

Киевский институт "Энергопроект"

Д.В.Шевелёв

**Возможность предсказания 3-мерных эффектов  
в рамках 1-мерных кодов  
и их значимость при выполнении  
детерминистических анализов безопасности  
реакторов типа PWR  
(на примере оценки  
конвективных массо- и теплопереноса  
внутри КД ВВЭР  
при помощи кода RELAP5 Mod3.2)**

Киев - 2002

## Введение. Постановка задачи. Модели КД

В настоящее время при выполнении детерминистических анализов безопасности РУ применяются в основном расчетные программы, построенные на одномерном по пространственной координате приближенном описании гидродинамики (так наз. 1D-коды). РУ представлена как система связанных объемов, каждый из которых имеет выделенное направление от "входа" к "выходу", и в записи исходных уравнений гидродинамики в явном виде присутствует лишь одна проекция скорости каждой из фаз (жидкость, пар) на выделенное направление. Такой подход полностью адекватен гидродинамике течений в трубах или каналах, где поперечная пространственная структура поля скоростей достаточно проста и сравнительно легко учитываема дополняющими полуэмпирическими соотношениями, или корреляциями. Описанное выше модельное ограничение не является принципиальным также для малоподвижной (покоящейся) жидкости в гравитационном поле в случае устойчивой стратификации, когда температура среды в объеме либо постоянна, либо возрастает (а плотность - убывает) с высотой, а перенос энергии в последнем случае определяется коэффициентом теплопроводности среды и градиентом температуры.

В то же время существуют по меньшей мере две ситуации, когда вышеуказанные модельные представления в их изначальном виде физически некорректны. Во-первых, это ситуация с сильным турбулентным перемешиванием двухфазной среды при относительно малых осредненных "продольных" скоростях, что имеет место, в частности, в горизонтальных парогенераторах, применяемых в составе РУ типа ВВЭР. Данный вопрос неоднократно обсуждался в литературе и к настоящему времени относительно хорошо исследован, хотя нельзя еще утверждать, что наши знания здесь являются исчерпывающими.

Второй класс процессов изучен в гораздо меньшей степени, поскольку не столь характерен для РУ, работающей на мощности. Речь идет о поведении макроскопически неподвижной (в смысле 1D-приближения), недогретой до кипения жидкости в вертикальном широком сосуде (трубе), температура в которой с высотой уменьшается. Примером такой системы является компенсатор давления ВВЭР (или PWR). Типичная конструкция КД ясна из рис.1, при этом характерное значение радиуса  $R$  сосуда составляет 1,0-1,5м, а высота  $H$  - несколько более 10м. В режиме "холодного" останова давление первого контура  $\sim 1.8$  МПа, необходимое для бескавитационной работы ГЦН, создается при помощи "азотной подушки" в КД, а температура теплоносителя первого контура находится в пределах от  $+20^{\circ}\text{C}$  ( $293.15\text{K}$ ) до  $+95^{\circ}\text{C}$  ( $268.15\text{K}$ ). Иными словами, КД заполнен теплоносителем с недогревом до кипения не менее чем  $120^{\circ}\text{C}$ . Как известно, одним из потенциально опасных для целостности первого контура является режим "холодной переопрессовки", т.е. превышение предельно допустимого по условиям хрупкой прочности давления. Среди исходных событий такого режима может быть ложное включение ТЭНов. Поскольку ТЭНы расположены в нижней части КД, инверсия температуры возникает очень быстро.

Инверсия температуры возможна и при работе на мощности при положительных объемных возмущениях т/н 1-го контура, когда в нижнюю часть КД поступает теплоноситель с недогревом до кипения  $\sim 25\text{K}$  и более. Кроме того, как нетрудно понять, конвективное перемешивание теплоносителя в любом случае приводит к росту абсолютного значения разности температур на границе со стенками сосуда, интенсифицируя тем самым процесс теплообмена, что при работе на мощности увеличивает эффективную теплоемкость КД и тем самым снижает эффективность ТЭНов.

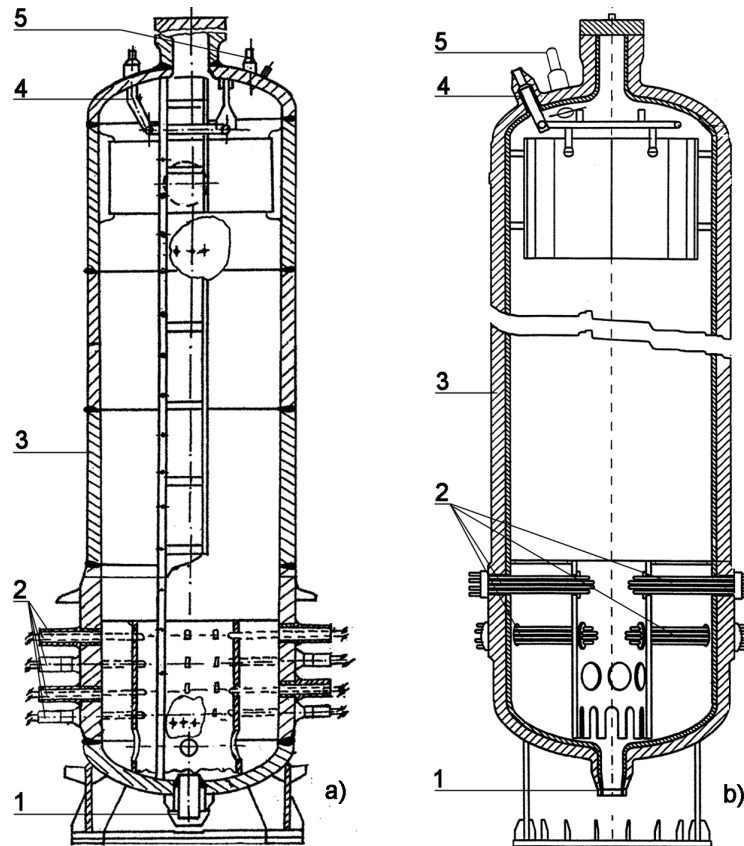


Рис.1

Схематический чертеж компенсатора давления (а – ВВЭР-440, б – ВВЭР-1000):  
 1-патрубок дыхательного трубопровода; 2-ТЭН КД; 3-корпус; 4-система впрыска т/н;  
 5-патрубок ИПУ КД;

В [1] теоретически рассмотрена устойчивость жидкости в вертикальной цилиндрической трубе кругового сечения при заданном вертикальном градиенте температуры для двух предельных случаев граничных условий: а) идеально теплопроводящие стенки, б) идеально теплоизолирующие стенки. Показано, что существует предельное значение  $\mathfrak{R}_c$  числа Рэлея (Rayleigh), определяющее порог устойчивости жидкости:

$$\mathfrak{R} = \frac{g\beta AR^4}{\chi\nu}, \quad (1)$$

где

$g = 9.807$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения,

$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  – температурный коэффициент объемного расширения (1/К),

$A = -\frac{dT}{dz}$  – вертикальный градиент температуры (°С /м, К/м),

$R$  – внутренний радиус сосуда (м),

$\chi = \frac{\kappa}{\rho C_p}$  – температуропроводность (м<sup>2</sup>/с),  $\kappa$  – теплопроводность,

$\rho$  – плотность жидкости (кг/м<sup>3</sup>),

$C_p$  – удельная теплоемкость жидкости (Дж/(кг×°С), Дж/(кг×К)),

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости (м<sup>2</sup>/с).

Параметры  $\chi$  и  $\nu$  связаны соотношением:  $Pr = \chi/\nu$ , где  $Pr$  – число Прандтля.

В случае "а" критическое значение  $\mathfrak{R}_c = 216$ , в случае "б"  $\mathfrak{R}_c = 68$ .

Из (1) определим пороговое значение вертикального градиента температуры:

$$A_c = \frac{\chi \nu \mathfrak{R}_c}{g \beta R^4}. \quad (2)$$

Подставив геометрические размеры (радиус КД) и численные значения параметров для воды при  $+20^{\circ}\text{C}$  ( $293.15\text{K}$ ):

$$\rho = 0.998 \times 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

$$Pr = 6.75,$$

$$\nu = 1.0037 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ а следовательно,}$$

$$\chi = 6.775 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\beta = 2.1 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1},$$

запишем (2) в виде:

$$A_c = 3.302 \times 10^{-5} \times \frac{\mathfrak{R}_c}{R^4} \text{ (}^{\circ}\text{C/м, К/м)}. \quad (2a)$$

Для реактора типа ВВЭР-440  $R = 1.20\text{м}$ . Тогда предельные значения градиента температуры  $A_c$  для случаев "а" и "б" равны соответственно  $3.44 \times 10^{-3} \text{ К/м}$  и  $1.083 \times 10^{-3} \text{ К/м}$ . В силу малости коэффициента теплопроводности воды по отношению к стали, реальный КД ближе к случаю "а", и предельное значение вертикального градиента составит  $\sim 3.4 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/м}$  (К/м).

Таким образом, силы плавучести, возникающие вследствие положительного коэффициента теплового расширения воды, играют дестабилизирующую роль, и состояние покоя жидкости неустойчиво уже при крайне малых отрицательных вертикальных градиентах температуры. Как результат, в реальном КД устанавливается развитая конвекция, обеспечивающая практически весь теплоперенос внутри жидкости и далее – к азоту в верхней части КД, а также определяющая теплообмен между т/н и стенками корпуса КД.

Иначе протекают процессы в экспериментальных установках, выполненных в масштабе 1:s по отношению к РУ-прототипу. В настоящее время для большинства экспериментальных установок величина s лежит в пределах от 48-100 (напр. BETHSY, PKL-III, LOFT, LSTF) до  $\geq 700-1000$  (LOBI-II, SEMISCALE и т.п.). При масштабировании, для корректного отражения величин потоков массы и энергии, разность высотных отметок остается неизменной, а масштабированию подвергаются площади горизонтальных сечений, т.е. радиус модели КД по отношению к реальному:

$$R_s = R / \sqrt{s},$$

а значит, в соответствии с (2a),

$$A_{cs} = A_c \times s^2$$

Например, для  $s=100$  получим  $A_{cs} \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C/м}$  (К/м), что по порядку величины уже соизмеримо с наблюдаемыми в экспериментах отрицательными вертикальными градиентами, а чаще превышает их. Иными словами, в эксперименте за счет "эффектов масштаба" (scaling effects) роль конвекции в массо- и теплопереносе в КД весьма незначительна.

В большинстве расчетных моделей для программы RELAP5 до последнего времени применялась нодализация КД (рис.2а), где КД представлен как вертикальная труба со значительным (обычно порядка 10-ти) числом расчетных объемов. Очевидно, что указанные выше модельные ограничения не дают возможности учета конвективного массо- и теплопереноса, т.к. в каждом из расчетных объемов поле скоростей жидкости должно быть неоднозначным. Проведенные на данной модели расчеты упомянутого выше переходного процесса давали разумные для тонких трубок, но нефизичные для сосудов большого диаметра значения вертикального градиента температуры порядка  $50 \dots 150 \text{ К/м}$ ; при этом теплообмен обеспечивался за счет кипения жидкости в объеме, куда был направлен поток тепла (т.е. расположены ТЭНы), с конденсацией образующегося пара в вышележащих слоях недогретой до кипения воды. Иными словами, модель, будучи приемлемой для установок с

масштабом ~ 1:100 и менее, не отражает физику процессов, происходящих в реальном КД. Учитывая ту роль, какую играет КД в управлении параметрами РУ, возникли сомнения в возможности адекватного выполнения анализа безопасности по меньшей мере для вполне определенной, вышеупомянутой группы переходных процессов. Учитывая подход, применяемый при описании горизонтального ПГ, нами была рассмотрена альтернативная модель, представленная на рис. 2b. Кроме того, рассматривались аналогичные модели, но с "загрубленным" разбиением по высоте (см. соответственно 2c и 2d).

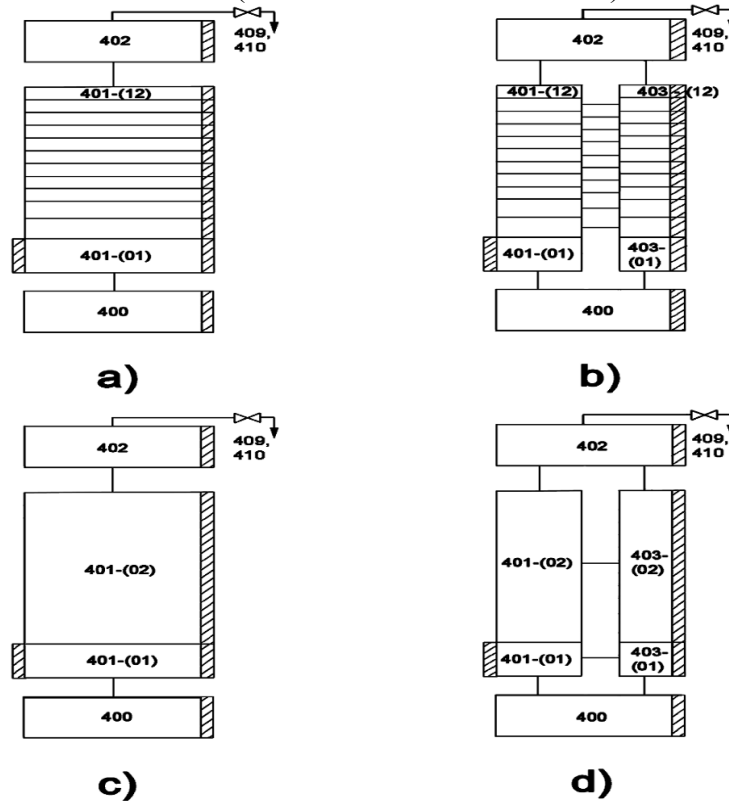


Рис.2

Принятые в сравнительных анализах модели КД:

a)- исходная (old); b)- модифицированная (new);

c)- исходная упрощенная (old simpl.); d)- модифицированная упрощенная (new simpl.).

Надписи в скобках применены для идентификации расчетных кривых на прилагаемых графиках зависимости параметров модели от времени (см. ниже).

Исходная модель КД (Рис.2a) представляет собой три элемента, расположенных друг над другом и соединенных связями.

Верхний (402) и нижний (400) элементы – типа BRANCH (т.е. объем заданной геометрии с присоединенными к нему связями), средний (401) – типа PIPE, т.е. система последовательно соединенных друг с другом расчетных объемов. Геометрия каждого объема задается его поперечным сечением  $S$ , длиной  $L$  и объемом  $V$ , причем эти три величины всегда связаны соотношением

$$S \times L = V,$$

так что пользователю достаточно задать любые две из них.

Параметры элементов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

№ элемента	Сечение S, м <sup>2</sup>	Длина L, м	Объем V, м <sup>3</sup>	Высота верхней границы от днища, м	Высота центра, м	Примечание
400-01	3.625	0.71	S×L=2.574	0.71	0.355	
401-01	4.50	1.34	S×L	2.05	1.38	Зона нагревателей
401-02	4.50	0.85	S×L	2.90	2.475	
401-03	4.50	0.85	S×L	3.75	3.325	
401-04	4.50	0.50	S×L	4.25	4.00	
401-05	4.50	0.50	S×L	4.75	4.50	
401-06	4.50	0.50	S×L	5.25	5.00	
401-07	4.50	0.50	S×L	5.75	5.50	
401-08	4.50	0.50	S×L	6.25	6.00	
401-09	4.50	0.50	S×L	6.75	6.50	
401-10	4.50	0.50	S×L	7.25	7.00	
401-11	4.50	1.125	S×L	8.375	7.8125	
401-12	4.50	1.125	S×L	9.50	8.9375	
402-01	3.625	0.71	S×L	10.21	9.855	

При построении модифицированной модели вертикальный цилиндрический участок (401) был заменен на 2 параллельных канала (элементы типа PIPE), которые условно можно назвать подъемным ("riser", 401) и опускным ("downcomer", 403). Как и ранее, каждый из них соединен снизу с элементом 400 (район нижнего эллиптического днища), а сверху – с элементом 402 (верхнее эллиптическое днище). Кроме того, соответствующие объемы параллельных каналов соединены поперечными горизонтальными связями. Определенный произвол существовал в выборе отношения сечений и объемов элементов 401 и 403. Поскольку в области отношений объемов от 1:1 до 5:1 предварительными расчетами было обнаружено весьма несущественное расхождение получаемых результатов (т.н. "низкая чувствительность"), для определенности было принято отношение сечений 3:1, т.е. 75% объема приходилось на элемент 401 ("riser") и 25% - на элемент 403 ("downcomer").

Были выполнены сравнительные расчеты поведения как отдельно старой и новой моделей КД (так наз. сепаратный тест), так и РУ в целом (интегральный тест), подтвердившие не только количественные, но в ряде случаев и качественные отличия получаемых выводов. Далее приведены сценарии наиболее характерных процессов, для которых проводилось сравнение.

## 1. Сепаратный тест. Состояние "холодный останов". Сценарий с включением ТЭНов.

Система во всех случаях приводится в начальное квазистационарное состояние в соответствии с Таблицей 1.1.

Таблица 1.1

Параметр	Значение	Примечание
Температура воды в КД, К	348	
Уровень воды в КД, м	8.04	
Давление азотной подушки, МПа	1.68	
Температура азота, К	350	
Давление открытия/закрытия 1-го ИПУ КД, МПа	4.8/3.0	модель
Давление открытия/закрытия 2-го ИПУ КД, МПа	4.9/3.1	модель
Суммарная мощность ТЭНов КД (5 групп), МВт	1.62	
Полный объем барботера, м <sup>3</sup>	15.0	
Объем воды в барботере, м <sup>3</sup>	11.0	
Температура воды в барботере, К	323	
Давление в барботере, МПа	0.0124	насыщенный водяной пар
Давление разрыва мембраны барботера, МПа	1.42	
Температура воздуха вне КД (в гермообъеме), К	303	

Затем включаются ТЭНы суммарной мощностью 1.62 МВт. По мере нагрева воды, а затем и азота, происходит рост давления газовой подушки в КД и одновременно некоторое уменьшение ее объема, связанное с тепловым расширением воды. При достижении давлением уставки открытия ИПУ происходят его периодические срабатывания со сбросом парогазовой смеси в барботажный бак. Азотная подушка в КД постепенно замещается паровой, а масса и уровень находящегося в нем теплоносителя (воды) уменьшаются. В силу значительного реального времени процесса, расчет выполнен не до практически полного выкипания воды (что соответствовало бы оголению ТЭНов реального КД с их разрушением), а лишь до существенного снижения ее массы, находящейся в объеме КД. Практически рассмотренный временной интервал составил около 8 часов реального времени, и является достаточным для понимания всех стадий моделируемого процесса в каждом из вариантов. Временные зависимости наиболее существенных параметров модели приведены на Рис. 1.1-1.9.

Прежде всего следует отметить качественное различие в распределении температуры воды по высоте КД. В исходной модели жидкость в смежных расчетных объемах прогревается последовательно, теплообмен обеспечивает за счет кипения жидкости в нижележащем объеме, первоначально - где расположены ТЭНы, с конденсацией образующегося пара в вышележащих слоях воды, существенно недогретой до кипения. Таким образом, зона кипения распространяется снизу вверх. В то же время новая модель показывает установление развитого конвективного перемешивания жидкости, с вертикальным градиентом температуры  $\sim 1$  К/м, тогда как рассчитанный по старой модели вертикальный градиент температуры в жидкостном объеме КД, особенно в верхней его части, достигает значения  $\sim 150$  К/м. Очевидно, что при снижении шага дискретизации мы получим нечто вроде сравнительно тонкого движущегося "фронта кипения" плоской формы, отделяющего пароводяную смесь под ним от недогретой до кипения жидкости над ним. Последняя представляет собой нечто вроде "поршня", сжимающего "азотную подушку". При первом же срабатывании ИПУ КД жидкость под "поршнем" интенсивно вскипает, а часть недогретого теплоносителя выбрасывается из КД с азотом. Интегральная величина выброшенной массы при первом срабатывании ИПУ составляет около 3500кг, против  $\sim 100$ кг азота согласно модифицированной модели. Применительно к реальной РУ, это означает гораздо более жесткие расчетные условия работы подвижных элементов ИПУ, а также прочностные требования к паросбросному трубопроводу, нежели реально необходимые.

В то же время новая модель показывает более **раннее** время открытия ИПУ, поскольку, после достижения теплоносителем температуры насыщения, давление в паровом объеме растет не только за счет сжатия азота, но и его непосредственного нагрева паром, а также роста плотности и парциального давления самого пара.

Попытка снизить эффект отсутствия конвекции в "старой" модели за счет "грубой" вертикальной нодализации (что в соответствии с приближением сосредоточенных параметров в RELAP5/Mod3.2 автоматически предполагает практически полное перемешивание жидкости в расчетных объемах) несколько улучшает предсказание скорости роста давления и времени от включения ТЭНов до первого срабатывания ИПУ, за счет более корректного вычисления температуры т/н вблизи свободной поверхности; в то же время результаты расчета заключительной фазы процесса (выкипание теплоносителя) в части временных характеристик работы ИПУ оказывается полностью искаженной.

В заключение следует отметить, что модифицированная "упрощенная" модель с загрубленным разбиением КД по вертикали, сохраняя качественную адекватность физике процессов, в количественном аспекте (временные характеристики) занимает промежуточное положение между новой и старой "детальными" моделями, оставаясь все же ближе к модифицированному варианту.

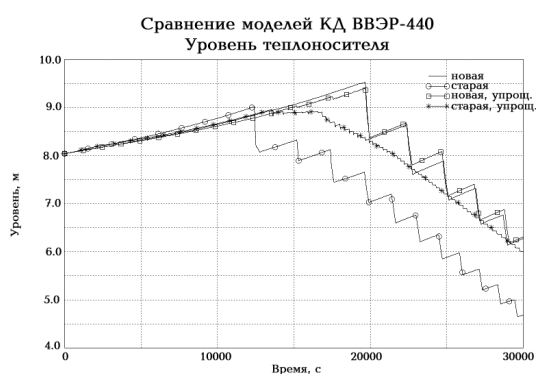


Рис.1.1.

Зависимость массового уровня т/н в КД от времени

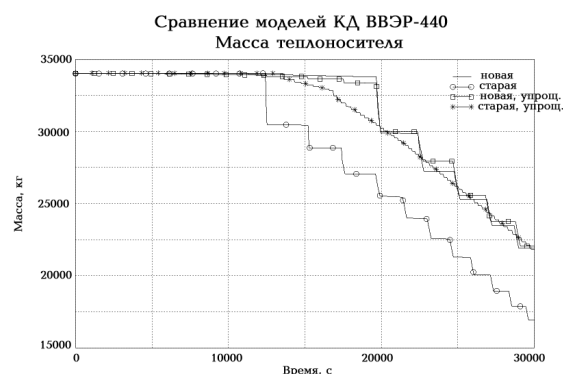


Рис.1.2.

Зависимость массы т/н в КД от времени

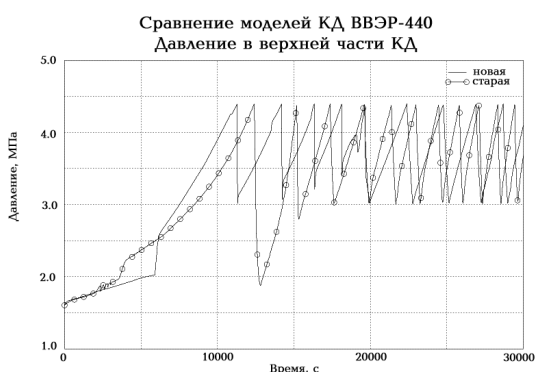


Рис.1.3.

Зависимость давления в КД от времени. "Детальные" модели

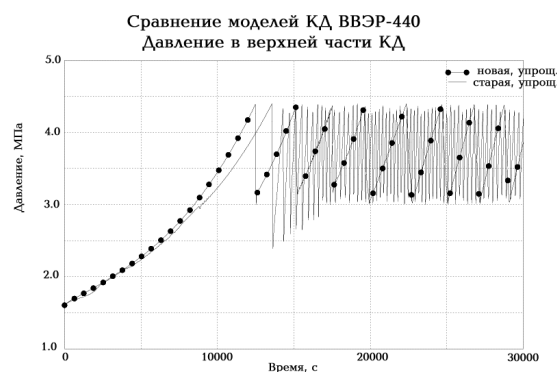


Рис.1.4.

Зависимость давления в КД от времени. "Упрощенные" модели



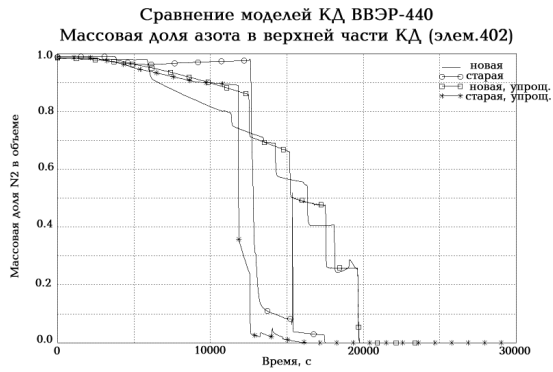


Рис.1.5.

Массовое содержание азота в верхнем объеме КД (элемент 402).

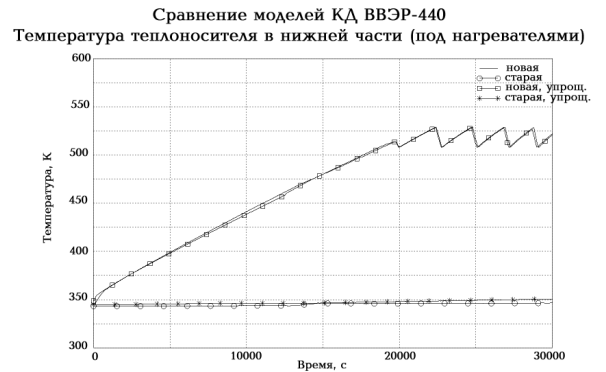


Рис.1.6.

Температура т/н в нижнем объеме КД (элемент 400).

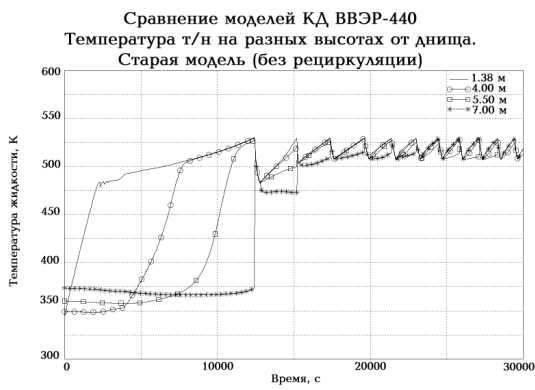


Рис.1.7

Температура т/н в КД на разных расстояниях от дна. Старая модель.

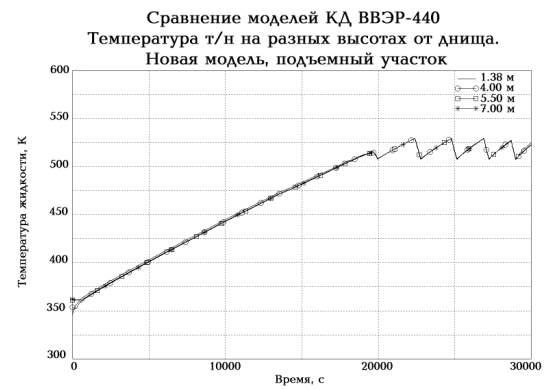


Рис.1.8

Температура т/н в КД на разных расстояниях от дна. Новая модель.

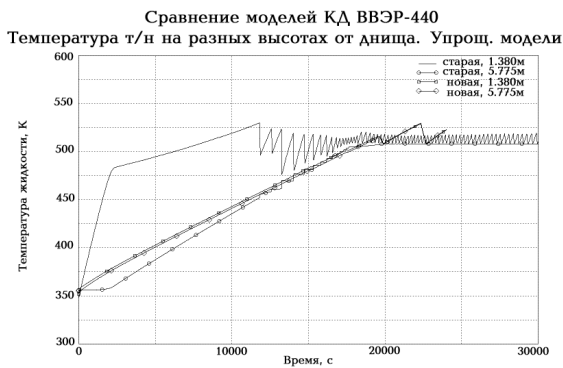


Рис.1.9

Температура т/н в КД на разных расстояниях от дна. Упрощенные модели.

## 2. Интегральный тест. Работа на мощности. Сценарий с кратковременным частичным сбросом нагрузки турбины.

Для проведения расчетов и выполнения сравнительного анализа был выбран переходной режим на РУ ВВЭР-440, вызванный частичным кратковременным сбросом мощности турбогенератора. Частичный кратковременный сброс мощности турбины может произойти вследствие внезапного отключения одного или нескольких мощных потребителей.

При расчете были приняты начальные и граничные условия, приведенные в Таблице 2.1.

Таблица 2.1

Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	1402 (102%)
Температура теплоносителя:	
• на входе в реактор, °С (К)	269 (542)
• на выходе из реактора при шести работающих ГЦН, °С (К)	297 (570)
Давление в первом контуре, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	126,5 (12,4)
Давление во втором контуре, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	46,5 (4,56)
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	39200
Уровень в КД, м	6,26
Давление пара перед турбиной, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	43,5 (4,26)
Общий расход пара на турбины, кг/с	764

Перечень технологических сигналов и защитных действий систем безопасности, задействованных в аварийном процессе, вызванном частичным кратковременным сбросом нагрузки турбины, приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Наименование технологического параметра	Защитное действие
1 Блокировки по ТЭН КД	
1.1 Давление в первом контуре 118 кгс/см <sup>2</sup> (11,6 МПа) и менее	Включение V группы ТЭН
1.2 Давление в первом контуре:	
• 121 кгс/см <sup>2</sup> (11,9 МПа) и более	Отключение V группы ТЭН
• менее 121 кгс/см <sup>2</sup> (11,9 МПа)	Включение IV группы ТЭН
1.3 Давление в первом контуре:	
• 122 кгс/см <sup>2</sup> (12,0 МПа) и более	Отключение IV группы ТЭН
• менее 122 кгс/см <sup>2</sup> (12,0 МПа)	Включение III группы ТЭН
1.4 Давление в первом контуре:	
• 123 кгс/см <sup>2</sup> (12,1 МПа) и более	Отключение III группы ТЭН
• менее 123 кгс/см <sup>2</sup> (12,1 МПа)	Включение II группы ТЭН
1.5 Давление в первом контуре:	
• 124 кгс/см <sup>2</sup> (12,2МПа) и более	Отключение II группы ТЭН
• менее 124 кгс/см <sup>2</sup> (12,2МПа)	Включение I группы ТЭН
1.6 Давление в первом контуре 128 кгс/см <sup>2</sup> (12,6 МПа) и более	Отключение I группы ТЭН
1.7 Уровень в КД 2,36 м (от днища) и менее	Отключение всех групп ТЭН
2 Блокировки по клапанам впрыска в КД	
2.1 Давление в первом контуре 127,5 кгс/см <sup>2</sup> (12,5 МПа) и менее	Закрывается первый клапан впрыска

Наименование технологического параметра	Защитное действие
2.2 Давление в первом контуре: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 128,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,6 МПа) и более</li> <li>• менее 128,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,6 МПа)</li> </ul>	Открывается первый клапан впрыска Закрывается второй клапан впрыска
2.3 Давление в первом контуре: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 129,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,7 МПа) и более</li> <li>• менее 129,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,7 МПа)</li> </ul>	Открывается второй клапан впрыска Закрывается третий клапан впрыска
2.4 Давление в первом контуре: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 130,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,8 МПа) и более</li> <li>• менее 130,6 кгс/см<sup>2</sup> (12,8 МПа)</li> </ul>	Открывается третий клапан впрыска УР10S06 Закрывается 4-й клапан впрыска УР10S05
2.5 Давление в первом контуре 132,6 кгс/см <sup>2</sup> (13,0 МПа) и более	Открывается 4-й клапан впрыска УР10S05

Исходное событие приводит к уменьшению расхода пара на турбину. Зависимость расхода пара на турбину от времени представлена на рисунке 2.1.

Дебаланс между расходом пара, потребляемым турбинами, и расходом пара, генерируемым в парогенераторах, вызывает рост давления во втором контуре (рисунок 2.3). Предполагалось, что БРУ-К не открываются (например, вследствие ухудшенного вакуума в конденсаторах турбин), и рост давления в ГПК после достижения давления 5.35МПа ограничивается работой БРУ-А. АРМ восстанавливает баланс между тепловой мощностью, вырабатываемой в активной зоне, и мощностью, отводимой по второму контуру к турбогенераторам, а также компенсирует эффекты реактивности. В результате мощность реактора в начале переходного процесса уменьшается, а затем, после восстановления нагрузки ТГ, возрастает и с 600 секунды начинает стабилизироваться. БРУ-А закрываются после снижения давления в ГПК менее 4.75МПа. Параметры первого контура в начале переходного процесса растут за счет снижения теплоотвода (уменьшения расхода пара из ПГ). Давление в первом контуре (рис. 2.6) резко возрастает и при достижении 12,6 МПа по блокировке срабатывает первый клапан впрыска в КД УР10S08, а затем при достижении давления 12,7 МПа - второй УР10S07, что приводит к падению давления в первом контуре ниже 12.0 МПа. По факту падения давления ниже 12,2 МПа включается I-я, затем II-я и III-я группы ТЭН, в результате давление постепенно повышается, ТЭНы отключаются. По достижении давления значения 12,6 МПа отключается I группа ТЭН и опять срабатывают клапаны впрыска, которые закрываются при достижении давления значения 12,5 МПа. Как видно на примере зависимости давления в КД от времени (рис. 2.4), при использовании традиционной и модифицированной моделей имеется существенная разница временных характеристик процесса. То же относится к эволюции уровня т/н в КД. Восстановление данных параметров РУ при использовании традиционной модели проходит значительно быстрее, а следовательно, картина реального протекания переходного процесса искажается. Причина здесь заключена в том, что в процесс теплообмена вовлечена масса т/н, которая в "старой" модели заключена и покоится в объеме под ТЭНами (элемент 400), а также в более интенсивном теплообмене со стенками корпуса КД, что в сумме проявляется как увеличение "эффективной" теплоемкости системы.

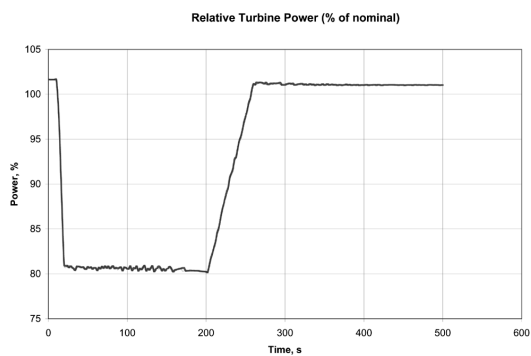


Рис.2.1

Относительная мощность турбогенератора

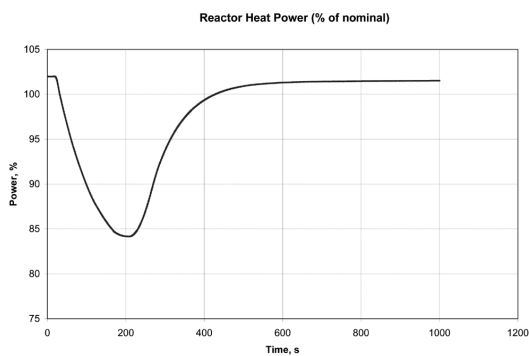


Рис.2.2

Относительная тепловая мощность реактора

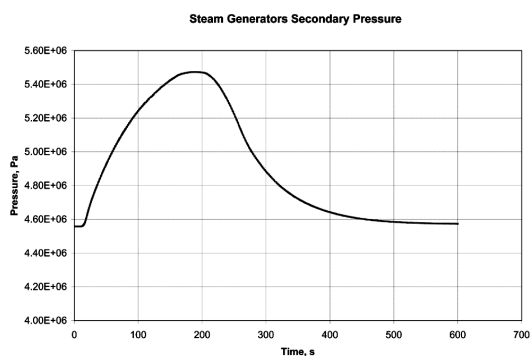


Рис.2.3

Давление в парогенераторах (первые 600 с)

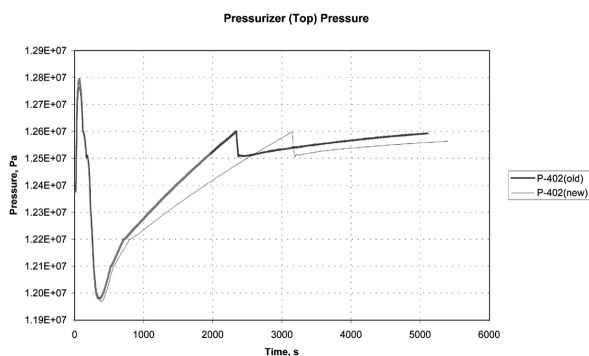


Рис.2.4

Давление в КД

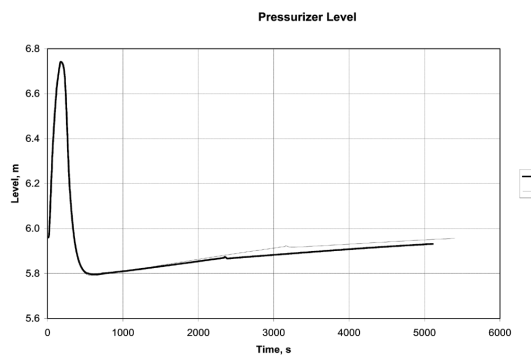


Рис.2.5

Уровень в КД

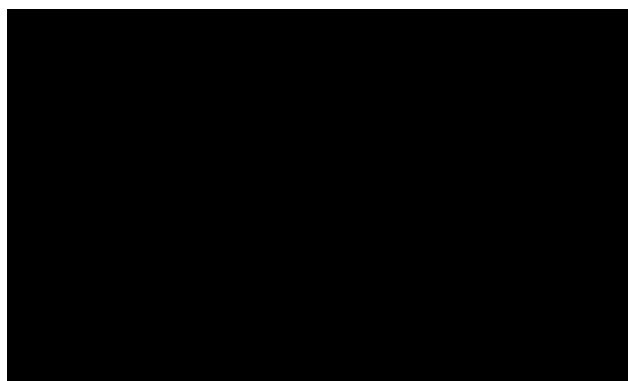


Рис.2.6

Давление в КД (первые 1000 с)

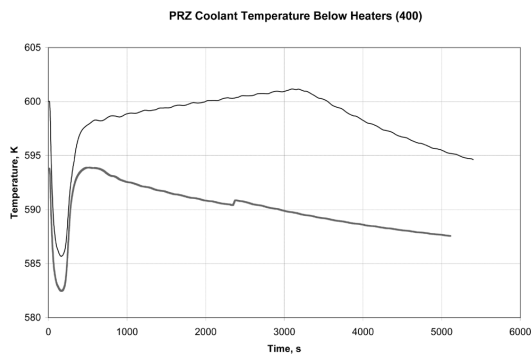


Рис.2.7

Температура т/н в КД ниже уровня ТЭН

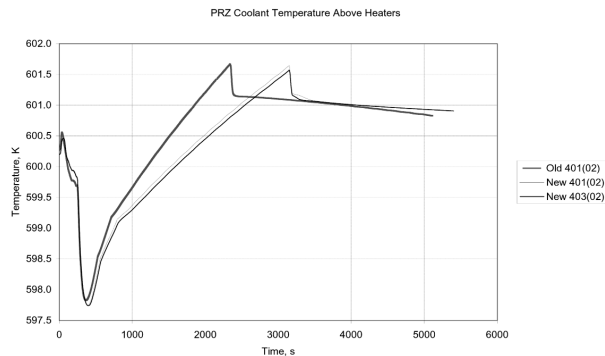


Рис.2.8

Температура т/н в КД выше уровня ТЭН

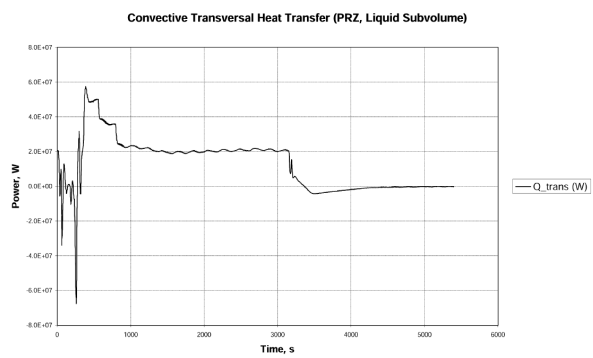


Рис.2.9  
Поперечный конвективный энергоперенос в  
жидкостном объеме КД

## Выводы.

Необходимо признать, что для корректного описания поведения реальной РУ класса PWR (ВВЭР) предпочтительным является использование предложенной здесь модифицированной модели всюду, где можно ожидать возникновения инверсной по температуре стратификации однофазной среды (а также неинверсной, но с большим вертикальным градиентом температуры) в "слепых", или "тупиковых", значительных по величине и поперечному сечению объемах, с последующим сравнением полученных результатов.

Также следует отметить, что в связи с пороговым характером конвективной неустойчивости реальный КД и его масштабированные модели могут обнаруживать существенно различное поведение. Поэтому данные валидации простых 1D расчетных моделей по результатам экспериментов, выполненных на ITF со значительным коэффициентом масштаба ( $s \sim 50$  и более), следует принимать с известной долей осторожности, особенно если имеются указания на возможность достижения условий, близких к порогу неустойчивости. В последнем случае представляется разумным изыскать возможность выполнения дополнительных экспериментов как минимум на SETF, выполненных в масштабе  $s \sim 1$ .

Наконец, предложенная модель все еще является упрощенной. Как видно на Рис.1, ТЭНовы расположены группами в периферийной части корпуса. Поэтому в окончательной модели зону КД вблизи нагревателей следовало бы модифицировать, разбив по крайней мере на следующие расчетные объемы (РО):

РО1: греемая зона, теплообмен с боковой стенкой, связана снизу с объемом 400, сверху с РО4, горизонтальная связь с РО2;

РО2: необогреваемая часть, теплообмен с боковой стенкой (403(01)настоящей модели, минус РО1); связи – снизу с объемом 400, сверху с РО5, горизонтальная связь с РО1;

РО3: центральная часть КД на уровне ТЭНов: необогреваемая, без теплообмена со стенками КД, связана снизу с 400, сверху – с 401(02). По сути - элемент 401(01) настоящей модели без тепловых структур и поперечных связей.

РО4, РО5: участки объема 403(02) настоящей модели, расположенные соответственно над РО1 и РО2, с горизонтальными связями между ними (подобно тому, как моделируется опускной участок, или "downcomer", корпуса реактора), а также с 401(02).

Таким образом, при работе на мощности (постоянный впрыск и включена одна группа ТЭНов) в РО1 имеем восходящее, а в РО2,3 – нисходящее течение т/н. Это позволило бы более точно учесть распределение (структуру) конвекционных потоков в КД. Однако данная модель требует дополнительных опытных данных для настройки и потому ее отладка еще не завершена.

## Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т.VI. Гидродинамика.- 4-е изд., стер.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.- 736с.- ISBN 5-02-013850-9 (т.VI)

## **Summary**

The Possibility of 3D-effects Prediction with 1D Thermohydraulic Codes and Its Significance in Frame of PWR Type Reactors Deterministic Safety Analysis Performance (Applying to WWER In-Pressurizer Convective Mass and Heat Transfer Modelling with RELAP5 Mod3.2 Code).

The theoretical background given to define the transients with the convective coolant instability in PRZ due to inverse thermal stratification of the subcooled liquid. The instability threshold given for both real PRZ geometry and scaled ITF, with the comparison against the practically anticipated thermal gradients. The "best estimated models" validation consequences discussed. The quasi-3D pressurizer model proposed and the "separate test" comparison performed for both "old" and "new" models. The power operation selected cases also analysed to find out the possible grade of the 3D-effect influence on the best estimate plant behaviour prediction.

## **Аннотация**

Возможность предсказания 3-мерных эффектов в рамках 1-мерных кодов и их значимость при выполнении детерминистических анализов безопасности реакторов типа PWR (на примере оценки конвективных массо- и теплопереноса внутри КД ВВЭР при помощи кода RELAP5 Mod3.2)

Приведены теоретические оценки для выявления переходных процессов, в которых возможно возникновение конвективной неустойчивости в КД вследствие инверсной температурной стратификации недогретого теплоносителя. Приведены теоретические численные значения порога неустойчивости как для реальной геометрии КД, так и для выполненных в масштабе интегральных тестовых установок (ITF), а также реально ожидаемые значения градиента температуры. Затронут вопрос валидации расчетных моделей "улучшенной оценки". Предложена квази-трехмерная модель КД и проведены сравнительные тестовые вычисления с помощью "старой" и "новой" моделей. В заключение приведены результаты расчетов отдельных переходных процессов при работе на мощности для оценки возможных влияний 3-мерных эффектов вышеуказанного типа на поведение системы в целом с точки зрения "улучшенной оценки" эволюции параметров РУ.