

Хорст-Михаэль Прассер, Герхард Грюнвальд, Томас Хёхне, Сёрен Клайм, Ульрих Рохде, Франк-Петер Вайс.

Перемешивание теплоносителя в реакторах типа PWR¹: при переходных процессах вследствие деборирования, разрывах паропровода, аварийного впрыска охлаждающей воды в активную зону – эксперименты и их анализы

Реакция активной зоны реактора на возмущение реактивности, вызванное снижением концентрации борной кислоты или температуры теплоносителя в одной из петель первого контура, существенно зависит от степени перемешивания с остальными невозмущенными петлями. Предположение о равномерном распределении возмущения на входе в активную зону, т.е. об идеальном перемешивании, приводит к недооценке последствий. С другой стороны, допускаемое отсутствие перемешивания представляет другую крайность – слишком большой ввод реактивности. Неопределенности между этими двумя предельными вариантами часто намного больше, чем порядок величины. В действительности, теплоноситель из возмущенной петли частично перемешивается с теплоносителем из других петель первого контура. В результате, реальное распределение параметра, представляющего интерес на входе в активную зону является промежуточным между этими двумя предельными вариантами как относительно формы, так и относительно диапазона.

Именно поэтому перемешивание теплоносителя привлекает в последние годы повышенный научный интерес. Для исследования перемешивания теплоносителя было построено множество испытательных стендов, каждый из которых учитывал геометрические особенности различных типов реактора [1-8]. В случае [1-4] исследованный переходный процесс был связан с непреднамеренным включением насоса в петле с очень низкой концентрацией борной кислоты. Деборированная вода может аккумулироваться благодаря различным причинам, например, из-за неисправности в системе вспомогательной питательной воды при останове реактора или из-за протечки теплообменной трубки в парогенераторе. Однако, ряд сценариев, которые могут потенциально приводить к переходному процессу с разбавлением бора на самом деле много шире. Особенно постулировались так называемые переходные процессы естественного разбавления бора с широким диапазоном граничных условий. Стартовой точкой является накопление деборированной воды в течение фазы кипения и конденсирования в первом контуре при маленькой аварии типа LOCA². После повторного заполнения контура, может начаться повторная естественная циркуляция, и деборированная вода вытиснится в реактор. Это может быть связано с совершенно разными количествами и составами накопленного конденсата, а также разными расходами в петлях как функций времени.

К другому важному явлению относят перемешивание теплоносителя с различными температурами в петлях. Это явление характерно для событий с разрывом главного паропровода, когда происходит охлаждение теплоносителя в петле с поврежденным паропроводом. На ранней фазе таких переходных процессов все циркуляционные насосы ещё работают и модели перемешивания намного отличаются от процессов, наблюдаемых при включении единственного насоса или развитии естественной циркуляции.

Третье, относящееся к делу, явление - это перемешивание холодной воды системы аварийного охлаждения активной зоны (CAOЗ³), впрыскиваемой в холодную нитку реакторов типа PWR [5-8]. В этом случае поле потока может, в основном, определяться эффектами гравитации из-за существенной разницы между плотностью воды CAOЗ и текущей плотностью теплоносителя. В результате образуется струя холодной воды, текущей вниз по направлению к нижней камере смешивания. Это может вызывать термические нагрузки на стенку корпуса реактора (PTS⁴) под давлением. Кроме этого, знание о распределении воды CAOЗ на входе в активную зону также важно

¹ PWR – Pressurized Water Reactor – реактор с водой под давлением

² LOCA – Loss-Of-Coolant Accident – авария с потерей теплоносителя

³ ECC – Emergency Core Cooling – система аварийного охлаждения активной зоны (CAOЗ)

⁴ PTS – Pressure Thermal Shock events – события с резкими изменениями температуры и давления

для прогнозирования поведения активной зоны, т.к. достигаемая подкритичность зависит от распределения борной кислоты.

Для исследования перемешивания теплоносителя в корпусе реактора под давлением по тракту потока от входных патрубков до входа в активную зону был построен и эксплуатируется в течение последних трех лет (см. рис.1) испытательный стенд ROCOM⁵. Стенд представляет модель немецкого реактора проекта KONVOI типа PWR (1300 МВт электрических) в масштабе 1:5 (см. рис.2). Поскольку было запланировано использовать стенд в широком диапазоне возможных вариантов перемешивания, то ROCOM был оборудован четырьмя полностью функционирующими петлями, т.е. в нем есть 4 циркуляционных насоса, которые вращаются двигателями с управляемыми компьютером преобразователями частоты. Таким образом, на стенде можно реализовать широкий спектр расходных режимов, таких как: работа с четырьмя петлями, работа с отключенными насосами, моделируемые режимы естественной циркуляции с разными темпами изменения расходов. Для создания условий естественной циркуляции соответствующие насосы работают на низких скоростях вращения посредством системы преобразования частоты. В случае экспериментов по впрыскиванию от САОЗ более высокая плотность впрыскиваемой воды имитировалась добавлением сахара (глюкозы).

Изменение пространственного распределения деборированного теплоносителя относительно воды САОЗ измерялось с помощью трассера, которым являлся раствор поваренной соли. Раствор трассера впрыскивался в одну из петель. Смешивающее устройство, расположенное вверх по течению теплоносителя от входных патрубков, обеспечивает равномерное распределение трассера в главном циркуляционном трубопроводе. Режим времени впрыскивания контролируется магнитными клапанами. Распределения проводимости, отражающие имеющуюся долю воды САОЗ в данное время и в данном местоположении, измерялись зондами, представляющими электродную сетку. Один зонд возле входного патрубка реактора (16x16 измерительных точек), два зонда в верхней и нижней части опускного канала (двухмерные решетки из 4 радиальных и 64 угловых измерительных позиций) и один зонд на входе в активную зону (входы каждого из 193 топливных элементов). Максимальная частота измерения составляет 200 Гц. В большинстве случаев, частота наблюдаемых эффектов намного меньше, так что каждые 10 достоверных измеренных результатов усреднялись и данные сохранялись с частотой 20 Гц. Некоторые испытания на частоте 200 Гц обнаружили детальную информацию о турбулентной структуре смешивающихся потоков.

Презентация включает визуализации измеренных распределений на входе в реактор, в опускном канале и на входе в активную зону. При работающих главных циркуляционных насосах теплоноситель из возмущенной петли поступает в сектор соответствующего входного патрубка в азимутальной ориентации. Но в противоречии с предельным предположением о резком характере сектора, углы наклона сектора сглажены, и максимальное возмущение составляет около 70-80% от возмущения на входе в реактор (см. рис.3). Такой случай характерен для разрыва главного паропровода, когда переохлажденная вода, поступающая из возмущенного парогенератора, вызывает реактивный переходный процесс. Благодаря упомянутому плавному перемешиванию, вызванное предельное изменение мощности намного меньше, чем упомянутое в случае предположения о резком характере сектора. Сценарии включения насоса также как и асимметричная естественная циркуляция в одной из четырех петель связаны с другой картиной. В этом случае вода с пониженной борной концентрацией поступает на вход в активную зону со стороны противоположной входному патрубку, в котором поток начал движение в азимутальной ориентации (см. рис.4).

Была разработана упрощенная математическая модель для обобщения экспериментальных результатов, использующая некоторые линейные свойства уравнения переноса для температуры относительно концентрации борной кислоты. Длина и амплитуда возмущения могут варьироваться в автономном режиме, т.е. без повторения экспериментов, посредством суперпозиции измеренных данных на входе в активную зону при коротких пульсациях трассера (квазиимпульсы Дирака), генерируемых на входе в реактор. Такой метод был протестирован сравнением с измеренными данными при коротких и длительных впрыскиваниях трассера.

Впрыскивание воды САОЗ с высокой концентрации сопровождается появлением струи холодной воды текущей вниз в опускном канале. На стенде ROCOM были выполнены эксперимен-

⁵ ROCOM – Rossendorf Coolant Mixing Model – модель перемешивания теплоносителя Россендорфа

ты, чтобы определить переход от движения потока в опускном канале под влиянием сил инерции к режиму движения под влиянием гравитационных сил (критерий Фруда). Для этих экспериментов перемешивающее устройство в главном циркуляционном трубопроводе было заменено моделью Т-соединения с линией впрыска САОЗ. Относительная разность плотности варьировалась от 0 до 10%, а петлевой расход составлял от 0 до 10% от номинального расхода. Эффект струйности больше проявляется при высоких разностях плотности. С другой стороны, формирование струи сильно подавляется перемешиванием теплоносителя, а интенсивность перемешивания возрастает с ростом расхода в петле. В случае потока под большим воздействием инерционных сил (высокие значения чисел Фруда) вода САОЗ достигает входа в активную зону вначале со стороны противоположной петли с возмущением по азимутальной ориентации. Это является результатом больших вторичных вихрей в опускном канале. Если имеется большая разница плотности (низкие значения чисел Фруда), то вода САОЗ падает вниз практически по прямой линии и достигает входа активной зоны по азимуту входного патрубка (см. рис. 5).

Параллельно экспериментальной работе были выполнены расчеты по CFD⁶ кодам. Хорошие результаты были достигнуты при использовании кода CFX-4.2. Район патрубка, опускного канала и нижней камеры смешения были дискретизированы решеткой с приблизительно 400000 узлами. Расчеты хорошо отражают, как форму, так и амплитуду распределений на входе в активную зону, если используется $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Детальная информация, представляемая датчиками сетки, помогает проводить валидацию кода.

Ссылки:

1. Д. Аварез и др. (1992). Трехмерные расчеты и экспериментальные исследования потока теплоносителя первого контура в корпусе реактора типа PWR (900 МВт). Труды конференции по термогидравлике ядерных реакторов (NURETH-5), т. II, с.586-592.
2. Алавьон и др. (1995). Экспериментальный и расчетный подход при исследовании переходных процессов при разбавлении бора в реакторах типа PWR. Совещание специалистов комитета по безопасности ядерных установок (CSNI) по переходным процессам при изменении концентрации борной кислоты. Государственный Университет, Пенсильвания, США, 18-20 октября 1995 г.
3. О.И. Мелихов и др. (2001) Анализ разбавления бора в реакторе ВВЭР-1000. Сборник трудов конференции по ядерной технологии 2001. с.117-120, ООО "INFORUM, Бонн, Германия
4. В.Н. Ульяновский и др. (2000) Перемешивание теплоносителя с разной концентрацией бора на входе в активную зону реактора ВВЭР-1000 при включении ГЦН. Сборник трудов конференции по ядерной технологии 2000. с.115-118, ООО "INFORUM, Бонн, Германия
5. Программа по безопасности HDR- тепловое перемешивание в холодной нитке и опускном канале испытательного стенда HDR. (1990). Отчет PHDR 91-89, Карлсруе, Германия
6. К. Уммингер и др. (1999). Теплогидравлика реактора PWR при событиях разбавления бора: Экспериментальные результаты, полученные на испытательных стендах PKL и UPTF. 9-я международная конференция по термогидравлике ядерных реакторов (NURETH-9). Сан-Франциско, Калифорния, США.
7. М. Гаврилас и К. Кигер (2001), ISP-43: Сравнительный отчет по экспериментальному исследованию переходного процесса при быстром разбавлении бора. NEA/CSNI/(2000) 22
8. Б.Вудс (2001). UM 2x4 петлевые экспериментальные исследования эффектов сил инерции и подъемной силы в кольцевом смешанном течении при переходных процессах, связанных с быстрым разбавлением бора. Тезисы. Университет Мериленда, США

⁶ CFD – Computational Fluid Dynamics –система математического моделирования динамики и теплообмена потоков жидкостей и газов

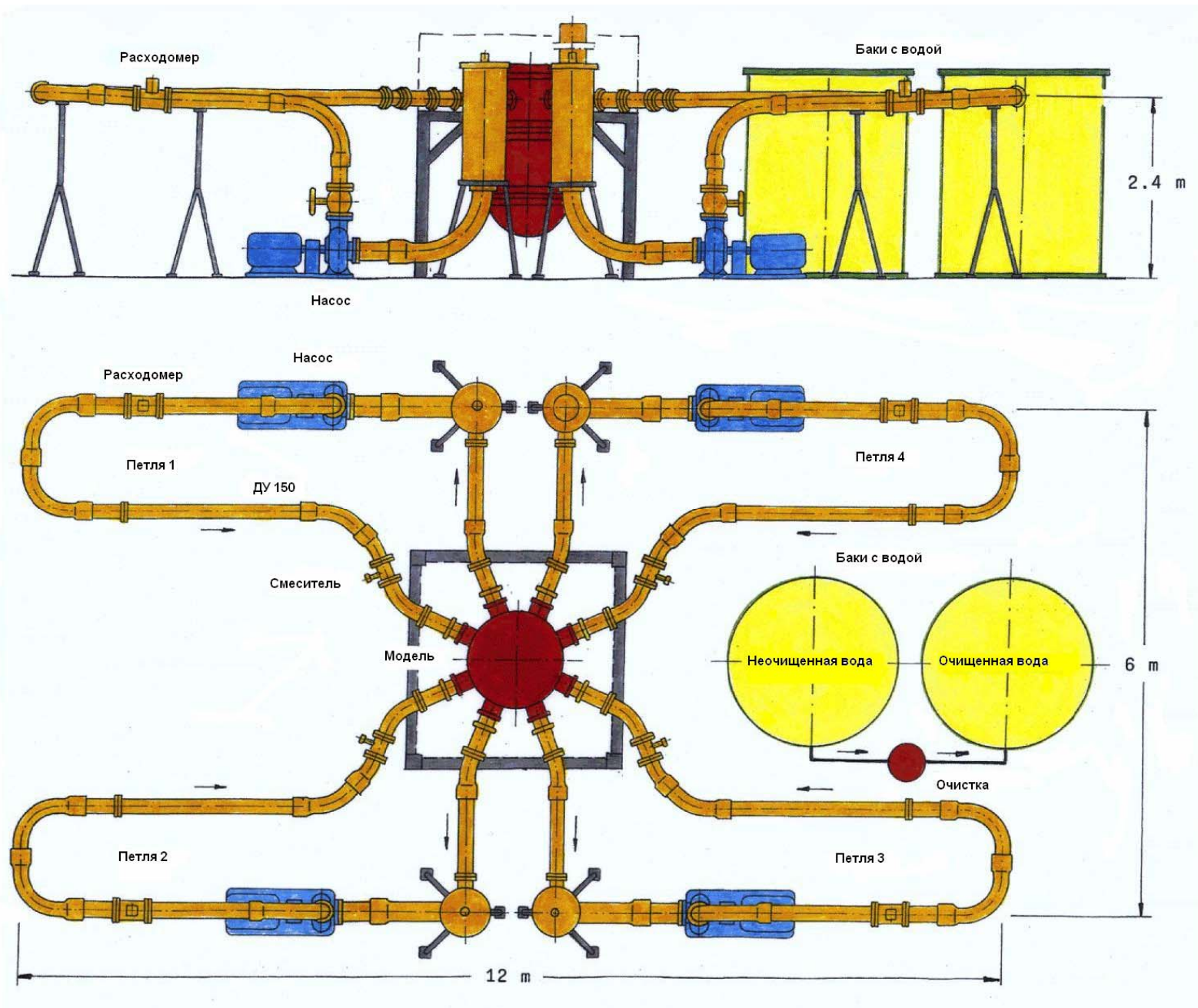


Рис.1. Схема испытательного стенда ROCOM

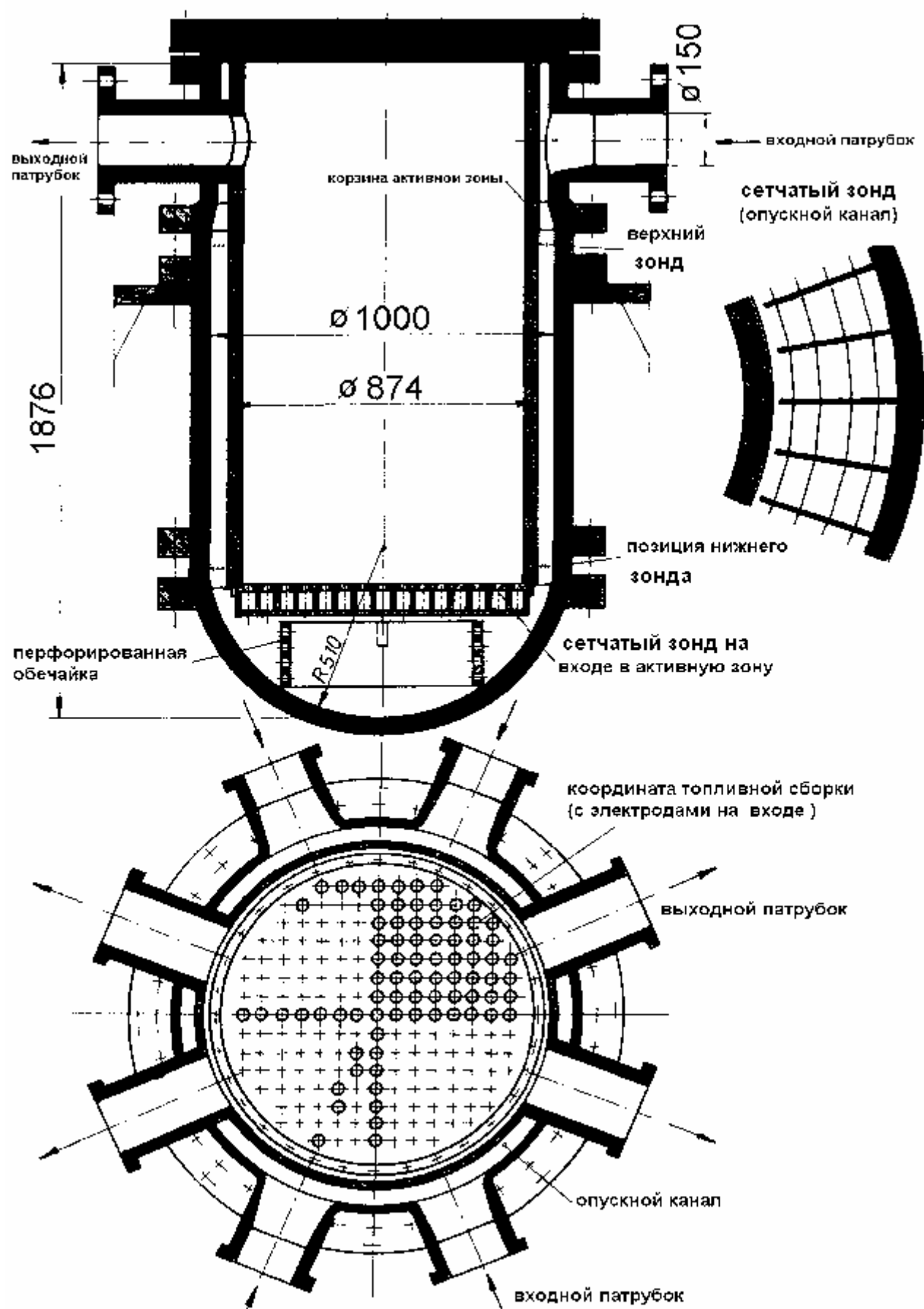


Рис.2. Модель реактора с точками измерений (сеточных зондов)

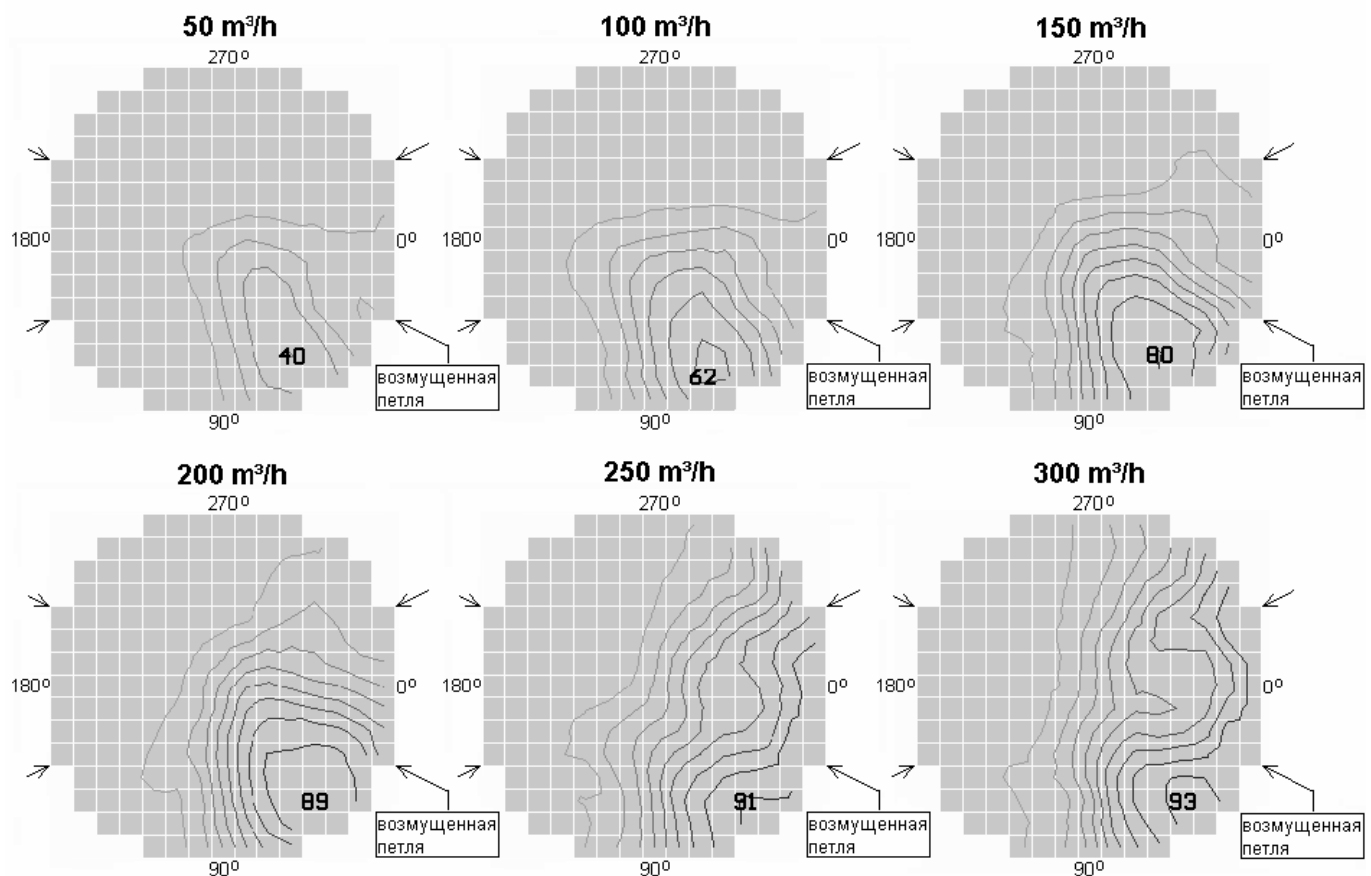


Рис.3. Коэффициенты перемешивания (разделение теплоносителя от петли 1) на входе в активную зону при работе всех 4-х петель. Расход в петлях 2-4: 200 м³/час

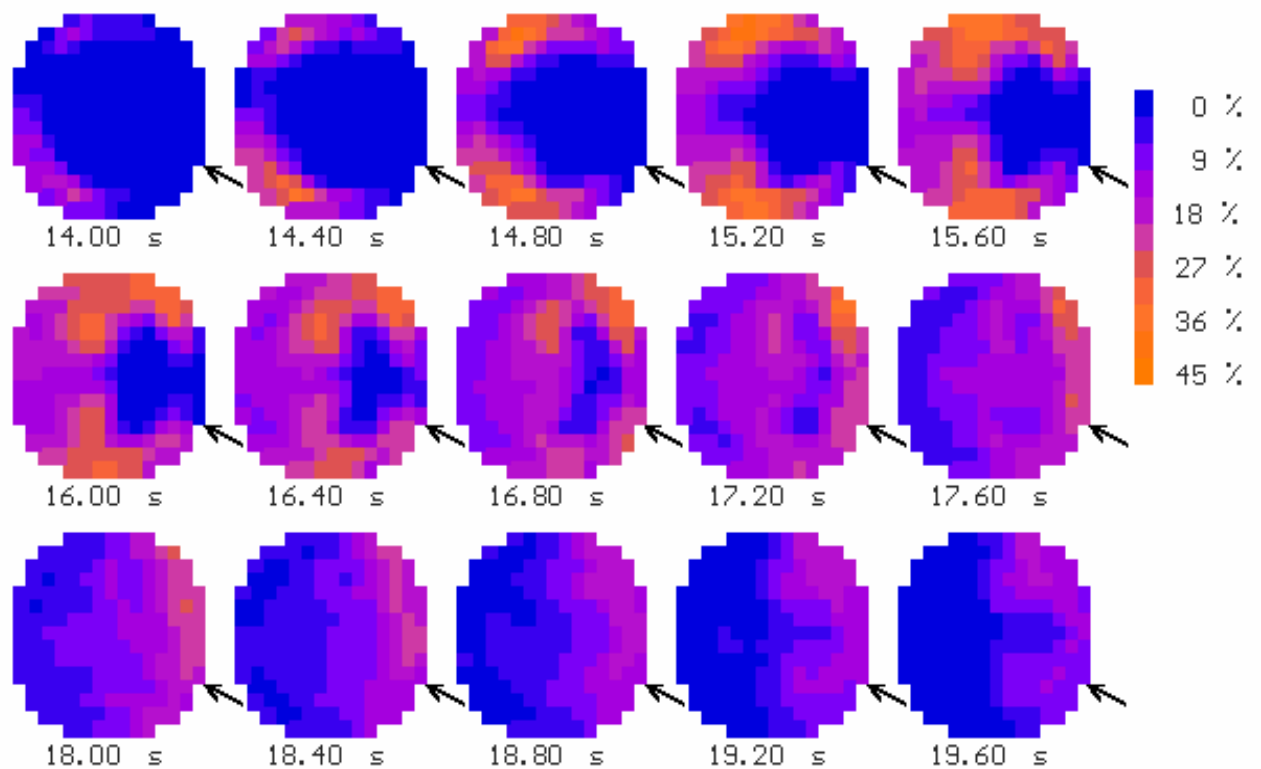


Рис. 4. Изменение относительного борного разбавления на входе в активную зону как функции времени на пример включения насоса

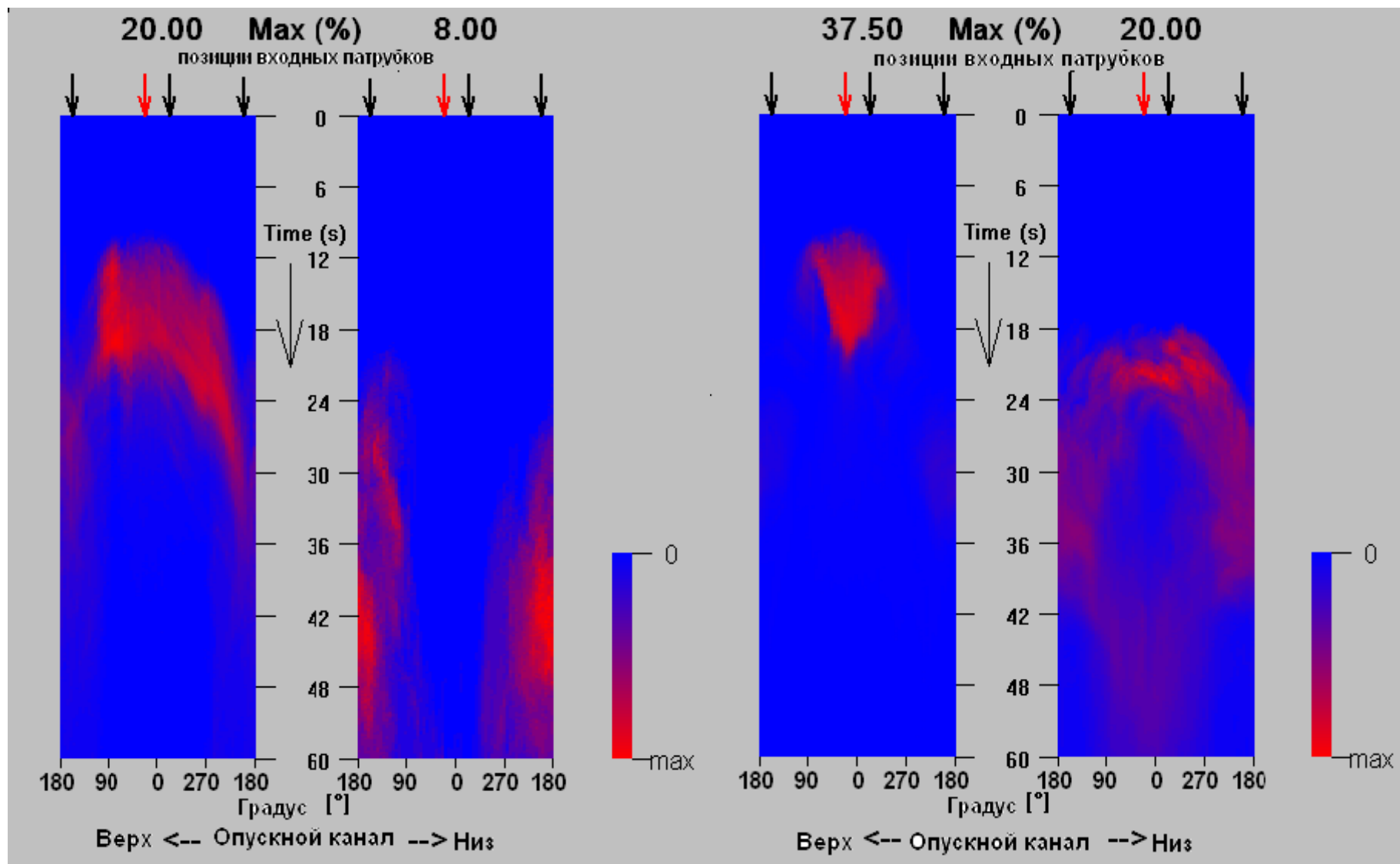


Рис. 5 Распределение воды САОЗ в опускном канале (развернутой проекции) корпуса реактора, слева – при отсутствии разницы в плотности, справа – разница плотности 10%, расход в петле 1 - 10% от номинального расхода (естественная циркуляция)