

## ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТВС РЕАКТОРОВ ВВЭР-СКД ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ВОДЫ

**К.В. Карташов, Г.П. Богословская**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Представлены результаты теплогидравлических расчетов по поканальным программам SUP и МИФ-СКД. Программа SUP производит расчет сектора активной зоны по распределению энерговыделения, полученному с помощью программы АСАДЕМ. Расчет по программе МИФ-СКД позволяет оценить теплогидравлические параметры отдельной ТВС. Программа была верифицирована на сериях экспериментальных данных. Представлены теплогидравлические расчеты параметров сектора и ТВС реакторной установки ВВЭР-СКД мощностью 1700 МВт (эл.) при разных схемах течения теплоносителя (одно- и двухходовая).

**Ключевые слова:** вода сверхкритических параметров, быстрый реактор, теплогидравлический расчет, поканальный метод, температура оболочек твэлов.

**Key words:** supercritical water, fast reactor, thermohydraulic calculations, subchannel approach, fuel pin cladding temperature.

### ВВЕДЕНИЕ

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

В настоящее время на основании многолетнего опыта тепловой энергетики и ряда проектов АЭС проводятся оценки физических и теплогидравлических характеристик реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемого водой сверхкритических параметров (СКП).

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°C. При СКП отсутствует такое явление как критический тепловой поток, который в ВВЭР (PWR, BWR) может привести к разрушению твэлов.

© К.В. Карташов, Г.П. Богословская, 2012

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.

Описание программы поканального теплогидравлического расчета МИФ-СКД и результаты верификации результатов расчетов на экспериментальных данных были представлены в [5].

### **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РУ ВВЭР-СКД**

Основные характеристики активной зоны и ТВС быстрорезонансного реактора ВВЭР-СКД мощностью 1700МВт (эл.) приведены в табл. 1 и 2 соответственно [1–3]. На данный момент рассматриваются одно- и двухходовые схемы течения теплоносителя.

Одноходовая, 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 центральную и периферийную части. В периферийной части осуществляется опускное течение теплоносителя, в центральной – подъемное течение. В нижней камере смешения происходит переход через псевдокритическую точку.

Таблица 1

**Параметры активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1700**

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

**Параметры ТВС активной зоны реактора ВВЭР-СКД-1700**

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 СКП, представленного в [4], показано, что особенности этих процессов связаны с тремя моментами:

- 1) в околокритической области наблюдается сильное немонокотное изменение теплофизических свойств в зависимости от температуры, особенно, теплоемкости, плотности, коэффициента объемного расширения и числа Прандтля;
- 2) вследствие 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.

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 анализ теплогидравлических характеристик наиболее энергонапряженных ТВС.

**Одноходовая схема течения теплоносителя**

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°C. В связи с этим возникает потребность в проведении дополнительных исследований и поиска новых кандидатных материалов для оболочек твэлов.

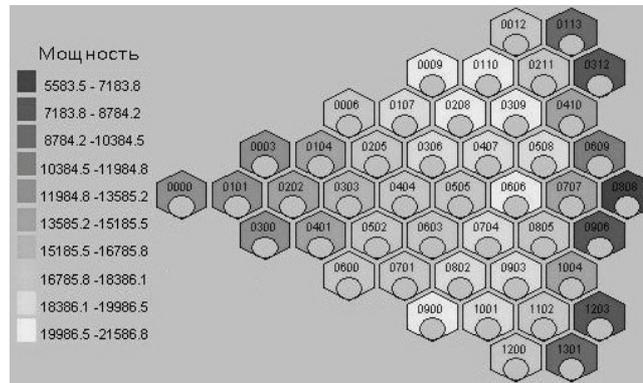


Рис. 1. Предоставленное распределение нейтронно-физических характеристик

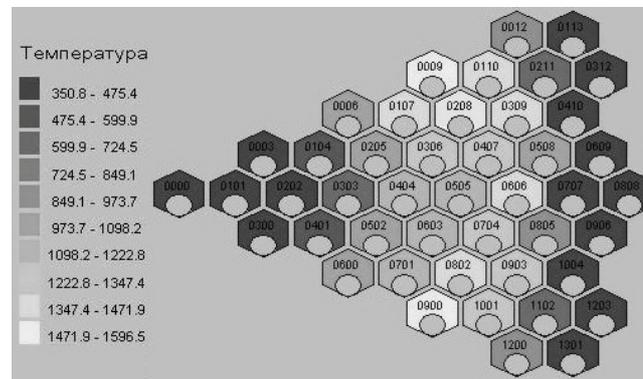


Рис. 2. Расчетное распределение температур в секторе активной зоны на выходе из сборок

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, полученные по программам SUP и МИФ-СКД, совпали. При увеличении расхода в

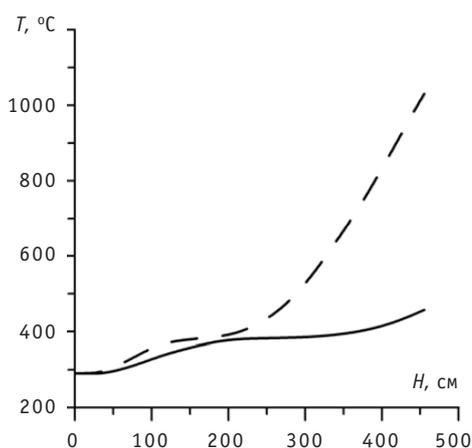


Рис. 3. Распределение средней температуры теплоносителя по высоте ТВС в зависимости от расхода: — —  $G = 5,04 \text{ кг/с}$ ; - - - -  $G = 10,08 \text{ кг/с}$

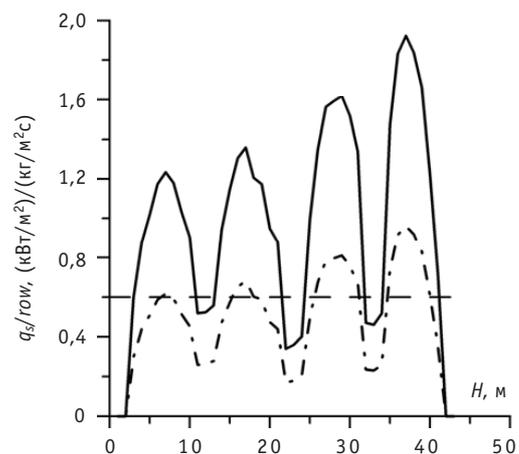


Рис. 4. Сравнение отношений тепловых потоков к массовой скорости по высоте при разных расходах: - - - - - граничная величина 0,6; — — — —  $G = 5,04 \text{ кг/с}$ ; - - - - -  $G = 10,08 \text{ кг/с}$

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  $q_s/row = 0,6$  [4]. Как видно из рисунка, увеличение расхода через ТВС в два раза не предотвращает возможности их возникновения.

### Двухходовая схема течения теплоносителя

Как известно, переход через псевдокритическую точку может сопровождаться резким изменением свойств и значительным ухудшением теплообмена вблизи стенки твэла, поэтому целесообразно локализовать переход через эту область не в пучке стержней, а в области нижней камеры, причем в периферийных ТВС происходит опускное течение теплоносителя, а через ТВС центральной части активной зоны реализуется подъемное течение.

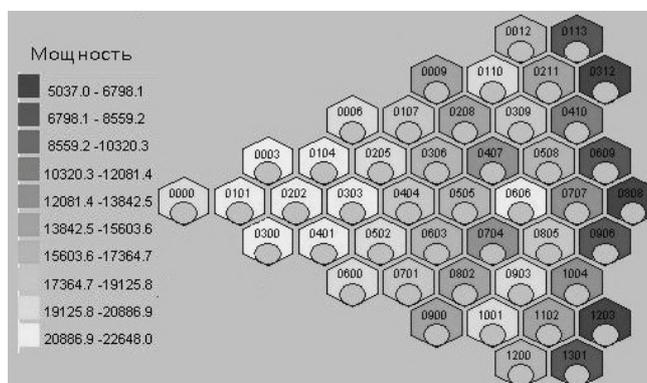


Рис. 5. Предоставленное распределение нейтронно-физических характеристик

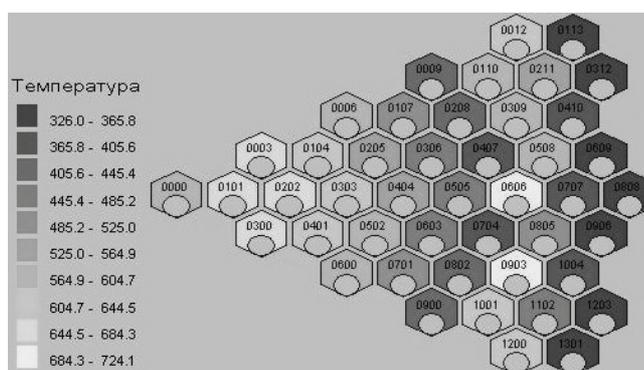


Рис. 6. Расчетное распределение температур в секторе активной зоны на выходе из сборок

Максимальное отношение мощности ТВС в области перегрева сверх псевдокритической температуры равно 1,67, что, как показывает проведенный расчет, позволяет говорить о небольшом разбросе температур и приемлемой максимальной температуре теплоносителя на выходе из активной зоны (724°C).

Как видно, на периферии (область нисходящего потока) отношение максимальной мощности ТВС к минимальной составляет 4,17 раз. Несмотря на это, максимальная температура теплоносителя на выходе не превышает 604°C. В связи с тем, что теплоноситель сначала подается в область нисходящего потока, необходимо

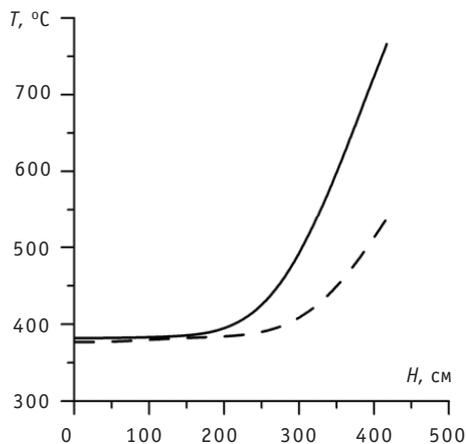


Рис. 7. Распределение средней температуры теплоносителя по высоте ТВС в зависимости от расхода: — — — расход 15,7 кг/с; — — — — 20,9 кг/с

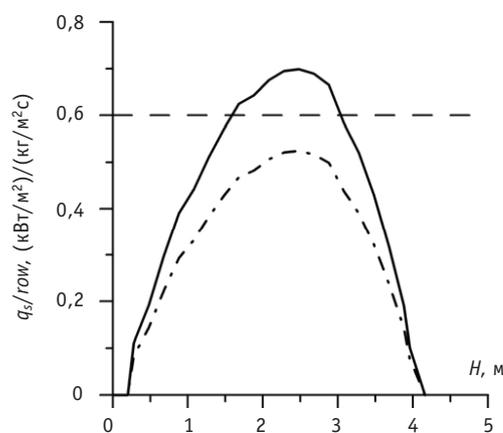


Рис. 8. Сравнение отношений тепловых потоков к массовой скорости по высоте при разных расходах: — — — расход 15,7 кг/с; — — — — 20,9 кг/с

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.

Из рисунков 6 и 7 видно, что, результаты, полученные по программам SUP и МИФ-СКД, различаются (температура выхода по программе SUP – 724,2 $^\circ\text{C}$ , по программе МИФ-СКД – 763,5 $^\circ\text{C}$ ) не более 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.

## 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.

**Работа выполнена в рамках государственного контракта от 23.04.2010 г. № П230 в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.» по направлению «Ядерно-энергетические установки нового поколения» в рамках мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами».**

### **Литература**

1. Кириллов П.Л., Баранев Ю.Д., Глебов А.П., Клушин А.В. Реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления, ВВЭР-СКД – основной претендент в «Супер-ВВЭР»/Материалы VII Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ОАО «ОКБГИДРОПРЕСС», 2011.
2. Махин В.М., Васильченко И.Н., Вялицын 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/Материалы VII Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ОАО «ОКБГИДРОПРЕСС», 2011.
3. Чуркин А.Н., Ягов П.В., Мохова О.В. Теплогидравлика однозаходной активной зоны ВВЭР-СКД. Гидропрофилирование и устойчивость/Материалы VII Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ОАО «ОКБГИДРОПРЕСС», 2011.
4. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления: Обзор ФЭИ-0297. – ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2003.
5. 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. 113-121.

Поступила в редакцию 17.10.2011

Open and experimentally justified a new physical phenomenon – a property of the flow of coolant lead – the process of implementing a purely gaseous cavitation process and the impossibility of ‘traditional’ vapor cavitation. Proposed and experimentally substantiated by three independent methods of model cavitation in the flow of gas coolant lead to the conditions of the reactor circuit. It is proved that the traditional steam (steam and gas), cavitation in the flow of coolant can not lead. The experimentally determined conditions for the appearance and characteristics of gas cavitation. Experimentally proved the absence of cavitation erosion wear of the impeller pump made of steel with an oxide-coated in lead coolant temperature 470–500°C, flow rate of lead approx. 10 m/s, the pump speed to 1200 rpm. When operating in a developed cavitation gas approx. 50 hours including 17 hours in provoking dynamic tests with the cyclical development of cavitation breakdown of filing, followed by the resumption of feeding, and development of cavitation cycle with a period of 3–5 seconds (a total of more than 15000 cycles).

**УДК 621.039.5: 536.24.08**

*Subchannel Thermohydraulic Calculations for Fuel Subassembly of Reactor Core on Supercritical Water* | K.V. Kartashov, G.P. Bogoslovskaja; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

Results of thermohydraulic calculations with subchannel codes SUP and MIF-SKD are presented in the paper. Code SUP allows the thermohydraulic parameters of the part of reactor core to be estimated. Input neutron-physical parameters are calculated with code ACADEM. Code MIF-SKD gives us possibility to predict local thermohydraulic parameters in separate fuel subassembly. The code has been verified on the data gained in experiments on water in round tube and on freon in pin bundle.

Thermohydraulic parameters of the part of reactor core and fuel subassembly of VVER-SKD by the power 1700 MW for different coolant flows within reactor core (one- and double-thread) are presented here.

**УДК 621.039.548**

*Random Hydrodynamic Loads and the Vibration of Fuel Elements in the Turbulent Coolant Flow in WWER Fuel Assembly* | V.V. Perevezentsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

Annotation on the basis of the multimeterings of pressure fluctuations on the perimeter of the fuel elements beam of the of full-scale mock-up fuel assembly WWER-440 of the second generation are obtained the realizations of the random hydrodynamic loads, which cause the vibrations of beam. It is established that in the region of initial hydrodynamic section near the lower supporting lattice. essential influence on the random hydrodynamic loads render the hydrodynamic conditions for shaping of the structure of flow at the entrance. Choke washers create the vortex structure of flow with the high levels of pulsating energy, which leads to the high intensities of vibrations in the initial hydrodynamic section. In the region of steady flow the levels of random hydrodynamic loads are reduced and to a lesser degree they depend on hydrodynamic entrance conditions. The generalizing empirical dependence of vibration movements on the random hydrodynamic loads are obtained. Two characteristic regions of the influence of random hydrodynamic loads on the vibration movements are discovered. With the values of random hydrodynamic loads of more than 80 N/m is observed a considerable increase in the intensity of vibrations, which is explained by the slippage of fuel element in the cell of the spacing lattice.

**УДК 621.039.548**

*Examination of Heat Transfer in Ceramic Fuel Elements at Variable Thermal Loadings* | V.V. Popov, V.N. Rumyantsev, I.S. Kurina, M.V. Mikheev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 18 titles.

The technique of measurement, under laboratory conditions, of contact pressure and heat conductance from UO<sub>2</sub> fuel pellets to fuel cladding at power variation is described. As has been shown, from the moment as a certain level of power is achieved, fuel sleeves go on cracking, so the radial gap between their fragments and cladding is being reduced up to the mechanical contact of sleeve fragments to cladding, and the contact pressure increases with the growth of level and amount of power variation cycles. The results of the analysis of computational models for heat transfer from fuel to cladding are also presented and discussed.