



Международный Центр Ядерной Безопасности

Минатом России



**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПО КОДУ RELAP5/MOD3.2
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЧАСТИЧНОМ
ОСУШЕНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР ВЫПОЛНЕННЫХ НА
СТЕНДЕ КС В РИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"**

Авторы: Виноградов В.А., Балыкин А.Ю.

Российский Научный Центр “Курчатowskiй Институт”
Адрес: Россия, 123182 Москва, Площадь Курчатова 1
E-mail: vav@vver.kiae.ru
Phone: +7(095) 196-92-71
Fax: +7(095) 196-61-72

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является оценка пригодности кода RELAP5/MOD3.2 для описания тепловых и гидродинамических процессов реализующихся в частично осушенной активной зоне ВВЭР при аварии с некомпенсируемой малой течью теплоносителя из первого контура. Расчетные исследования проведены в соответствии с планом валидации кода применительно к ВВЭР [1] разработанным МЦЯБ в рамках совместного с US INSC проекта # 6 “Валидация компьютерных кодов применительно к ВВЭР и РБМК”. В план были включены 7 стандартных проблем. По мере готовности для анализа, была сформулирована Стандартная Проблема ВВЭР “Исследования теплопередачи в частично осушенной активной зоне ВВЭР-1000 на стенде КС в РИЦ Курчатowskiй институт” [2], которая определена в плане валидации кода как INSCSP-V4.

Авария с малой течью теплоносителя из первого контура является одной из проектных аварий ВВЭР. Отдельные явления гидродинамики и теплообмена в активной зоне ВВЭР при ее частичном осушении являются специфическими. Поэтому необходимо оценить адекватность моделей кода RELAP5/MOD3.2 для моделирования отдельных явлений в условиях ВВЭР, так как существуют характерные особенности в конструкции активной зоны и ТВС реакторов этого типа.

В частности, существенными отличиями ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 от западных реакторов типа PWR являются расположение твэлов в треугольной решетке в поперечном сечении ТВС, меньшие значения диаметра твэлов и гидравлического диаметра ячеек пучка стержней. Особенно значительные отличия имеют место в геометрии и количестве дистанционирующих решеток, а также в расстояниях между ними P_{sg} по высоте ТВС (в ТВС ВВЭР $P_{sg} = 240-250$ мм, а в ТВС PWR $P_{sg} \approx 500$ мм, хотя в усовершенствованных ТВС PWR установлены также и дополнительные промежуточные решетки с шагом $P_{sg} \approx 250$ мм).

2. ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В докладе представлены *описание стандартной проблемы INSCSP-V4 и предварительные результаты расчетного анализа экспериментов* с моделированием частичного и полного осушения активной зоны реактора типа ВВЭР–1000. Эксперименты проведены на экспериментальном участке КС-1 на стенде КС в РИЦ “Курчатовский институт”. Основной целью экспериментов являлись исследования:

- тепловых и гидродинамических процессов при паро-конденсатной естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя в замкнутом контуре при различных положениях физического уровня двухфазной смеси в модели активной зоны в квази-стационарных условиях при низких (остаточных) тепловыделениях и средних давлениях;
- неравновесного теплообмена и распределений температур стенки имитаторов твэлов в осушенной части активной зоны при противоточном течении пара и его конденсата, возникающем из-за превалирования конденсации пара в элементах замкнутого контура над его генерацией в активной зоне вследствие превышения потерь тепла над мощностью модели ТВС.

Экспериментальный участок КС-1 (рис.2.1) представляет собой полу-интегральную, однопетлевую модель первого контура реактора типа ВВЭР, которая предназначена для исследований гидродинамики и теплообмена применительно к аварийным режимам реактора с малой течью теплоносителя. Она включает в себя модели всех основных элементов реактора: опускной камеры (ОК), нижней камеры смешения (НКС), активной зоны (АЗ) реактора типа ВВЭР-1000 (рис.2.2), верхней камеры смешения (ВКС), а также модели горячей и холодной ниток главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) с имитатором горизонтального парогенератора (ПГ) с пассивным отводом тепла. В качестве модели топливной сборки использован пучок из 19 электрически обогреваемых трубок (из нержавеющей стали 12Х18Н10Т) с наружным диаметром 9 мм, расположенных в треугольной решетке с шагом 12.75 мм, и высотой зоны тепловыделения равной 2.505 м.

Для *измерения* распределения температур стенки имитаторов твэлов $T_{Wi-k}(t_{exp})$ по высоте и радиусу модели ТВС были установлены 33 термопары. Термопары были установлены внутри 14 (номера твэлов $i=1-14$) имитаторов твэлов на различных уровнях (номера сечений $k=0-24$) по высоте ТВС (рис.2.3). Также измерялись давление $P_{out}(t_{exp})$ на выходе из активной зоны и перепады давления по высоте моделей опускной камеры, ВКС и АЗ (рис.2.1). Компьютер регистрировал все указанные параметры и температуры теплоносителя в модели НКС $T_{Fin}(t_{exp})$ и на выходе из ТВС $T_{Ffa}(t_{exp})$, на входе в ВКС $T_{Fup}(t_{exp})$ и в опускной камере $T_{Fdc}(t_{exp})$, а также напряжение и силу тока в модели ТВС. Период опроса всего набора каналов измерений был ≈ 0.5 с. Точка нулевого времени t_{0exp} соответствует началу квази-стационарного режима при определенных начальных значениях параметров.

Измерение распределения температур имитаторов твэлов по высоте ТВС с помощью термопар, установленных в 20 уровнях, позволяет получить данные о положении физического уровня двухфазной смеси в канале с ТВС с точностью ± 50 мм.

Для оценки кода RELAP5/MOD3.2 из имеющихся опытных данных в стандартную проблему INSCSP-V4 были отобраны шесть экспериментов для расчетного моделирования явлений/процессов в частично и полностью осушенной активной зоне реактора в аварийных условиях.

Значения определяющих параметров: - мощности тепловыделения в модели ТВС $W(t_{0exp})$, давления на выходе из модели АЗ $P_{out}(t_{0exp})$, температуры теплоносителя на входе в

модель НКС $T_{Fin}(t_{0exp})$ в начальный момент времени t_{0exp} реализации квази-стационарных режимов для шести выбранных опытов представлены в таблице 2.2.

Для моделирования экспериментальных начальных условий необходимо также знать действительное положение физического уровня пароводяной смеси $L_m(t_{0exp})$ в канале с ТВС в начальный момент времени. Реальное положение физического уровня смеси было определено на основе предварительного анализа опытных данных о поведении температур имитаторов твэлов и распределений температур твэлов $T_{Wi-k}(t_{0exp})$ по высоте обогреваемой зоны в начальный момент времени t_{0exp} . При этом используется допущение, что за место положения физического уровня смеси $L_m(t)$ можно принять такое сечение по высоте канала с ТВС, в котором начинается резкое повышение истинного объемного паросодержания, локальное осушение стенок имитаторов твэлов, резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи $H_{w1}(t)$ от наружной поверхности стержней к теплоносителю, и как следствие, локальное возрастание температуры стенки $T_W(t)$ твэла выше температуры насыщения воды $T_s(P)$.

Таблица 2.2. Начальные значения определяющих параметров в квази-стационарных режимах для шести выбранных опытов.

Эксперимент	Мощность модели ТВС $W(t_{0exp})$, кВт	Давление на выходе АЗ $P_{out}(t_{0exp})$, бар	Уровень смеси в канале с ТВС $L(t_{0exp})$, м	Температура на входе АЗ $T_{Fin}(t_{0exp})$, К
KS1-18-1	20,5	66	1,62	478
KS1-18-2	14,5	60	1,78	479
KS1-19-1	21,2	35	2,29	489
KS1-19-2	12,9	31	1,78	488
KS1-33-1	9,6	31	< 0	507
KS1-34-1	9,4	34	0,62	511

Выбранные опыты существенно различаются по условиям их проведения, и в частности, специально были отобраны опыты с разными начальными положениями физического уровня смеси в модели ТВС и разным характером его поведения. Для анализа используются опытные данные о поведении и распределении температур стенки твэлов в частично или полностью осушенной модели ТВС ВВЭР–1000, которые получены при различных значениях мощности и теплового потока, различных давлениях, расходах и скоростях генерируемого пара в осушенной части модели активной зоны.

К особенностям этих экспериментов относится также сравнительно высокая интенсивность теплоотдачи от твэлов к теплоносителю в осушенной части модели ТВС в условиях конденсации пара в имитаторе горизонтального парогенератора. Были получены неравномерные распределения температур стенок имитаторов твэлов по высоте и радиусу осушенной части ТВС при ее охлаждении в условиях противоточного течения пара и его конденсата, стекающего обратно в активную зону сверху. При этом измеренные максимальные значения температуры стенки могли реализовываться в имитаторах твэлов, расположенных во внутреннем ряду пучка, как на выходе активной зоны, так и в сечениях зоны, расположенных на определенных расстояниях от ее верха. Температура стенок имитаторов твэлов $T_W i-k$ не превышала 770 К.

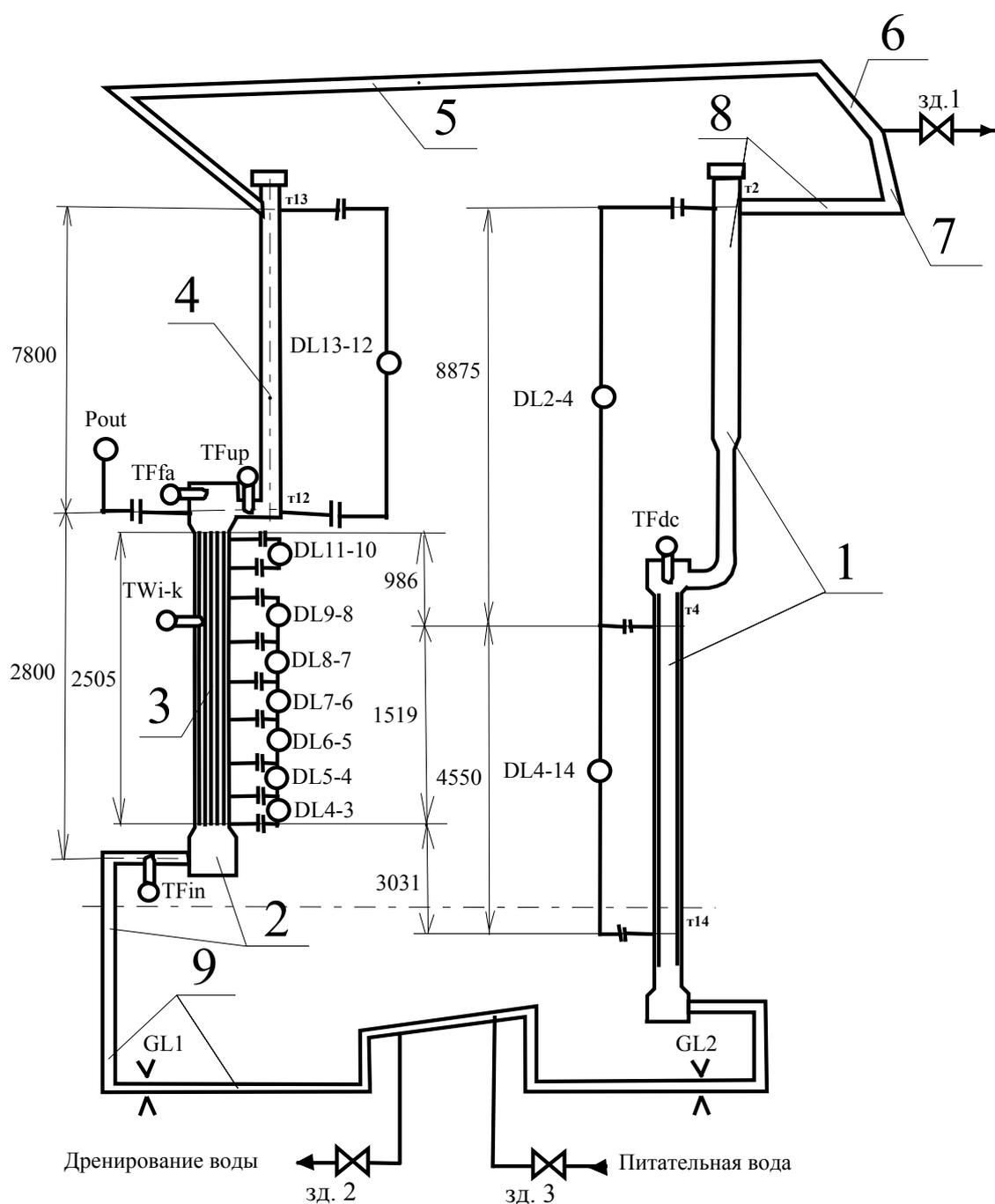


Рис. 2.1. Модель первого контура реактора типа ВВЭР на стенде КС и измерения.

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Модель опускной камеры реактора | 6. Имитатор трубного пучка парогенератора |
| 2. Модель нижней камеры смешения | 7. Имитатор трубного пучка парогенератора |
| 3. Модель активной зоны реактора | 8. Имитатор холодной нитки ГЦТ |
| 4. Модель верхней камеры смешения | 9. Нижняя водяная коммуникация |
| 5. Модель горячей нитки ГЦТ | |

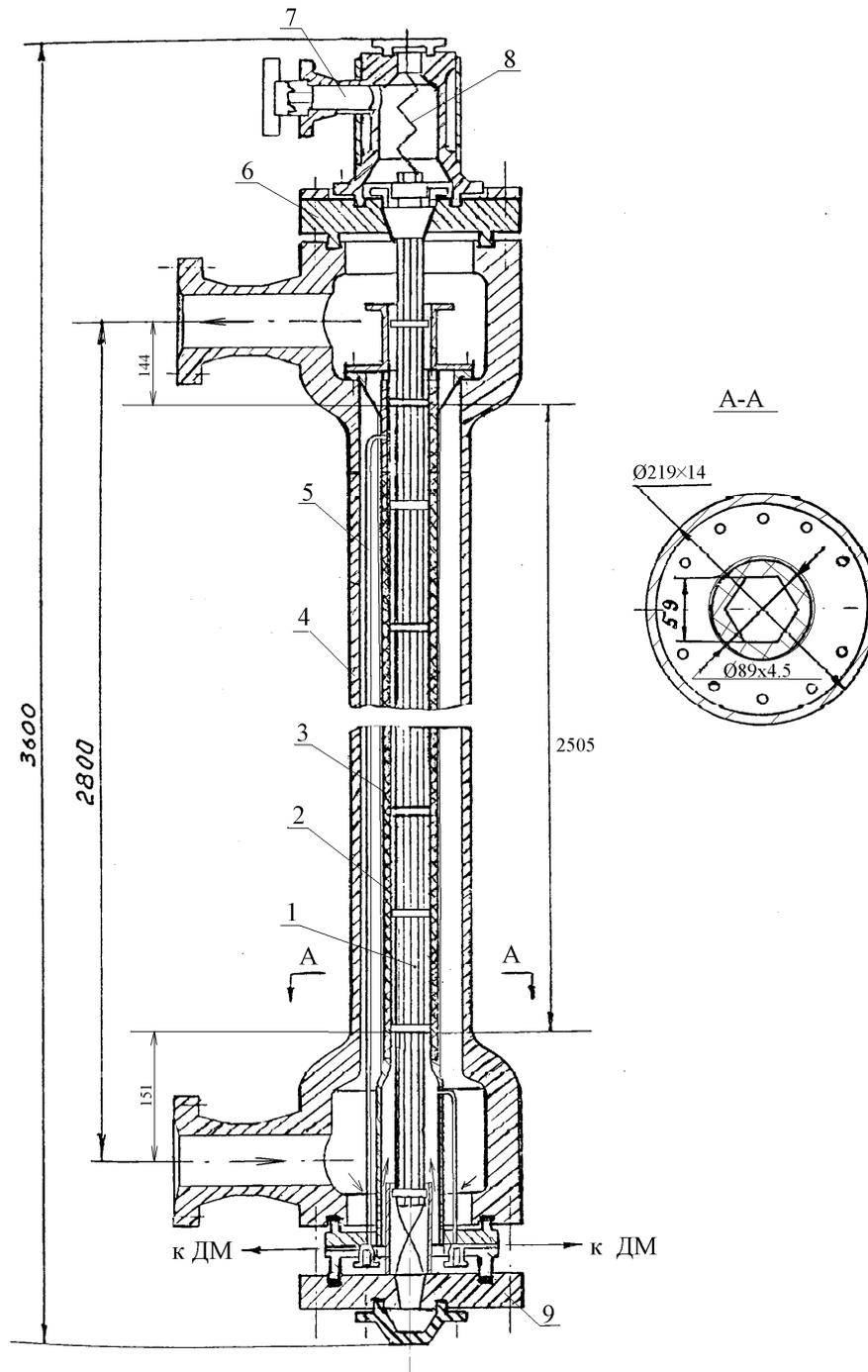


Рис. 2.2. Модель активной зоны реактора типа ВВЭР.

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1. Модель ТВС ВВЭР–1000 | 6. Токоподвод верхний |
| 2. Чехол модели ТВС | 7. Устройство газовой разгрузки труб твэлов |
| 3. Втулки изолятора из талькохлорита | 8. Выводы термопар |
| 4. Корпусная труба | 9. Токоподвод нижний |
| 5. Импульсные линии дифманометров | |

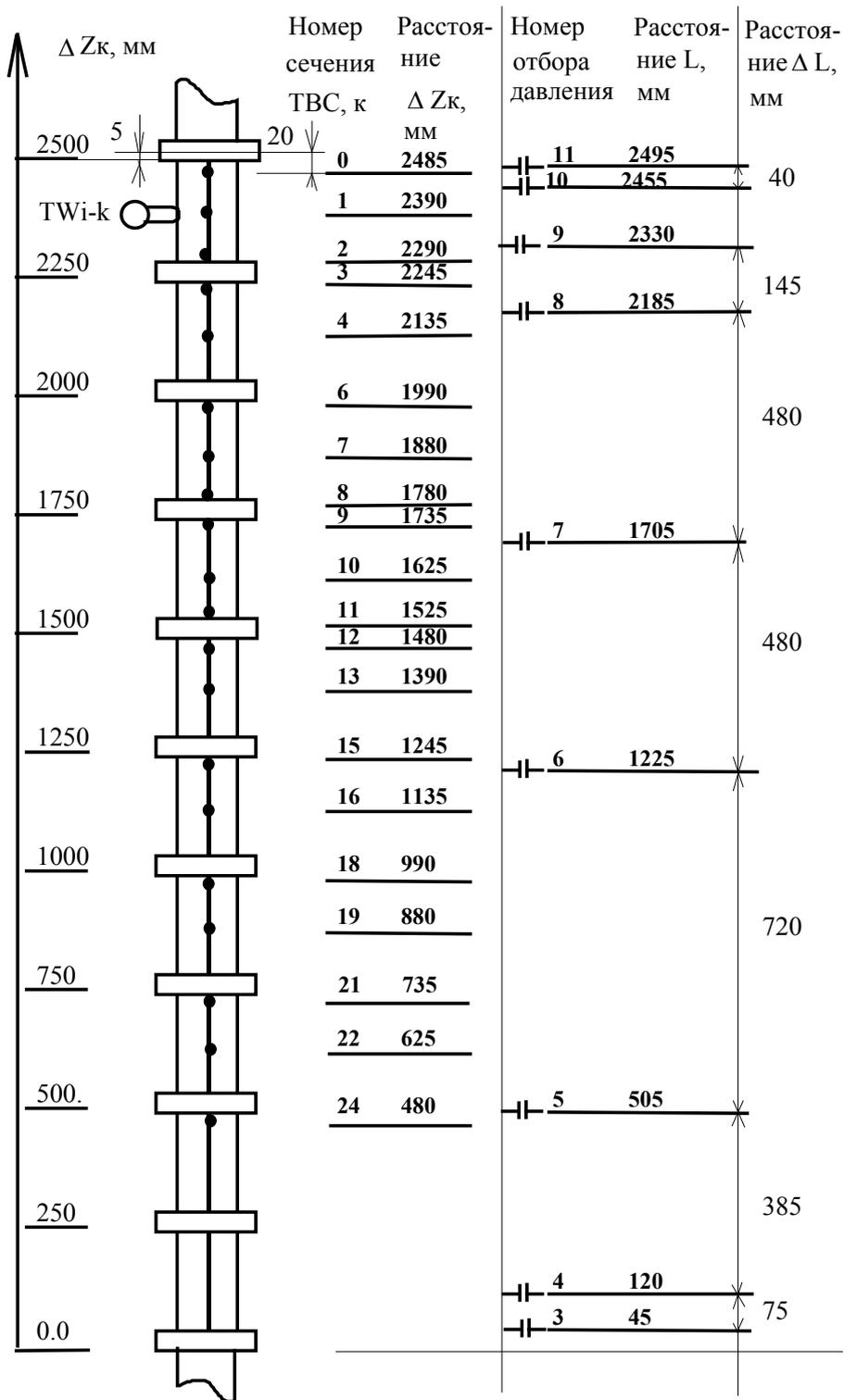


Рис. 2.3. Схема расположения рабочих спаев термомпар TWi-k и отборов давлений по высоте модели ТВС.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ КС

3.1. Методика проведения экспериментов

При заданной мощности ТВС устанавливался кипящий режим естественной циркуляции теплоносителя в модели контура ВВЭР при несколько больших значениях давления P_{out} и температуры воды T_{Fin} на входе АЗ, чем задано в эксперименте. При этом часть пара сбрасывали из имитатора парогенератора через вентиль 1 в расширительный бак.

После прогрева металла трубопроводов верхней части модели контура ВВЭР до температуры насыщения $T_s(P)$ производилось полное осушение модели ВКС, контролируя положение массового уровня теплоносителя в модели ВКС с помощью дифманометра DL13-12. И затем, при значении давления близком к заданному в эксперименте $P_{out}(t_{0exp})$, устанавливалось заданное частичное осушение модели активной зоны путем дренирования части воды из нижней водяной коммуникации через вентиль 2 в расширительный бак, контролируя при этом положение массового уровня теплоносителя в канале с ТВС с помощью дифманометров, измеряющих перепады давления по высоте ТВС, а также массового уровня в опускной камере с помощью дифманометров DL2-4 и DL4-14.

После достижения установившегося режима при требуемом положении физического уровня $L_m(t_{0exp})$ в канале с ТВС, начинался опыт по исследованию теплоотдачи в осушенной части ТВС в условиях паро-конденсатной циркуляции теплоносителя при постоянном заданном значении мощности $W(t_{0exp})$ *в квази-стационарных условиях*. При этом в замкнутом контуре циркуляции происходили очень медленное понижение давления $P_{out}(t)$, медленное изменение уровня смеси $L_m(t)$ и соответствующие изменения температур стенки $TW(t)$ твэлов по высоте активной зоны из-за превалирования конденсации пара в элементах контура над его генерацией в активной зоне при $\Sigma Q_{loss} > W$ (при закрытых вентилях 1, 2 и 3).

3.2. Граничные условия на наружных поверхностях модели контура ВВЭР

Только имитатор парогенератора является неизолированной частью экспериментального контура. Все остальные компоненты контура покрыты слоем тепловой изоляции.

Для определения тепловых потерь в окружающую среду в основных структурных элементах контура, а также сведения теплового баланса в модели активной зоны были проведены специальные эксперименты. Суммарная мощность тепловых потерь ΣQ_{loss} от наружных поверхностей контура через слой теплоизоляции к окружающему воздуху в помещении стенда определена на основе опытных данных полученных в режиме с кипением в полностью смоченной теплоносителем модели ТВС и последующей конденсацией пара в замкнутом контуре циркуляции при постоянном давлении. Например, при постоянном $P_{out}(t_{exp}) = 51$ бар и, следовательно, при равенстве $W = \Sigma Q_{loss}(t_{exp})$ мощность $W = 50.2$ кВт.

При расчетном моделировании поведения определяющих параметров в других экспериментах при отличающихся давлениях и при $\Sigma Q_{loss} > W$ а, следовательно, при постепенном понижении давления и температуры насыщения $T_s(P)$ в контуре необходимо было каждый раз индивидуально подбирать такое значение суммарной мощности тепловых потерь $\Sigma Q_{loss}(t_{cal})$, при использовании которого расчетная кривая уменьшения давления $P_{out}(t_{cal})$ как можно лучше совпадает с экспериментальной кривой $P_{out}(t_{exp})$ для каждого отдельного опыта.

Величина тепловых потерь и их распределение по контуру циркуляции определяют процессы охлаждения пара и интенсивность его конденсации в элементах контура и, следовательно, расход конденсата пара $G_L \text{ out (tcal)}$, стекающего сверху вниз под действием гравитации из подъемной ветви контура обратно в канал с ТВС, а также расходы конденсата стекающего в модель опускной камеры и в кольцевом канале модели АЗ. ***Поэтому было определено распределение по длине контура коэффициентов теплопередачи K_{loss} от наружных поверхностей различных элементов контура к воздуху.***

3.3. Начальные и граничные условия внутри контура циркуляции теплоносителя

Температурный режим твэлов в осушенной части ТВС непосредственно связан с динамикой уровня теплоносителя в активной зоне при его выкипании, при этом физический уровень двухфазной смеси, являющийся границей между областью ухудшенного теплообмена над уровнем и областью кипения жидкости под уровнем, определяет также и массовый расход пара G_g в осушенной области ТВС. Поэтому для расчета температурного режима модели ТВС нужно иметь надежные данные о положении физического уровня L_m пароводяной смеси в канале с ТВС.

Внутри имитаторов твэлов отвода тепла нет, так как их полости заглушены сверху и снизу.

Начальные и граничные условия для моделирования тепловых и гидродинамических процессов в контуре следующие :

- модель опускной камеры реактора и часть модели нижней камеры смешения заполнены жидкостью при заданных значениях температуры $T_{Fin} (t_{0exp})$, при заданных начальных положениях физического уровня $L_m (t_{0exp})$ пароводяной смеси в канале с ТВС и соответствующих ему положениях массового уровня насыщенной жидкости в кольцевом канале модели АЗ и в опускной камере, а также при заданных значениях давления $P_{out}(t_{0exp})$ и мощности тепловыделения $W (t_{0exp})$ в модели ТВС;

- остальная часть контура, расположенная над физическим уровнем, а именно: - модель ВКС и модель горячей нитки ГЦТ, имитаторы парогенератора и холодной нитки ГЦТ, а также верхняя часть модели ОК заполнены сначала сухим насыщенным паром. Наряду с генерацией пара в модели АЗ, пар образуется также из-за падения давления в процессе дренирования насыщенной жидкости из ВКС и осушения АЗ через вентиль 2 и под воздействием аккумулированного в металле тепла, идущего на испарение пристенной влаги в запаренных верхних компонентах контура;

Затем ***в установившемся режиме***, в условиях уже развитой паро-конденсатной естественной циркуляции теплоносителя в контуре, расход жидкости на входе активной зоны будет определяться движущим напором. При этом расход конденсата пара $G_L \text{ out (tcal)}$, стекающего обратно вниз под действием гравитации из подъемной ветви контура в канал с ТВС, а также расходы конденсата стекающего в модель опускной камеры и в кольцевом канале модели АЗ будут определяться величиной тепловых потерь и их распределением по длине контура циркуляции.

При заданных малых значениях мощности тепловыделения $W < \Sigma Q_{loss}$, в условиях плавного уменьшения давления $P_{out}(t)$ в замкнутом контуре и при частичном осушении модели ТВС стационарные состояния в основных компонентах контура достичь практически невозможно. В частности, нельзя получить одновременно стационарные температурные режимы имитаторов твэлов, талькохлоритового изолятора, стального чехла и корпуса модели активной зоны в различных сечениях по высоте осушенной части модели ТВС при достижении допустимых значений температуры стенок имитаторов твэлов. Это объясняется как влиянием медленных изменений различных гидродинамических параметров в

компонентах контура, так и различной теплоемкостью указанных элементов конструкции и различной теплопроводностью материалов.

Поэтому, использованные опытные данные рассматриваются как данные, полученные в квази-стационарном режиме при постоянной во времени мощности ТВС (за исключением опыта КС1-18-1 с изменяющейся ступенчато мощностью), и в тоже время при относительно медленных изменениях давления с темпом $dP/dt \approx - (0.01 \div 0.04)$ бар/с), уровня смеси в канале с ТВС с темпом $dL/dt \approx \pm (2 \div 4)$ мм/с, и при соответствующих им изменениях расходов пара G_g и стекающего конденсата G_L out, которые определяют теплообмен и поведение температур твэлов в осушенной части модели ТВС. При этом темпы изменения температур имитаторов твэлов в осушенной части ТВС вдали от физического уровня смеси реализовывались в диапазоне $dTW/dt \approx \pm (0.1 \div 0.3)$ К/с.

В определенных стадиях процесса имеется возможность рассматривать режимы передачи тепла от твэлов к теплоносителю, и затем к массивным деталям в осушенной части модели активной зоны как *установившиеся режимы* при слабо уменьшающихся, вследствие уменьшения давления $P_{out}(t)$, значениях локальных коэффициентов теплоотдачи от твэлов к теплоносителю $Hw1(t)$, от теплоносителя к изолятору $Hw2(t)$, от чехла к теплоносителю в кольцевом канале $Hw3(t)$ и от теплоносителя к корпусной трубе $Hw4(t)$. **Время установления** температурного режима в модели ТВС в экспериментах составляло $\sim 400 - 800$ секунд в зависимости от начальных условий.

4. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПЫТОВ НА СТЕНДЕ КС

4.1. Основные допущения, сделанные при расчетном анализе экспериментов КС-1

На этапе предварительных расчетов с использованием кода RELAP5/MOD3.2 было принято, что для описания кодом рассматриваемых отдельных явлений и сложных процессов должны применяться опции, которые рекомендуются разработчиками кода и обычно используются для задеирования моделей кода при аналогичных или подобных условиях [3, 4].

На первом этапе работы были сделаны следующие допущения:

- используются следующие модели процессов в соответствующих компонентах контура: Volume Vertical Stratification, Water Packing, Abrupt Area Change, Umbrella Model, дополнительная модель захлебывания противоточных потоков фаз (CCFL Model) только для моделирования НКС;
- не используются следующие модели процессов в соответствующих компонентах контура: дополнительная модель захлебывания противоточных потоков фаз (CCFL Model) в верхней части модели ТВС, модель повторного залива (Reflood Model).

Для описания межфазного трения в потоке теплоносителя в канале с ТВС используется опция под флагом $b=1$, предназначенная для пучков стержней. В расчетах сопряженных процессов гидродинамики и теплопередачи/теплопроводности используется полу-невная схема численного интегрирования под флагом $tt=3$.

Опытные данные о температуре теплоносителя в НКС $T_{Fin}(t_{exp})$ могут отличаться от реальной температуры теплоносителя на входе ТВС из-за процедуры предварительного дренирования насыщенной жидкости из ВКС в расширительный бак через вентиль 2. В этом случае насыщенная жидкость может заместить некоторое количество недогретой до кипения жидкости в модели НКС и повлиять на результаты измерения $T_{Fin}(t_{exp})$. В дополнение к отмеченному, объем модели НКС, расположенный под каналом с моделью ТВС, после дренирования повторно заполняется насыщенной жидкостью при сливе конденсата пара из модели ВКС через канал с обогреваемой моделью ТВС. Это создает трудности для оценки

температуры теплоносителя в модели НКС TFin (texp) в течение квази-стационарного режима. **Поэтому на первом этапе расчетов было принято, что в начальный момент времени объем НКС, а также нижние части кольцевого канала и канала с моделью ТВС заполнены насыщенной жидкостью.**

При прямом электрическом обогреве трубок имитаторов твэлов локальная мощность тепловыделения на различных участках по высоте ТВС определяется электрическим сопротивлением трубки из нержавеющей стали, которое заметно возрастает с повышением температуры стенки при частичном осушении модели ТВС. Влияние изменения электрического сопротивления стальных нагревателей в зависимости от их температуры на распределение мощности тепловыделения по высоте и радиусу ТВС можно учесть, используя результаты измерений распределения температур в имитаторах твэлов и данные об электрическом сопротивлении стали 12X18H10T при различных температурах. **Однако, на первом этапе расчетов влияние указанных изменений электрического сопротивления на распределение мощности в модели ТВС не учитывалось, т.к. в рассматриваемых опытах аксиальная неравномерность распределения мощности вносит погрешность в локальный тепловой поток не более ~10 % по сравнению с принятым в расчетах равномерным распределением внутренних источников тепловыделения.**

4.2. Описание нодализации модели первого контура ВВЭР и набора входных данных

На рисунке 4.1 показана схема нодализации экспериментальной модели контура ВВЭР (КС-1) для расчетного моделирования выбранных опытов с помощью кода RELAP5/MOD3.2. Расчетное моделирование этих экспериментов проводится по специальным расчетным методикам (процедурам), которые используются для обеспечения адекватного моделирования экспериментальных начальных и граничных условий.

Расчетная модель (в терминах RELAP5/MOD3.2) включает все элементы первого контура экспериментального участка КС-1, она состоит в общем из 11 компонентов с 240 гидродинамическими объемами, 240 соединениями (Junctions) и 277 тепловыми структурами с 1462 узлами сетки.

Схема тепловых структур, используемых для описания распределений мощности тепловыделения и температур в трубном пучке модели ТВС, а также распределения тепловых потерь в окружающую среду показана на рис. 4.1.

Были проанализированы различные нодализации с 20 и 40 контрольными объемами для модели ТВС при фиксированном количестве узлов мелкой сетки в теплопроводящих элементах. Для моделирования участка канала с моделью ТВС была выбрана мелкая нодализация для гидродинамических компонентов и тепловых структур по высоте АЗ, длины которых привязаны к шагу между дистанционирующими решетками. Это позволяет при расчете гидродинамики и теплообмена в канале учитывать влияние всех дистанционирующих решеток, расположенных с шагом $P_{sg} = 250$ мм в обогреваемой зоне. При этом шаг разбиения активной зоны был выбран равным половине или четверти от шага между дистанционирующими решетками ($1/2 P_{sg} = 125$ мм или $1/4 P_{sg} = 62.5$ мм).

Мелкие разбиения на 20 или 40 контрольных объемов по высоте модели ТВС используются как для повышения точности расчетов, так и для более точного определения начального положения физического уровня смеси L_m (t_{0cal}) и его поведения в переходном режиме, а также для определения распределения температур твэлов по высоте активной зоны.

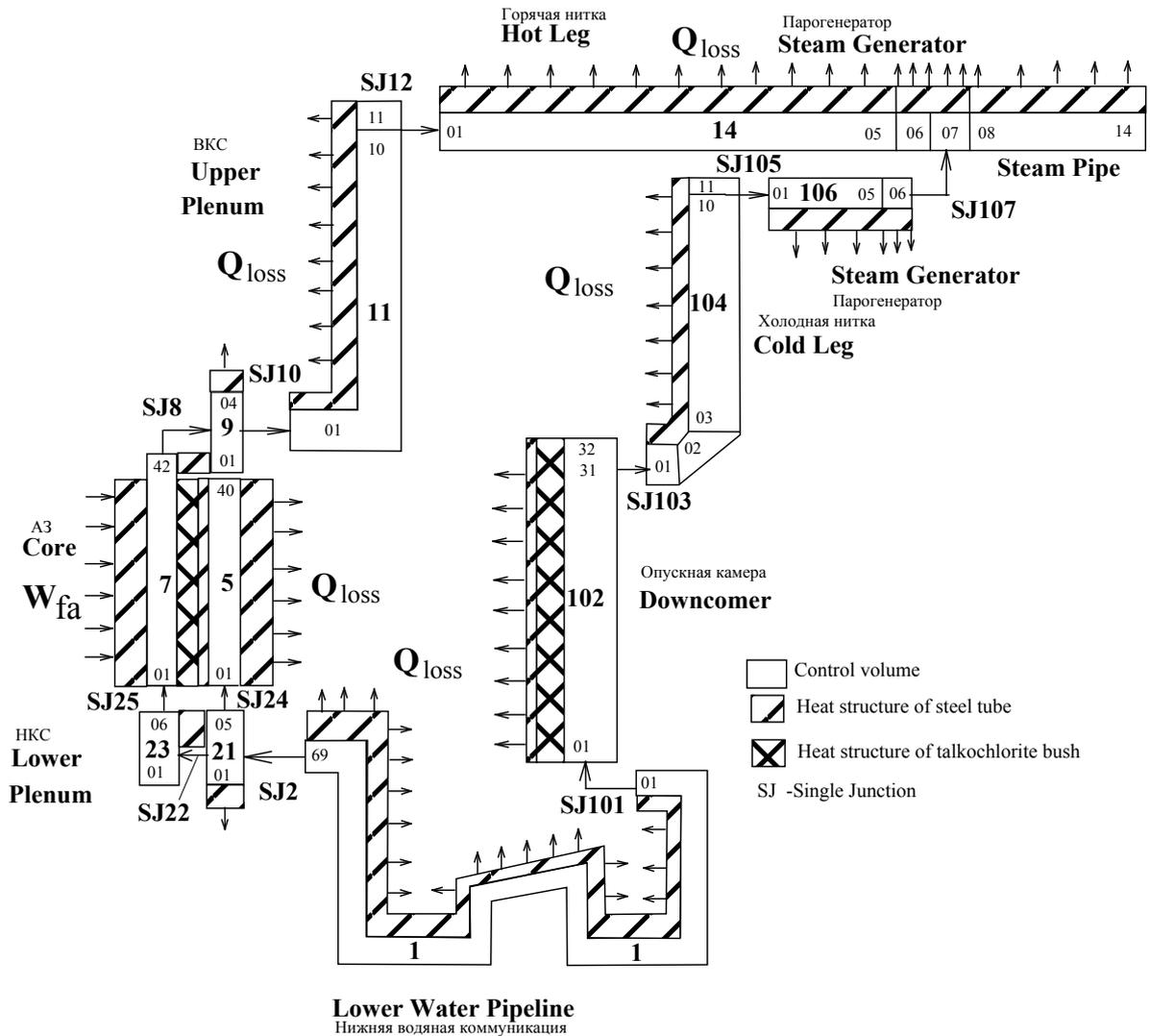


Рис. 4.1. Основной вариант нодализационной схемы для расчетного моделирования экспериментов на КС-1 с помощью RELAP5/MOD3.2.

Стенки электрообогреваемых трубок имитаторов твэлов моделировались тепловыми структурами с *равномерно распределенными внутренними источниками тепловыделения*. Для задания граничных условий на поверхностях твэлов использовались “Additional Right Boundary Cards” с граничным условием типа W3 (I) =110 (Vertical bundle without crossflow с P/D=1.42). Толщина стенки трубок имитаторов твэлов равная 1.53 мм одинакова для всех твэлов. Стенки трубок твэлов разбиты по толщине на 6 слоев. 11 дистанционирующих решеток, расположенных в обогреваемой зоне, моделировались локальными гидравлическими сопротивлениями $\xi=0.26$ [2].

Стенки каналов в моделях активной зоны, ВКС, горячей нитки ГЦТ, ПГ, холодной нитки ГЦТ, опускной камеры и нижней водяной коммуникации моделировались тепловыми структурами с целью моделирования влияния аккумулированного тепла в металле и тепловых потерь в окружающую среду на процессы в контуре.

При моделировании процедуры перехода в состояние с требуемыми начальными и граничными условиями, нестационарный разогрев имитаторов твэлов и талькохлоритового

изолятора, стального чехла, пара в тупиковом кольцевом зазоре и корпусной трубы, а также тепловые потери от корпусной трубы модели АЗ в окружающую среду рассчитываются кодом используя заданные температурные зависимости для удельной плотности, теплоемкости и коэффициента теплопроводности для нержавеющей стали и талькохлорита [2], а также используя модели кода, рекомендованные для описания локальных коэффициентов теплоотдачи $Hw1(t)$, $Hw2(t)$, $Hw3(t)$, $Hw4(t)$ в соответствующих условиях.

4.3. Методика расчетного моделирования опытов на стенде КС

При постановке данной Стандартной Проблемы основное внимание уделено оценке адекватности кода RELAP5/MOD3.2 при моделировании отдельных явлений/процессов теплообмена в осушенной части ТВС. При этом задачи моделирования кодом гидродинамических явлений и процессов в основных компонентах контура рассматриваются как вспомогательные, решение которых необходимо для обеспечения требуемых начальных и граничных условий в осушенной части модели активной зоны.

Такой подход обусловлен тем, что при расчетном моделировании сложных и взаимосвязанных гидродинамических и тепловых процессов в контуре при частичном осушении активной зоны возможны существенные неточности описания таких гидродинамических характеристик, как начальное положение и поведение физического уровня смеси в активной зоне, распределения истинных объемных паросодержаний, расходов пара G_g и его конденсата $G_L out$, распределения скоростей фаз V_g и V_L при противоточном их течении и интенсивность межфазного теплообмена перегретого пара и жидкости по высоте осушенной части ТВС.

Следует учитывать, что *в переходных режимах возможны существенные неточности расчетов* указанных параметров в условиях паро-конденсатной циркуляции. Еще большие неточности имеют место в случае расчетного моделирования экспериментальной процедуры дренирования теплоносителя из нижней водяной коммуникации через вентиль 2 с целью частичного осушения модели АЗ и установления необходимого положения уровня смеси в канале с ТВС. *Анализ адекватности кода при расчетном моделировании отдельных гидродинамических процессов в замкнутом контуре при паро-конденсатной циркуляции необходимо проводить дополнительно в специальной Стандартной Проблеме.*

Поэтому для уменьшения возможного влияния этих неточностей на результаты расчетов коэффициентов теплоотдачи и на распределение температур твэлов по высоте осушенной части ТВС, были разработаны специальные методики расчетного моделирования начальных и граничных условий для осушенной части модели активной зоны, адекватные условиям проведения каждого отдельного опыта.

В этих методиках имеется возможность *подгонять* расчетное положение физического уровня в модели ТВС путем подбора массы жидкости M_L в опускной и подъемной ветвях контура циркуляции и величины начального расчетного давления $P_{out}(t_{0cal})$. Согласование расчетных временных интервалов от t_{1cal} до t_{2cal} для требуемых условий изменения давления от $P_{out}(t_{1cal}) = P_{out}(t_{0exp})$ до $P_{out}(t_{2cal}) = P_{out}(t_{1exp})$ с расчетным интервалом времени для требуемых изменений уровня смеси в канале с ТВС от $L_m(t_{1cal}) = L_m(t_{0exp})$ до $L_m(t_{2cal}) = L_m(t_{1exp})$, а также обоих этих интервалов с интервалом реализации опыта от t_{0exp} до t_{1exp} возможно также путем подбора начальных значений массы жидкости $M_L(t_{0cal})$, давления $P_{out}(t_{0cal})$ и поправочного коэффициента тепловых потерь $C_{loss}(t_{cal})$.

Поведения температур стенки имитаторов твэлов TW (t) и их распределение по высоте ТВС определяются в *установившемся режиме* при постоянной мощности W(t) и при соответствующем законе уменьшения давления Pout (t) в контуре, который реализуется в зависимости от соотношения подведенной мощности к ТВС и мощности суммарных тепловых потерь ΣQ_{loss} в контуре при $W < \Sigma Q_{loss}$.

Результаты расчетов показали, что *“замороженная” версия кода RELAP5/MOD3.2 и основной вариант методики расчетного моделирования экспериментов обеспечивают адекватность расчетного моделирования начальных и граничных условий только для гидродинамики*, реализующейся в режиме паро-конденсатной циркуляции, и только для опытов с положением уровня смеси в средней или нижней частях активной зоны, а также с полностью осушенной активной зоной. *При этом имеют место заметные количественные и качественные различия между рассчитанным и измеренным аксиальными профилями температур твэлов TW в осушенной части ТВС в начальный момент времени t0exp.*

В расчетах переходных процедур к требуемому начальному состоянию модели АЗ код значительно завышает (на **80 – 150 К**) температуры твэлов TW (tcal) в осушенной части модели ТВС в поперечных сечениях, расположенных вдали над уровнем смеси. Это является одной из главных проблем кода в основном варианте моделирования начальных и граничных условий экспериментов.

Причиной этих расхождений, как показывают результаты анализа, является занижение кодом значений коэффициентов теплоотдачи Hw1 (tcal) от твэлов к теплоносителю при ламинарном и переходном режимах течения пара в осушенной части ТВС, которые реализуются на ранних стадиях развития тепловых и гидродинамических процессов в модели активной зоны при расчетном моделировании процедуры перехода в требуемое начальное состояние.

Чтобы смоделировать реальный аксиальный профиль температур твэлов в обогреваемом пучке в начальный момент времени t0exp, для каждого опыта был использован свой набор входных данных для рестарта (RESTART input deck) с заданием в нем экспериментального профиля температур твэлов в тепловых структурах в модели ТВС. Аксиальный профиль температур TW (t0exp) был измерен для каждого опыта в имитаторах твэлов, которые расположены в среднем ряду пучка. Именно в этих имитаторах твэлов были получены наибольшие значения температуры стенки TW в осушенной части ТВС в течение опыта.

Анализ результатов расчетов показал, что в *установившемся режиме* с развитой гидродинамикой в осушенной части ТВС, встраивание реального температурного профиля TW в набор входных данных для рестарта в начальный момент времени t0exp позволяет уменьшить значительные расхождения между предсказаниями кода TW (tcal) и опытными данными TWi-k (texp) о поведении температур твэлов в обогреваемой модели ТВС в течение рассчитываемого “квази-стационарного режима”.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ КС

С целью адекватного расчетного моделирования процессов теплоотдачи от имитаторов твэлов к теплоносителю в осушенной части модели ТВС, было обеспечено точное совпадение поведения расчетного $P_{out}(t_{cal})$ и экспериментального $P_{out}(t_{exp})$ давления, совпадение расчетного $L_m(t_{cal})$ и экспериментального $L_m(t_{exp})$ положений уровня смеси в начальный момент времени и последующего поведения уровня в канале с ТВС, которые все вместе обеспечивают также адекватное моделирование расходов генерируемого пара $G_g(t_{exp})$ и его конденсата $G_L(t_{exp})$, поступающих в осушенную часть сверху и снизу.

В результате расчетного анализа показано, что в рассматриваемых условиях в замкнутом контуре и в модели активной зоны реализуются сложные и различные по характеру процессы гидродинамики и теплообмена *при противоточном течении фаз в компонентах подъемной ветви контура*.

Выбранные шесть экспериментов можно разделить на *три различных типа*, характеризующиеся различной степенью адекватности моделирования кодом начальных и граничных условий, а также поведения в течение опыта определяющих параметров теплоносителя в модели активной зоны: давления $P_{out}(t_{exp})$, уровня смеси $L_m(t_{exp})$, расходов пара $G_g(t_{exp})$ и жидкости $G_L(t_{exp})$.

Сравнения расчетных и опытных данных о поведении температур стенки имитаторов твэлов на различных уровнях в модели ТВС позволяют сделать заключения о хорошем, разумном или минимальном согласии общих картин протекания моделируемых сложных процессов в расчетах и в рассматриваемых экспериментах в соответствии с принятыми критериями оценки адекватности кода. *Показано, что существенные различия рассматриваемых опытов по режимам течения противоточных потоков пара и жидкости в осушенной части ТВС являются причиной значительных различий в степени согласования результатов расчетов по коду с опытными данными от опыта к опыту*.

К первому типу следует отнести эксперименты **KS1-18-1, KS1-18-2 и KS1-19-2**, в которых значения начального уровня смеси в канале с ТВС близки между собой и равны, соответственно, 1.62, 1.78 и 1.78 м. Эти опыты отличаются друг от друга значениями давления $P_{out}(t_{exp})=66, 60$ и 31 бар и мощности ТВС $W(t_{exp})=20.5, 14.5$ и 12.9 кВт, что приводит к различным значениям расходов и скоростей пара в осушенной части ТВС и, соответственно, к различным значениям коэффициентов теплоотдачи h_{w1} от имитаторов твэлов к теплоносителю при противоточном течении пара и жидкости.

В указанных опытах, для которых значения чисел Рейнольдса $Re_g=V_g \cdot Dh/v_g$ равняются $\sim 3000 - 3900, \sim 2400 - 3200, \sim 1600 - 2000$, соответственно, в осушенной части ТВС реализуется турбулентный режим течения пара.

Расчеты этих опытов проведены без использования дополнительной модели кода для захлебывания (CCFL model) в канале с ТВС, поэтому в расчетах величину расхода конденсата пара $G_L(t_{cal})$, стекающего сверху в активную зону, определяют процессы охлаждения и конденсации пара в верхней части контура, а также межфазное трение и межфазный теплообмен при противоточном течении фаз в канале с ТВС.

В этих экспериментах уровень смеси в канале с ТВС медленно возрастает в течение опыта из-за превалирования процессов конденсации пара в контуре циркуляции над испарением жидкости в активной зоне.

Ниже на рисунках приведены результаты анализов экспериментов **KS1-19-2** и **KS1-18-1**.

- Для оценки адекватности расчетного моделирования определяющих параметров в канале с ТВС в *начальных квази-стационарных состояниях*, приведены сравнения результатов расчетов и опытных данных по уменьшению давления $P_{out}(t)$ и поведению температур стенки имитаторов твэлов $TW(t)$ и их распределению по высоте ТВС.
- Как видно, разработанные методы расчетного моделирования указанных опытов обеспечивают адекватность моделирования начальных и граничных условий, реализующихся в экспериментах этой группы, *за исключением аксиального профиля температуры твэлов в осушенной части модели ТВС в начальный момент времени t_{0exp}* .
- В расчетах экспериментов **KS1-18-1** и **KS1-19-2** были получены разумные согласия начального положения уровня смеси и его последующего поведения dL/dt в канале с ТВС в течение опыта. Для иллюстрации на рисунке показаны поведение координаты центра контрольного объема, в котором при расчетном моделировании реализуется режим вертикальной стратификации потока (VST), а также поведение уровня смеси в опыте. Моменты времени для прохождения уровнем определенных координат по высоте ТВС определялись по началу резкого изменения скорости охлаждения стенки $TW_{i-k}(t_{exp})/dt$
- Медленное изменение уровня смеси в канале с ТВС в опытах позволяет также говорить о достаточно медленном изменении расхода и скорости пара для отдельных участков ТВС, расположенных вдали над уровнем смеси.

Очевидно, что адекватное моделирование поведения уровня смеси в рассматриваемых условиях является очень сложной задачей для кода RELAP5/MOD3.2, т.к. точность моделирования поведения уровня смеси в активной зоне зависит от способности различных отдельных моделей кода адекватно описывать указанные выше отдельные явления в сложных процессах.

• При положении уровня смеси в средней части канала с ТВС и турбулентном течении пара в осушенной его части в условиях противотока фаз код дает хорошее согласование с опытными данными о поведении температур стенки твэлов в различных сечениях по высоте ТВС.

Ко второму типу следует отнести эксперимент с полностью осушенной активной зоной **KS1-33-1** и опыт **KS1-34-1** с низким начальным уровнем смеси $L_m(t_{0exp}) \approx 0.62$ м в канале с ТВС. Эти опыты проведены при близких значениях давления $P_{out}(t_{exp})=31$ бар и 34 бар и мощности ТВС $W(t_{exp})=9.6$ кВт и 9.4 кВт. В указанных опытах в осушенной части ТВС также реализуются противоточные течения пара $G_g(t_{exp})$ и жидкости $G_{L,out}(t_{exp})$.

В опыте **KS1-33-1** в течение квази-стационарного режима при мощности ТВС $W(t_{exp})=9.6$ кВт усредненные скорости пара $V_g(t_{cal}) \approx 0.030 - 0.065$ м/с на различных уровнях в канале с ТВС. **В осушенной области ТВС реализуется ламинарное течение пара при значениях чисел Рейнольдса $Re_g \approx 160-320$.**

В опыте **KS1-34-1** с низким физическим уровнем смеси $L_m(t_{0exp}) \approx 0.62$ м рассчитанные в течение “квази-стационарного режима“ при мощности ТВС $W(t_{exp})=9.4$ кВт усредненные скорости пара $V_g(t_{cal}) \approx 0.15 - 0.25$ м/с на различных уровнях в канале с ТВС. Значения чисел Рейнольдса $Re_g \approx 950-1100$. Это соответствует переходному режиму течения пара в осушенной части ТВС, который реализуется между ламинарным и турбулентным режимами течения.

В эксперименте **KS1-34-1** уровень смеси в канале с ТВС также медленно возрастает в течение опыта из-за превалирования процессов конденсации пара в контуре циркуляции над испарением жидкости в активной зоне.

Эти два опыта существенно отличаются от опытов первого типа своими режимами течения пара в канале с ТВС, а также повышенной относительной степенью влияния межфазного теплообмена при ламинарном и переходном режимах течения пара на теплообмен и распределения температур теплоносителя и температур имитаторов твэлов по высоте активной зоны в условиях противоточного течения фаз.

Величину расхода конденсата пара G_{Lout} (tcal), стекающего сверху в активную зону, определяют процессы охлаждения и конденсации пара в верхней части контура, а также межфазное трение и межфазный теплообмен при противоточном течении фаз в канале с ТВС.

В случаях с полностью осушенной активной зоной и с низким физическим уровнем теплоносителя имеют место значительные качественные и количественные различия между рассчитанными и экспериментальными аксиальными профилями температур твэлов в обогреваемой модели ТВС.

При ламинарном и переходном режимах течения пара в условиях противотока фаз код дает лишь минимальное согласование с опытными данными о поведении температур твэлов в различных сечениях по высоте осушенной части модели ТВС. Код завышает темпы возрастания температуры стенок dTW/dt в верхней части модели ТВС. Рассчитанная температура стенки твэла намного выше (на $\sim 100-150$ К), чем измеренная температура твэлов в верхнем сечении ТВС. Это является одной из главных проблем кода при расчетном моделировании рассматриваемых процессов.

Причиной этих расхождений между расчетом и экспериментом являются слишком малые коэффициенты теплоотдачи $h_w \approx 56-58$ Вт/м²·К от имитаторов твэлов к теплоносителю, рассчитанные кодом для ламинарного и переходного режимов течения пара в осушенной части ТВС в условиях противотока фаз в канале. В этом случае, занижение кодом интенсивности межфазного теплообмена может быть другой причиной для этих отклонений между экспериментами и расчетами.

С целью выяснения главной причины этих расхождений было проведено дополнительное исследование адекватности кода при моделировании теплоотдачи в частично осушенной модели активной зоны ВВЭР-440 на стенде ВТИ.

Для расчетного моделирования использованы данные эксперимента 7.12.15.4 о распределении температур оболочек имитаторов твэлов по высоте активной зоны **при переходном режиме течения пара** ($Re_g \approx 1650-850$) в осушенной части канала с ТВС в стационарных условиях [5, 6].

Таблица 5.1. Значения режимных параметров в стационарных условиях опыта 7.12.15.4.

Эксперимент на стенде ВТИ	Мощность ТВС W (t0exp), kW	Давление P _{up} (t0exp), bar	Уровень смеси L _m (t0exp), m	Расход ЕЦ GL (t0exp), kg/s
7.12.15.4	16.8	27.3	1.87	5.1 -3

Отличительной особенностью этого эксперимента является отсутствие противоточного течения фаз в модели ВКС и в осушенной части модели ТВС. Такой режим течения пара в условиях отсутствия его конденсации обеспечивался с помощью охранных электрических нагревателей, расположенных на наружных поверхностях моделей активной зоны и верхней камеры смешения. Эти нагреватели были предназначены для компенсации тепловых потерь в окружающую среду и предотвращения конденсации пара в элементах контура, расположенных над активной зоной, и как следствие, предотвращения образования

конденсата, который мог бы стекать обратно в канал с ТВС навстречу восходящему потоку пара. Это также позволило обеспечить стационарные условия в замкнутом контуре естественной циркуляции и в модели активной зоны при ее частичном осушении.

Экспериментальный участок на стенде ВТИ состоит из моделей нижней камеры смешения, активной зоны и верхней камеры смешения реактора типа ВВЭР-440. Активная зона реактора моделируется 19-стержневой сборкой электрообогреваемых имитаторов твэлов, выполненной с учетом натурной геометрии ТВС ВВЭР-440. Имитатор твэла с косвенным нагревом представляет собой трубу из стали 12Х18Н10Т наружным диаметром 9.1 мм и толщиной 0.8 мм, внутри которой находится нагреватель, электрически изолированный от оболочки периклазом (MgO). В качестве нагревателя используется стальной (12Х18Н10Т) стержень диаметром 3.7 мм и длиной 2.5 м.

В расчете учитывалось влияние изменения электрического сопротивления стальных нагревателей в зависимости от их температуры на распределение мощности тепловыделения по высоте и радиусу ТВС, используя результаты измерений распределения температур в имитаторах твэлов и данные об электрическом сопротивлении стали 12Х18Н10Т при различных температурах.

- Получено значительное количественное различие между рассчитанным и измеренным аксиальными профилями температур твэлов в осушенной части ТВС. В опыте измеренная максимальная температура стенки ТW (texр) max ≈ 910 К реализовалась в самой верхней части ТВС. В расчете максимальная температура твэл на выходе ТВС ТW (tcal) max ≈ 1010 К значительно выше (на ~ 100 К), чем измеренное ее значение. Это является одной из главных проблем кода для базового варианта расчета этого опыта.
- Причиной значительных отклонений рассчитанных значений температур твэлов от опытных являются слишком низкие коэффициенты теплоотдачи $Hw1(tcal) \approx 60-75$ Вт/м²·К от твэлов к потоку пара в условиях *переходного режима* его течения при $Re_g \approx 1650-850$. Поэтому, возрастание температур твэлов по высоте ТВС в расчетах намного больше, чем измеренных.
- Результаты исследований чувствительности показали возможность модификации в коде модели теплоотдачи для канала с ТВС ВВЭР-440 путем использования множителя Fouling factor $K_{Hw1} = 3.0$ с целью увеличения значений коэффициентов теплоотдачи Hw1 от твэлов к потоку пара и получения хорошего согласования рассчитанного аксиального профиля температур твэлов в осушенной части ТВС с опытными данными. Согласие между рассчитанным и измеренным аксиальными профилями температур твэлов становится хорошим при соответствующем увеличении значений коэффициентов теплоотдачи в ~ 3 раза до $Hw1(tcal) \approx 170-195$ Вт/м²·К по-сравнению с $Hw1(tcal) \approx 60-75$ Вт/м²·К в основном варианте расчета при $K_{Hw1} = 1.0$.

Показано, что одной из главных причин неадекватного расчетного моделирования экспериментов на стендах KS-1 и ВТИ является занижение кодом RELAP5/MOD3.2 значений коэффициентов теплоотдачи Hw1 (tcal) в ~ 2.8 раза при переходном режиме течения пара в осушенной части модели ТВС.

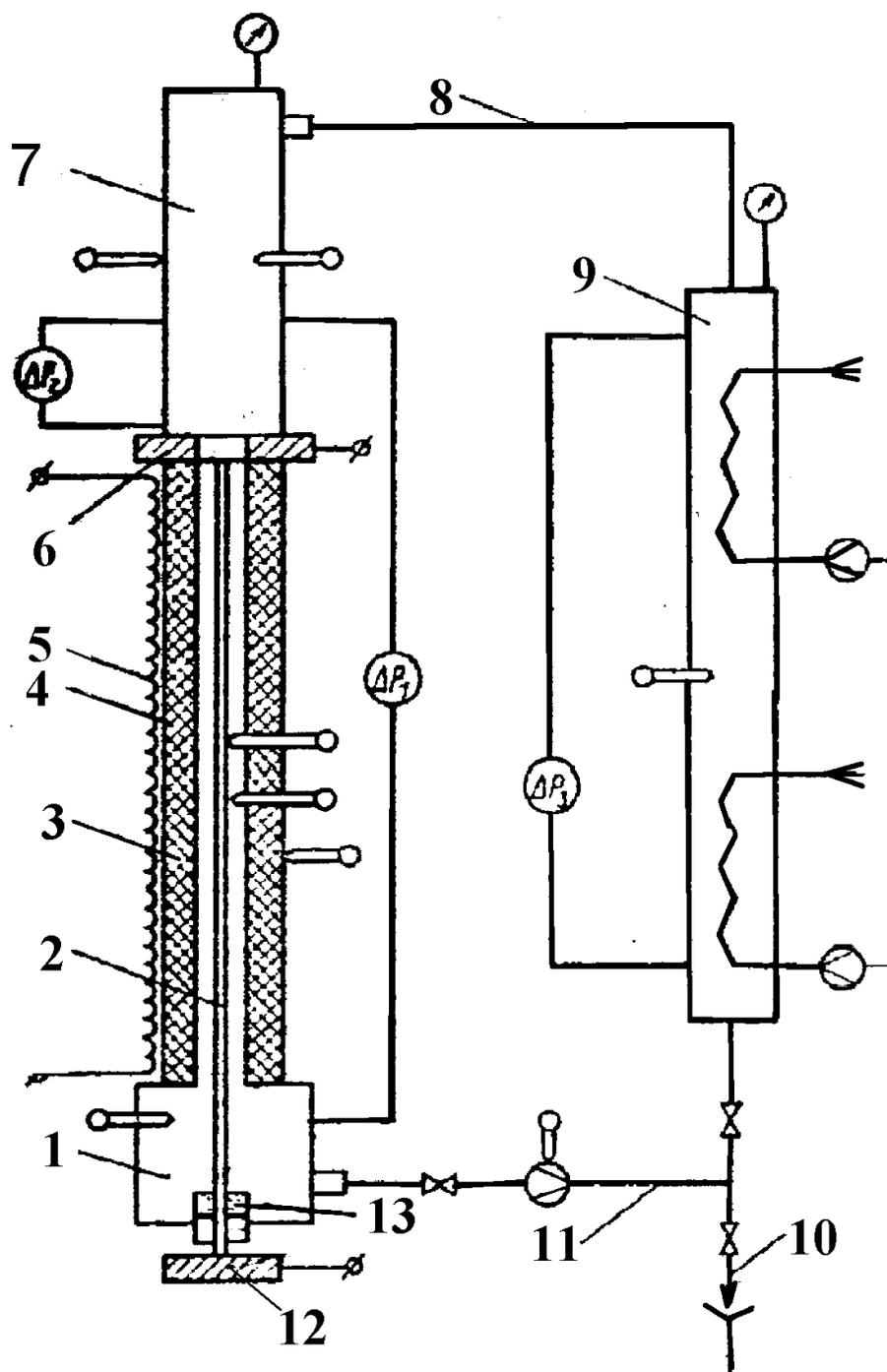


Рис.3.1. Схема модели петли реактора типа ВВЭР-440 и измерения на стенде ВТИ [1]:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Нижняя камера смешения; | 7 - Верхняя камера смешения; |
| 2 - Модель ТВС; | 8 - Модель горячей нитки ГЦТ; |
| 3 - Втулки изолятора; | 9 - Имитатор парогенератора; |
| 4 - Корпус давления; | 10 - Дренажный трубопровод; |
| 5 - Охранный нагреватель; | 11 - Нижняя водяная коммуникация. |
| 6 - Верхний токоподвод; | |

В связи с этим, должен быть проведен дополнительный анализ специально сформулированной Стандартной Проблемы “Теплоотдача в частично осушенной модели активной зоны ВВЭР при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения пара в условиях отсутствия противоточного течения фаз”. Эту работу можно выполнить на основе имеющихся опытных данных ВТИ и ЦКТИ.

Также необходимо провести анализ адекватности моделей кода RELAP5/MOD3.2, используемых для межфазного трения и межфазного теплообмена в осушенной части обогреваемого пучка стержней в условиях противоточного течения фаз применительно к ВВЭР.

К третьему типу следует отнести эксперимент **KS1-19-1**, для которого, как показано, код не обеспечивает адекватного моделирования начальных и граничных условий, и в частности, гидродинамики и теплообмена в начальный момент времени.

- При мощности ТВС $W = 21.2$ Квт и давлении $P_{out} = 35$ бар, а также при высоком начальном положении уровня смеси $L_m (t_{0exp}) = 2.29$ м в этом опыте, код не дает адекватного описания начального положения физического уровня смеси в канале с ТВС и его последующего уменьшения в течение опыта и, как следствие, не дает адекватного описания поведения массовых расходов и скоростей жидкости и пара в осушенной части модели ТВС. Вследствие этого код не дает адекватного описания теплоотдачи от твэлов к теплоносителю и распределения температур стенки твэлов в осушенной части модели ТВС.

Имеют место значительные количественные и качественные различия между рассчитанным и измеренным аксиальными профилями температур в обогреваемой модели ТВС.

RELAP5/MOD3.2 значительно завышает температуры стенки $TW (t_{cal})$ в осушенной области в верхней части модели ТВС. Это является основанием для заключения о полной неадекватности расчетного моделирования начальных и граничных условий, и затем о неадекватности моделирования “квази-стационарного режима” для эксперимента в целом.

- Причиной этих значительных различий может быть неточное описание кодом межфазного трения, параметров уноса капель с уровня смеси под действием потока пара и их осаждения на поверхностях стержней в области высоких объемных паросодержаний > 0.997 , критического теплового потока и теплообмена при относительно высоких тепловых нагрузках и больших паросодержаниях в условиях возможного ограничения расхода конденсата восходящим потоком перегретого пара на выходе из канала с ТВС.

- **Очевидно, что представленных опытных данных и результатов их расчетного анализа недостаточно для уверенной оценки кода применительно к явлениям гидродинамики и теплообмена в условиях противоточного течения конденсата и перегретого пара в модели ТВС.**

- Анализ адекватности кода при моделировании тепловых и гидродинамических процессов в частично осушенной модели активной зоны в условиях захлебывания должен быть проведен дополнительно в специальной Стандартной Проблеме. Эту работу можно выполнить на основе имеющихся опытных данных ЦКТИ [7] при постановке и анализе следующей Стандартной Проблемы “Сложные тепловые и гидродинамические процессы при захлебывании противоточного течения фаз в канале с обогреваемой моделью ТВС, заглушенном снизу”.

6. ОБЩИЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

- Показана необходимость модификации кода RELAP5/MOD3.2 для адекватного описания значительно повышенной эффективности охлаждения осушенной части активной зоны при противоточном течении пара и его конденсата в специфических условиях ВВЭР.
- При *турбулентном течении пара в осушенной части* ТВС при положении уровня смеси в средней части активной зоны код дает хорошее согласие с опытными данными по температурами твэлов в условиях противотока фаз.
- При *ламинарном и переходном режимах течения пара* код дает минимальное согласие с опытными данными по температурами твэлов в осушенной части модели ТВС в условиях противотока фаз.

В случаях с полностью осушенной активной зоной и с низким физическим уровнем смеси имеют место значительные качественные и количественные различия между рассчитанными и экспериментальными аксиальными профилями температур твэлов в осушенной части ТВС. Рассчитанная температура стенки твэла намного выше (на $\sim 100-150$ К), чем измеренная температура твэлов в верхнем сечении ТВС. Это является одной из главных проблем кода при расчетном моделировании рассматриваемых процессов.

- Причиной значительных отклонений рассчитанных значений температур твэлов от опытных являются слишком низкие коэффициенты теплоотдачи $Hw1$ (tcal) от твэлов к потоку пара в условиях ламинарного и переходного режимов его течения. Поэтому, возрастание температур твэлов по высоте ТВС в расчетах намного больше, чем измеренных. В этом случае, занижение кодом интенсивности межфазного теплообмена может быть другой причиной для этих отклонений между экспериментами и расчетами.
- В условиях отсутствия противоточного течения фаз, при *переходном режиме течения пара* при $Re_g \approx 1650-850$ в осушенной части ТВС, использование множителя Fouling factor $K_{Hw1} = 3.0$ с целью увеличения значений коэффициентов теплоотдачи $Hw1$ от твэлов к потоку пара позволяет получить разумное согласование рассчитанного аксиального профиля температур твэлов в осушенной части ТВС с опытными данными.

При увеличении значений коэффициентов теплоотдачи в ~ 3 раза от $Hw1$ (tcal) $\approx 60-75$ Вт/м²·К в основном варианте расчета при $K_{Hw1} = 1.0$ до $Hw1$ (tcal) $\approx 170-195$ Вт/м²·К при $K_{Hw1} = 3.0$ достигается разумное согласие между расчетом и экспериментом.

- Код не дает адекватного описания гидродинамики и теплообмена в условиях противоточного течения при высоком положении уровня смеси, а также при низком положении уровня смеси в канале с ТВС. Неадекватное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена на стадии начала осушения активной зоны приведет также к неадекватному описанию этих процессов и на последующей стадии аварии, где ожидается, что код должен хорошо работать.

Показана необходимость дополнительных исследований для обоснования модификации моделей кода RELAP5/MOD3.2, используемых для межфазного трения и межфазного теплообмена в осушенной части обогреваемого пучка стержней при противоточном течении фаз применительно к специфическим условиям ВВЭР.

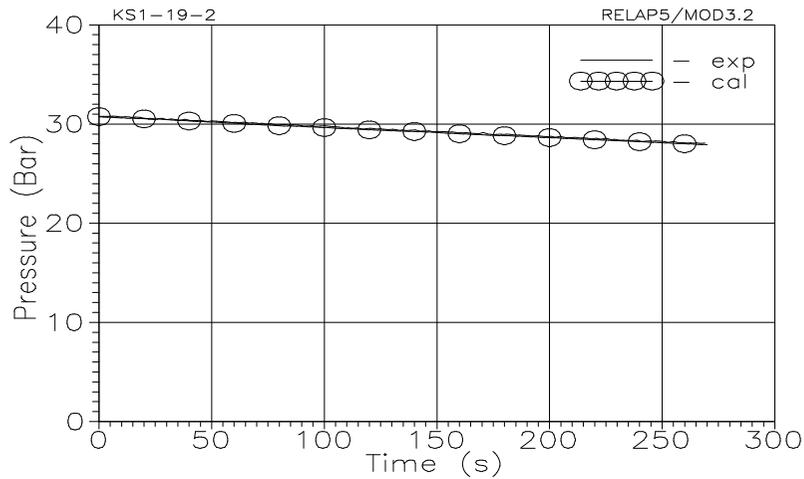
- Также необходимо провести анализ адекватности кода при моделировании теплоотдачи в частично осушенной модели активной зоны при различных режимах течения пара в условиях отсутствия противоточного течения фаз. Этот анализ должен быть проведен дополнительно в специальной Стандартной Проблеме. Эту работу можно выполнить на основе имеющихся опытных данных ВТИ и ЦКТИ при постановке и анализе следующей Стандартной

Проблемы “Теплоотдача в частично осушенной модели активной зоны ВВЭР при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения пара в условиях отсутствия противоточного течения фаз”.

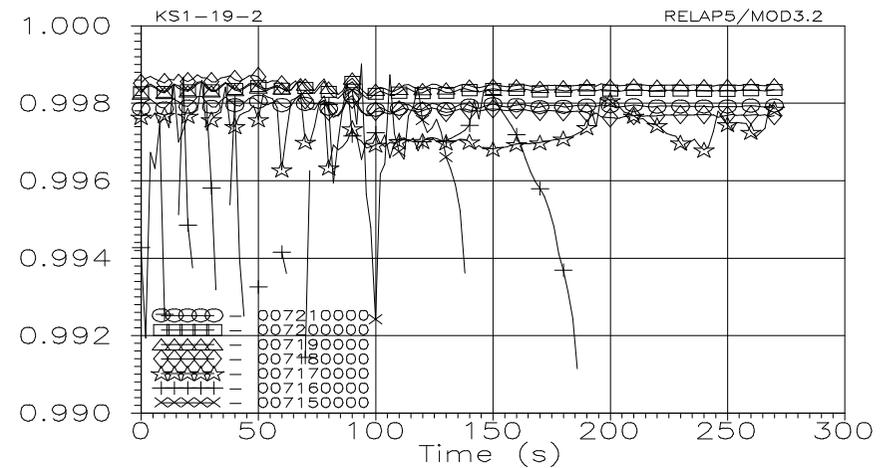
Литература

1. “Final RELAP5 validation plan for application to VVER”, submitted as Deliverable 6 under Joint Project 6, phase 2 (Computer Code Validation for Transient Analysis of VVER and RBMK Reactors), International Nuclear Center of Russia Minatom, Moscow, Russia (January 1998).
2. Vinogradov V.A., Balykin A.Yu. Computer code validation for transient analysis of VVER and RBMK reactors: Standard Problem INSCSP-V4 Definition “Investigation of heat transfer for partly uncovered VVER-1000 core at the test facility KS at RRC “Kurchatov Institute”, Experiments with KS RRC KI test facility, International Nuclear Center of Russia Minatom, Moscow, Russia (March, 2000).
3. RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume 4: Models and Correlations, INEL-95/0174, NUREG/CR-5535, 1995.
4. RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume 2: User’s Guide and Input Requirements, INEL-95/0174, NUREG/CR-5535, 1995.
5. Gordon B.G., Pomelnikov V.N. Study of Heat Transfer at Small LOCAs. Thermophysical Aspects of VVER Safety. Proceedings of the International Symposium “Thermophysics-90”, Volume 1, p. 255-262.
6. Gordon B.G., Pomelnikov V.N. Study of Heat Transfer in the VVER Fuel Assembly at low mass flow. Journal “Atomic Energy”, volume 68, april 1990, p. 288-291.
7. Alekseev S.B., Balynov B.F., Ilyukhin Yu.N., Svetlov S.V. “Critical power of VVER reactor fuel assemblies during ceasing the coolant forced circulation“. THERMOPHYSICAL ASPECTS OF VVER SAFETY. Proceedings of the International Symposium “Thermophysics-90”. Obninsk, 1991, p.278-285.

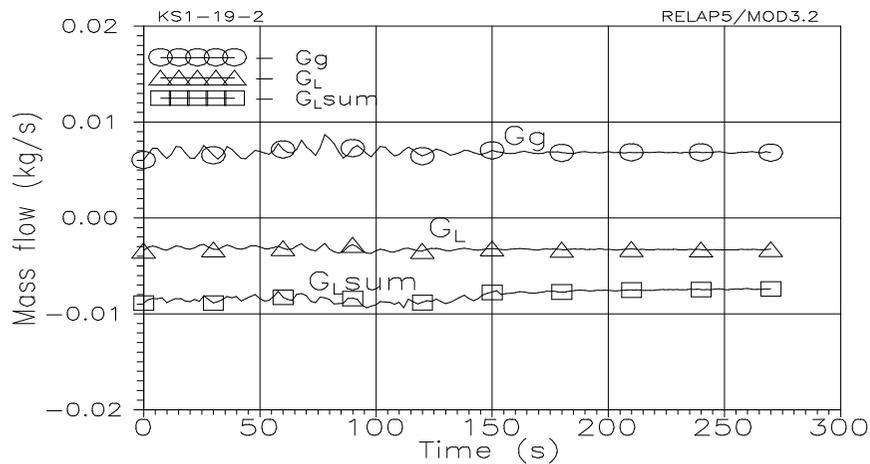
Experiment KS1-19-2: $W = 12.9 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 31 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.01 \text{ bar/s}$, $Lm(t_{0\text{exp}}) \approx 1.78 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{\text{HW1}}=1.0$, $Re_g \approx 1600 - 2000$



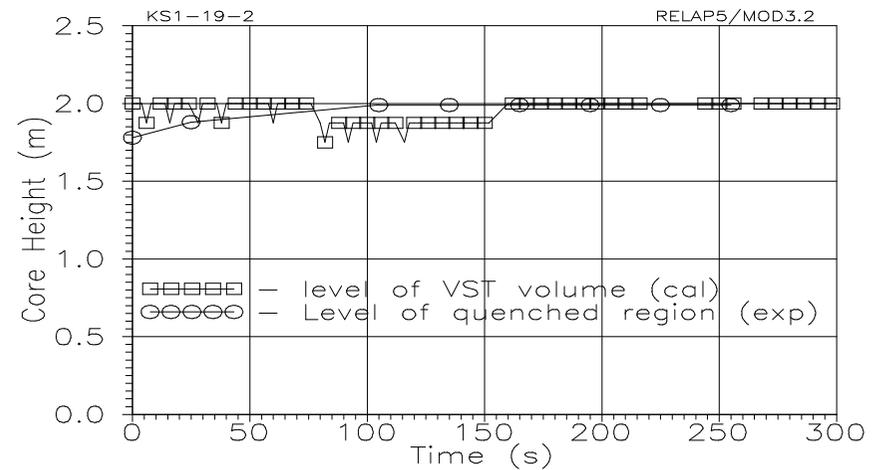
Поведение давления $P_{\text{out}}(t)$



Паросодержание в осушенной части ТВС

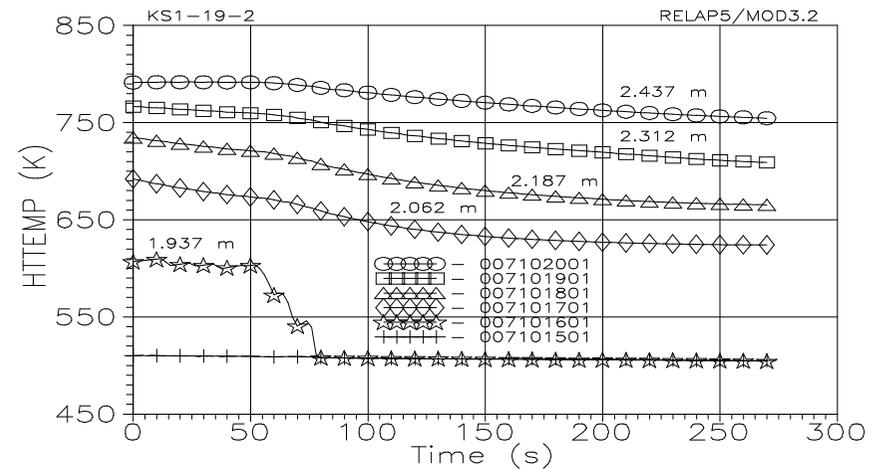
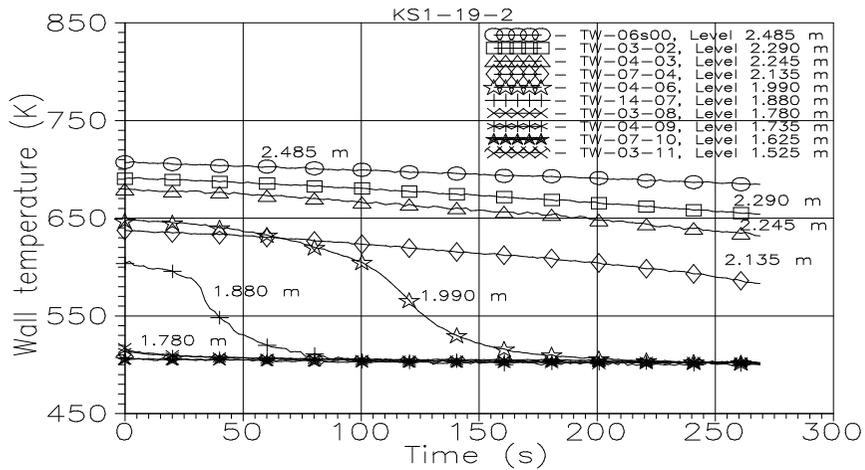


Расходы G_g (tcal) и G_L (tcal) на выходе ТВС и $G_L \text{ sum}$ (tcal)



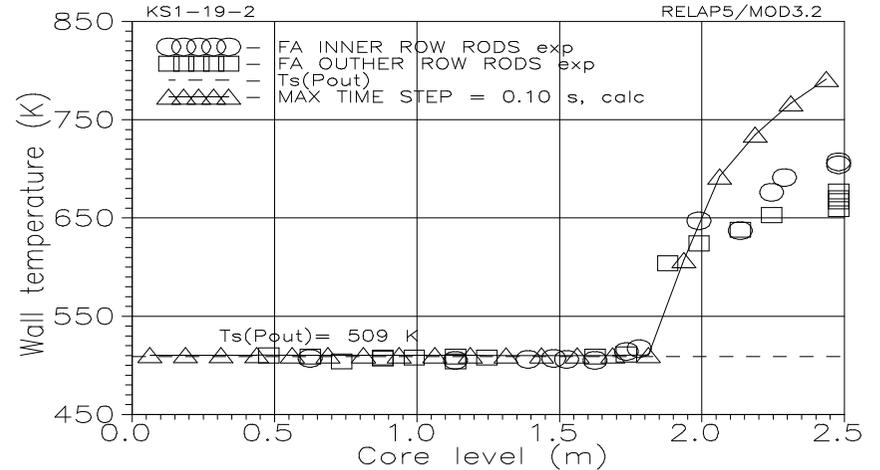
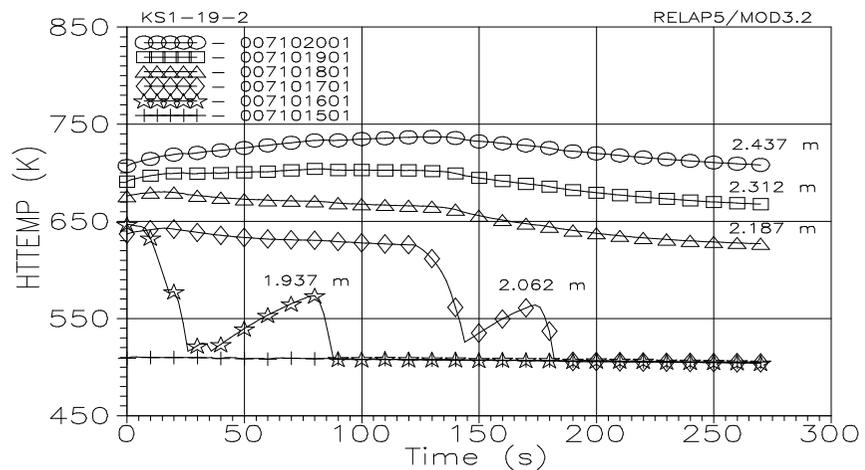
Поведение уровня смеси $Lm(t)$

Experiment KS1-19-2: $W = 12.9 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 31 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.01 \text{ bar/s}$,
 $Lm(t_{0\text{exp}}) \approx 1.78 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{\text{HW1}}=1.0$, $Re_g \approx 1600 - 2000$



Поведение температур TW (texp) в осушенной части ТВС

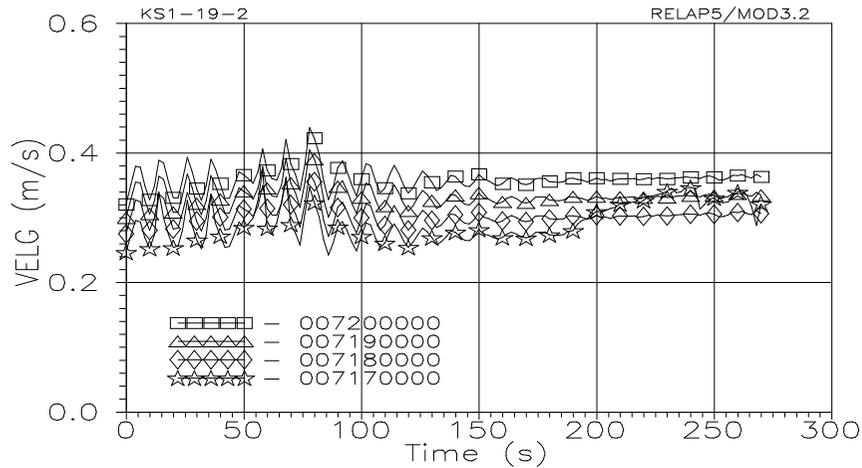
Расчетные TW (tcal) в осушенной части ТВС



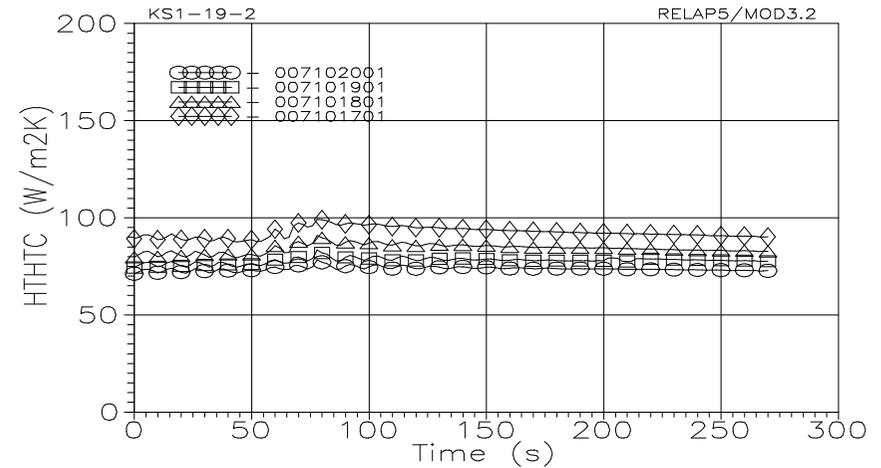
Расчетные TW (tcal) в осушенной части ТВС,
 RESTART со встроенным опытным профилем TW (t0exp)

Профиль температуры TW в момент t0exp

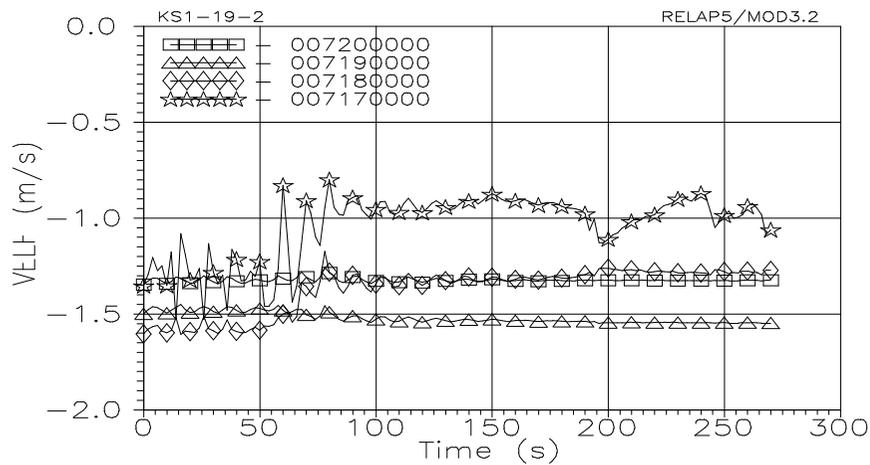
Experiment KS1-19-2: $W = 12.9 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 31 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.01 \text{ bar/s}$,
 $Lm(t_{0\text{exp}}) \approx 1.78 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{\text{HW1}}=1.0$, $Re_g \approx 1600 - 2000$



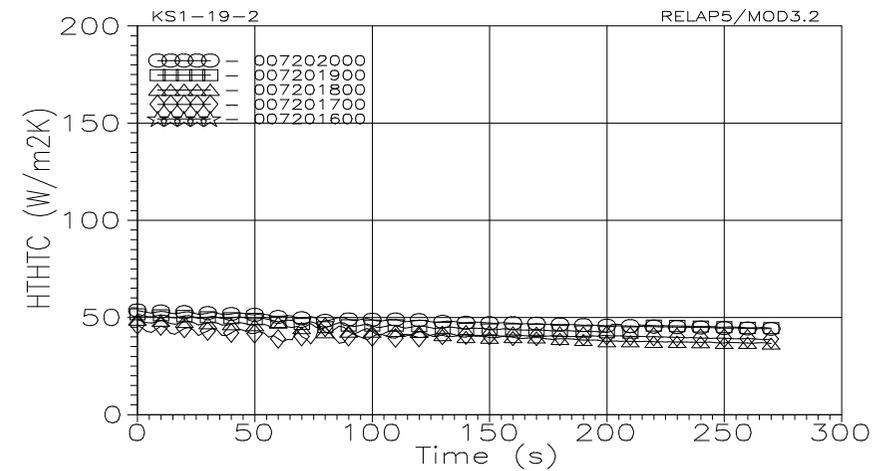
Поведение скорости пара $V_g(t)$



Коэффициент теплоотдачи $H_{w1}(tcal)$

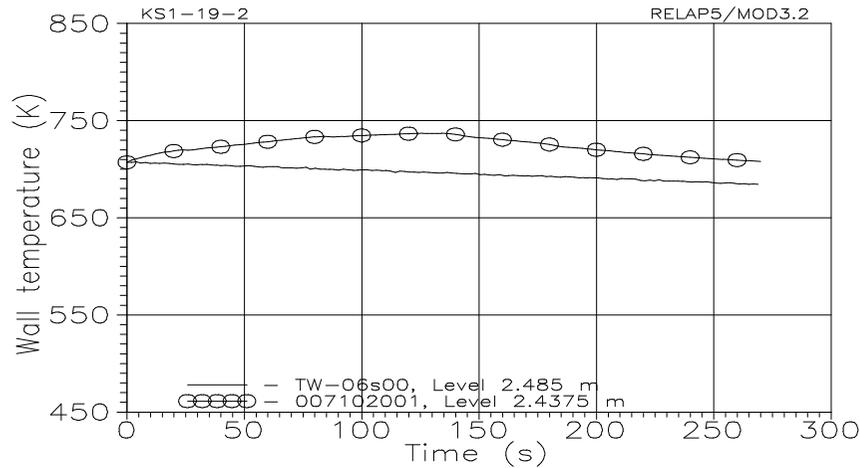


Поведение скорости жидкости $V_L(tcal)$

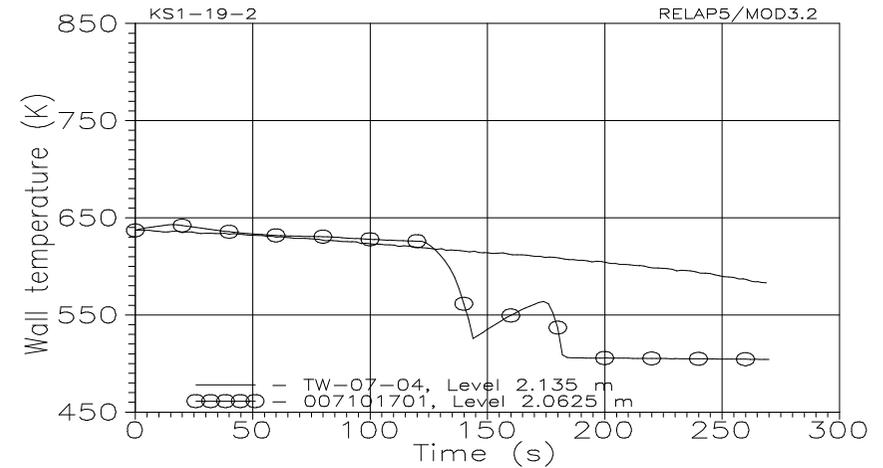


Коэффициент теплоотдачи $H_{w2}(tcal)$

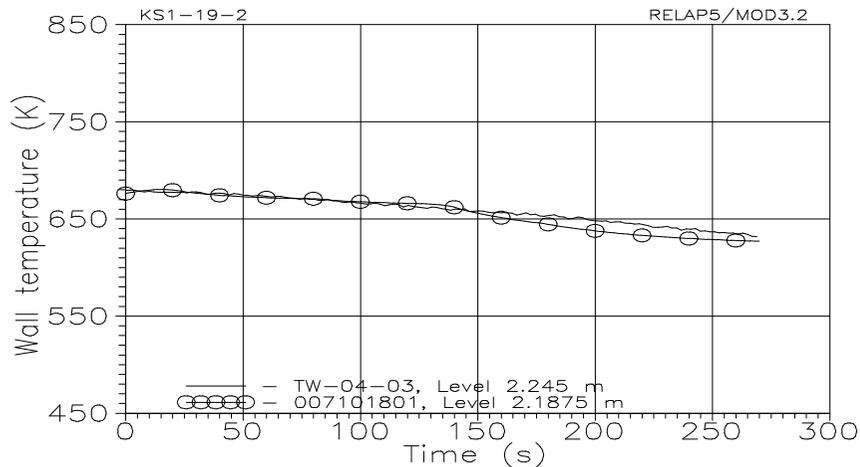
Experiment KS1-19-2: $W = 12.9 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 31 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.01 \text{ bar/s}$,
 $L_m(t_{0\text{exp}}) \approx 1.78 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{\text{HW1}}=1.0$, $Re_g \approx 1600 - 2000$



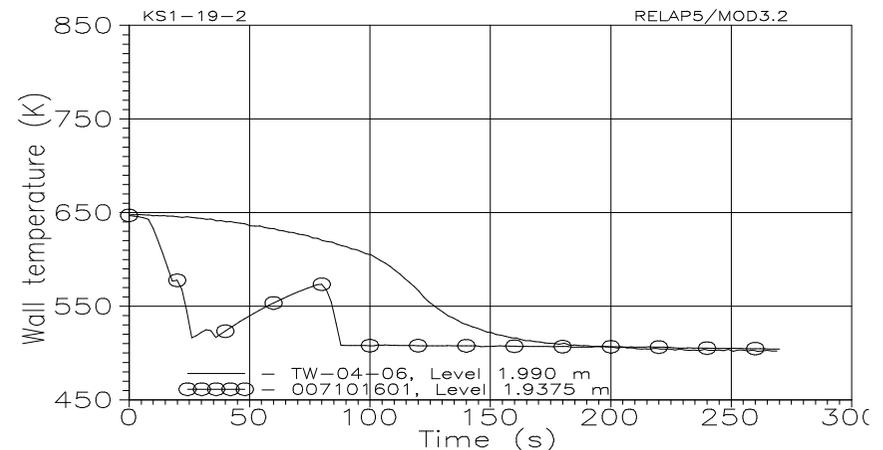
TW (t) макс в на уровне L = 2.485 м



TW (t) на уровне L = 2.135 м

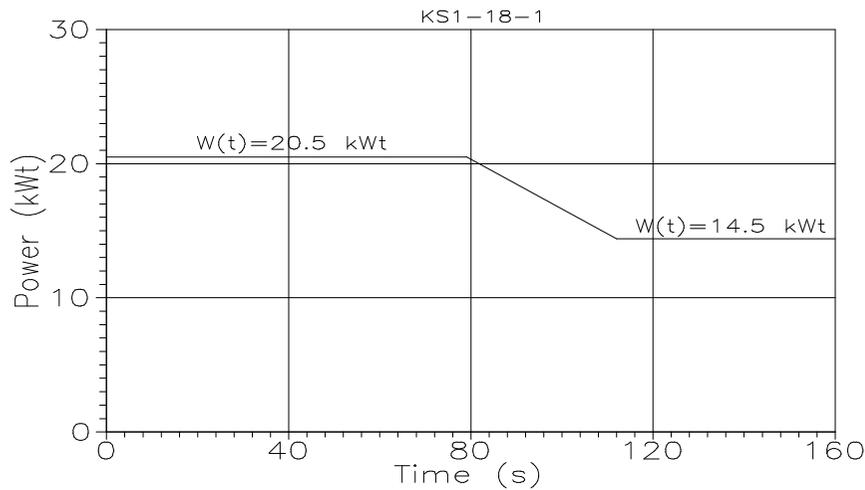


TW (t) на уровне L = 2.245 м

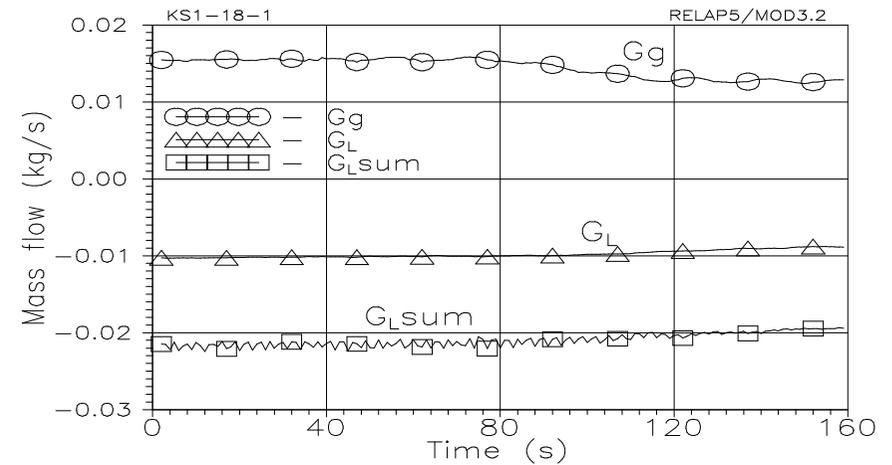


TW (t) на уровне L = 1.990 м

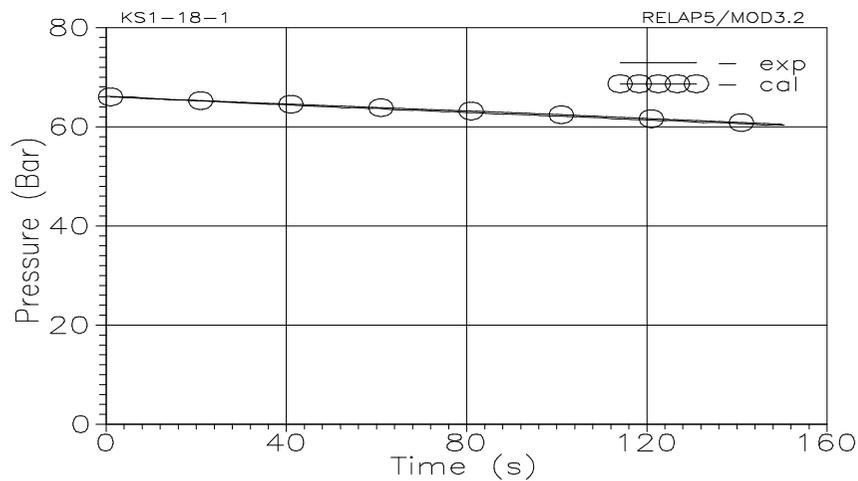
Experiment KS1-18-1: $W(t_{0exp}) = 20.5 \text{ kWt}$, $P_{out}(t_{0exp}) = 66 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0,04 \text{ bar/s}$,
 $Lm(t_{0exp}) = 1.625 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{HW1}=1.0$, $Re_g \approx 3000 - 3900$



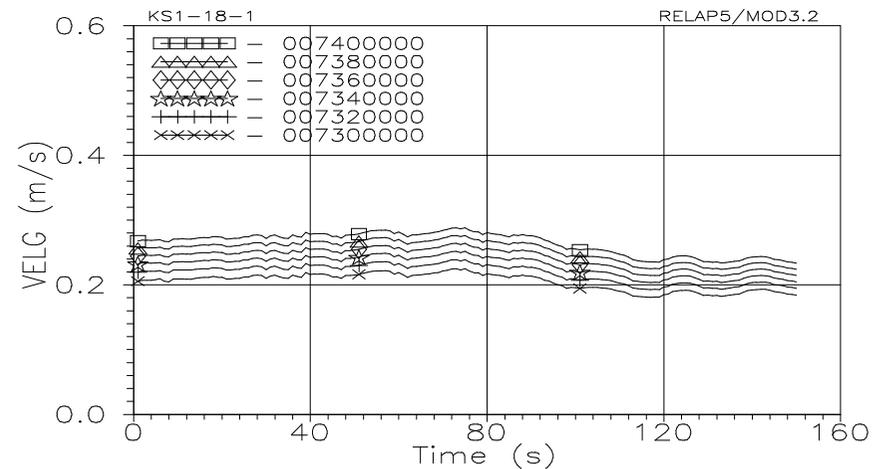
Поведение мощности $W(t)$



Расходы G_g (tcal) и G_L (tcal) на выходе ТВС и G_L sum (tcal)

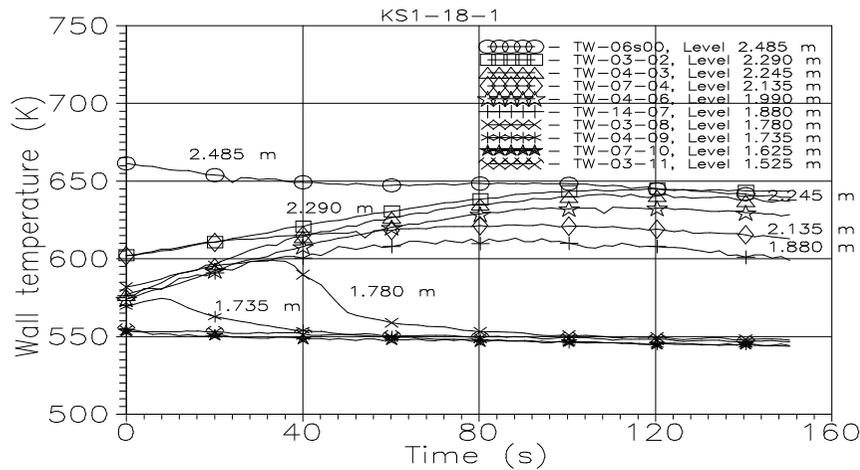


Поведение давления $P_{out}(t)$

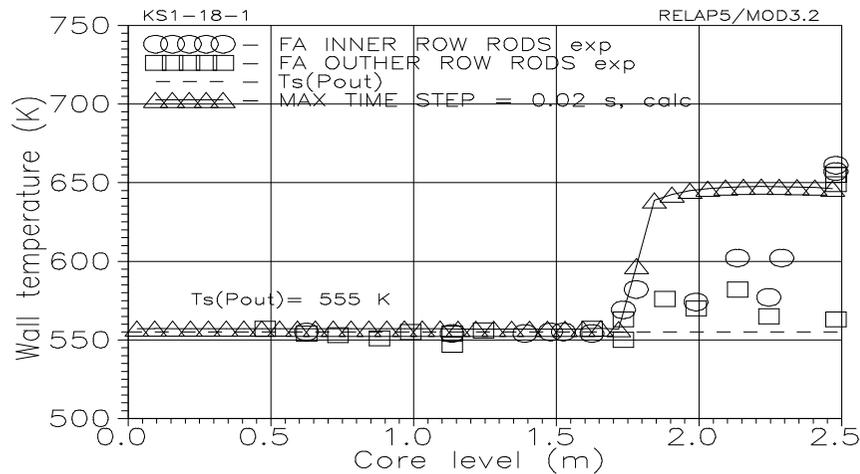


Скорость пара $V_g(t)$ в осушенной части ТВС

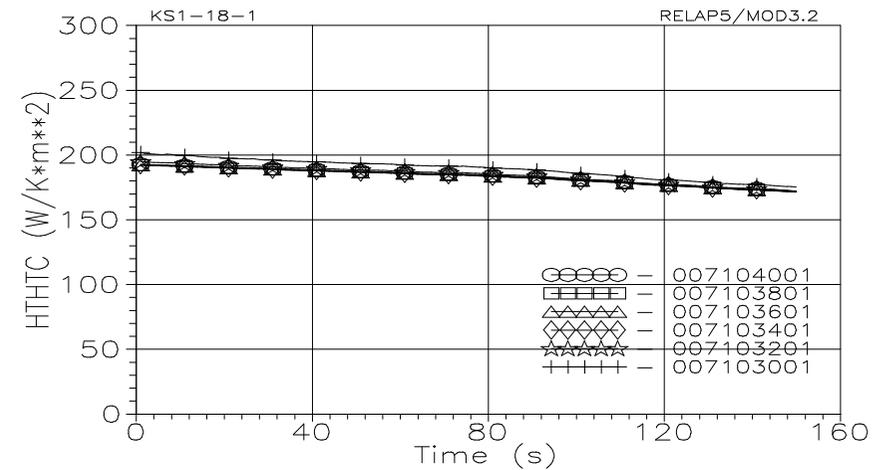
Experiment KS1-18-1: $W(t_{0exp}) = 20.5 \text{ kWt}$, $P_{out}(t_{0exp}) = 66 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.04 \text{ bar/s}$,
 $Lm(t_{0exp}) = 1.625 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{HW1}=1.0$, $Re_g \approx 3000 - 3900$



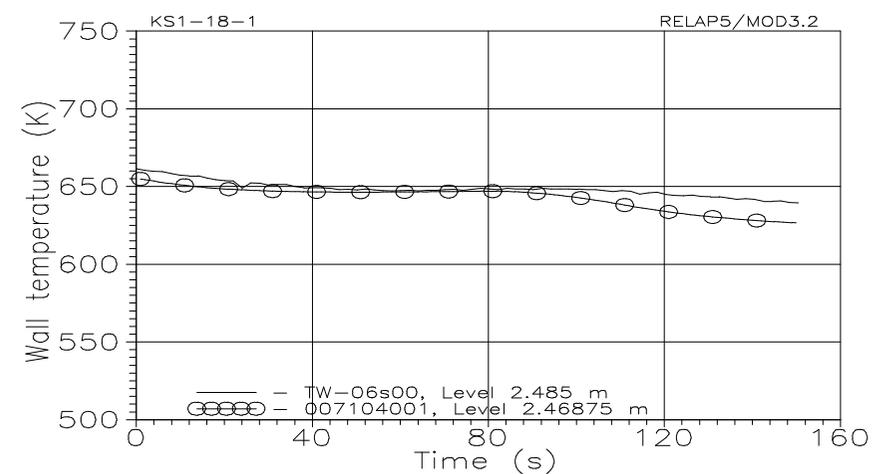
Поведение TW (texp) в осушенной части ТВС



Профиль температуры TW в момент t0exp

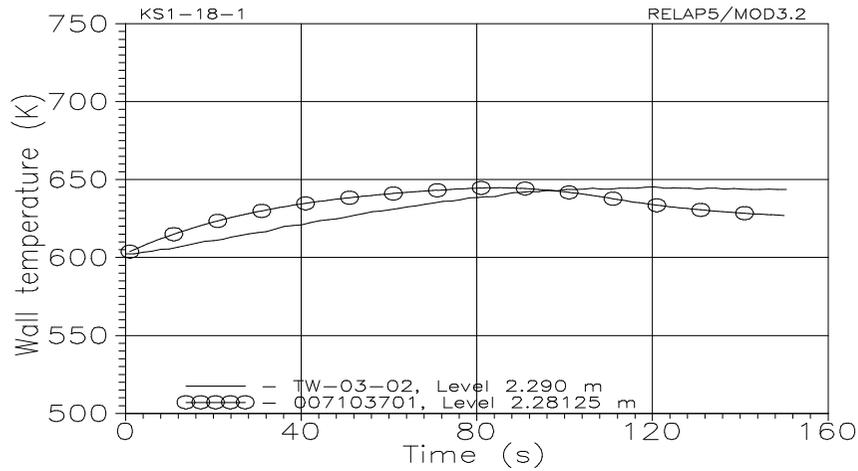


Коэффициент теплоотдачи Hw1 (tcal)

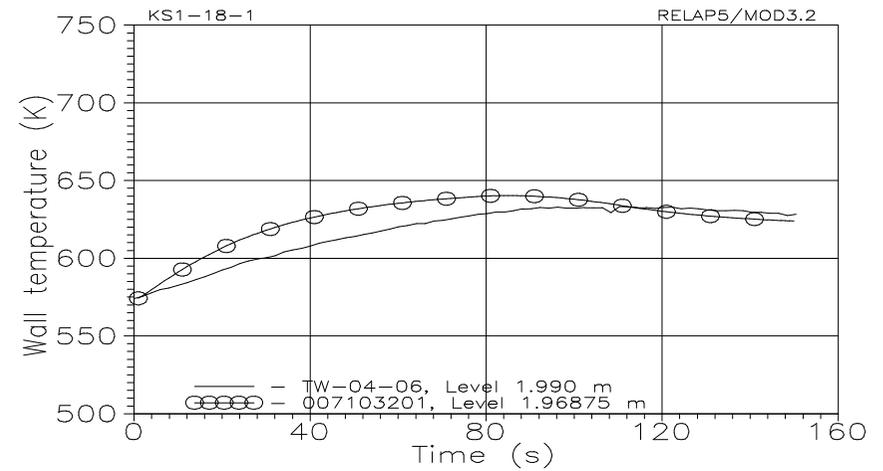


TW (t) max в на уровне L = 2.485 м

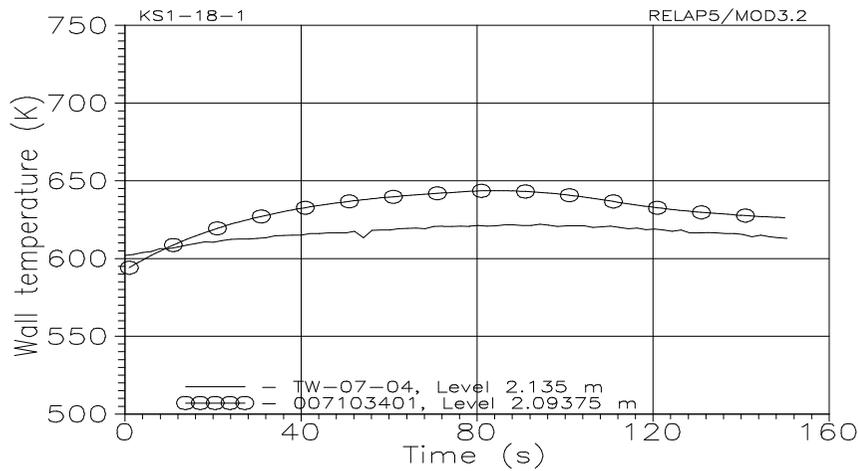
Experiment KS1-18-1: $W(t_{0exp}) = 20.5 \text{ kWt}$, $P_{out}(t_{0exp}) = 66 \text{ bar}$, $dP/dt \approx -0.04 \text{ bar/s}$,
 $Lm(t_{0exp}) = 1.625 \text{ m}$, $dL/dt \approx 2 \text{ mm/s}$, fouling factor $K_{HW1}=1.0$, $Re_g \approx 3000 - 3900$



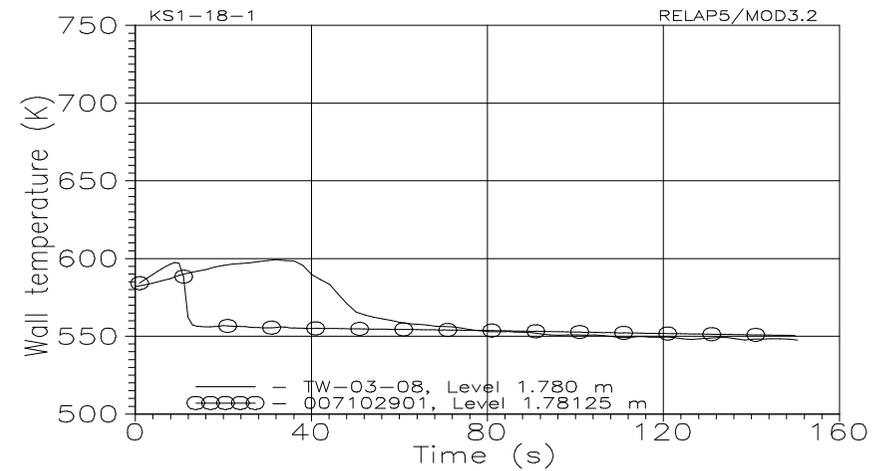
TW (t) на уровне L = 2.290 м



TW (t) на уровне L = 1.990 м

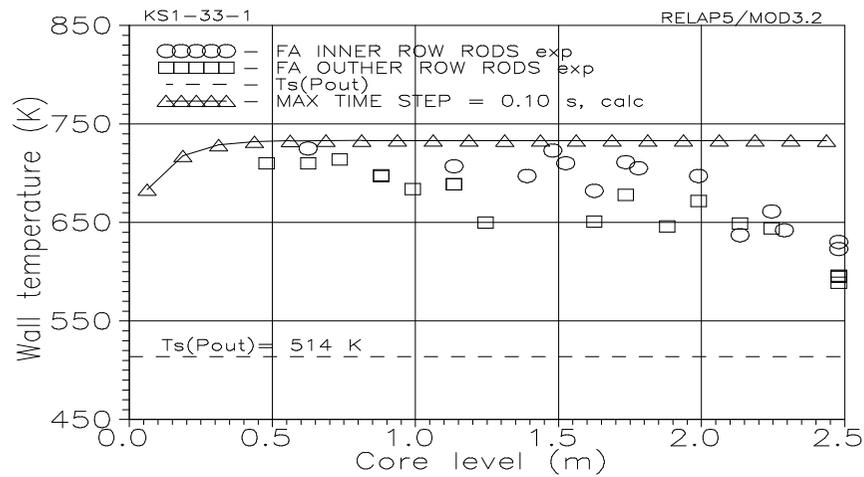


TW (t) на уровне L = 2.135 м

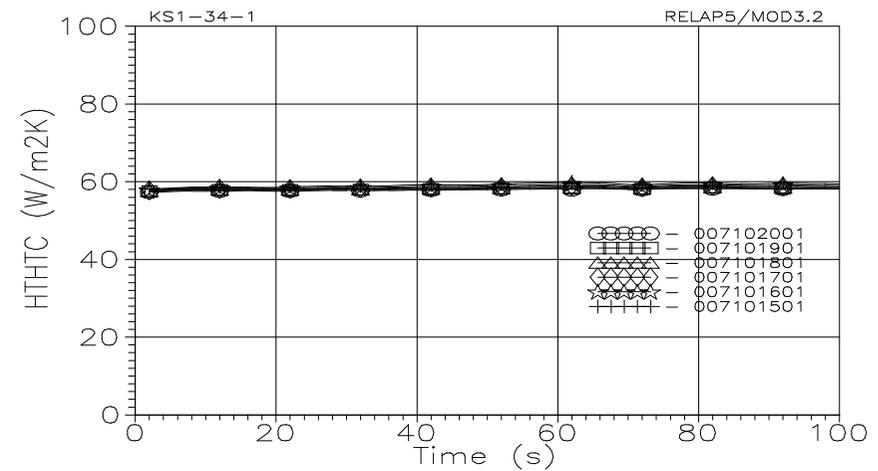


TW (t) на уровне L = 1.780 м

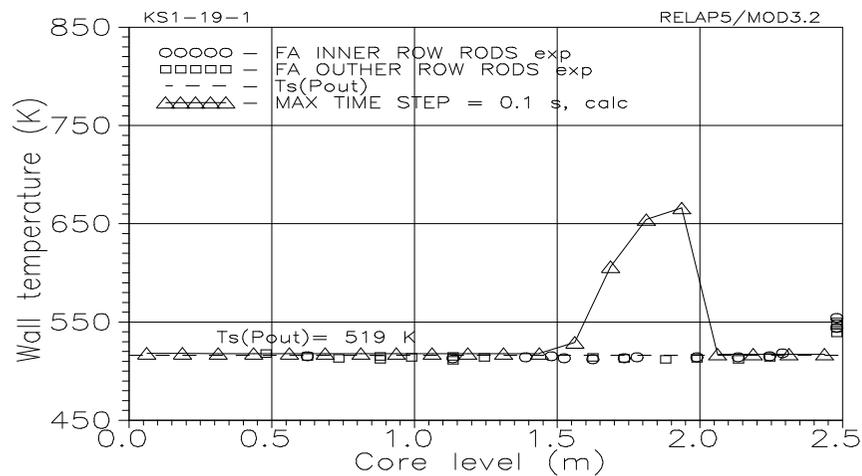
Experiment KS1-33-1: $W = 9.6 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 31 \text{ bar}$, $L_m(t_{0\text{exp}}) < 0$, $Re_g \approx 160 - 320$
 Experiment KS1-34-1: $W = 9.4 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}}(t_{0\text{exp}}) = 34 \text{ bar}$, $L_m(t_{0\text{exp}}) = 0.62 \text{ m}$, $Re_g \approx 950 - 1100$



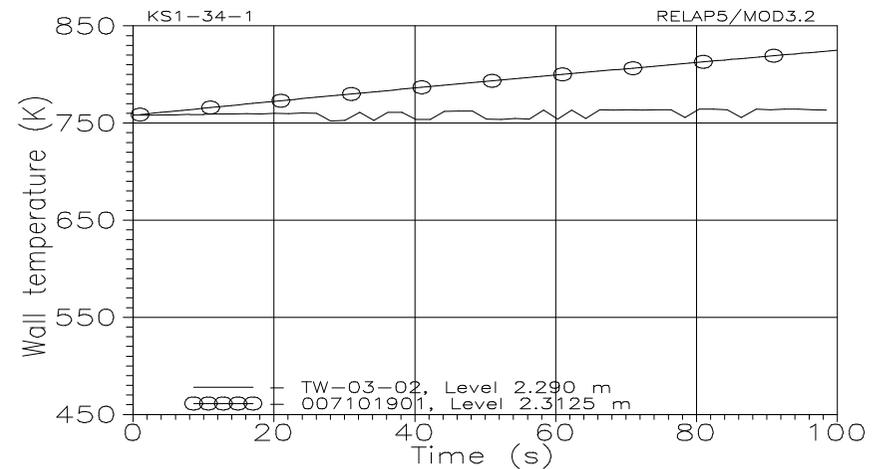
Профиль температуры TW в момент $t_{0\text{exp}}$ в опыте KS1-33-1



Коэффициент теплоотдачи $Hw1$ (tcsl)

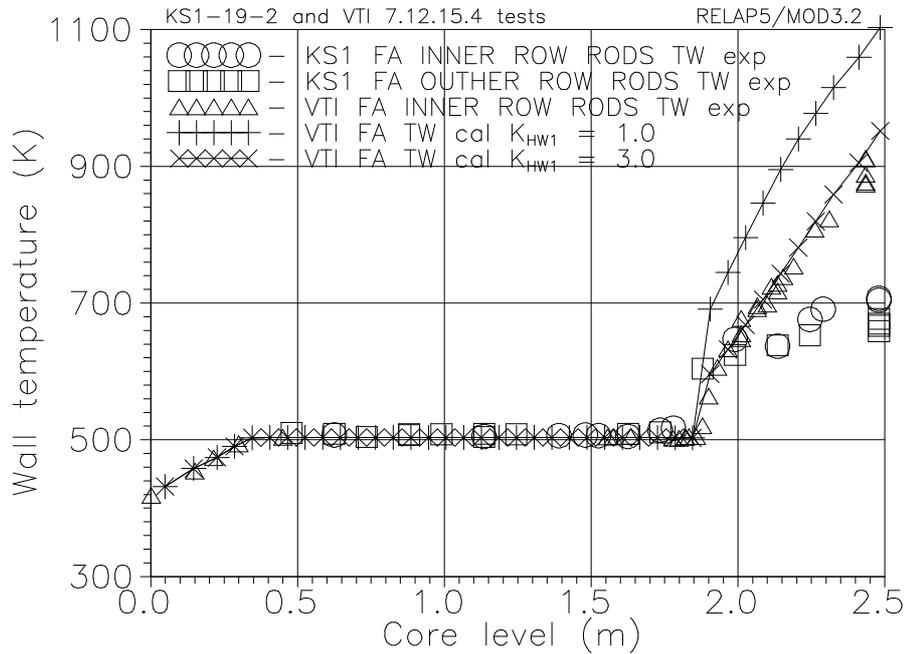


Профиль температуры TW в момент $t_{0\text{exp}}$ в опыте KS1-19-1

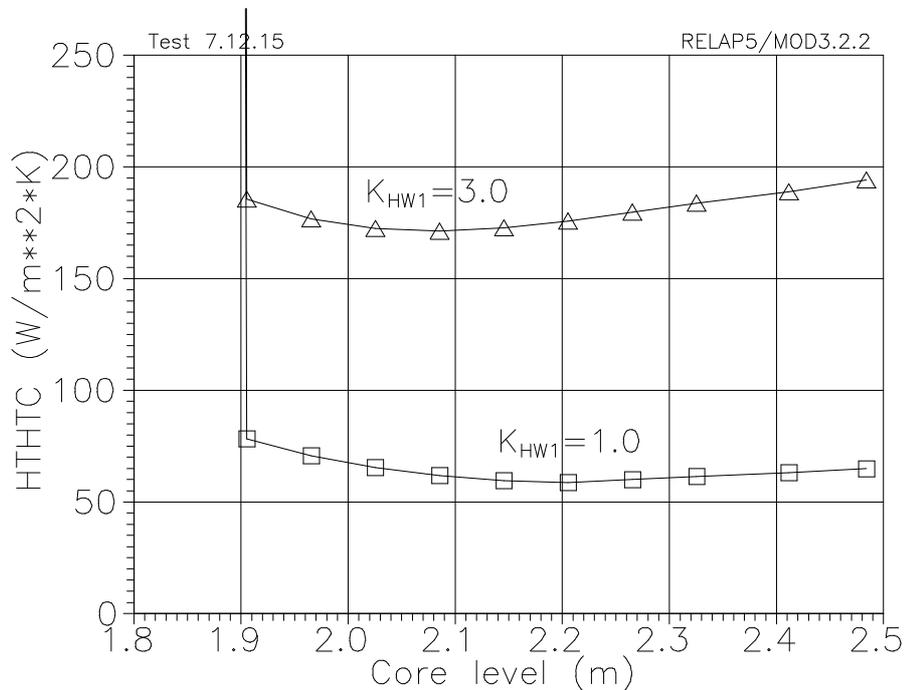


TW (t) на уровне $L = 2.290 \text{ м}$

Experiment VTI 7.12.15.4, stationary regime:
 $W = 16.8 \text{ kWt}$, $P_{\text{out}} = 27.3 \text{ bar}$, $L_m = 1.87 \text{ m}$,
 $Re_g \approx 1650 \rightarrow 850$



Сравнение профиля температуры TW(tcsl) с опытными данными



Сравнение распределений коэффициентов теплоотдачи H_{w1} (tcsl)