепловых потоков к массовой скорости по высоте при разных расходах (сплошная линия – расход 15.7 кг/с, пунктирная – 20.9 кг/с)

Из рисунков 6 и 7 видно, что, результаты, полученные по программам SUP и МИФ-СКД, различаются (температура выхода по программе SUP – 724,2 °С, по программе МИФ-СКД – 763,5 °С) не более чем на 10%.

Увеличение расхода теплоносителя на 30% позволяет добиться такой температуры теплоносителя на выходе из ТВС, при которой температура оболочек ТВЭЛОВ не превысит допустимых значений. Из рисунка 8 видно, что такого увеличения расхода достаточно, чтобы избежать возникновения режимов ухудшенного теплообмена.

Данная работа выполнена в рамках государственного контракта от 23 апреля 2010 г № П230 в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, по направлению «Ядерно-энергетические установки нового поколения» в рамках мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами».

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработаны поканальные программы SUP и МИФ-СКД для теплогидравлического расчета характеристик сектора активной зоны и отдельной ТВС реактора ВВЭР-СКД.

Проведенные расчеты показали, что с точки зрения теплогидравлики для дальнейшего рассмотрения предпочтительна двухходовая схема течения теплоносителя в активной зоне реакторной установки этого типа.

Существенная неравномерность в распределении мощности ТВС требует дополнительных исследований по гидравлическому профилированию потока через активную зону.

### ***Литература***

1. Грабежная В.А., Кириллов П.Л.. О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления: Обзор ФЭИ- 0297, Цнииатоминформ. 2003.
2. Дядякин Б.В., Попов А.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление тесного семистержневого пучка, охлаждаемого потоком воды при закритических параметрах состояния. Труды Всесоюзного Теплотехнического НИИ. 1977. – № 11. – с. 244-253.
3. Жуков А.В., Сорокин А.П., Мантлик Ф. и др. Теплофизическое обоснование температурных режимов ТВС быстрых реакторов с учетом факторов перегрева. Методики и программы теплогидравлического расчета ТВС быстрых реакторов: Препринт №1817 / ФЭИ-Обнинск, 1986.

4. А.А. Александров, Б.А. Григорьев. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
5. Кириллов П.Л., Колосов А.А., Петрова Э.А., Смирнов А.М., Судницын О.А. Распределение температуры в турбулентном потоке воды при сверхкритических давлениях (круглая труба): Препринт ФЭИ-1766. 1986.
6. Кириллов П.Л., Ложкин В.В., Смирнов А.М. Исследование границ ухудшенных режимов канала при сверхкритических давлениях: Препринт ФЭИ-2988. Обнинск. 2003.
7. Шелегов А.С., Лескин С.Т., Чусов И.А., Слободчук В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в пучке из семи стержней при сверхкритических параметрах фреона-12. Препринт ИАТЭ-001–2010. Обнинск. 2010.
8. Кириллов П.Л., Баранаев Ю.Д., Глебов А.П., Клушин А.В. Реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления, ВВЭР-СКД - основной претендент в «Супер-ВВЭР». Материал 7-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОАО "ОКБ ГИДРОПРЕСС". 2011.
9. Махин В.М., Васильченко И.Н., Вьялицын В.В., Кушманов С.А., Куракин К., Чуркин А.Н., Лапин А.В., Семиглазов С.В. Концепция активных зон ВВЭР СКД: условия эксплуатации твэлов, конструкция ТВС и кандидатные материалы. Материал 7-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОАО "ОКБ ГИДРОПРЕСС". 2011.
10. Чуркин А.Н., Ягов П.В., Мохова О.В. Теплогидравлика однозаходной активной зоны ВВЭР-СКД. Гидропрофилирование и устойчивость. Материал 7-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОАО "ОКБ ГИДРОПРЕСС". 2011.
11. Карташов К.В., Богословская Г.П. Статистическая оценка максимальной температуры оболочек твэлов быстрого реактора, охлаждаемого водой сверхкритических параметров. Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №3. – с. 3-11.

12. Карташов К.В., Богословская Г.П. Проведение расчетов по оптимизации геометрических и режимных параметров ТВС реакторов ВВЭР-СКД для различных режимов эксплуатации реактора на сверхкритических параметрах воды. Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №2. – с. 3-11.