VERIFICATION OF THERMOHYDRAULIC CODES ON A STANDARD PROBLEM OF REFLOODING

V.V. Sergeev

SSC RF – IPPE named by acad. A.I. Leipunsky, Obninsk, Russia

ABSTRACT

The fulfilment of standard problems is one of the main links of a technological chain of validation process of the system thermohydraulic codes. Validation of codes on the experimental data, obtained during reflooding of the uncovered and overheated core is specially actual as flowing past thus thermohydraulic processes not only determine the limit values of clad temperature of fuel rods and duration of the most dangerous term of reactor cooling but also allow to reveal lacks of mathematical models of physical processes involved and their algorithmic, numerical and programming implementation in codes, which are not showing at simulation the another processes.

For verification the reflooding models domestic and foreign thermohydraulic codes on the basis of experiments which were carried in IPPE the fulfilment of 1-st Standard problem of reflooding for VVER named «The cooling of 7-rods model of VVER fuel assembly during bottom reflooding» was organized. Experiments, in which one apart from other to simulate the nuclear decay heat in core the smoothly decreasing of power of heater rods was modelled, were conducted on full scale on a height model of fuel assembly with indirect heating rod simulators and stepwise distribution of power along the length.

Availabiling of two unheated rods in the bundle is a feature of the selected experiment for fulfilment of the Standard problem. Eight organizations from Minatom took part for carrying out pre- and post tests calculations using different versions of codes RELAP5, ATHLET, CATHARE, COBRA-TF, KORSAR, CANAL-97.

The basic results of the fulfilment of the Standard problem are shown in this paper. The comparison of predicted and experimental data and predicted among themselves, including the usage of statistical methods, are presented.

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОДОВ НА СТАНДАРТНОЙ ЗАДАЧЕ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА

В.В. Сергеев

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

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – верификация моделей повторного залива современных теплогидравлических кодов с использованием технологии выполнения стандартных задач.

Для первой стандартной задачи повторного залива был выбран выполненный на стенде СВД-1 ГНЦ-РФ ФЭИ эксперимент по расхолаживанию полномасштабной по высоте, электрообогреваемой 7-стержневой модели ТВС ВВЭР в условиях повторного залива снизу.

Отличительная особенность эксперимента – наличие в модельной ТВС двух необогреваемых стержней.

В 1999 г. был выполнен первый этап работы – расчеты «вслепую» (претест), в 2000 г. – посттестовые расчеты. Расчеты велись в 8 организациях Минатома РФ:

№ п/п	Организация	Код
1	ОКБ «Гидропресс»	КАНАЛ-97
2	ОКБМ	RELAP5/Mod3.2
3	НИТИ	КОРСАР/В1
4	НИКИЭТ	RELAP5/Mod3.2; ATHLET1.1 cycle D
5	ИПБ ИЯЭ РНЦ КИ	RELAP5/Mod3.2.2
6	ГНЦ РФ НИИАР	RELAP5/Mod3.1 и Mod3.2.2 (посттест)
7	ГНЦ РФ-ФЭИ	COBRA-TF
8	ПКФ «Росэнергоатомпроект»	CATHARE

При проведении посттестовых расчетов была учтена выявленная на стадии предтестовых расчетов 60-секундная задержка поступления охлаждающей воды в обогреваемую часть модельной сборки по отношению к моменту начала снижения мощности ТВС. Кроме того, в расчетное моделирование были внесены коррективы, направленные на устранение недостатков, выявленных при анализе результатов предтестовых расчетов, и учет ранее не учтенных при расчетах факторов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Циркуляционный контур

Для проведения экспериментальных исследований по повторному заливу на полномасштабных по высоте моделях топливных сборок реактора ВВЭР использовалась экспериментальная петля, включающая в себя элементы оборудования и контура стенда СВД-1. Принципиальная схема петли показана на рис. 1.

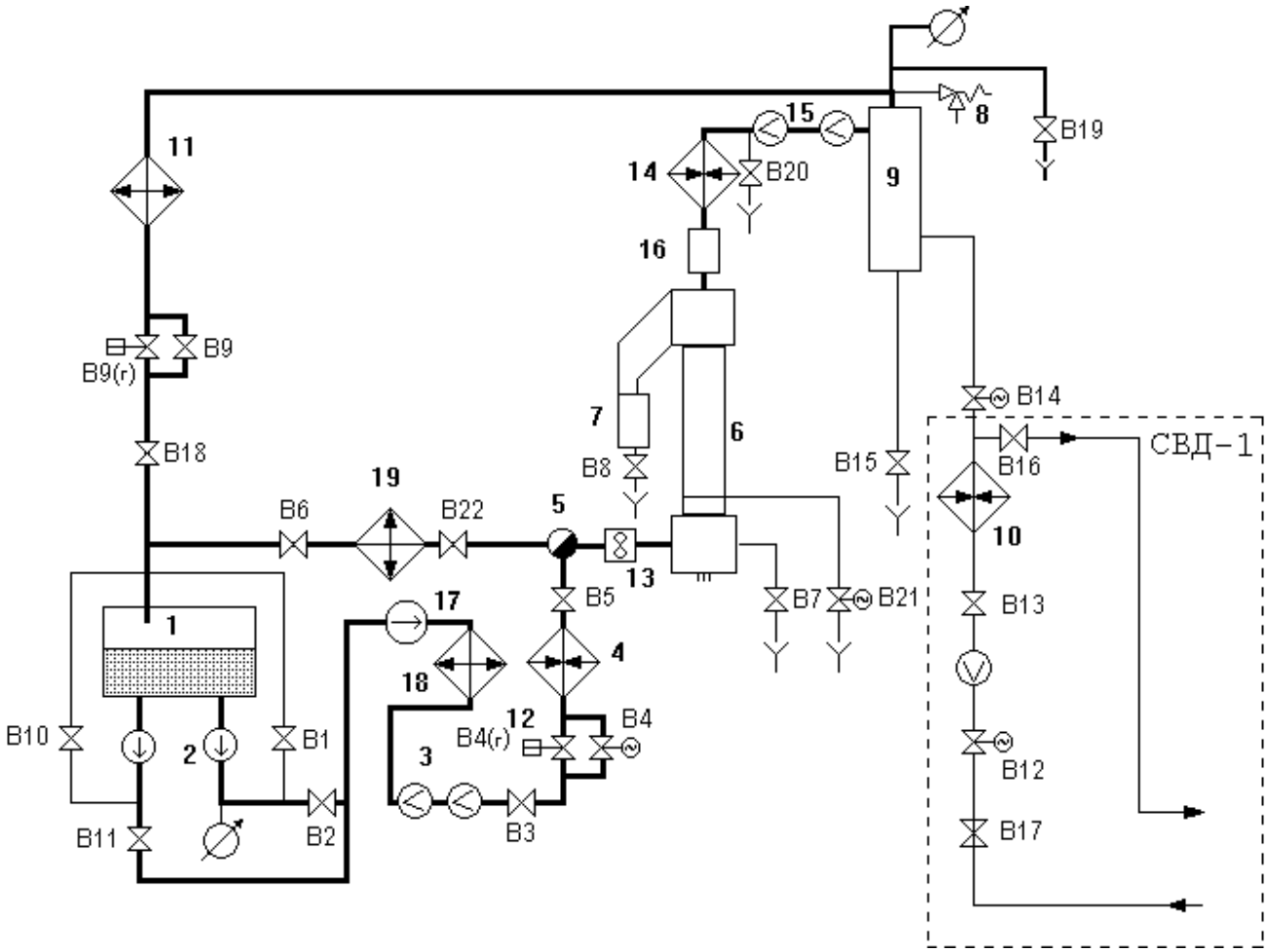

Рис. 1. Схема циркуляционной петли.

Рабочий участок.

Рабочий участок (РУ), конструкция которого схематично показана на рис. 2, состоит из корпуса, верхней и нижней камер.

Корпус изготовлен из стальной трубы внутренним диаметром 38,5 мм и толщиной стенки 3,25 мм и оснащён 16 термопарами, измеряющими температуру его наружной поверхности на четырёх уровнях по четыре термопары в сечении. Для измерения распределения статического давления по высоте корпус имеет три пояса узлов отбора давления с уравнительными кольцевыми камерами. В нижней кольцевой камере, расположенной на уровне начала зоны обогрева, сделан дополнительный отводной патрубок для слива теплоносителя.

Верхняя камера, предназначена для сепарации фаз в двухфазном потоке, выходящем из пучка стержней.

Отсепарированная влага собирается в кольцевой канавке на дне верхней камеры и через наклонное отверстие в дне стекает в сосуд для сбора унесённой влаги.

Для измерения температуры и давления в верхней части верхней камеры и в выходном патрубке имеются штуцера для ввода термопар и штуцер отбора давления.

Нижняя камера снабжена штуцерами подачи и слива воды, отбора давления, ввода термопар для измерения температуры воды и вывода из полости рабочего участка термопар, измеряющих температуру дистанционирующих решёток.

Для уменьшения тепловых потерь (особенно за счёт излучения) корпус и камеры изолированы высокотемпературной теплоизоляцией, на наружной поверхности которой размещены 4 термопары (по одной на каждом уровне размещения термопар корпуса) для оценки потерь энергии пучком стержней.

Пучок стержней

Пучок стержней состоит из 7 имитаторов твэл косвенного нагрева с длиной обогреваемой части 3530 мм с 5-ступенчатым профилем энерговыделения по высоте (k_z=1 ,62).

Имитатор твэл имеет оболочку из нержавеющей стали наружным диаметром около 9,1 мм и внутренним - 7,9 мм, внутри которой располагаются нихромовый нагреватель и шесть хромель-алюмелевых термопар из кабеля КТМС диаметром 1,0 мм с изолированным спаем. В качестве изолирующей засыпки используется окись магния.

Стержни в пучке дистанционировались с шагом 255 мм 15-ю дистанционирующими решетками (ДР), собранными из элементов штатных решеток.

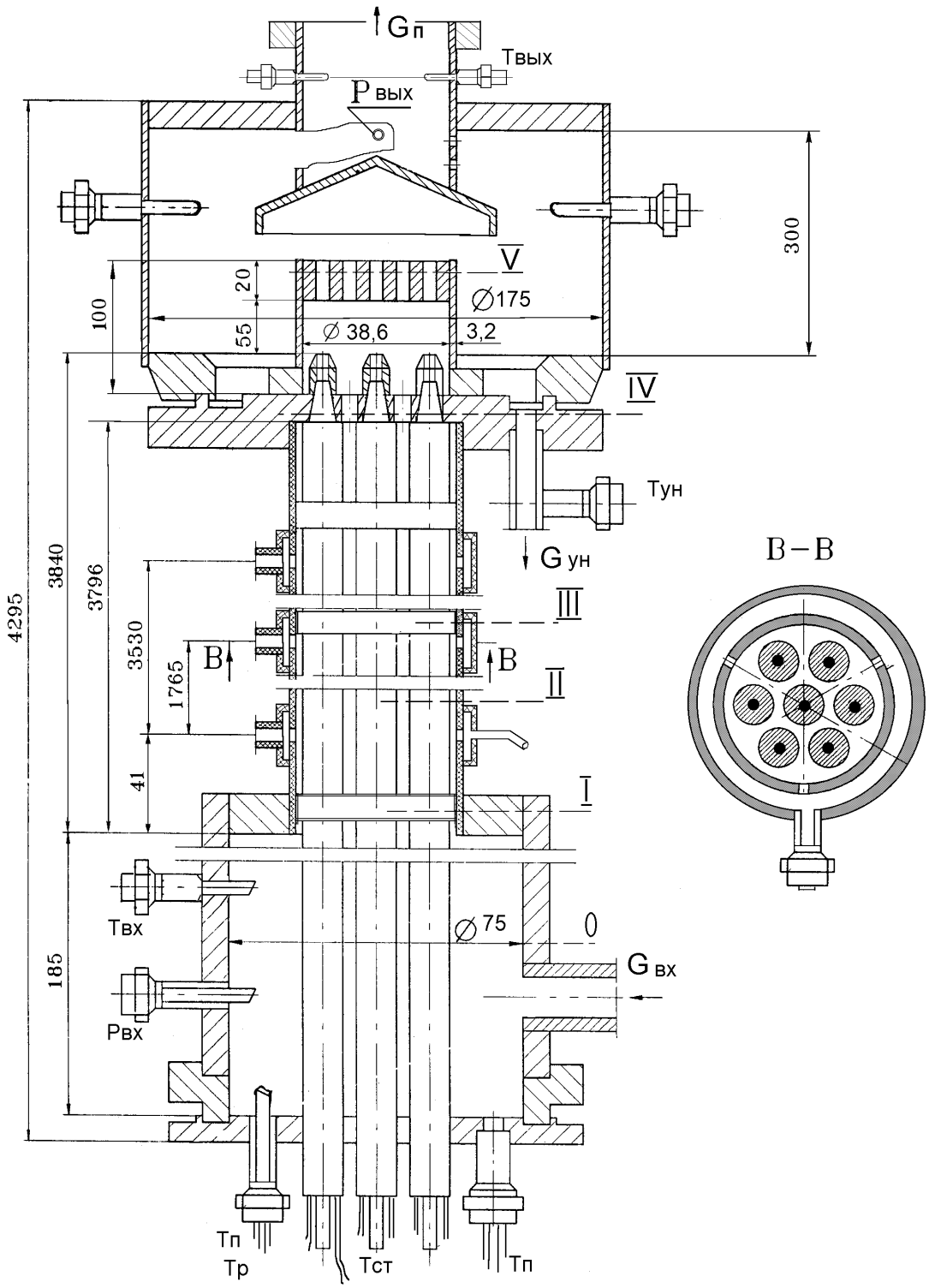

Рис. 2. Схема рабочего участка.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Петля и модель оснащены датчиками для измерения следующих параметров: давления на входе и выходе; расхода жидкости на входе и пара на выходе; количества унесенной влаги; температур: потока теплоносителя на входе и выходе и в ячейках пучка, стенки имитаторов, дистанционирующих решеток, корпуса рабочего участка и изоляции; мощности, выделяемой в пучке стержней; перепадов давления на обогреваемой части пучка и сосуде для сбора унесенной влаги. Измерения наиболее ответственных параметров дублировались.

Суммарная погрешность измерения параметров в эксперименте составила: давление - 0,5 %; расход - 2,0 %; перепад давления - 1,0 %; мощность - 1,0 %; температура - 1,0 %.

СЦЕНАРИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходное состояние – нижняя камера РУ заполнена водой, пучок стержней и верхняя камера – насыщенным паром.

- Подъем мощности до заданного уровня.
- Прогрев стержней до стартовой температуры.
- При достижении стартовой температуры начинается снижение мощности по заданному закону и включается расход охлаждающей воды.
- Опыт прекращается при снижении температуры стержней до температуры кипения.

Стартовые значения основных параметров:

- давление в верхней камере - 0,278 МПа;
- температура охлаждающей воды на входе - 90°С;
- скорость залива - 2 см/с;
- плотность теплового потока в зоне максимума тепловыделения - 2,94 кВт/м;
- максимальная температура оболочек имитаторов - 700°С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

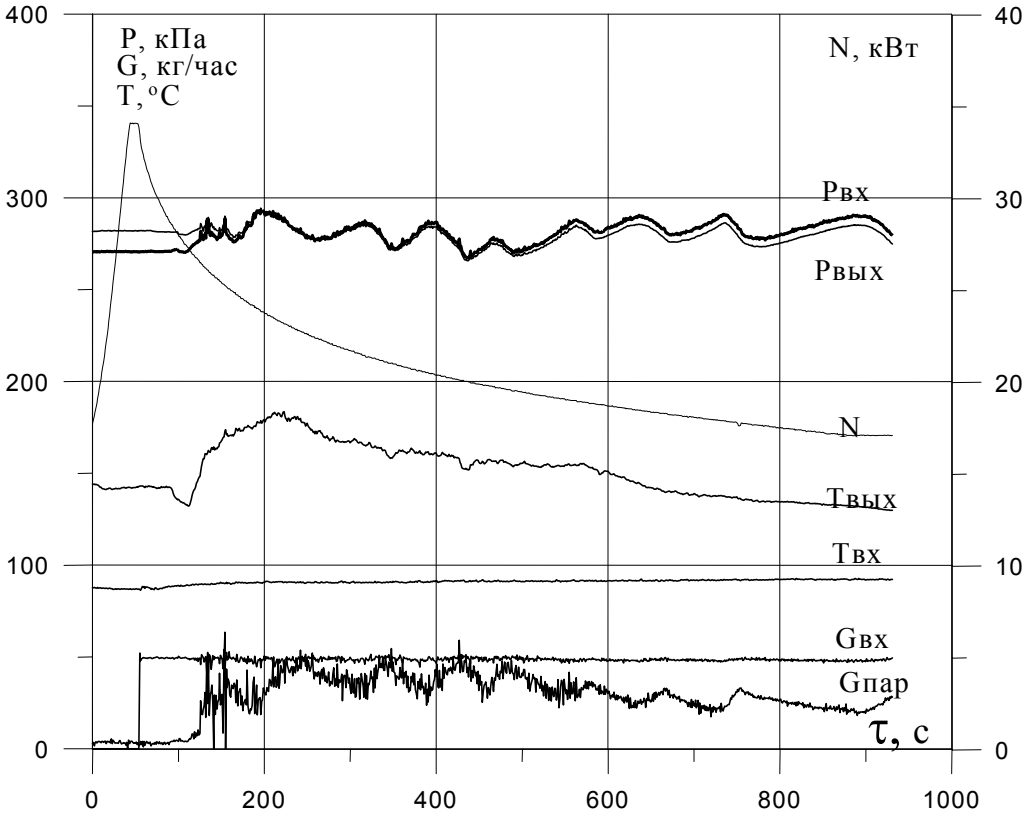

Рис. 3. Изменение основных режимных параметров

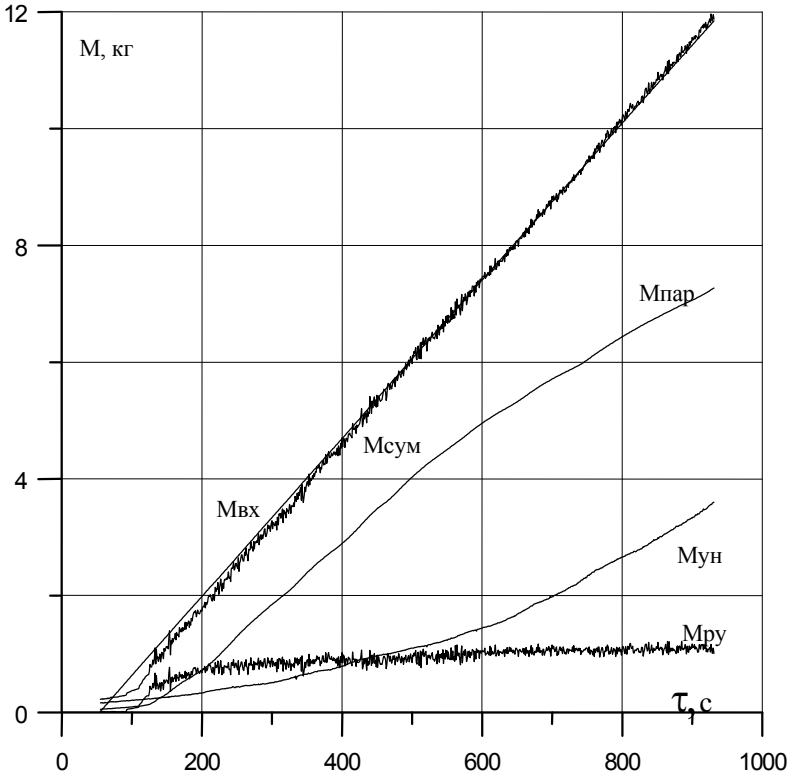

Рис. 4. Сходимость материального баланса

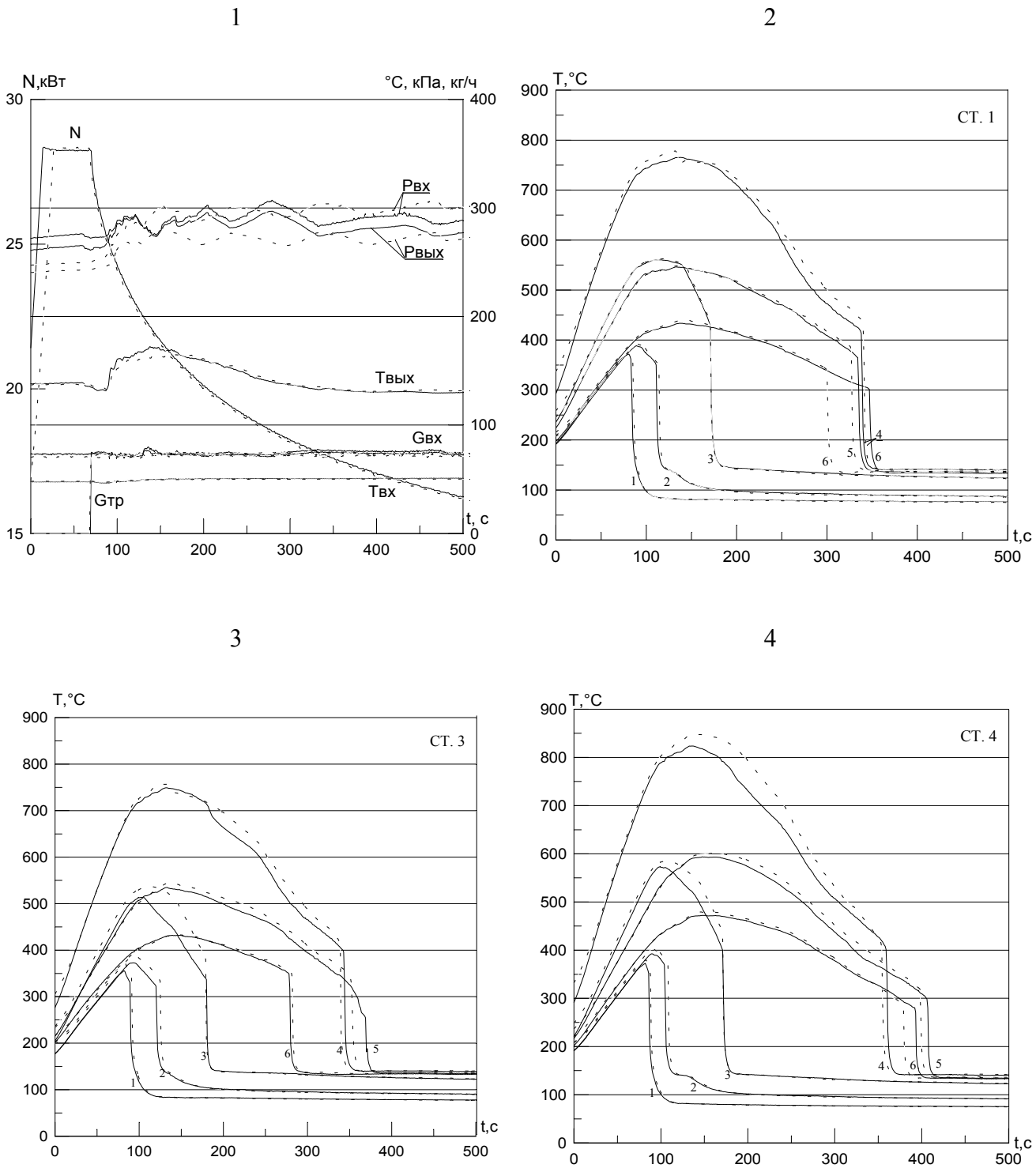

Рис. 5. Воспроизводимость эксперимента:

1 – режимные параметры;

2, 3, 4 – температурные режимы соответственно 1-, 3- и 4-стержней;

- - - - по данным опыта 4; —— по данным опыта 16.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

КОРСАР

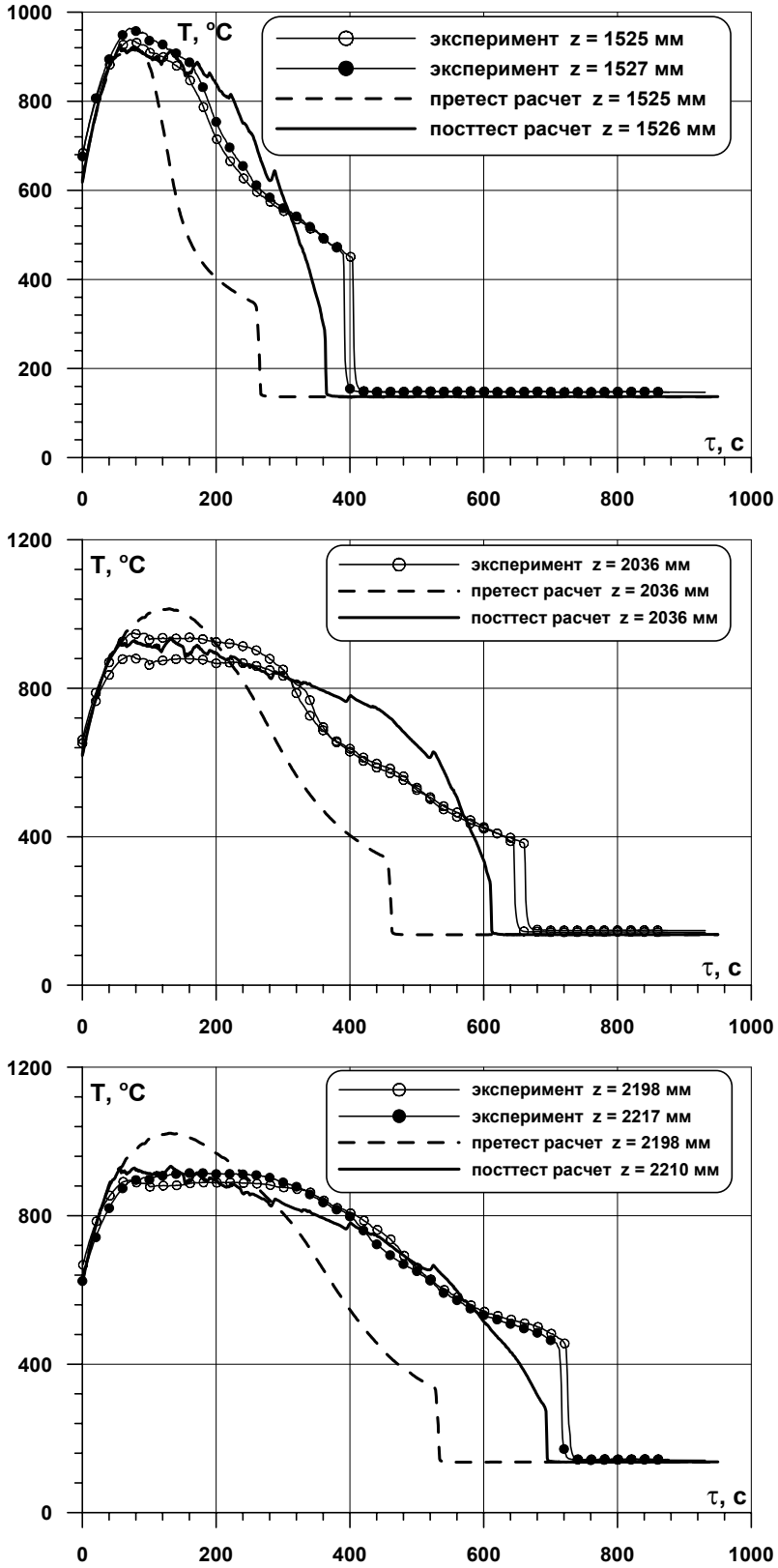

Рисунок 6 – Изменение температур обогреваемых стержней

КОРСАР

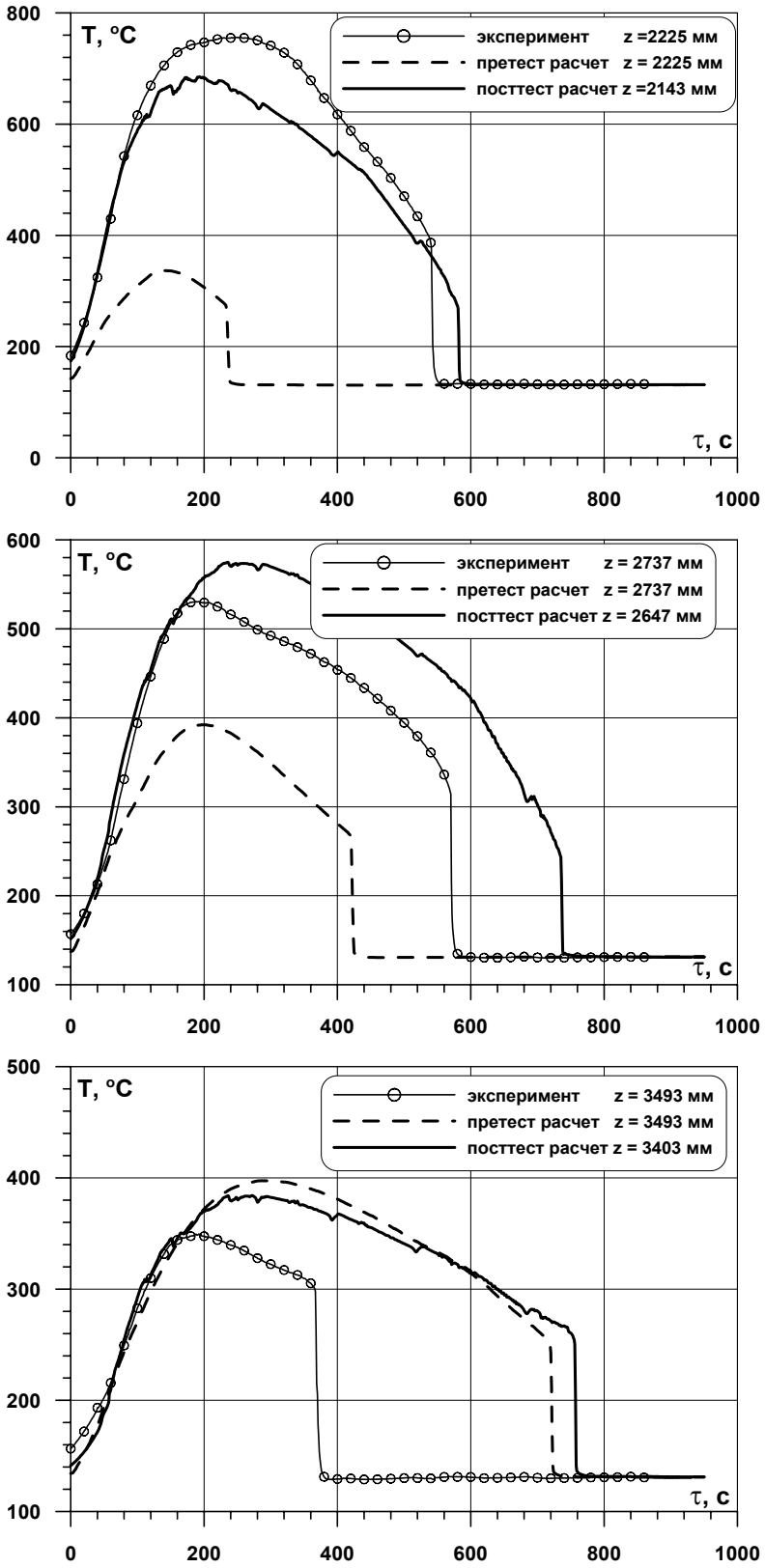

Рисунок 7 - Изменение температур центрального необогреваемого стержня

КОРСАР

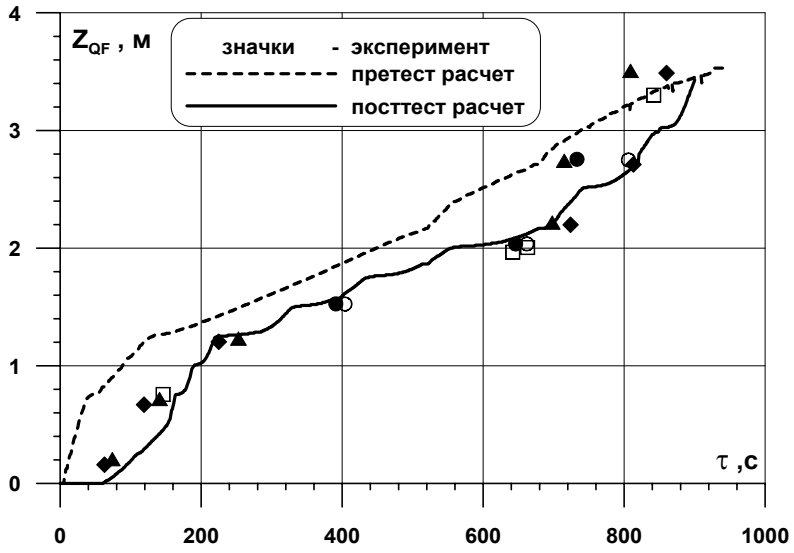

Рисунок 8 – Динамика фронта смачивания обогреваемых стержней

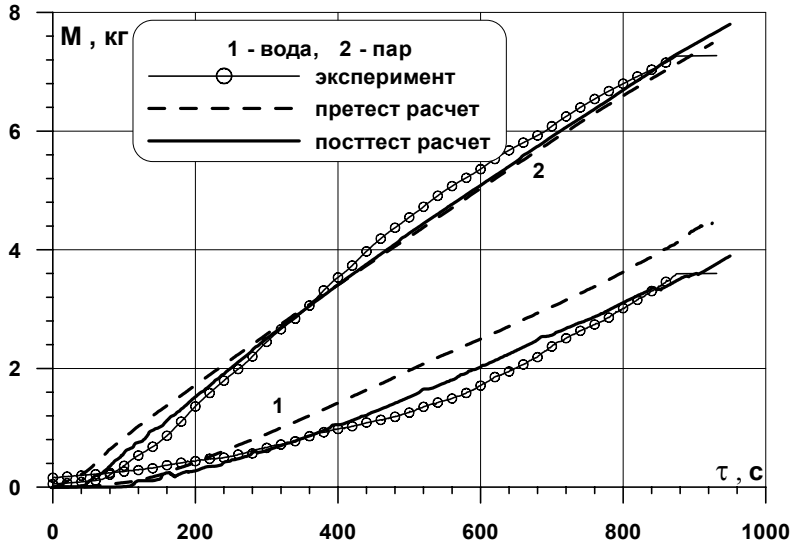

Рисунок 9 – Выход массы жидкой и паровой фаз из стержневой сборки

Основные результаты расчетов

	T_{max}, °C «горячего» стержня претест / посттест	Время ее достижения, сек претест / посттест	T_{max}, °C «холодного» стержня претест / посттест	Время ее достижения, сек претест / посттест	Полное время расхолаж., сек претест / посттест
Эксперимент	**988**	**73 / 13**	**756**	**243 / 183**	**853 / 793**
КАНАЛ-97 (ОКБ ГП)	1040 / 1100	58 / 12	680 / -	113 / -	783 / 813
КОРСАР/В1 (НИТИ)	1015 / 927	73 / 13	390 / 680	213 / 83	853 / 900
RELAP5/Mod3.1 RELAP5/Mod3.2.2 (НИИАР)	1062 / 967	73 / 103	709 / 735	116 / 143	768 / 679
RELAP5/Mod3.2 (НИКИЭТ)	907 / 1035	103 / 6,5	570 / 661	148 / 81	830 / 729
RELAP5/Mod3.2 (ОКБМ)	955 / 980	90 / 80	550 / 740	163 / 100	850-980 / 855-860
RELAP5/Mod3.2.2 (РНЦ КИ)	1100 / 1080	73 / ~20	895 / ~800	248 / ~240	1143 / 823
ATHLET 1.1 (НИКИЭТ)	1020 / 1030	13,5 / 13,5	640 / 700	138,5 / 158,5	660 / 780
CATHARE (ПКФ РЭА)	1114 / 1257	178 / 187	580 / -	190 / -	903 / 992
COBRA-TF (ФЭИ)	1180 / -	118 / -	676 / -	193 / -	~1000 / -

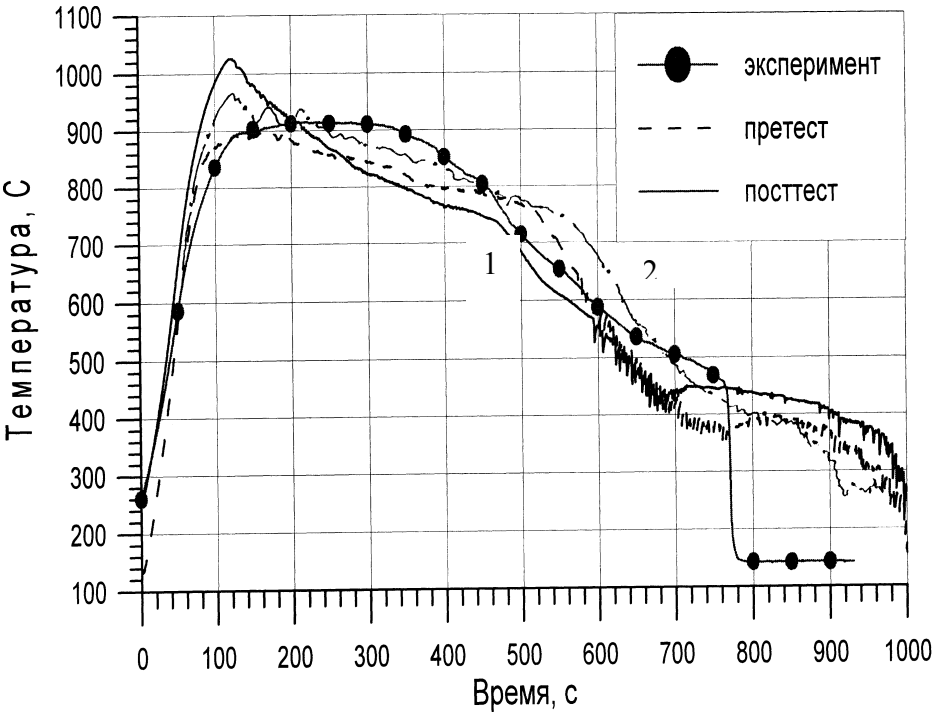

Рис. 10. Сопоставление расчетов по коду RELAP5/Mod3.2

1 – НИКИЭТ; 2 - ОКБМ

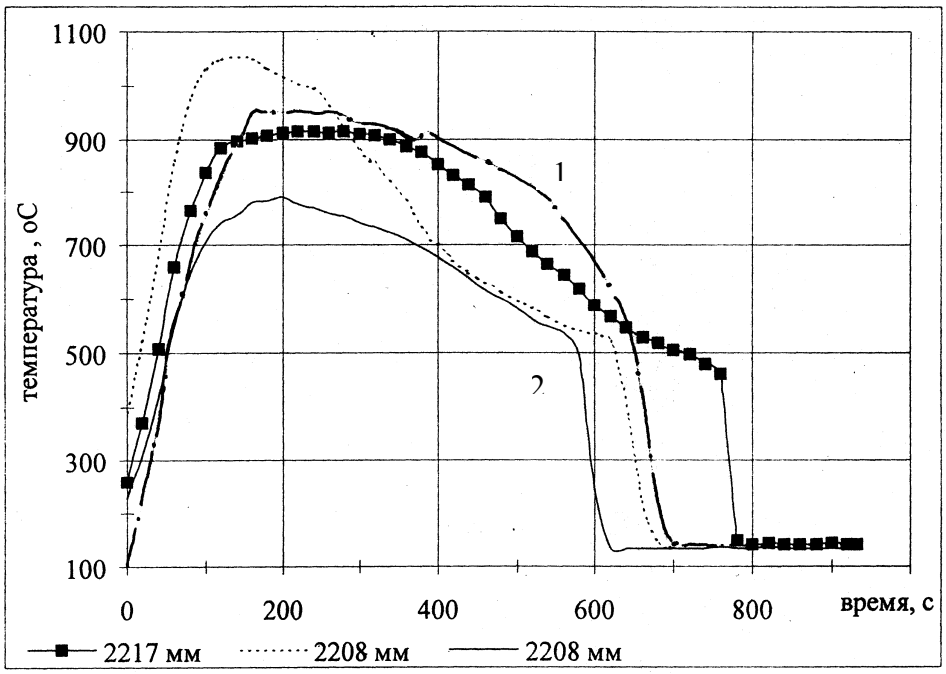

Рис. 11. Сопоставление расчетов по коду RELAP5/Mod3.2.2

1 – РНЦ КИ; 2 – НИИАР; значки - эксперимент

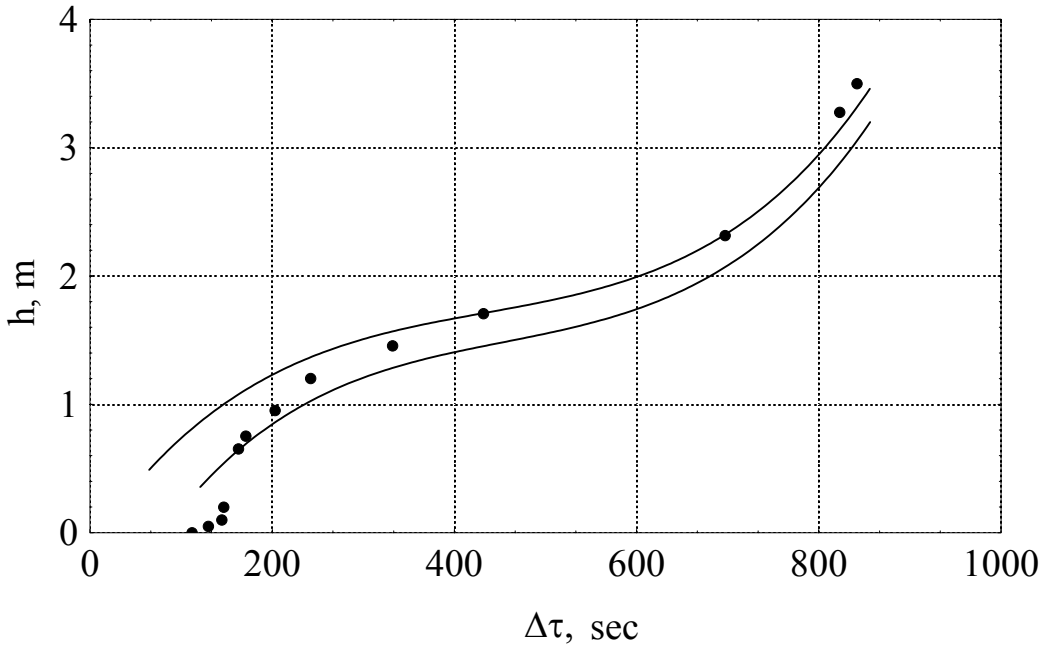

Рис. 12. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду RELAP5/mod3.2 (НИКИЭТ).

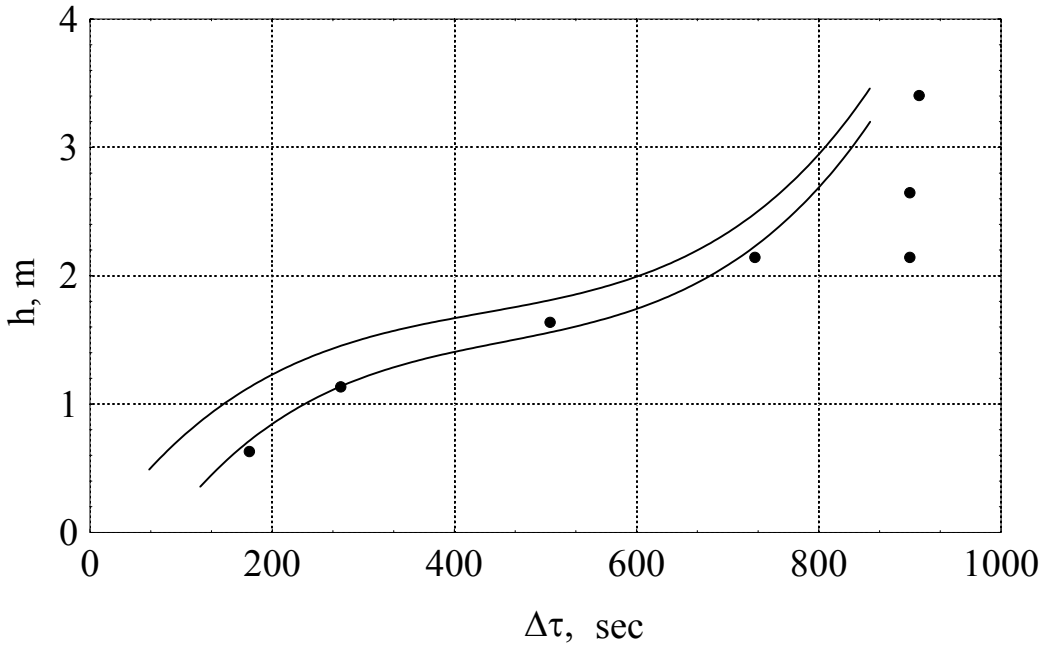

Рис. 13. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду RELAP5/mod3.2 (ОКБМ).

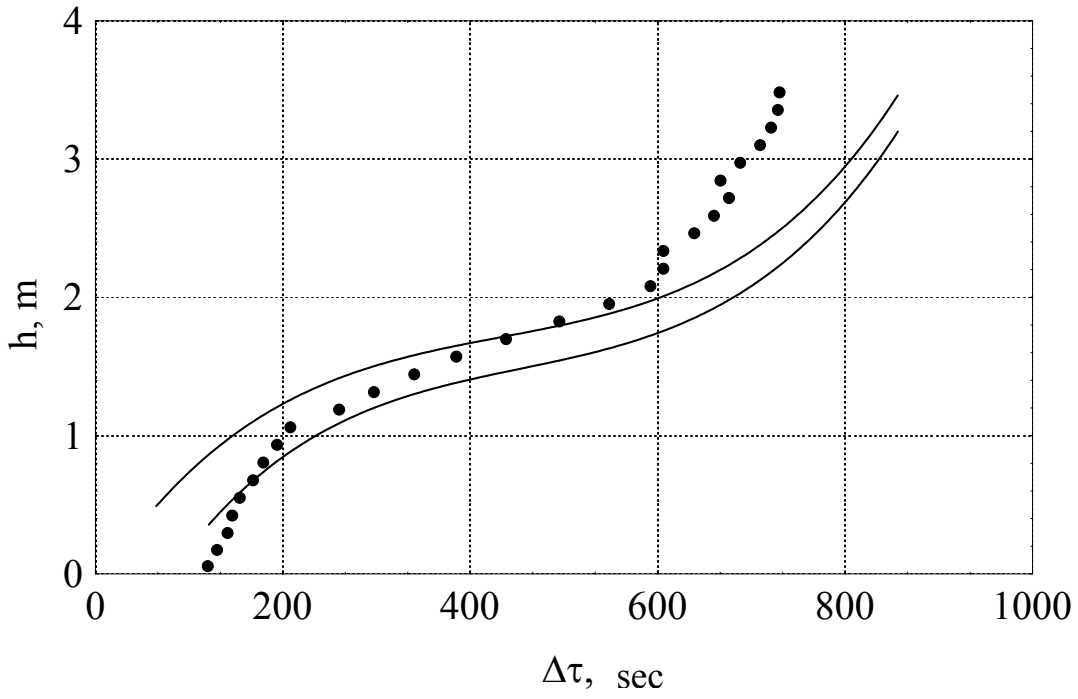

Рис. 14. Продвижение фронта смачивания по необогреваемым стержням, точки – расчет по коду RELAP5/mod3.2.2 (НИИАР).

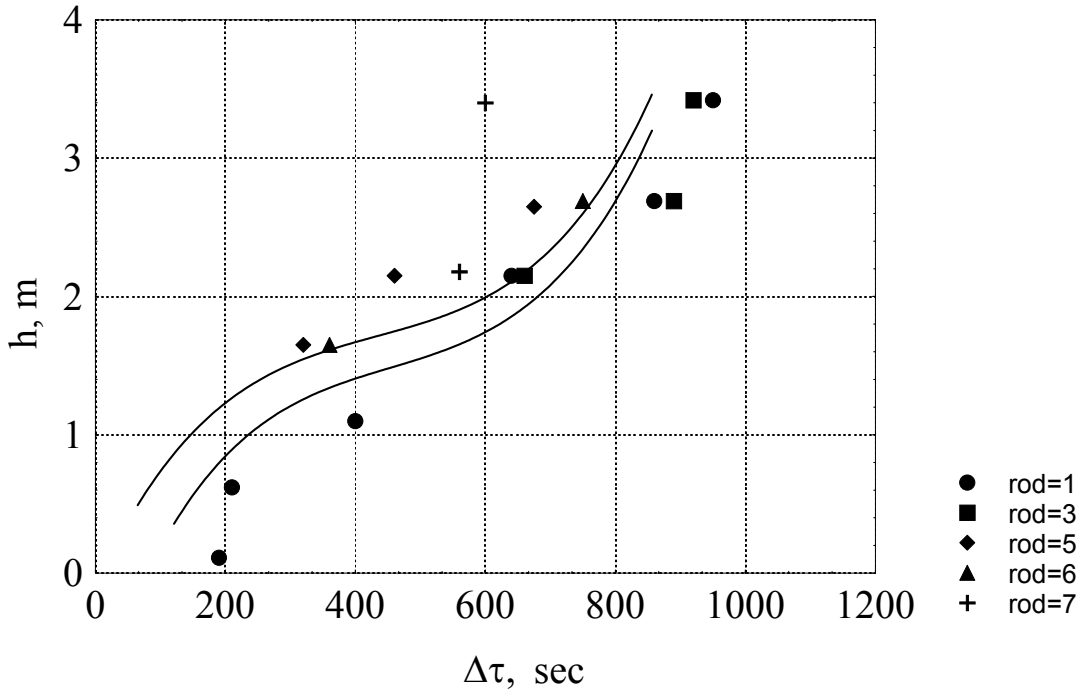

Рис. 15. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду RELAP5/mod3.2.2 (РНЦ КИ).

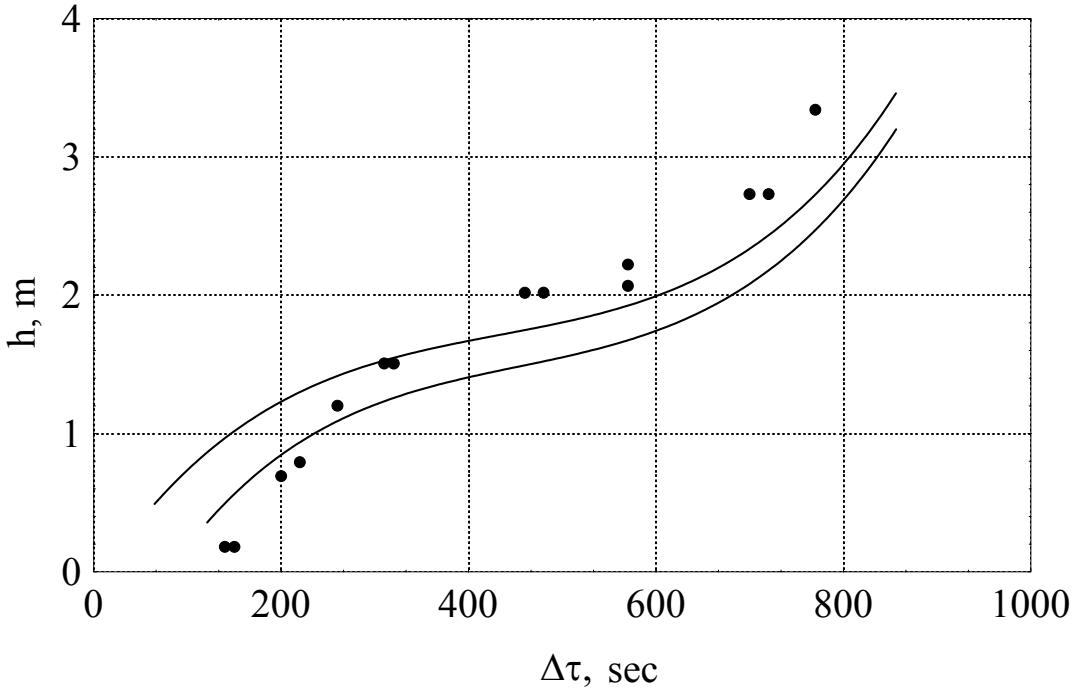

Рис. 16. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду ATHLET (НИКИЭТ).

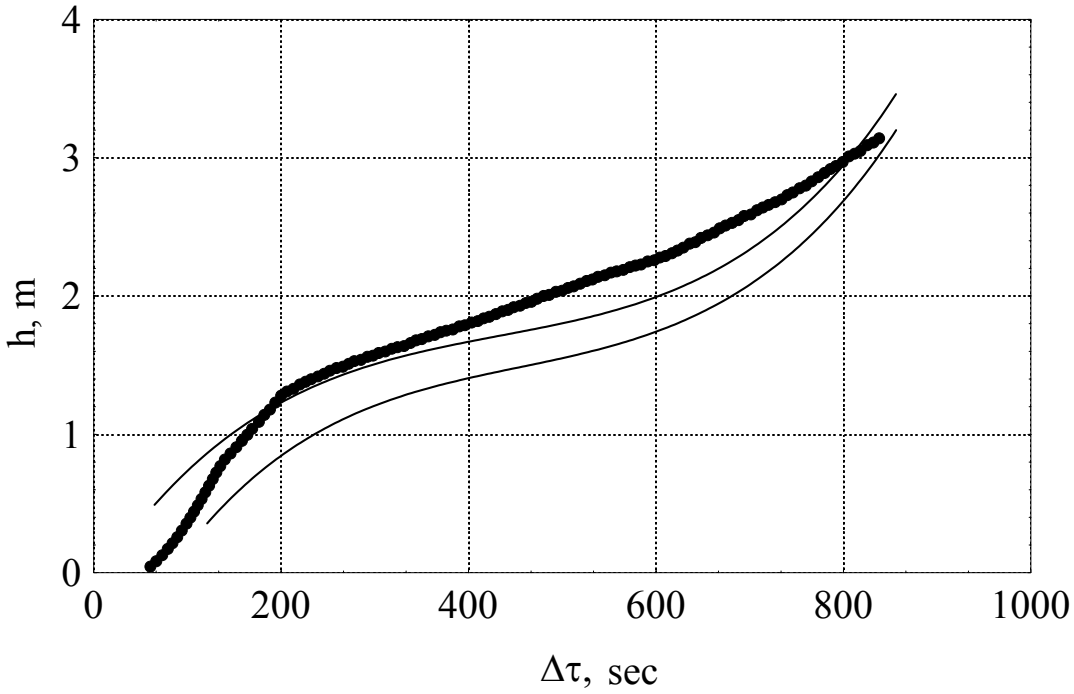

Рис. 17. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду CATHARE (ПКФ РЭА).

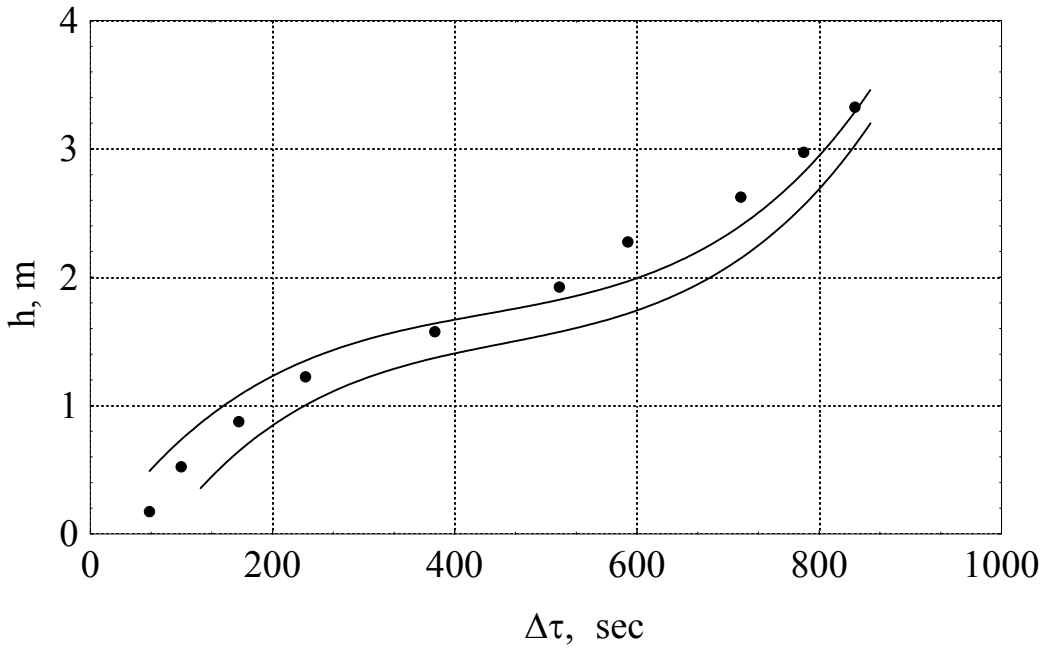

Рис. 18. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду КАНАЛ97 (ОКБ ГП).

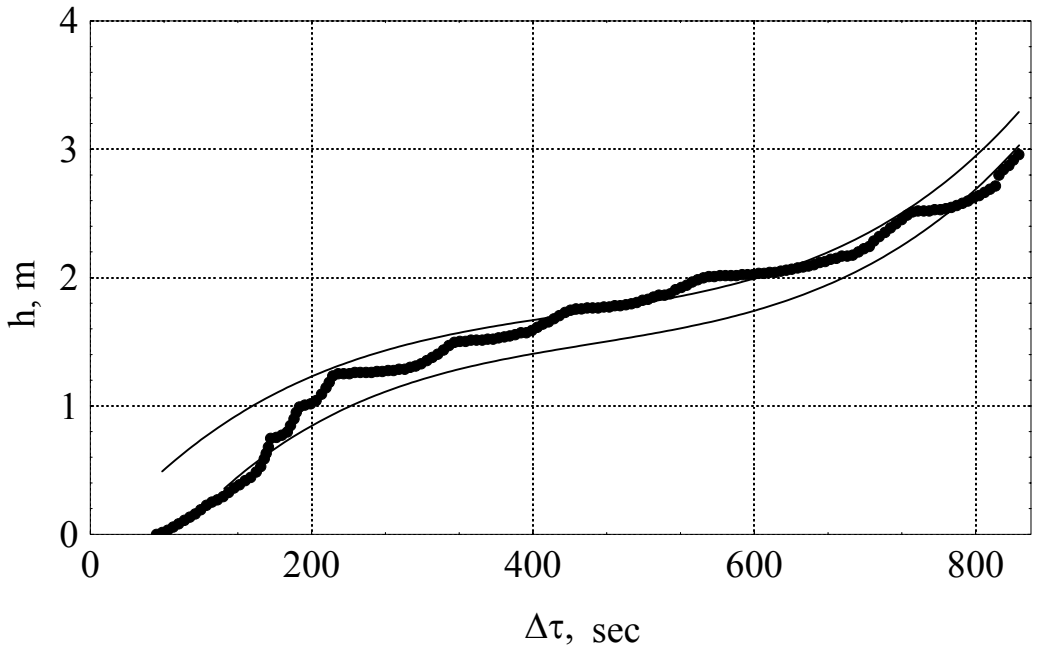

Рис. 19. Продвижение фронта смачивания по обогреваемым стержням, точки – расчет по коду КОРСАР (НИТИ).

ВЫВОДЫ

- Стадия разогрева сборки и интегральные характеристики процесса (максимальная температура стержней, полное время расхолаживания сборки, вынос влаги и пара из ТВС) предсказываются большинством кодов вполне удовлетворительно.
- Наибольшие различия расчетных и экспериментальных данных наблюдаются на стадии расхолаживания верхней части ТВС и связаны с образованием вторичных фронтов смачивания из—за стекания по стержням влаги, осаждающейся на верхней опорной плите.
- Отличия в расчетах, выполненных по одинаковым версиям кода RELAP5, обусловлены, в основном, отличиями в схемах нодализации и учета влияния различных факторов, т.е., в конечном счете, квалификацией пользователей.