

# Теплогидравлика однозаходной активной зоны ВВЭР-СКД. Гидропрофилирование и устойчивость

А.Н. Чуркин, П.В. Ягов, О.В. Мохова

ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,  
Подольск, Россия

*Тезисы. В настоящее время ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (г. Подольск) и ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск) ведут конструкторские проработки и расчетные исследования одноконтурной реакторной установки ВВЭР-СКД с быстро-резонансным спектром нейтронов, охлаждаемой водой сверхкритического давления. Рассматриваются два варианта организации движения теплоносителя в активной зоне: однозаходное и двухзаходное. В докладе акцентируется внимание на особенностях теплогидравлики однозаходной активной зоны ВВЭР-СКД. Дано краткое описание проекта ВВЭР-СКД, приводятся результаты расчетных исследований и принципиальные технические решения, направленные на обеспечение устойчивости течения теплоносителя и выравнивание подогревов теплоносителя в различных ТВС.*

## 1. Введение

Атомная энергетика, отвечающая требованиям крупномасштабной энергетики по безопасности, экономике, экологии и нераспространению, может взять на себя существенную часть прироста мировых потребностей в топливе и энергии. Развитие атомной энергетики на ближайшие десятилетия должно быть ориентировано на создание в первую очередь современных энергоблоков третьего поколения, замещающих энергоблоки, снимаемые с эксплуатации, при одновременной разработке энергоблоков, реализующих принцип внутренне присущей безопасности в большей степени. В России – это энергоблоки с реакторными установками ВВЭР, которые проектирует ОКБ «ГИДРОПРЕСС» [1].

Вместе с тем, наряду с необходимостью эволюционного развития ВВЭР, уже на данном этапе требуется начать разработку новых инновационных проектов для обеспечения перехода к замкнутому топливному циклу в атомной энергетике. С этой целью ОКБ «ГИДРОПРЕСС», совместно с РНЦ «Курчатовский институт» (г. Москва) и ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск) участвует в разработке предложений по СУПЕР-ВВЭР. В частности, активно ведутся конструкторские и исследовательские работы по следующим реакторным установкам:

- традиционная оптимизированная реакторная установка ВВЭР с тесной решеткой ТВЭЛов для ужесточения спектра нейтронов;
- инновационная реакторная установка ВВЭР-СКД (проект В-393) с быстро-резонансным спектром нейтронов, которая охлаждается водой сверхкритического давления.

Работы над проектами, которые обеспечивали коэффициент воспроизводства топлива около 1, начались еще в 80-х годах прошлого века (см. табл. I). В 1984 г. были выполнены эскизные проработки корпусного пароводяного реактора на быстрых нейтронах БПВЭР-1200 (совместная работа РНЦ «Курчатовский институт» и ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). В 1990 г. предложена концепция корпусного реактора с естественной циркуляцией теплоносителя сверхкритического давления в первом контуре и изменением спектра нейтронов в процессе кампании ВВЭР-СКД-И (совместная работа РНЦ «Курчатовский институт» и ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Данный проект предусматривал размещение парогенераторов в корпусе реактора (интегральная компоновка).

В период 2006-2007г. была предложена концепция корпусного реактора для одноконтурной установки со сверхкритическим давлением теплоносителя ВВЭР-СКД. Был рассмотрен реактор с быстрорезонансным спектром нейтронов (совместная работа ГНЦ РФ ФЭИ и ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), а также с тепловым спектром нейтронов (совместная работа ГНЦ РФ ФЭИ, РНЦ «Курчатовский институт» и ОКБ «ГИДРОПРЕСС») [2–6].

Таблица I. Проекты инновационных водоохлаждаемых корпусных реакторов

Параметр	БПВЭР-1200 (1984г.)	ВВЭР-СКД-И (1990г.)	ВВЭР-СКД <sup>а</sup> (2007г.)
Тепловая мощность, МВт	3450	1350	3830
Электрическая мощность, МВт	1200	515	1700
КПД, %	35	37	43
Топливо	UO <sub>2</sub> + PuO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> + PuO <sub>2</sub>
Теплоноситель	Паро-водяная смесь	Вода СКД (p = 23.5 МПа)	Вода СКД (p = 24.5 МПа)
Температура теплоносителя на входе, °С	347	345–365 <sup>б</sup>	290
Температура теплоносителя на выходе, °С	360	378–381	540
Коэффициент воспроизводства	1.20	0.78	0.9

<sup>а</sup> Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов.

<sup>б</sup> Температура меняется в ходе кампании для изменения спектра нейтронов.

В настоящее время ведется дальнейшая конструкторская проработка реактора с быстро-резонансным спектром нейтронов (рис. 1), внутрекорпусных устройств, активной зоны и ТВС для однозаходной и двухзаходной схемы движения теплоносителя в активной зоне. Выполняются расчетные исследования.

Были выявлены проблемные вопросы практической реализации проекта ВВЭР-СКД, которые требуют первоочередного изучения:

- теплообмен в ТВС;
- коррозия и перенос продуктов коррозии;
- теплогидравлика активной зоны (вопросы гидропрофилирования);
- теплогидравлика в камерах смешения;
- устойчивость движения теплоносителя в РУ с учетом обратных связей между нейтронной мощностью и параметрами теплоносителя в активной зоне;
- исследование теплогидравлики при переходе через критическое давление в переходных процессах;
- охлаждение активной зоны в авариях с потерей теплоносителя;
- проблема ввода жидкого поглотителя для обеспечения подкритичности при заливе активной зоны холодной водой;
- обеспечение отрицательных коэффициентов реактивности по температуре топлива и удельному объему теплоносителя.

Данная статья посвящена некоторым теплогидравлическим особенностям и проблемам одноконтурной РУ ВВЭР-СКД с однозаходной схемой движения теплоносителя в активной зоне.

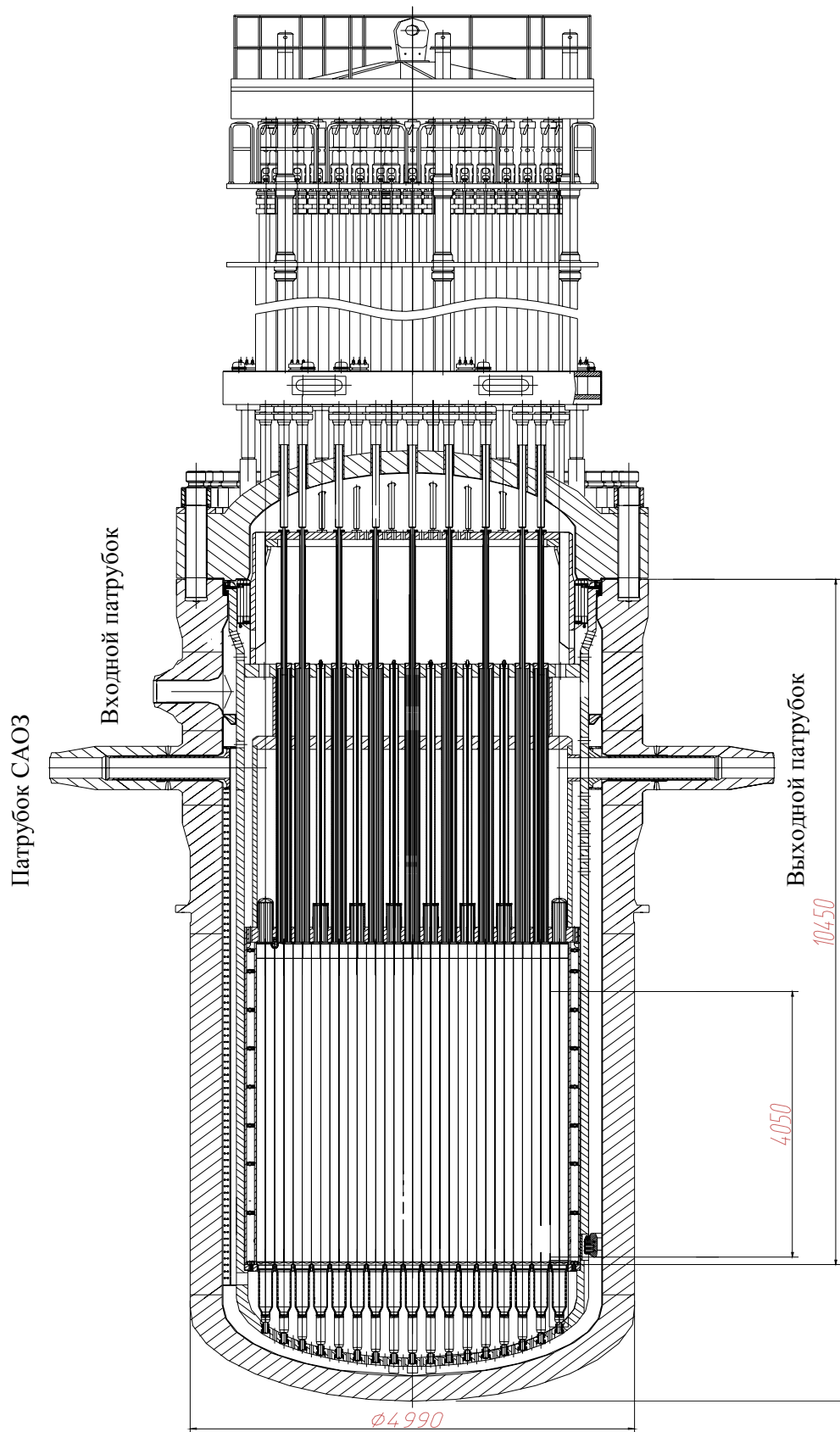


РИС.1. Вариант реактора ВВЭР-СКД с однозаходной схемой движения теплоносителя в активной зоне.

## 2. Анализ устойчивости течения теплоносителя в ТВС

Выполнен предварительный анализ тепло-гидродинамической устойчивости течения теплоносителя в ТВС активной зоны одноконтурной РУ ВВЭР-СКД с однозаходной схемой движения теплоносителя.

В анализе рассмотрено два типа неустойчивости: аperiodическая неустойчивость, причиной которой является многозначность гидродинамической характеристики канала (зависимости перепада давления на канале от расхода теплоносителя) с возможным внезапным изменением массового расхода теплоносителя, и периодическая неустойчивость, которая может возникать в обогреваемом канале при течении теплоносителя с сильно меняющимися теплофизическими свойствами. Последний тип неустойчивости называют «канальная неустойчивость» или «колебания волн плотности» («density wave oscillations»). Расчеты выполнялись с помощью вычислительной программы ТЕМПА-СК [7], которая разрабатывается в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для исследования процессов тепломассопереноса в ТВС реакторов с водой сверхкритического давления. Для выполнения анализа использовалась расчетная модель ТВС, состоящая из одного канала, который разбивается по высоте на 79 слоев, включая 69 обогреваемых.

### 2.1. Аperiodическая устойчивость течения теплоносителя

Для анализа аperiodической устойчивости выполнены теплогидравлические расчеты стационарного течения теплоносителя в трех ТВС с различной относительной мощностью  $Kq$  (0.4, 1.0 и 1.4). На входе ТВС задавались температура и расход теплоносителя, а на выходе – давление. Расход теплоносителя варьировался в диапазоне, обеспечивающем температуру теплоносителя на выходе из ТВС от 390 до 755°C (при температуре теплоносителя на входе в ТВС 290°C). Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, для рассмотренных условий многозначность гидродинамических характеристик ТВС не наблюдается, следовательно, аperiodическая неустойчивость течения теплоносителя отсутствует.

Проведен анализ влияния на результаты расчетов значений коэффициентов гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток, нижней опорной решетки и головки ТВС. Как показали расчеты, при варьировании перечисленных выше коэффициентов в диапазоне, который гарантированно перекрывает возможные неточности их определения, многозначность гидродинамических характеристик ТВС не наблюдается, следовательно, аperiodическая неустойчивость течения теплоносителя отсутствует.

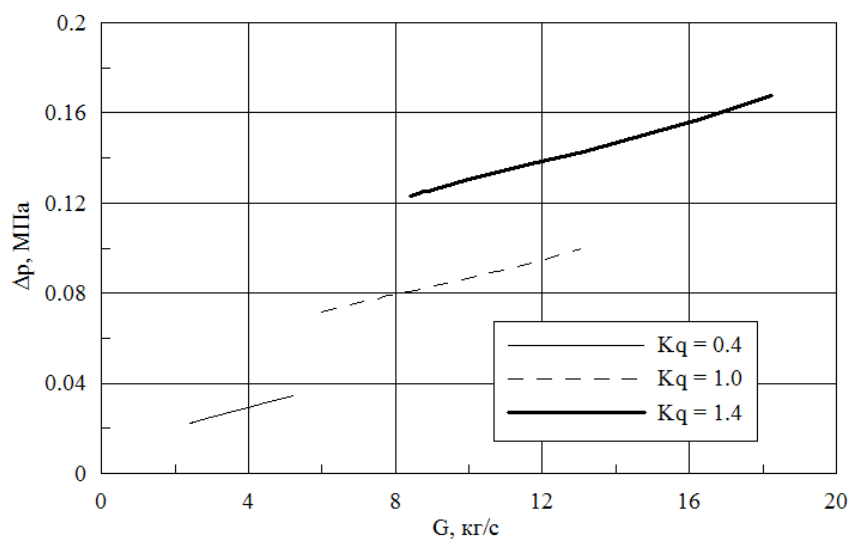


РИС.2. Зависимость перепада давления на ТВС от расхода.

## 2.2. Периодическая устойчивость течения теплоносителя

Для анализа периодической устойчивости выполнены теплогидравлические расчеты течения теплоносителя через ТВС реактора ВВЭР-СКД, при перепаде давления на ТВС, равном 110 кПа, в диапазоне температур теплоносителя на входе в ТВС от 220 до 380°C. Указанный перепад давления обеспечивает при гидропрофилировании активной зоны (см. раздел 3) проектный подогрев теплоносителя.

Для поиска границы неустойчивости использовалась процедура, описанная, например в [8], которая заключается в достаточно медленном повышении тепловой мощности ТВС. При заданном постоянном перепаде давления на ТВС, по мере повышения мощности происходит снижение расхода теплоносителя и повышение температуры на выходе ТВС. При приближении к границе неустойчивости возникают колебания параметров течения и теплоносителя. Типичная картина возникновения неустойчивости приведена на рис. 3 и 4.

По результатам расчетов в безразмерных комплексах  $N_{TPC}$  и  $N_{SPC}$  [9], построена картограмма устойчивости течения теплоносителя и область рабочих параметров ВВЭР-СКД, которая показана на рис. 5 красной линией.

Область неустойчивого течения теплоносителя имеет пересечение с областью рабочих параметров ВВЭР-СКД. Для исключения возможности возникновения периодической неустойчивости течения теплоносителя использовано дросселирование ТВС. Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) дросселирующего устройства определен по результатам вариантных расчетов так, чтобы область неустойчивого течения теплоносителя не имеет пересечения с областью рабочих параметров ВВЭР-СКД. Картограмма устойчивости течения теплоносителя с применением дросселирования показана на рис. 5 зеленой линией.

Таким образом, при использовании дросселирующего устройства с местным коэффициентом гидравлического сопротивления большим 12 (приведено к скорости теплоносителя в нижней части пучка твэлов) отсутствует периодическая тепло-гидродинамическая неустойчивость течения теплоносителя в ТВС в эксплуатационных режимах ВВЭР-СКД.

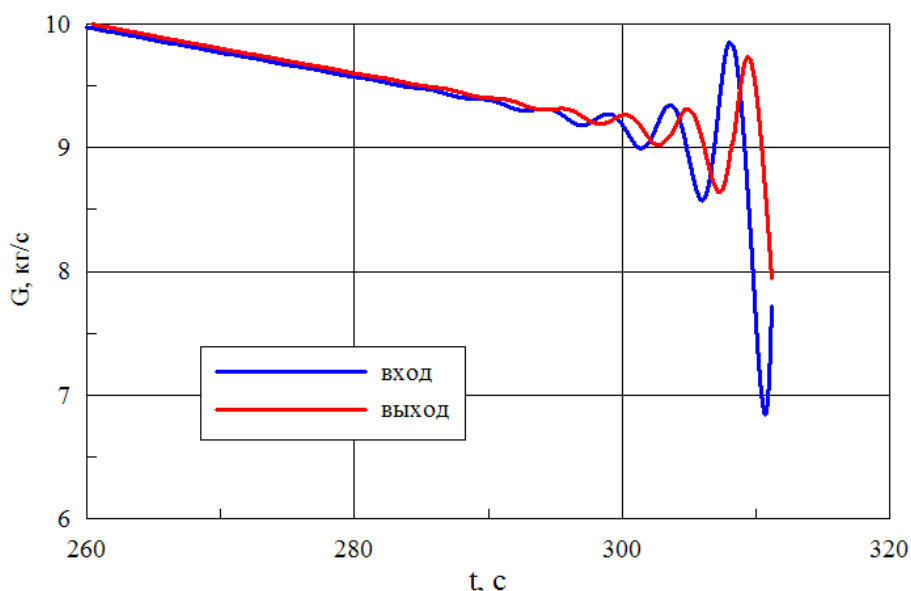


РИС.3. Графики изменения во времени расхода теплоносителя в ТВС вблизи границы неустойчивости.

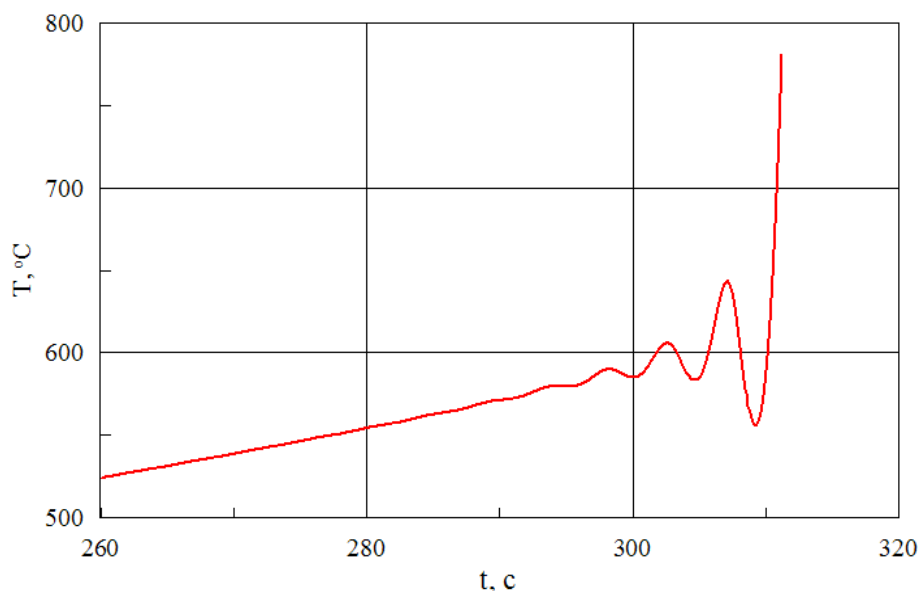


РИС.4. Графики изменения во времени температуры теплоносителя на выходе из ТВС вблизи границы неустойчивости.

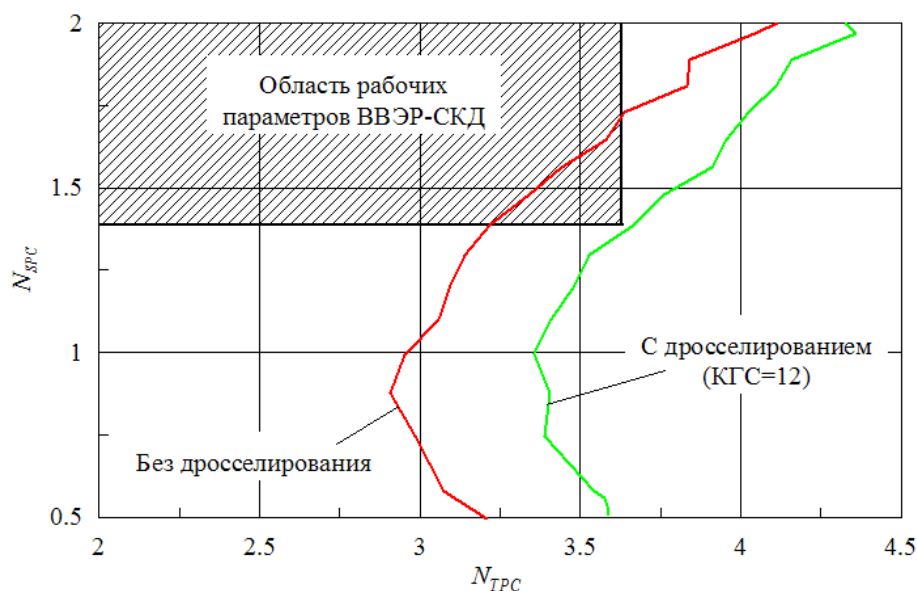


РИС.5. Границы устойчивости течения теплоносителя без и с дросселированием.

### 2.3. Выводы

Выполнен анализ тепло-гидродинамической устойчивости течения теплоносителя в ТВС активной зоны одноконтурной РУ ВВЭР-СКД с однозаходной схемой движения теплоносителя в активной зоне. Рассмотрены два типа неустойчивости: аperiodическая неустойчивость и периодическая канальная неустойчивость. Показано, что для рассмотренных условий многозначность гидродинамических характеристик ТВС не наблюдается, следовательно, аperiodическая неустойчивость течения теплоносителя отсутствует.

Анализ периодической устойчивости показал, что для обеспечения данного типа устойчивости течения теплоносителя необходимо использование дросселирующего устройства с КГС большим 12 (приведено к скорости теплоносителя в нижней части пучка твэлов).

Проведенные ранее исследования [10] показали, что необходимо исследовать возможность возникновения резонансных эффектов в системе, связанных, например, с колебанием расхода на входе в реактор.

Наиболее важным направлением дальнейших исследований является анализ гидро-нейтронной неустойчивости. Для этого потребуется внедрение в программу ТЕМПА-СК нейтронно-физического модуля.

### 3. Гидропрофилирование активной зоны

Выполненные теплогидравлические расчеты сектора симметрии активной зоны ВВЭР-СКД показали, что одной из основных проблем однозаходного реактора, охлаждаемого водой сверхкритического давления, является сильная зависимость расхода через ТВС от мощности тепловыделений в ней. При прочих равных условиях, чем выше мощность, тем выше подогрев теплоносителя, тем большее сопротивление испытывает теплоноситель при течении. Это связано с тем, что в ТВС происходит сильное изменение плотности, и, соответственно, скорости теплоносителя по высоте активной зоны.

Поэтому, если не предпринимать специальных мер, то теплоноситель в активной зоне перераспределится таким образом, что в «холодных» ТВС расход будет выше, чем в «горячих» ТВС. В результате создастся сильная неравномерность температуры теплоносителя на выходе из различных ТВС. Расчеты показали, что при средней температуре на выходе из реактора 540°C температура на выходе из «горячей» ТВС составит 1100°C, а на выходе из «холодной» ТВС – 370°C. Такая большая разница температур недопустима, во-первых, из-за высоких температур оболочек твэлов в «горячей» ТВС (~1200°C), а во-вторых, из-за термоакустических эффектов при смешивании потоков разной плотности и температуры.

Дальнейшие расчеты показали, что даже в случае идеального дросселирования активной зоны ВВЭР-СКД (расходы во всех ТВС равны) разброс температур на выходе из ТВС остается существенным (температура на выходе из «горячей» ТВС составит 700°C, а на выходе из «холодной» ТВС – 390°C). При этом максимальная температура поверхности оболочек твэлов будет достигать 760°C. Подобные значения также являются неприемлемыми для ВВЭР-СКД.

Таким образом, возникает необходимость перераспределения расхода теплоносителя между ТВС активной зоны. Ситуация осложняется тем, что в ходе кампании, по мере выгорания топлива, происходит изменение мощности ТВС. На рис. 6 показана разность между значениями относительной мощности ТВС на конец кампании  $K_q(\text{end})$  и на начало кампании  $K_q(\text{beg})$ . Видно, что у большей части ТВС изменение мощности не превышает 5%. В ТВС с номерами 7, 20 и 30 происходит увеличение мощности на 13 – 20% за счет того, что в них размещаются регулирующие и компенсирующие стержни, которые в ходе кампании вытаскиваются из активной зоны.

Одним из способов перераспределения расхода между ТВС является пассивное гидропрофилирование. При данном способе регулирования на входе в ТВС устанавливаются дроссельные шайбы, коэффициент гидравлического сопротивления которых зависит от мощности ТВС и от того, как эта мощность изменяется в ходе кампании.

Чтобы учесть изменение мощности ТВС в ходе кампании, принят следующий алгоритм определения КГС дроссельных шайб. В первую очередь выбирается допустимый диапазон температур на выходе из ТВС 520 – 590°C. Как показали предварительные расчеты, температура оболочек твэлов в этом случае не превысит 700°C. Далее рассчитывается КГС дроссельной шайбы исходя из мощности ТВС на начало кампании и принятой зависимости распределения температуры теплоносителя на выходе из ТВС от изменения мощности ТВС за кампанию (рис. 7).

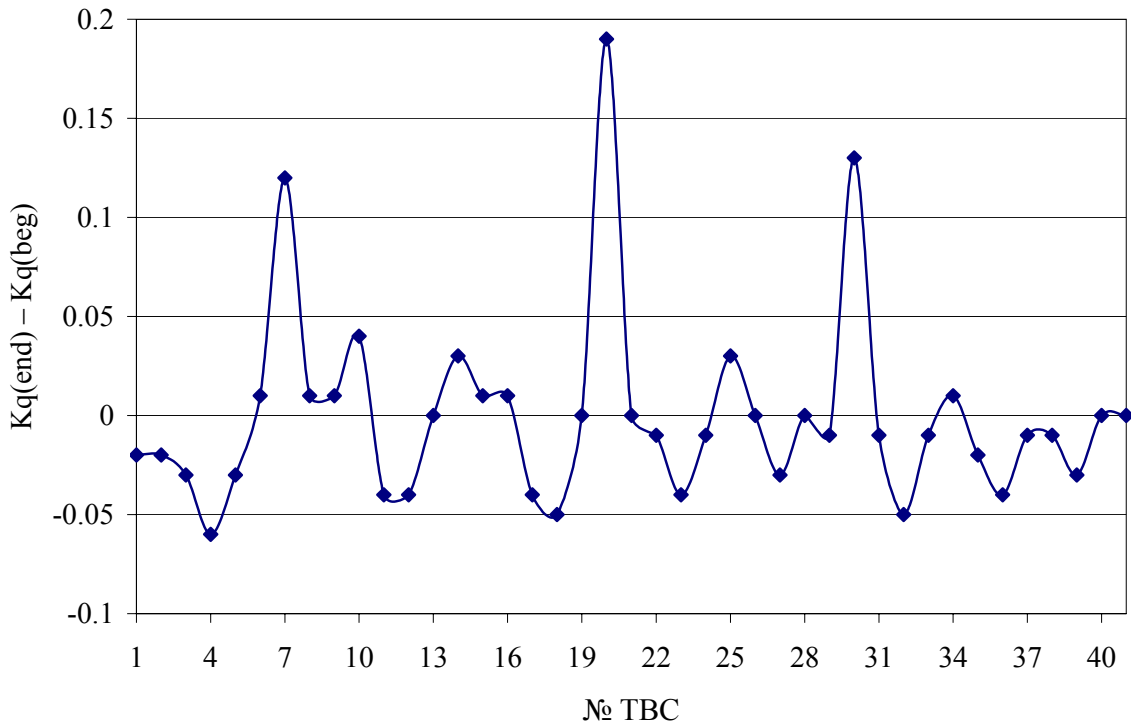


Рис.6. Изменение относительной мощности ТВС в секторе симметрии активной зоны за кампанию.

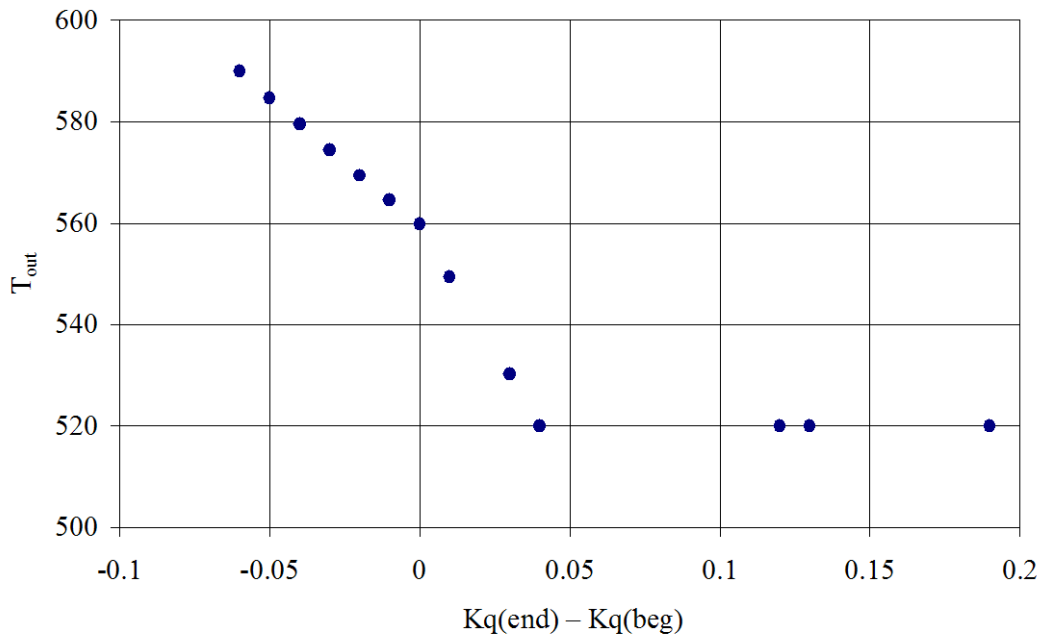


Рис.7. Принятое распределение температуры на выходе из ТВС в зависимости от изменение относительного энерговыделения ТВС за кампанию.

С учетом найденных значений КГС дросселирующих устройств, распределение температуры теплоносителя на выходе ТВС на начало и конец кампании представлено на рис. 8. Видно, что у большей части ТВС температура теплоносителя не выходит за границы принятого диапазона (520 – 590°C), за исключением ТВС с регулируемыми и компенсирующими стержнями. Таким образом, возникает необходимость регулирования расхода в небольшой части ТВС, т.е. необходимо активное гидропрофилирование.



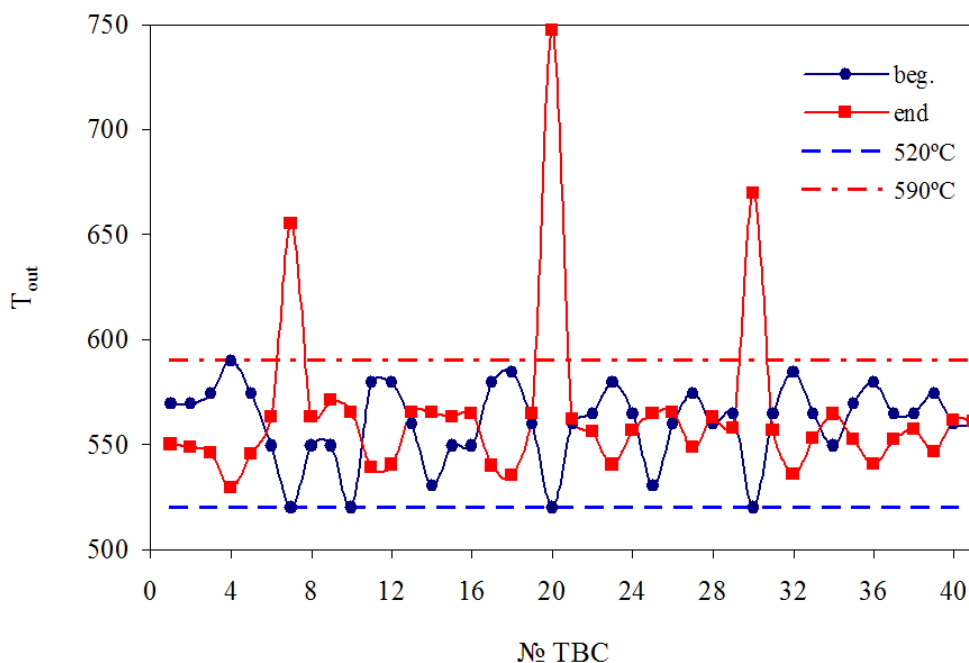


РИС.8. Распределение температуры теплоносителя на выходе из ТВС по сектору симметрии активной зоны на начало (*beg.*) и конец (*end*) кампании.

Можно предложить два принципиальных направления активного гидропрофилирования:

- адаптивное гидропрофилирование, при котором изменение расхода через ТВС реализуется за счет обратных связей, присутствующих в системе;
- управляемое гидропрофилирование, при котором воздействие на расход осуществляется извне оператором или системой автоматического регулирования.

Оба способа имеют свои преимущества и недостатки. В настоящее время в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» подготавливаются технические предложения по обоим вариантам. В качестве примера одного из технических предложений на рис. 9 показано дросселирующее устройство, КГС которого меняется в зависимости от положения центрального управляющего стержня.

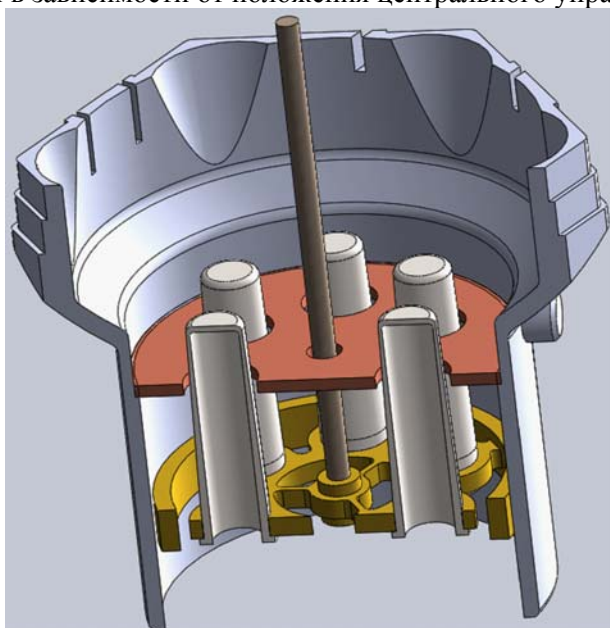


РИС.9. Хвостовик ТВС с управляемым дросселирующим устройством.

#### 4. Поканальный расчет ТВС

С помощью программы ТЕМПА-СК выполнены поканальные теплогидравлические расчеты сектора симметрии ТВС различной энергонапряженности в стационарном режиме при работе на номинальном уровне мощности (см. табл. 1).

Расчетная модель сектора симметрии ТВС включала 50 основных каналов (рис. 10), 65 каналов связи и 26 твэлов. В модели учитывалось наличие направляющих каналов (НК) и центральной трубки (ЦТ). По высоте ТВС разбивалась на 78 слоев. В качестве граничных условий рассматривалось постоянное давление на выходе (24 МПа) и равномерно распределенная по всем основным каналам массовая скорость теплоносителя на входе (расход через ТВС равен ~9.2 кг/с). Тепловыделение в твэлах моделировалось заданием теплового потока с поверхности твэлов. Рассматривалась «горячая» ТВС с относительной мощностью  $Kq = 1.22$ .

Выполненные теплогидравлические расчеты показали, что при равномерном распределении энерговыделения по твэлам ( $Kk = 1$ ) возникает сильная неравномерность подогревов теплоносителя по сечению ТВС (рис. 11), что связано с относительно высокой площадью проходного сечения периферийных каналов (см. рис.10, каналы № 18, 32, 42, 48, 50). В этих каналах подогрев теплоносителя сравнительно небольшой, и туда, по мере нагрева, происходит вытеснение теплоносителя из более горячей центральной части пучка (рис. 12).

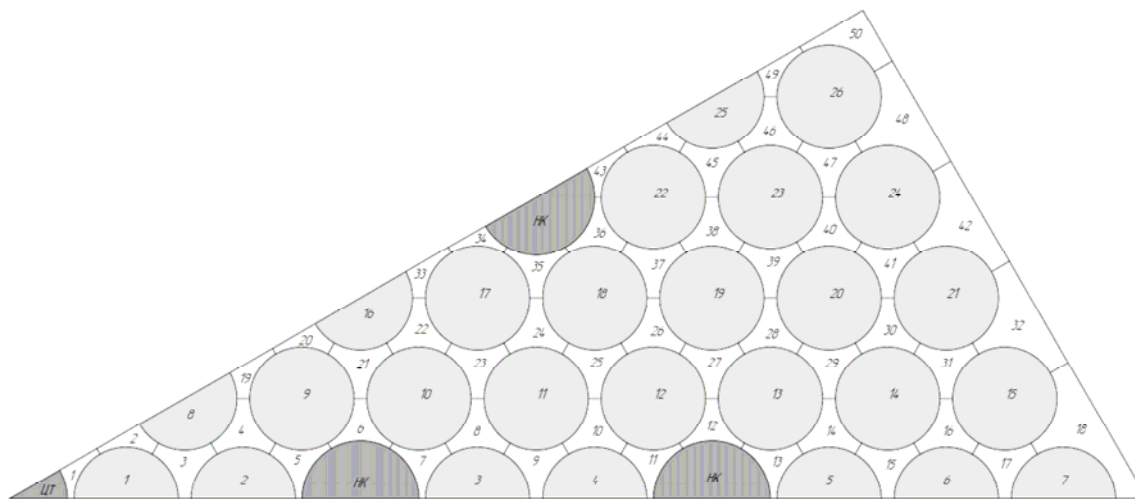


РИС.10. Расчетная модель сектора симметрии ТВС. Нумерация основных каналов и твэлов.

Решить данную проблему возможно установкой вытеснителей в периферийные каналы и профилированием энерговыделения по сечению ТВС. Технические предложения по решению данного вопроса и проверочные теплогидравлические расчеты проводятся в настоящее время.

Кроме этого, в настоящее время ведется исследование вопроса о допустимом коэффициенте неравномерности энерговыделения по сечению ТВС ( $Kk$ ). С этой целью рассматривалась модельная ТВС без периферийных каналов, состоящая только из твэлов. В результате, все каналы в модели ТВС одинаковые. Количество твэлов в модели ТВС  $N_{FR} = 127$ .

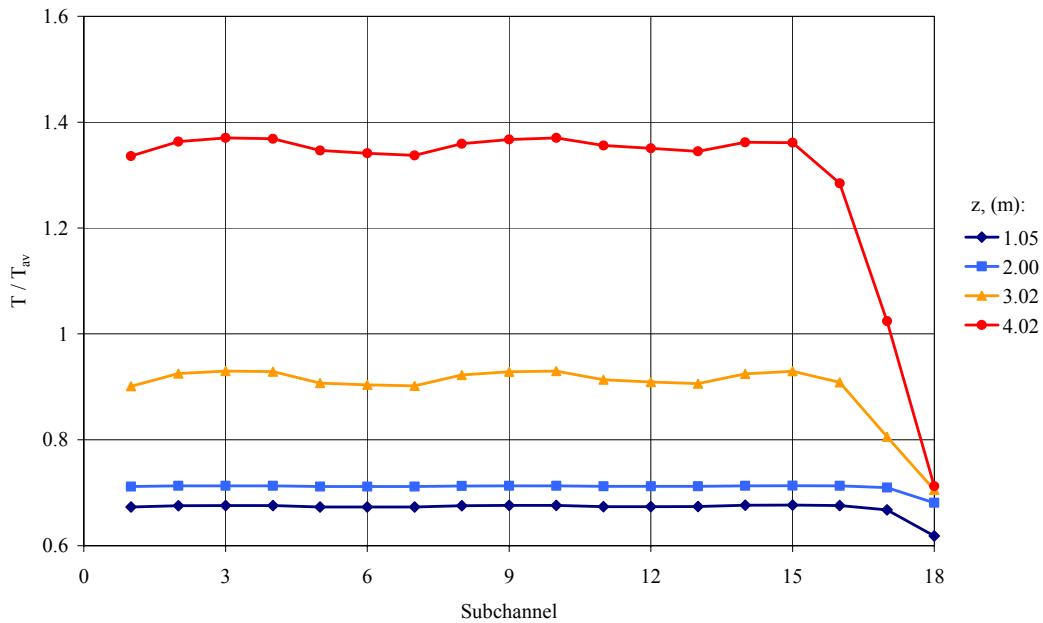


Рис.11. Распределение относительной температуры теплоносителя по каналам на различных высотных отметках ТВС.

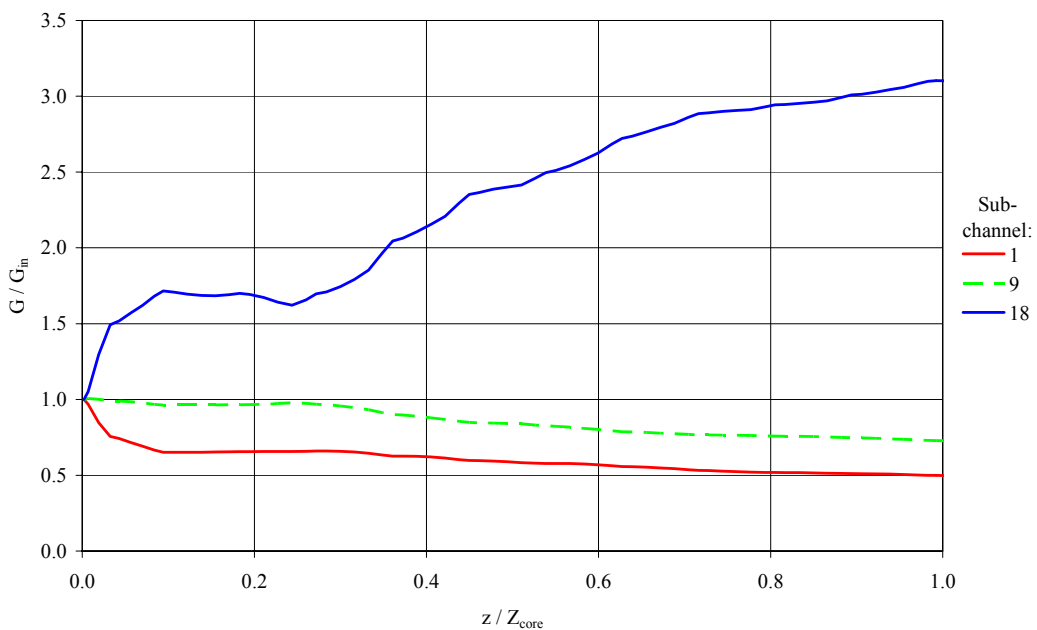


Рис.12. Распределение относительного расхода теплоносителя по высоте ТВС в каналах № 1, 9 и 18.

Твэлы разбивались на две группы: «горячие» твэлы в центральной части ТВС с заданным коэффициентом неравномерности  $Kk > 1$ , и остальные – «холодные» твэлы, относительная мощность которых меньше 1, и выбиралась исходя из требования сохранения суммарной мощности модельной ТВС. В ходе выполнения расчетного исследования количество «горячих» твэлов в центре ТВС  $N_{hot}$  изменялось от 1 до 91, а коэффициент неравномерности энерговыделения «горячих» твэлов  $Kk$  варьировался в диапазоне от 1.0 до 1.1.

На рис. 13 показана зависимость максимальной относительной температуры теплоносителя на выходе из медельной ТВС от заданного коэффициента неравномерности энерговыделений ( $Kk$ )

для различного количества «горячих» твэлов. На рис. 14 показана зависимость максимальной относительной температуры теплоносителя на выходе из модельной ТВС от относительного размера «горячего пятна». На рис. 14 пунктирными линиями показаны также средние температуры теплоносителя на выходе из модельной ТВС, если все твэлы модельной ТВС будут «горячими».

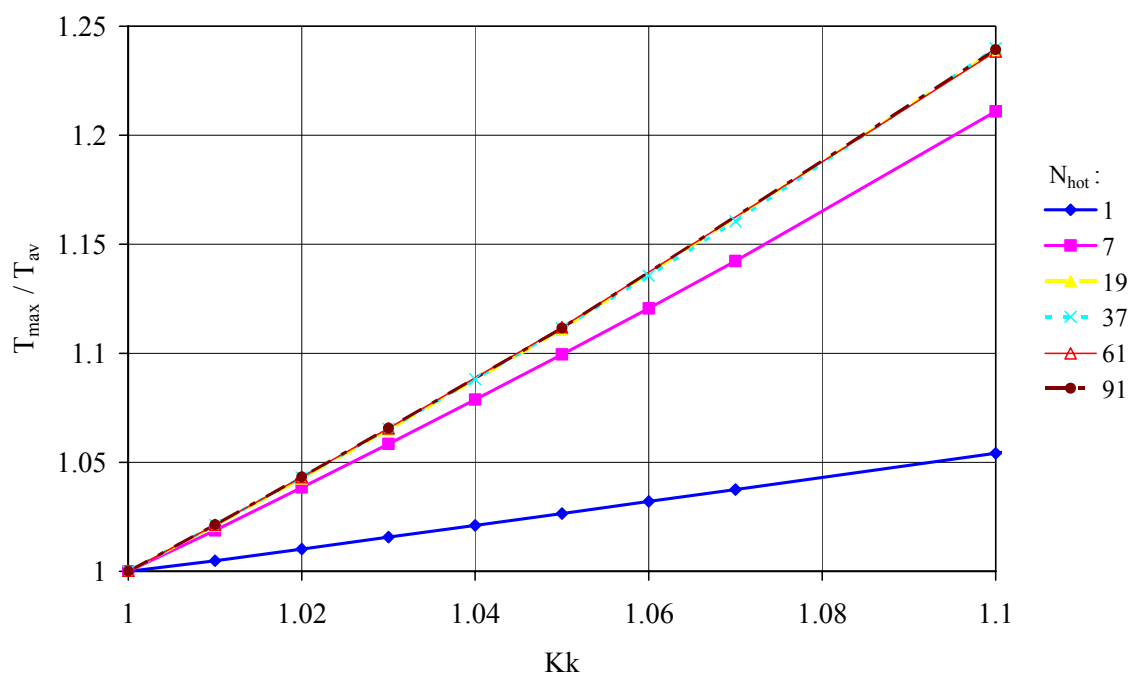


РИС.13. Зависимость максимальной относительной температуры теплоносителя на выходе из ТВС от относительной неравномерности энерговыделений твэлов.

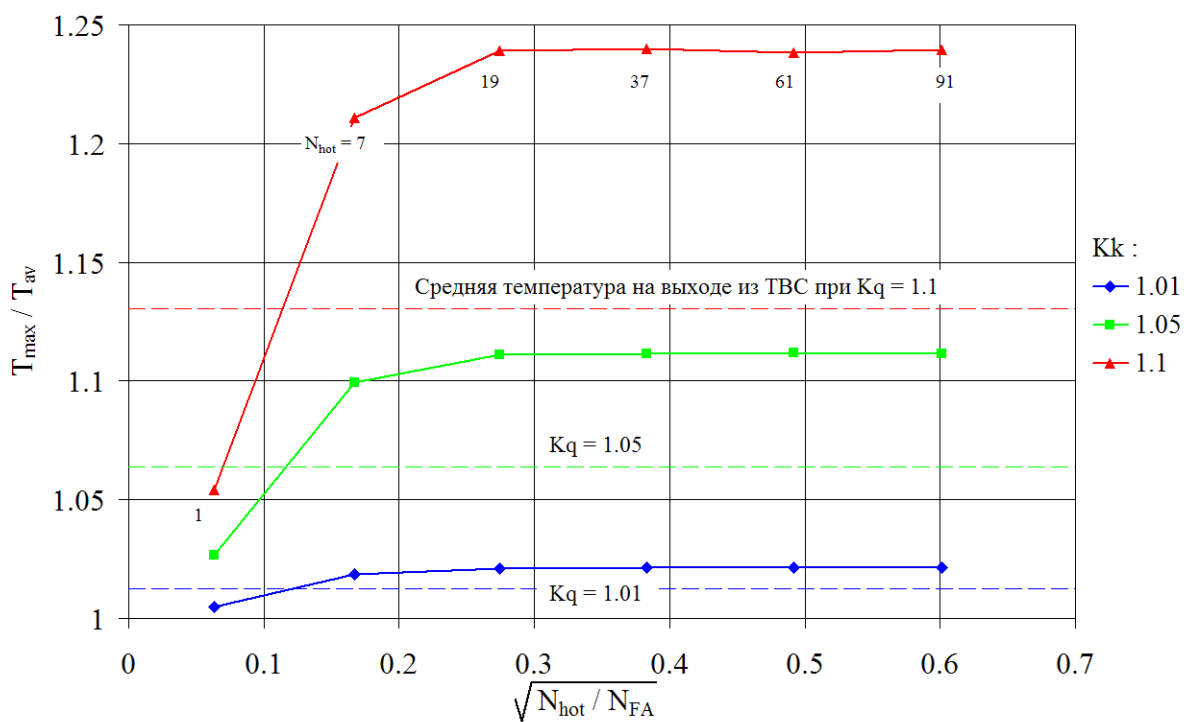


РИС.14. Зависимость максимальной относительной температуры теплоносителя на выходе из ТВС от количества «горячих» твэлов.

Из рис. 14 следует, что, начиная с «горячего пятна», состоящего из 7 твэлов, температура теплоносителя на выходе из ячеек этого пятна будет превышать среднюю температуру ТВС, целиком состоящую из «горячих» твэлов. Это объясняется вытеснением теплоносителя из межтвэльного пространства «горячего пятна» в межтвэльное пространство более холодной части ТВС.

Для рассмотренных условий приемлемой может считаться неравномерность по сечению ТВС  $Kk = 1.05$ . Однако полученные результаты требуют уточнения как в рамках поканальной методики расчета (уточнение коэффициента межканального обмена в области сверхкритических температур), так и в рамках CFD подходов для уточнения азимутальной неравномерности температуры оболочек твэлов, поскольку температура оболочек твэлов является основным фактором, ограничивающим максимальные подогревы теплоносителя в активной зоне ВВЭР-СКД.

## 5. Заключение

С помощью программы ТЕМПА-СК выполнены предварительные расчетные анализы:

- тепло-гидродинамической устойчивости течения теплоносителя в ТВС ВВЭР-СКД;
- распределения расходов по ТВС активной зоны ВВЭР-СКД (вопрос гидропрофилирования активной зоны);
- допустимой неравномерности распределения энерговыделений в ТВС ВВЭР-СКД.

Основные выводы по каждому исследованию приведены в тексте доклада.

Дальнейшие исследования, будут направлены на внедрение в программу ТЕМПА-СК нейтронно-физического модуля для учета сильной обратной связи между мощностью энерговыделений и плотностью теплоносителя при анализе гидро-нейтронной неустойчивости и распределения расходов по ТВС активной зоны ВВЭР-СКД.

Необходимо уточнение корреляций по коэффициенту теплоотдачи в пучках стержней и коэффициенту межканального обмена. Необходимо выполнение оценки азимутальной неравномерности температуры оболочек твэлов.

## Список обозначений

$G$	– расход (кг/с)
$Kk$	– коэффициент неравномерности мощности твэлов в ТВС
$Kq$	– относительная мощность ТВС
$N$	– количество твэлов
$N_{SPC}$	– число, характеризующее недогрев теплоносителя до псевдокритической температуры на входе в ТВС (sub-pseudocritical number)
$N_{TRC}$	– число, характеризующее подогрев теплоносителя в ТВС (trans-pseudocritical number)
$p$	– давление (Па)
$T$	– температура (°C)
$t$	– время (с)
$z$	– продольная координата (м)
$Z_{core}$	– высота активной зоны (м)

## Индексы

av	– средний
FA	– в ТВС
hot	– в «горячем пятне»
in	– входной

max – максимальный  
out – выходной

### Ссылочная литература

- [1] Рыжов С.Б., Мохов В.А., Подшибякин А.К. и др., “О новых проектах реакторных установок ВВЭР на современном этапе развития атомной энергетики”, 6-ая Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Сборник докладов, Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (2009), т.1, с.7–36.
- [2] Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Никитенко М.П. и др., “Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами – перспективные реакторы 4-го поколения”, Научная сессия МИФИ-2007, Сборник научных трудов, Москва, МИФИ (2007), Т.8, с. 34–35.
- [3] Кириллов П.Л., “Водоохлаждаемые реакторы на воде сверхкритических параметров (предложения по программе и путям развития работ)”, Отраслевой научно-технический семинар "Реакторы на сверхкритических параметрах воды", Сборник трудов, Обнинск, ФЭИ (2007), с. 4–15.
- [4] Глебов А.П., Клушин А.В., Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов, охлаждаемый водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя, Атомная энергия, т.100, вып. 5 (2006), с. 349–355.
- [5] Никитенко М.П., “Корпусные реакторы со сверхкритическими параметрами пара. Конструкторские и схемно-режимные проработки РУ 4-го поколения ВВЭР-СКД”, Материалы международного семинара «Вода и пар сверхкритических параметров в атомной энергетике: проблемы и решения», 22-23 сентября 2008, Москва, ФГУП НИКИЭТ (2008), с. 3–4.
- [6] Махин В.М., Мохов В.А., Васильченко И.Н. и др., Проблемные вопросы по активной зоне корпусного реактора ВВЭР-СКД, Безопасность окружающей среды, №3 (2009), с. 130–134.
- [7] Churkin A.N., Yagov P.V., “Computer code TEMPA-SC: simulation of thermo-hydraulic processes in the core of VVER-SCP reactor”, 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, March 8-11, 2009, Heidelberg, Germany, Paper No. 02, [http://www.hplwr.eu/public/Symposium/Proceedings\\_01-20.zip](http://www.hplwr.eu/public/Symposium/Proceedings_01-20.zip).
- [8] Ambrosini, W., Khartabil, H., 2009, Specifications for a Benchmark Exercise on Stability in Heated Channels with Supercritical Fluids, University of Pisa, Italy, DIMNP RL 1214(2009), July 10th, 2009
- [9] Ambrosini, W., Sharabi, M., “Dimensionless Parameters in Stability Analysis of Heated Channels with Fluids at Supercritical Pressures”, Proceedings of ICONE 14, 14th International Conference on Nuclear Engineering, July 17-20, 2006, Miami, Florida USA.
- [10] Чуркин А.Н., Махин В.М., Щекин И.Г., Ягов П.В. Анализ устойчивости течения теплоносителя в активной зоне реактора с водой сверхкритического давления, Сборник тезисов докладов межведомственного семинара «Теплофизика-2008», 15-17 октября 2008, ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2008, с. 72 – 74.