

1555800

На правах рукописи

УДК 621.177

ШИШОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА СЕПАРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ АЭС С РЕАКТОРАМИ РБМК**

Специальность 05.14.03

Ядерные энергетические установки

· Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 1997

Работа выполнена в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники.

Научный руководитель:

к. т. н., доцент Селиховкин С.В.

Научный консультант:

к. т. н., ст. н. с. Новосельский О.Ю.

Официальные оппоненты:

д. т. н., заведующий лаборатории
Энергетического Института
им. Г.М. Кржижановского (ЭНИН)
Агеев А.Г.

к. т. н., доцент,
МГТУ им. Н.Э.Баумана Хвостов В.И.

Ведущая организация:

Московский энергетический институт
(Технический Университет)

1 "декабрь" 1997 г. на заседании
08 в Московском государственном
мана по адресу: 107005, Москва Б-5,

и в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

1555800

___ 1997 г.

Кутуков Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Внутрикорпусные устройства (ВКУ) барабанов-сепараторов (БС) диаметром 2,3 м, которые установлены на всех АЭС с РБМК-1000 первого поколения и на блоках №3 и №4 Ленинградской АЭС (ЛАЭС), не позволяют сохранять достаточно большой оперативный запас воды, такой, чтобы не создавать угрозу срыва главных циркуляционных насосов (ГЦН) при срабатывании аварийной защиты на полной мощности. Проектные ВКУ не обеспечивают достаточного равномерного распределения пара по ширине погруженного дырчатого листа (ПДЛ) и надежной работы гидрозатворов на сливе воды с ПДЛ, что ухудшает сепарационные характеристики БС.

Одним из путей повышения надежности и безопасности АЭС РБМК-1000 является модернизация ВКУ БС диаметром 2,3 м, которая позволяет увеличить в них запас воды, а следовательно и в контуре многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) и улучшить сепарационные характеристики при использовании вместо проектной конструкции ВКУ системы с коллекторной раздачей пароводяной смеси.

1555800
Применение системы длительного расхолаживания из БС (СДР БС), которая органично встраивается в новые ВКУ, позволяет повысить безопасность энергоблоков РБМК и заметно увеличить эксплуатационную надежность. Это достигается благодаря возврату продувочной воды после байпасной очистки по трубопроводам СДР БС и соответственно исключению таких малонадежных узлов как смесители на трубопроводах питательной воды. Использование СДР БС в режиме ремонтного охлаждения реактора, снижает трудо- и дозозатраты персонала и позволяет проводить ремонтные работы на оборудовании опускной части КМПЦ без ограничения по времени.

Работая по алгоритму системы аварийного охлаждения реактора (САОР), СДР БС обеспечивает подачу воды от насосов в пароводяные коммуникации (ПВК). Вода СДР БС поступает в топливные каналы (ТК) в режиме опрокинутой

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1555800

Шишов А.В. Разработка сепар



циркуляции. Таким образом исключается ситуация, когда какие-либо ТК при аварии с разрывом трубопровода или коллектора в напорной части КМПЦ могут оказаться без адекватного охлаждения.

В процессе эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами РБМК-1000 и -1500 в сварных швах водоуравнительных трубопроводов (ВУТ) БС отмечено образование многочисленных дефектов типа трещин, которые вследствие неодинаковых тепловых перемещений соседних БС при разогреве и расхолаживании КМПЦ испытывают значительные механические напряжения. Один из наиболее реальных путей повышения надежности этих трубопроводов заключается в снижении их жесткости за счет уменьшения диаметра и/или изменения трассировки при условии сохранения нормируемой влажности пара после БС.

Цель работы.

1. Исследовать сепарационные и гидродинамические характеристики модернизированных ВКУ БС.

2. Проанализировать гидравлические характеристики СДР БС при пуске, функционировании системы в режиме аварийного охлаждения реактора из БС, ремонтного расхолаживания и возврата продувочной воды после байпасной очистки через СДР БС, а также и останове.

3. Проанализировать сепарационные характеристики БС с учетом разбаланса уровней воды между ними при изменении геометрических размеров ВУТ.

4. Разработать методики и программы расчетов гидравлических процессов в СДР БС и разности уровней воды между БС.

5. Верифицировать программы по результатам экспериментов на моделях и действующих энергоблоках на АЭС.

Научная новизна. Впервые для модернизированных ВКУ БС диаметром 2,3 м реакторов РБМК-1000 первого поколения в условиях эксплуатации получены: зависимости влажности отсепарированного пара в паровых коллекторах БС от положения массового уровня воды над ПДЛ при различных мощностях реактора; характеристики системы измерения уровня воды в БС;

запас воды в БС; положения уставок аварийных защит по повышению и понижению уровня воды в БС. Впервые были выполнены сепарационные испытания модернизированных ВКУ при уровнях воды в БС ниже ПДЛ.

Впервые для СДР БС разработана математическая модель, позволяющая определять ее гидравлические характеристики при пуске, останове и функционировании в различных режимах эксплуатации.

Впервые проведено комплексное экспериментально-расчетное исследование гидравлических характеристик ВУТ БС, которое позволило определить их вклад в уменьшение разности уровней воды между БС. Определено, что разность уровней воды между соседними БС, в основном, определяется разбалансом расходов жидкой фазы теплоносителя по БС и конструктивным оформлением опускной части контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). Разработана первая математическая модель расчета гидравлики ВУТ БС, учитывающая важные особенности их работы совместно с опускной частью КМПЦ, паровым и питательным трактами.

Практическая ценность. Определены в широком диапазоне зависимости оперативного запаса воды и сепарационные характеристики от мощности реактора и положения массового уровня воды в БС с модернизированными ВКУ.

Создана методика расчета и вычислительная программа SDR для разработки оптимальной схемы и конструкции отдельных узлов СДР БС для действующих АЭС.

Создана методика расчета и вычислительная программа VUT для модернизации ВУТ БС.

В настоящее время модернизированными ВКУ оснащены БС блоков №1 и №2 ЛАЭС. На блоке №2 они эксплуатируются с декабря 1994 г., а на блоке №1 с июня 1996 г. Ведется монтаж ВКУ на блоке №1 Курской АЭС (КуАЭС).

Программа SDR использовалась для гидравлического обоснования СДР БС блоков №1 и №2 ЛАЭС в двух режимах функционирования САОР БС и ремонтного расхолаживания. Для блока №2 также рассчитаны минимально

необходимые расходы воды в систему с учетом неравномерности раздачи по топливным каналам и остаточному энерговыделению в активной зоне реактора по истечении одних, двух, трех, четырех и пяти суток после останова в режиме ремонтного расколаживания. СДР БС на блоке №2 эксплуатируется около трех, а на блоке №1 полутора лет. Аналогичное обоснование выполнено для СДР БС блока №1 КуАЭС и блока №3 ЛАЭС, которые имеют другую конструкцию коллекторов, установленных внутри БС.

Программа ВУТ применялась для обоснования проекта при выполнении первого этапа реконструкции ВУТ блоков №1 и №2 Игналинской АЭС (ИАЭС), который заключался в ликвидации четырех из шести имеющихся ВУТ на каждой половине КМПЦ между БС. После проведения реконструкции данные блоки эксплуатируются около полутора лет. На блоке №1 КуАЭС проведена реконструкция, заключающаяся в изменении трассировки ВУТ с дополнением в виде пространственногогиба при сохранении внутреннего диаметра и количества данных трубопроводов. В настоящее время выполнен монтаж измененных ВУТ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международном семинаре МАГАТЕ “IAEA Workshop on Regulatory Assessment of the Safety Upgrading of operational NPPs”, Ленинградская АЭС, 1996 г.; на международном симпозиуме “The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation”, Москва, 1997 г., на научных семинарах в НИКИЭТ и МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 5 печатных работах и 24 научно-технических отчетах.

Объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, выводов, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 243 страницах текста, содержит 79 рисунков, 30 таблиц, список литературы включает 48 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы и указаны цели в повышении эксплуатационной надежности и безопасности АЭС с РБМК-1000 и -1500, а также приводится краткое содержание глав работы.

В первой главе описываются конструкции различных типов БС, которые эксплуатируются в настоящее время на АЭС с РБМК, а также проводится анализ экспериментальных работ на моделирующих стендах по отработке ВКУ и промышленных испытаний по определению сепарационных и гидродинамических характеристик БС на энергоблоках.

Изучение гидродинамики ВКУ БС РБМК-1000 на экспериментальных установках и анализ данных эксплуатации и сепарационных испытаний БС на энергоблоках позволили найти пути их усовершенствования. Это стало возможным при использовании системы с коллекторной раздачей пароводяной смеси внутри БС, рис.1. Особенностью системы является постоянство запаса воды в БС от мощности реактора и равномерное распределение скорости пара по ширине ПДЛ.

Применение СДР БС, которая органично встраивается в новые ВКУ, позволяет повысить безопасность энергоблоков РБМК и заметно увеличить эксплуатационную надежность.

Эксплуатация РБМК показывает, что между БС постоянно есть разность уровней воды. Эта разность ограничена условием обеспечения нормируемой влажности пара менее 0,1% на выходе из сепараторов. Поэтому связи по воде и пару соседних БС должны обладать как малым гидравлическим сопротивлением, так и малой механической жесткостью для компенсации взаимного перемещения БС. Таким образом, любое решение в отношении реконструкции ВУТ БС является компромиссным.

Исходя из рассмотренного материала в конце главы сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе анализируются результаты сепарационных и гидродинамических испытаний модернизированных ВКУ на энергоблоках №1 и №2 ЛАЭС. Испытания проведены по опробованной методике с учетом особенностей испытываемых конструкций. Измерения выполнялись в диапазоне массовых уровней воды над ПДЛ от +20 до +350 мм. Каждая серия измерений проводилась на следующих мощностях блока (эл): МКУ, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 МВт. Кроме того, часть испытаний была проведена в расширенном диапазоне изменения уровня воды в БС от 0 до +630 мм (ноль совпадает с геометрической осью БС).

С использованием этих данных выполняется обоснование работоспособности системы измерения уровня воды в БС, по результатам которого выбираются уровнемеры с наиболее достоверными показаниями. Далее по этим уровнемерам строятся сепарационные характеристики и определяется оперативный запас воды в БС, а также выдаются рекомендации на положение уставок аварийных защит и поддержание номинального массового уровня воды над ПДЛ.

Важным показателем эффективности работы модернизированных ВКУ является демонстрируемая экспериментально независимость запаса воды в БС от мощности реактора (рис.2). Установлена зависимость между количеством воды в БС с модернизированными ВКУ и показаниями торцевого уровнемера, рис.3.

Результаты сепарационных испытаний на блоке №2 ЛАЭС представлены на рис.4. Видно, что все четыре БС блока №2 (БС11, БС12, БС21 и БС22) имеют идентичные сепарационные характеристики. Влажность пара с повышением уровня над ПДЛ монотонно возрастает, не превышая величины 0,03 %, а в диапазоне эксплуатационного уровня воды 0 ± 50 мм составляет не более 0,02 %.

Нормируемого значения 0,1 % влажность отсепарированного пара достигает для номинальной мощности блока при массовом уровне воды +220 мм по показаниям уровнемеров с базой УС 630 мм (или +320 мм над ПДЛ).

Результаты сепарационных испытания на блоке №1 ЛАЭС представлены

на рис.5. Необходимо отметить, что при уровнях воды в БС ниже ПДП не наблюдалось повышения влажности пара, как это имело место в БС с проектными ВКУ.

В третьей главе описывается СДР БС с методикой гидравлического расчета и вычислительной программой SDR. Программа SDR предназначена для гидравлического обоснования проектов СДР БС. Написана на языке FORTRAN для IBM PC объемом около 7500 строк.

По результатам функциональных испытаний СДР БС на энергоблоках №1 и №2 ЛАЭС и работ на гидравлическом стенде проводится сравнение экспериментальных и расчетных данных. Представлен анализ погрешностей измерений и расчета по программе SDR. На базе проведенных исследований вырабатываются предложения по оптимальному конструктивному оформлению отдельных элементов и узлов СДР БС для энергоблока №3 ЛАЭС. Проводится гидравлический расчет системы с обоснованием работоспособности в режиме ремонтного охлаждения.

В методике расчета СДР БС рассматривается коллекторная система, которая распределяет воду, подаваемую на одну половину КМПЦ, сначала по БС (наружная часть коллекторной системы), затем внутри каждого БС - по трубопроводам ПВК (внутренняя часть коллекторной системы). Каждый из двух коллекторов наружной части системы (в помещении БС) распределяет воду СДР на два БС, установленных в этом помещении. От каждого из наружных коллекторов вода отводится восемью трубопроводами Ду68, по четыре трубопровода на каждый БС. Введенная через резервные патрубки БС, вода восемью трубопроводами Ду49 в каждом БС подается во внутренний коллектор, из которого она распределяется по всем ПВК, подсоединенным к данному БС (около 420 шт), с помощью трубопроводов Ду10. Задача расчета заключается в определении значений расходов в каждом трубопроводе Ду10 при заданном расходе на входе в систему и известной геометрии трубопроводов.

Функциональные испытания СДР БС были проведены после выхода из

ремонта блока №2 ЛАЭС. Цель испытаний - определение наличия и величины расхода в каждом трубопроводе Ду10, подающим воду в ПВК.

Из результатов пуско-наладочных работ следует, что основная трудность в условиях АЭС состоит в определении минимально необходимого расхода воды на половину КМПЦ, при котором гарантированно выбиваются воздушные пробки из трубопроводов Ду10 СДР БС. Определение этой величины для включения ее в эксплуатационную документацию потребовало специального исследования на стенде с натурными трубопроводами Ду10 от СДР БС блоков №1 и №2 ЛАЭС. Экспериментальное исследование, выполненное на модели внутрикорпусных трубопроводов СДР БС, не только позволило ответить на этот вопрос, но и получить гидравлические характеристики реальных трубопроводов.

Выполненные измерения расходов охлаждающей воды в ТК на энергоблоке и экспериментальные исследования по определению гидравлических характеристик трубопроводов Ду10 СДР БС блоков №1 и №2 ЛАЭС позволили оценить достоверность модели программы SDR при расходах воды в систему характерных для режимов ее эксплуатации. Проведенный анализ показал хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Для базового расхода воды 200 т/ч на половину КМПЦ в режиме ремонтного охлаждения отклонения составили не более $\pm 12\%$. Сделан вывод, что при использовании в качестве входных данных среднестатистических (проектных) гидравлических характеристик трубопроводов, программа SDR позволяет получить достоверные результаты для реально выполненных трубопроводных систем СДР БС.

В четвертой главе излагается методика гидравлического расчета по определению разности уровней воды между соседними БС с описанием методических особенностей и вычислительной программы VUT. Методические особенности заключаются в том, что для удобства расчетов уравнения преобразованы и записаны в безразмерном виде или в отклонениях. Программа VUT предназначена для гидравлического обоснования проектов реконструкции ВУТ БС. Написана на языке FORTRAN для IBM PC объемом около 800 строк.

Объектом исследования на теплофизическом (пароводяном) стенде являлись модели двух БС РБМК-1000. Результаты экспериментов на теплофизическом стенде показаны на рис.6, из которого видно, что разность уровней в сепараторах увеличивается как с ростом разности расходов воды, так и коэффициента гидравлического сопротивления ВУТ. Исследования на стенде также показали, что на разность уровней воды в моделях сепараторов существенное влияние оказывает различие в коэффициентах гидравлического сопротивления водоопускных трубопроводов.

Полученные на стенде экспериментальные данные были использованы для тестирования программы VUT. Сопоставление разницы уровней воды в моделях по результатам расчета и измерения на стенде (см. рис.6) свидетельствуют об их удовлетворительном согласовании.

Аналогичный методический подход использован при обработке данных промышленных испытаний, на одном ВУТ между БС11 и БС12 энергоблока №2 КуАЭС. Основная задача испытаний заключалась в определении скорости и направления перетока воды через ВУТ.

С ростом мощности реактора скорость воды увеличивается и достигает 0,38 м/с. При этом возрастает и доля воды, перетекающей через ВУТ. Это обусловлено повышением эксплуатационного расхода пароводяной смеси на каждый БС и, как правило, разности расхода теплоносителя между соседними сепараторами. При испытаниях была исследована зависимость скорости воды в ВУТ от положения уровня воды в БС. Оказалось, что изменение уровня воды над ПДЛ в пределах эксплуатационного значения не влияет на скорость воды в ВУТ.

С помощью программы VUT и результатов промышленных испытаний, содержащих данные о расходе питательной воды, пара и насыщенной воды на БС, давлении, а также конструктивных характеристиках трубопроводов, были выполнены расчеты расходов и скорости воды через ВУТ. По этим данным сопоставлены расчетная и измеренная скорость воды. Отклонения составили не более 11 %, что позволяет использовать разработанную математическую модель

для расчетного обоснования вариантов реконструкции ВУТ.

Результаты расчетов по программе при двух ВУТ, соответствующих реальному режиму испытаний, показаны на рис.7. При этом предполагается, что трассировка ВУТ остается неизменной, а меняется лишь внутренний диаметр. Из рис.7 следует, что при проектных ВУТ ($D_{\text{в}} = 300$ мм) и $N = 2$ расчетная разверка уровней воды между БС11 и БС12 составляет 20 мм. С учетом приборной погрешности, которая по статистическим данным определяется как $\Delta h = 40-50$ мм, разность уровня воды между БС будет 60-70 мм. Это меньше располагаемой по условию обеспечения нормируемой влажности пара на выходе из БС величины $H_c = 100$ мм.

Представляет определенный практический интерес постановка вопроса о возможности ликвидации одного ВУТ на каждой паре БС. Результаты расчетов разверки уровней воды между БС при одном ВУТ для тех же входных условий, что и на рис.7, с учетом поправки Δh будут составлять не более 105 мм. Это практически укладывается в располагаемую по условиям сепарации величину $H_c = 100$ мм. При ликвидации обоих ВУТ разверка уровней воды между БС достигает 240 мм без учета поправки Δh . Поэтому ликвидация обоих ВУТ на БС диаметром 2,3 м с проектными ВКУ недопустима по условию обеспечения нормируемой влажности пара 0,1%. Таким образом возможности реконструкции ВУТ БС диаметром 2,3 м с проектными ВКУ достаточно ограничены.

Существенно большими возможностями реконструкции ВУТ обладают БС внутренним диаметром 2,6 м, в которых за счет только понижения эксплуатационного значения уровня воды над ПДЛ можно оставить по два ВУТ внутренним диаметром около 200 мм.

Результаты сепарационных испытаний на блоках №1 и №2 ЛАЭС открывают весьма интересную перспективу в вопросе реконструкции ВУТ БС с модернизированным ВКУ, в которых допустимо поддерживать существенно больший уровень воды над ПДЛ и опускать его до геометрической оси БС, т.е. эксплуатировать БС с большей разницей в показаниях уровнемеров. Такой

режим эксплуатации пары БС потребует предварительного обоснования и поэтапных промышленных испытаний, в результате которых будет показана приемлемость эксплуатационных характеристик соседних БС либо с одним ВУТ уменьшенного диаметра, либо вовсе без ВУТ.

ВЫВОДЫ

1. Для модернизированных ВКУ БС диаметром 2,3 м реакторов РБМК-1000 первого поколения в условиях эксплуатации получены: зависимости влажности отсепарированного пара в паровых коллекторах БС от положения массового уровня воды над ПДЛ при различных мощностях реактора; характеристики системы измерения уровня воды в БС; запас воды в БС; положения уставок аварийных защит по повышению и понижению уровня воды в БС. Были выполнены сепарационные испытания модернизированных ВКУ при уровнях воды в БС ниже ПДЛ.

2. Для СДР БС разработана математическая модель и программа SDR, верифицированная по результатам стендовых и промышленных испытаний, позволяющая определять ее гидравлические характеристики при пуске, останове и функционировании в различных режимах эксплуатации.

3. Проведено комплексное экспериментально-расчетное исследование гидравлических характеристик ВУТ БС, которое позволило определить их вклад в уменьшение разности уровней воды между БС. Определены факторы, оказывающие доминирующее влияние на разбаланс уровней воды в барабанах-сепараторах АЭС с РБМК различных поколений. Установлено, что разность уровней воды между соседними БС в основном определяется разбалансом расходов жидкой фазы теплоносителя по БС и конструктивным оформлением опускной части КМПЦ.

4. Разработана математическая модель расчета гидравлики ВУТ БС и программа VUT, верифицированная по результатам стендовых и промышленных

испытаний, учитывающая важные особенности их работы совместно с опускной частью КМПЦ, паровым и питательным трактами.

5. Гидравлическая модель и программа SDR, программа VUT используются для обоснования проектов СДР БС РБМК-1000 и реконструкции ВУТ БС РБМК-1000 и -1500.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ

1. Методические вопросы исследования гидравлических характеристик водоуравнительных трубопроводов БС РБМК / В. Б. Карасев, О. Ю. Новосельский, А. В. Шишов и др. // Атомная энергия. - 1994. - Т. 77, вып. 5. - С. 329-334.
2. Исследование гидравлических характеристик водоуравнительных трубопроводов БС РБМК-1000 / В. Б. Карасев, О. Ю. Новосельский, А. В. Шишов и др. // Атомная энергия. - 1994. - Т. 77, вып. 5. - С. 334-340.
3. Реконструкция сепараторов пара и испытания системы длительного расхолаживания на Ленинградской АЭС / В. Б. Карасев, О. Ю. Новосельский, А. В. Шишов и др. // Атомная энергия. - 1997. - Т. 82, вып. 3. - С. 191-198.
4. Ivanov S. P., Shishov A. V. Modernization of In- Vessel Components of Drum Separators and Commissioning of Subsystem of ACCS at the First Generation of LNPP // IAEA Workshop on Regulatory Assessment of the Safety Upgrading of operational NPPs, Leningrad NPP, sept. 1996. - Vienna, 1996. - P. 237-256.
5. Novoselsky O. Yu., Карасев В. Б., Shishov A. V. Advance in RBMK - Reactor Safety through Steam Separator Reconstraction // International Symposium on / The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation, Moscow, may 1997. - M., 1997. - P. 293-296.

Автор выражает глубокую благодарность к.т.н. В.Б.Карасеву за научное консультирование, начальнику цеха наладки Л.А.Белянину и ведущему инженеру по ядерной безопасности Н.И.Арбузову за помощь в проведении экспериментов на действующих энергоблоках Ленинградской АЭС.

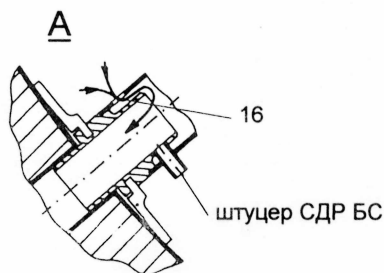
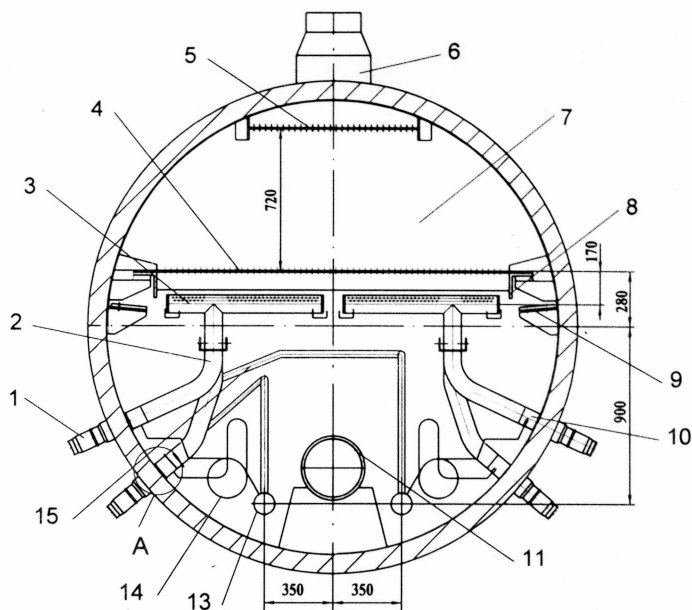


Рис.1. Барабан-сепаратор с модернизированными ВКУ и СДР

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1 - патрубок ПВК БС; | 9 - отбойный щиток гидрозатвора; |
| 2 - подводящая труба; | 10 - сопловая вставка ВКУ БС; |
| 3 - перфорированный коллектор; | 11 - коллектор питательной воды; |
| 4 - погруженный дырчатый лист; | 12 - опора коллектора пит. воды; |
| 5 - пароприемный дырчатый щит; | 13 - коллектор СДР БС; |
| 6 - пароотводящий патрубок; | 14 - отводящий трубопровод; |
| 7 - паровое пространство; | 15 - подводящий трубопровод; |
| 8 - закраина ПДЛ; | 16 - дренажное отверстие. |

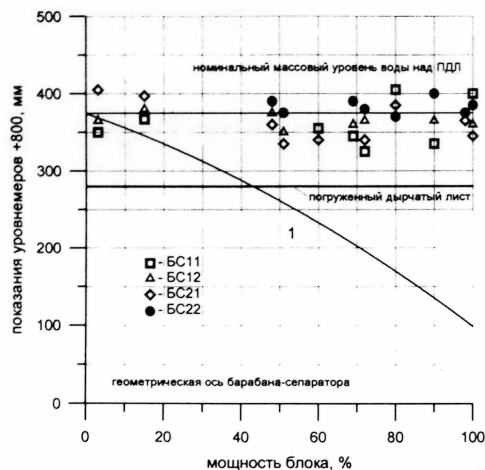


Рис.2. Зависимость показаний уровнемеров ± 800 мм от мощности энергоблока №1 и №2 ЛАЭС при номинальном массовом уровне воды над ПДЛ для БС с модернизированными ВКУ

1 - эксплуатационные данные для БС с проектными ВКУ.

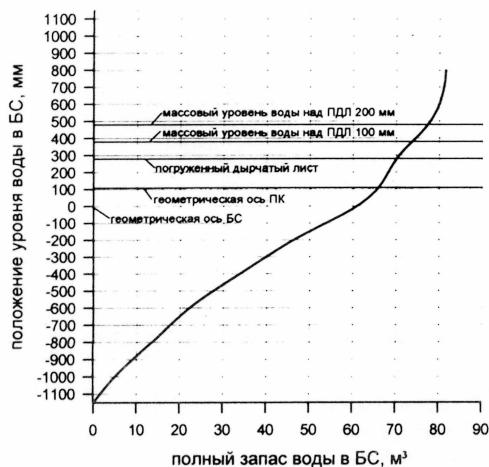


Рис.3. Зависимость полного запаса воды от уровня в БС с модернизированными ВКУ

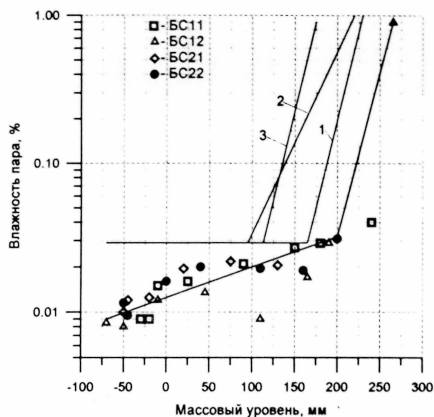


Рис.4. Зависимость влажности пара в паровых коллекторах БС с модернизированными ВКУ от массового уровня воды над ПДЛ по показаниям уровнемеров ± 315 мм при номинальной мощности. Блок №2 ЛАЭС

- 1 - модели БС с модернизированными ВКУ;
- 2 - БС с проектными ВКУ блока №1 ЛАЭС;
- 3 - модели БС с проектными ВКУ на стенде "Гидропресс".

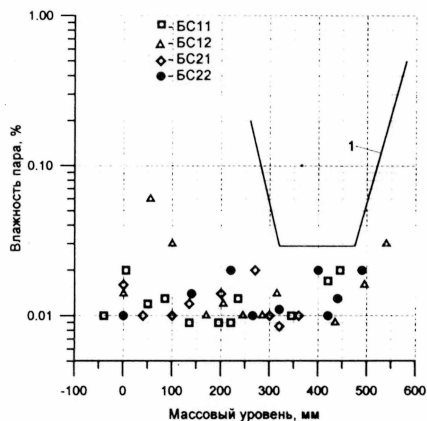


Рис.5. Зависимость влажности пара в паровых коллекторах БС с модернизированными ВКУ от массового уровня воды по показаниям уровнемеров ± 800 мм при номинальной мощности. Блок №1 ЛАЭС

- 1 - БС с проектными ВКУ блока №1 ЛАЭС.

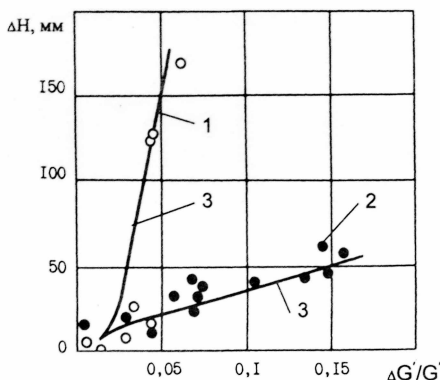


Рис.6. Зависимость разности массового уровня воды в моделях БС от относительной разности расхода жидкой фазы через модели при различных гидравлических характеристиках ВУТ

- 1 - экспериментальные данные при закрытом ВУТ;
- 2 - экспериментальные данные при открытом ВУТ;
- 3 - результаты расчета по программе VUT.

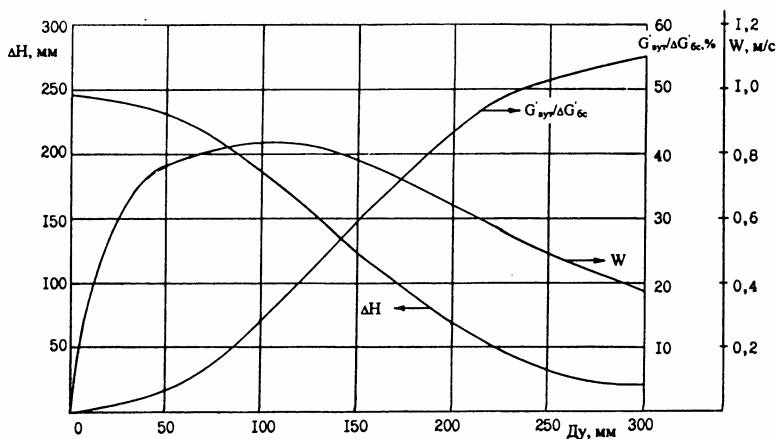


Рис.7. Зависимость разницы уровней воды между соседними БС, доли расхода и скорости воды через ВУТ от его диаметра

- количество ВУТ равно 2;
- отношение расходов насыщенной воды на входе между соседними БС равно 1,029;
- направление перетока через ВУТ от БС12 к БС11.