

СТАТЬИ

УДК 621.039.58

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ИЗ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС с ВВЭР-1200

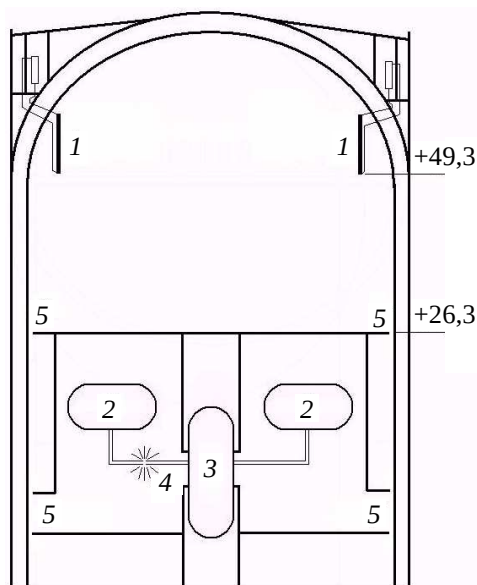
Безлепкин В.В., Затевахин М.А., Кректунов О.П., Крылов Ю.В., Масленникова О.В.,
Семашко С.Е., Шарапов Р.А. (ОАО Головной ин-т «ВНИПИЭТ», г. Санкт-Петербург),
Ефимов В.К., Мигров Ю.А. (НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор)

Система пассивного отвода тепла из защитной оболочки Ленинградской АЭС-2 с ВВЭР-1200 состоит из четырех одинаковых и независимых один от другого каналов. Три работающих канала способны выполнить функцию системы в полном объеме. Каждый канал включает в себя четыре теплообменника-конденсатора, подключенные к соответствующему баку аварийного отвода тепла. Теплообменники располагаются на стенке защитной оболочки на отметке 49,3 м (рис. 1).

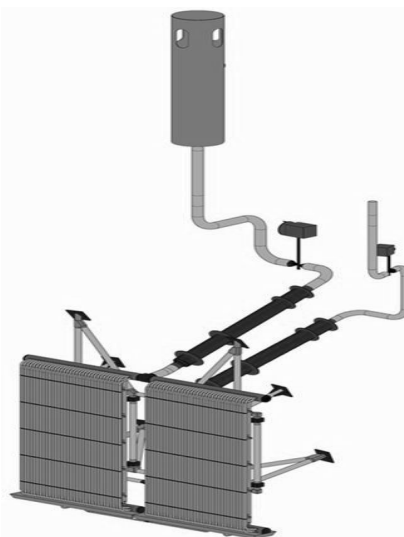
Система пассивного отвода тепла из защитной оболочки основана на физических законах теплообмена и не требует внешних источников энергии, изменения состояния элементов схемы и действий оператора. При поступлении пароводяной среды в объем защитной оболочки на по-

верхности теплообменников конденсируется пар с передачей тепловой энергии теплоносителю контура системы. В результате в замкнутом контуре возникает естественная циркуляция с отводом тепла к воде баков аварийного отвода тепла и от нее во внешнюю среду (рис. 2).

Одним из этапов разработки системы являлось расчетное обоснование эффективности и определение ее основных характеристик. Эффективность определяется интенсивностью теплообмена при конденсации пара из парогазовой среды на теплообменных поверхностях, условия конденсации пара, в свою очередь, — характером конвективных течений и распределением неконденсирующихся газов в объеме защитной оболочки. Термодинамические параметры атмосферы при авариях с течами теплоносителя внутри защитной оболочки АЭС с ВВЭР рассчитываются с помощью кода КУПОЛ-М. Центральным вопросом верификации этого кода яв-



Р и с. 1. Размещение теплообменников системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки в здании реактора: 1 — теплообменник; 2 — парогенератор; 3 — реактор; 4 — разрыв; 5 — парогазовая смесь



Р и с. 2. Контур охлаждения одной секции системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки

ляется выбор замыкающих соотношений для расчета теплопередачи от парогазовой смеси к поверхности пленки конденсата на поверхности водоохлаждаемых теплообменников, расположенных в подкупольном пространстве. На данном этапе обоснования работоспособности возникла необходимость экспериментальных исследований физических процессов. Результаты экспериментов позволили уточнить замыкающие соотношения, используемые в интегральных кодах.

Для детального анализа данных и понимания определяющих их процессов применили численное моделирование тепломассопереноса с помощью трехмерных гидродинамических кодов. Для этого в настоящей работе использовали коды ПГС-ТК (совместная разработка ОАО «СПбАЭП» и СПбГПУ) и коммерческий код Star-CD (Великобритания), позволяющие рассчитывать турбулентные течения сжимаемой многокомпонентной смеси. Коды основаны на решении усредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики, для замыкания используется полуэмпирическая модель турбулентности [1]. В кодах реализована модель поверхностной конденсации, включающая расчет тепломассообмена на поверхности пленки и течения пленки по поверхности конденсации.

Необходимым условием численного моделирования является предварительная верификация кода на задачах, в которых реализуются основные процессы, характерные для рассматриваемого случая. Используемые в настоящей работе коды верифицированы на большом числе тестовых задач, для которых имеются известные решения или надежные экспериментальные данные. Среди них следует отметить свободную конвекцию газа вблизи вертикальной пластины в условиях ламинарно-турбулентного перехода [2] и конденсацию пара из свободно-конвективного турбулентного пограничного слоя на охлаждаемой трубе [3]. Особо следует отметить первую верификационную задачу: тестовые расчеты показали, что из многих протестированных моделей турбулентности только модель [1] качественно и количественно правильно воспроизводит данные [2]. Экспериментальные данные в работе [3] получены для давления и концентрации водяного пара, близких к ожидаемым в условиях запроектной аварии. Верификация кода на этих данных имеет большое значение для обоснования достоверности результатов.

Расчеты выполнены в различных постановках: с полным описанием всех помещений внутри защитной оболочки и моделированием теплообменников участками вертикальных поверхностей и детальным описанием отдельного теплообменника или его фрагмента, помещенного в сектор подкупольного пространства.

Экспериментальные исследования физических процессов, влияющих на работу теплообменников-конденсаторов, были выполнены на крупномасштабных стендах, специально доработанных или созданных для обоснования системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки АЭС-2006.

Экспериментальный стенд СПОТ 30 (ОАО «ОКБМ Африкантов»). Основной целью проведенных на нем исследований является испытание полномасштабной модели контура охлаждения системы для обоснования эффективности теплоотвода в условиях естественной циркуляции теплоносителя при низком давлении.

В состав модели контура охлаждения входят модель теплообменника-конденсатора (М 1:1), расположенная в емкости — модели защитной оболочки, штатные трубопроводы, штатное паросбросное устройство, расположенное в баке-испарителе с запасом воды. Модель защитной оболочки представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд с эллиптическим днищем объемом 59 м^3 [4].

Экспериментальный стенд КМС. Для обоснования длительной работы системы пассивного отвода тепла при запроектных авариях создан стенд КМС, представляющий собой модель защитной оболочки АЭС нового поколения с реакторной установкой типа ВВЭР. Внутренний свободный объем стенда составляет 1830 м^3 . Основной состав оборудования стенда включает в себя защитную оболочку, систему пассивного отвода тепла из герметичной защитной оболочки, технологические системы подачи сред (воздух, пар, гелий) в защитную оболочку [5].

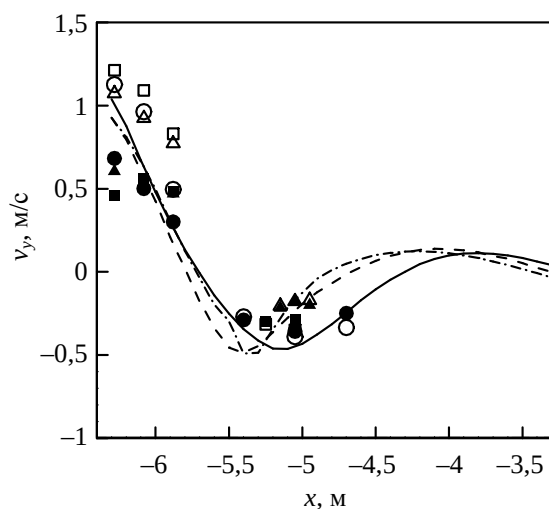
Экспериментальный стенд СМК. Он представляет собой модель подкупольного пространства защитной оболочки Ленинградской АЭС-2. Диаметр модели оболочки 12,8 м, высота 11,7 м, масса несущих конструкций 20,6 т. Внутренний объем составляет 1176 м^3 . Внутри оболочки по опорному кольцу расположено

Таблица 1. Характеристики защитной оболочки АЭС-2006 и стендов

Параметр	АЭС-2006	КМС	Масштаб	СМК	Масштаб
Высота, м	67	28,9	1:2,3	12	—
Внутренний диаметр, м	44	12	1:3,7	12	1:3,7
Суммарный объем, м ³	76 700	1830	1:41	—	—
Объем над кольцевым зазором, м ³	48 622	769	1:63	1130	1:43
Нижний объем, м ³	28 078	1069	1:26	—	—
Площадь прямых участков труб теплообменника, м ²	1200	32,6	1:21,8	176	1:6,82
Объем над кольцевым зазором, деленный на площадь теплообменника	40,5	23,6	1:1,72	6,42	1:6,3
Высота от щели до теплообменника, м	22,8	4	1:5,7	~5	1:4,6
Высота теплообменника, м	5	1,7	1:2,94	2,5	1:2
Мощность системы, МВт	24	0,57	~1:40	0,14	1:160

16 теплообменников. Высота установки по верхнему коллектору 8,3 м от основания купола. Суммарная площадь теплообменной поверхности составляет 224 м² (с учетом коллекторов). По периметру основания стенда расположены электронагреватели. Эксперименты и численное моделирование течения на стенде СМК позволили установить характерные параметры течения воздуха в объеме модели защитной оболочки и непосредственно вблизи теплообменников [6].

Общая картина течения состоит в сложном взаимодействии восходящей струи, образующейся над нагревателем и распространяющейся вдоль стенки оболочки, и стекающей с теплообменников холодной (рис. 3). Анализ численного моделирования показал, что восходящая струя

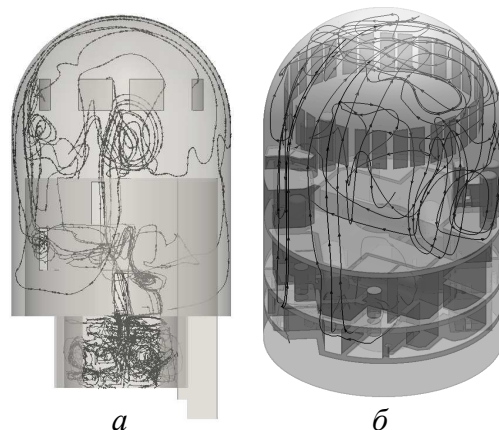


Р и с. 3. Рассчитанная с помощью трехмерного кода (—, — · —, - - -) и измеренная на высоте 5,24 (▲, <), 4,44 (■, □), 3,44 м (●, ○) вертикальная скорость течения под теплообменником СМК

оказывает заметное влияние на эффективность работы теплообменника.

Параметры стендов для обоснования пассивной системы отвода тепла из защитной оболочки приведены в табл. 1. Особенностью стенда КМС является объем купольного пространства, приходящийся на единицу поверхности теплообменников.

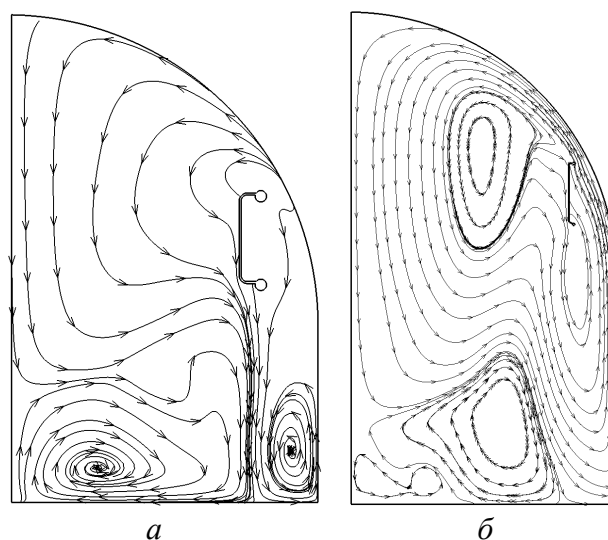
Течение парогазовой смеси в защитной оболочке и около теплообменников представить сложно, что затрудняет использование кода в сосредоточенных параметрах КУПОЛ-М без поддерживающих расчетов с помощью CFD-кодов. Результаты поддерживающих расчетов с использованием трехмерных гидродинамических кодов показали сложную картину течения. На рис. 4 видно, как пар проникает в кольцевой зазор и выходит из него в подкупольное пространство. Наблюдается некоторая асимметрия поступления пара в подкупольное пространство,



Р и с. 4. Течение в помещениях стенда КМС (а) и защитной оболочке Ленинградской АЭС-2 (б)

связанная с ориентацией проемов. Ее результатом является повышенная эффективность работы внешней, ориентированной к стенке защитной оболочки части секций теплообменников. Тем не менее расчеты показывают хорошее перемешивание среды почти по всему объему стенда КМС. Следует отметить, что характер течения слабо зависит от использования в расчетах той или иной модели турбулентности. Это облегчает выбор замыкающих соотношений для кода КУПОЛ-М. В то же время от модели турбулентности, заложенной в расчетный код, существенно зависят интенсивность конденсационных процессов и, как следствие, давление под защитной оболочкой.

Были проведены детальные расчеты обтекания одного теплообменника, помещенного в сектор подкупольного пространства. Рассмотрены два варианта: в одном варианте теплообменник моделировался участком вертикальной поверхности, в другом использовалась его реальная геометрия. Подачу пара моделировали заданием его расхода через кольцевой зазор. Результаты расчетов с помощью кодов ПГС-ТК и Star-CD по интегральным параметрам согласуются между собой и соответствуют полученным при расчетах в полной геометрии стенда (табл. 2).



Р и с. 5. Течение около теплообменника стенда КМС (а) и Ленинградской АЭС-2 (б)

Течение около теплообменника характеризуется сильной неоднородностью и зависит как от его конфигурации, так и от внешних условий. На рис. 5 показано течение около теплообменника стенда КМС и натурального теплообменника. На стенде КМС отмечается сильное нисходящее течение, образующееся около теплообменника и блокирующее восходящую струю. Распределение потоков массы по поверхности теплообменника характеризуется сильной неоднород-

Т а б л и ц а 2. Сопоставление результатов расчетного моделирования с помощью кодов ПГС-ТК и Star-CD

Номер экспери- мента	Секции и подсекции теплообменников	$P_{3.0}$, кПа	$T_{3.0}$, °C	$Q_{Т.О.}$, кВт	$Q_{сум}$, кВт	k , Вт/(м²·K)	
1	АС1 — АС2	352	117,5	Код ПГС-ТК			
	АС3 — АС4			76	301	380	
	АС5 — АС6			71		340	
	АС7 — АС8			80		410	
2	АС1 — АС2	446	130,3	74	658	360	
	АС3 — АС4			168		490	
	АС5 — АС6			152		440	
	АС7 — АС8			175		520	
1	АС1 — АС2	370	119,9	163		470	
	АС3 — АС4			Код Star-CD			
	АС5 — АС6			74		310	320
	АС7 — АС8			78			330
	Сектор с теплообмен- ником в виде участка поверхности	370	120,3	79	350		
	Сектор с реальным теп- лообменником	370	121,1	79	330		
				78	—	330	
			75	—	310		

ностью. Наибольшие потоки наблюдаются на нижних изогнутых участках труб, обтекаемых нисходящим течением, которое образуется около вертикальных участков труб теплообменников. Это подтверждается и тепловизионной съемкой. Эти участки вместе с коллекторами вносят значительный вклад в общий теплосъем.

На обтекание натурного теплообменника сильное влияние оказывает восходящая струя, распространяющаяся вдоль стенки защитной оболочки. Ее воздействие приводит к интенсивному течению в межтрубном зазоре, которое оттесняет пар от стороны теплообменника, обращенной к центру защитной оболочки. В результате интенсивность конденсации на этой стороне существенно меньше, чем на противоположной. В силу конструктивных особенностей натурного теплообменника вклад коллекторов и изогнутых участков труб крайне незначителен.

В табл. 3 сопоставлены результаты экспериментов на стенде КМС и расчетного модели-

рования с помощью кода КУПОЛ-М. Соответствие расчетных и экспериментальных данных удовлетворительно. Сравнение с данными, приведенными в табл. 2, показывает, что расчеты с помощью разных кодов согласуются между собой. Немного большая расчетная снимаемая мощность объясняется неучтенными потерями, связанными с прогревом постаментной части стенда.

На стенде КМС были исследованы распространение легкого газа (гелия) по помещениям стенда и его влияние на тепломассоперенос (табл. 4). В экспериментах наблюдалось хорошее перемешивание среды в помещениях герметичного объема при работе системы пассивного отвода тепла вне зависимости от места подачи гелия.

Расчеты конвекции в защитной оболочке АЭС с ВВЭР-1200 были выполнены для сценария аварии с большой течью теплоносителя первого контура при отказе спринклерной системы и одного канала системы пассивного отвода

Таблица 3. Результаты экспериментов на стенде КМС и расчетного моделирования с помощью кода КУПОЛ-М для бинарной смеси

Номер эксперимента	Секции и подсекции теплообменников	P , кПа	T , °C	$Q_{т.о.}$, кВт	$Q_{сум.}$, кВт	k , Вт/(м ² ·К)
Эксперимент						
1	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	371 ± 2	120 ± 2	68,0 ± 3,3 77,0 ± 3,3 53,3 ± 3,3 72,7 ± 3,3	271 ± 27	—
2	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	498 ± 2	135 ± 2	143 ± 3 151 ± 3 126 ± 3 148 ± 3	569 ± 25	—
3	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	442 ± 2	128	123 ± 5 146 ± 5 105 ± 5 132 ± 5	506 ± 40	—
Расчет						
1	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	374	117,4	74,6 78,3 73,9 77,2	304	373 369 370 369,8
2	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	483	131	158,6 163,2 155,1 159,4	636	442 441,2 442,1 440,7
3	AC1 — AC2 AC3 — AC4 AC5 — AC6 AC7 — AC8	419	123,5	124,7 129,3 123,7 128,2	505,9	448,1 445,8 449,8 448,1

Таблица 4. Сопоставление результатов экспериментов и расчетного моделирования с помощью кода КУПОЛ-М для тернарной смеси

Номер эксперимента	Секции и подсекции теплообменников	P , кПа	T , °C	C_{He} , % по объему	$Q_{\text{т.о.}}$, кВт	$Q_{\text{сум}}$, кВт
Эксперимент						
12-05	AC1 — AC2	240	98	0,15	43,6	173
	AC3 — AC4				42,8	
	AC5 — AC6				44,5	
	AC7 — AC8				41,7	
12-06	AC1 — AC2	263	101	5,7	48,3	191
	AC3 — AC4				47,1	
	AC5 — AC6				49,4	
	AC7 — AC8				46,5	
12-07	AC1 — AC2	285	103	10	49,3	195
	AC3 — AC4				47,7	
	AC5 — AC6				50,2	
	AC7 — AC8				47,4	
Расчет						
12-05	AC1 — AC2	235	92	0,16	39,5	159
	AC3 — AC4				39,5	
	AC5 — AC6				39,8	
	AC7 — AC8				39,8	
12-06	AC1 — AC2	264	96	6	45,5	184
	AC3 — AC4				45,5	
	AC5 — AC6				46,2	
	AC7 — AC8				46,2	
12-07	AC1 — AC2	286	97	11,2	47	190
	AC3 — AC4				46,9	
	AC5 — AC6				47,7	
	AC7 — AC8				47,7	

тепла от защитной оболочки. Теплообменники моделировали участками вертикальных поверхностей эквивалентной площади. Приведенные на рис. 4 результаты показывают сложную картину распространения пара внутри защитной оболочки, приводящего к сильной неравномерности распределения теплосъема по теплообменникам: теплообменники, расположенные в районе выхода пара из кольцевого зазора, снимают в 2,5—3 раза большую мощность, чем остальные. Тем не менее расчетные результаты с помощью трехмерных кодов соответствуют полученным с помощью кода КУПОЛ-М (табл. 5).

Выводы. Таким образом, код КУПОЛ-М и трехмерные гидродинамические коды были верифицированы в условиях, максимально приближенных к натурным. Согласование расчетных и экспериментальных данных хорошее. Использование верифицированных кодов способствует обоснованию функционирования системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки при запроектных авариях.

Таблица 5. Результаты расчета с помощью кодов КУПОЛ-М и Star-CD

Параметр	КУПОЛ-М	Star-CD
Расход пара, кг/с	8,45	8,2
Давление, кПа	367	384
Средняя температура, °C	126	127
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	1200	1200

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lien F., Leschziner M. Computational modelling of a transitional 3D turbine-cascade flow using a modified low-Re k — ε -model and a multi-block scheme. — Intern. J. Comp. Fluid Dynamics, 1999, v. 12, p. 1—15.
2. Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate. — Intern. J. Heat Mass Transfer, 1988, v. 31, № 8, p. 1723—1734.
3. Dehby A., Golay M., Kazimi M. Condensation experiments in steam-air steam-helium mixture under turbulent natural convection. — In: National Conf. of Heat Transfer. AIChE Symp. Ser., 1991, № 87(283), p. 19—28.

4. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Вахрушев В.В. и др. Экспериментальное обоснование контура охлаждения системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки проекта АЭС-2006 для площадки Ленинградской АЭС. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 3, с. 148—152.
5. Мигров Ю.А., Ефимов В.К., Засуха В.К. и др. Экспериментальное исследование внутриконтейментных процессов и пассивных систем безопасности проекта АЭС-2006 на стенде КМС. — В сб.: 6-я Межд. научно-

технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 2009, с. 62.

6. Безлепкин В.В., Затевахин М.А., Семашко С.Е. и др. Применение многоточечной системы ЛДА при экспериментальном исследовании системы отвода тепла из контеймента. — В сб.: 11-я Межд. научно-технич. конф. «Оптические методы исследования потоков». Москва, 27—30 июня 2011 г., доклад № 119.

Поступила в Редакцию 21.06.13

УДК 621.039+536.242

ЗНАЧЕНИЕ И МЕСТО КРУПНОМАСШТАБНОГО СТЕНДА КМС В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ВВЭР

Василенко В.А., Мигров Ю.А., Засуха В.К., Ефимов В.К. (НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор),
Безлепкин В.В., Семашко С.Е. (ОАО Головной ин-т «ВНИПИЭТ», г. Санкт-Петербург)

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям процессов, связанных с течениями теплоносителя, а также с тяжелыми авариями, сопровождающимися выбросом большого количества энергии, радиоактивных продуктов и водорода в атмосферу защитной оболочки АЭС. В этих случаях защитная оболочка является последним барьером на пути распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду. Обоснование ее целостности и герметичности при любых сценариях развития тяжелой аварии является неременным требованием к проекту АЭС. Обоснование безопасности любого проекта АЭС заключается не только в точном прогнозировании процессов, которые могут быть при развитии аварий, но и в разработке технических средств, позволяющих ими управлять и смягчать их последствия. При этом обоснованность и эффективность таких средств должны быть подтверждены на экспериментальных установках в условиях, приближенных к условиям на реальном объекте.

В этой связи исследование изменения давления и температуры в защитной оболочке, распространения и локализации продуктов деления (аэрозолей), перемешивания, стратификации водорода и верификация расчетных кодов на экспериментальных данных являются важными составляющими обоснования безопасности АЭС. Экспериментальные результаты, полученные с помощью расчетных кодов, используются для оценки параметров, важных для безопасности АЭС, и для разработки мероприятий по

предотвращению и устранению возможных последствий тяжелых аварий.

Для удержания термодинамических параметров среды в защитной оболочке АЭС в проектных пределах предусматриваются специальные меры, в том числе пассивный отвод тепла из защитной оболочки в окружающую среду, распыление холодной воды в атмосфере защитной оболочки через форсунки спринклерной системы, контролируемое удаление водорода взрывоопасной концентрации, сброс избыточного давления через систему фильтров в атмосферу. Для практической реализации каждой из этих мер требуются разработка соответствующих технических решений и значительный объем расчетно-экспериментальных исследований для обоснования работоспособности и эффективности систем безопасности.

В мировой практике экспериментальная база, предназначенная для исследования таких процессов, включает стенды различного класса:

мелкомасштабные стенды для исследования локальных явлений тепломассопереноса. На таких установках получают основные замыкающие соотношения для физико-математических моделей;

стенды среднего масштаба, на которых можно воспроизвести условия каких-либо сложных натуральных процессов. Данные, полученные на этих установках, служат для верификации отдельных моделей или блоков расчетных кодов;