

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 5. С. 222–230
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 222–230

Научная статья
УДК 621.039

Анализ экспериментов по исследованию конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления

А.Н. Чуркин¹, В.И. Крыжановский¹, М.А. Быков¹, Д.А. Посысаев¹, А.М. Баисов¹✉,
В.В. Кучерова¹

¹ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия
✉baisov75@gmail.com

Аннотация. В статье кратко описаны эксперименты, проведенные в ОКБ «ГИДРОПРЕСС», по исследованию условий возникновения конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления реакторных установок ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. Представлены результаты расчетного моделирования экспериментов, выполненного с использованием программы КОРСАР/ГП для анализа протекающих в трубопроводе процессов. Подтверждена возможность программы предсказывать возникновение замкнутых паровых полостей, которые являются обязательным условием возникновения конденсационных гидравлических ударов. Отмечается необходимость дальнейшего усовершенствования расчетной модели применительно к задачам анализа конденсационных гидравлических ударов.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ, компенсатор давления, трубопровод аварийного впрыска, конденсационный гидравлический удар, КОРСАР/ГП

Для цитирования. Чуркин А.Н., Крыжановский В.И., Быков М.А., Посысаев Д.А., Баисов А.М., Кучерова В.В. Анализ экспериментов по исследованию конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 5. С. 222–230. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182007>

Original article

Analysis of experiments on studying condensation induced water hammer in the emergency injection pipeline into the pressurizer

A.N. Churkin¹, V.I. Kryzhanovsky¹, M.A. Bykov¹, D.A. Posysaev¹, A.M. Baisov¹✉,
V.V. Kucherova¹

¹OKB GIDROPRESS JSC, Podolsk, Russia
✉baisov75@gmail.com

Abstract. The report gives brief description of the experiments conducted at OKB GIDROPRESS JSC on studying conditions of condensation induced water hammer emergency in the emergency injection pipeline into the pressurizer of the VVER-1200 and VVER-TOI reactor. It presents the results of the

experiments computational modeling, accomplished with the KORSAR/GP software for the analysis of the processes proceeded in the pipeline as well. The report confirms the capability of the program to predict the closed vapor cavities origination, which are the mandatory condition for the condensation induced water hammer occurrence, and notes the necessity of further improvement of the computational model as applied to the condensation induced water hammer analysis problems.

Keywords: VVER, pressurizer, emergency injection pipeline, condensation induced water hammer, KORSAR/GP

For citation. Churkin A.N., Kryzhanovsky V.I., Bykov M.A., Posysaev D.A., Baisov A.M., Kucheroва V.V. Analysis of experiments on studying condensation induced water hammer in the emergency injection pipeline into the pressurizer. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 222–230. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182007>

Введение

В современных проектах реакторных установок (РУ) ВВЭР для атомных электрических станций (АЭС) предусмотрен трубопровод аварийного впрыска в компенсатор давления (КД), который предназначен для обеспечения подачи холодного теплоносителя в паровую часть КД от системы аварийного ввода бора (САВБ). Автоматический впрыск по данному трубопроводу происходит в ходе протекания аварии с течью теплоносителя из первого контура во второй для предотвращения повышения давления выше уставок на срабатывание предохранительных клапанов парогенераторов с целью ограничения выброса радиоактивного теплоносителя первого контура в атмосферу. Возможно также использование аварийного впрыска по команде оператора в ходе управления проектными или запроектными авариями.

Конфигурация трубопровода аварийного впрыска предполагает наличие насыщенного пара в его верхней части непосредственно перед КД. При срабатывании САВБ происходит поступление в верхнюю часть холодного (вплоть до 20 °С) теплоносителя. Наличие в трубопроводе одновременно насыщенного пара и недогретой до температуры насыщения воды является одним из условий для возникновения конденсационного гидравлического удара (КГУ) [1].

Сложная геометрия трубопровода аварийного впрыска и нестационарный характер течения теплоносителя в нем при срабатывании САВБ не позволяют применить теоретические методы и имеющиеся критерии для оценки возникновения и интенсивности КГУ [1–3]. Поэтому

в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на экспериментальной установке «Гидроудар» [4] были проведены необходимые экспериментальные исследования [5].

В состав экспериментальной установки после модернизации вошли имитатор КД и модели участков трубопроводов аварийного впрыска для РУ Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2 и Курской АЭС-2. В экспериментах моделировались только участки трубопровода, расположенные вблизи КД и выполненные в масштабе 1:1.

Принципиальная гидравлическая схема части экспериментальной установки, используемой для выполнения описываемых исследований, представлена на рис. 1 [5]. Всего было выполнено 88 экспериментов при различных сочетаниях давлений пара в имитаторе КД и расходов подаваемого теплоносителя.

Результаты экспериментов показали, что возникновение КГУ возможно, однако максимальная амплитуда КГУ, зафиксированная в экспериментах, не превысила 4,4 МПа, при этом КГУ не регистрировались при давлении в имитаторе КД выше 3 МПа.

Полученные результаты показали, что возможные КГУ не влияют на работоспособность трубопроводов аварийного впрыска в КД.

Для углубленного анализа процессов, происходящих в трубопроводе аварийного впрыска при срабатывании САВБ, необходим расчетный анализ. Также необходим расчетный инструмент, который бы позволил оценивать возникновение КГУ в различных трубопроводах РУ в ходе протекания проектных и запроектных режимов.

В данной работе представлены результаты выполненных расчетных исследований с использованием программы КОРСАР/ГП применительно к модели трубопровода аварийного впрыска Курской АЭС-2. Представлен анализ протекающих процессов в трубопроводе на различных фазах впрыска.

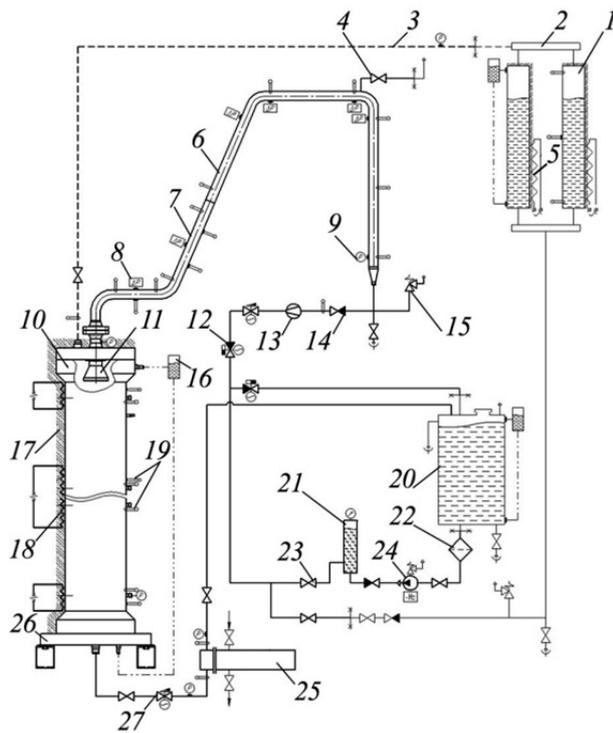


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема экспериментальной установки: 1 – емкость паропроизводящая, 2 – коллектор, 3 – паропровод, 4 – воздухошник, 5 – электронагреватель, 6 – модель трубопровода аварийного впрыска, 7 – модель коллекторного трубопровода, 8 – датчик динамического давления, 9 – датчик статического давления, 10 – имитатор компенсатора давления, 11 – модель форсунки, 12 – быстродействующий клапан, 13 – расходомер, 14 – обратный клапан, 15 – предохранительный клапан, 16 – система контроля управления заполнения, 17 – теплоизоляция, 18 – компенсационный электрообогреватель, 19 – термопара, 20 – питательный бак, 21 – демпфер, 22 – фильтр; 23 – запорная арматура, 24 – насос высокого давления, 25 – теплообменник, 26 – опорная конструкция, 27 – регулирующий клапан

Краткое описание расчетной программы КОРСАР/ГП

Программа КОРСАР/ГП является развитием программы КОРСАР [6], разработанной Научно-исследовательским технологическим институтом им. А.П. Александрова, и используется для выполнения нестационарных теплогидравлических расчетов на основе полностью неравновес-

ной двухжидкостной модели течения воды в одномерном приближении. Для расширения возможностей моделирования различных объектов, включая водо-водяные реакторы и экспериментальные стенды, была реализована гибкая топологическая схема за счет заложенного в программу набора специализированных модулей, осуществляющих расчет простейших элементов нодализационной схемы.

В основе пространственной дискретизации уравнений лежит метод контрольных объемов, при этом разностные уравнения сохранения массы и энергии фаз составляются балансным методом в консервативной форме. По пространственной координате используется смещенная сетка для скалярных и векторных величин. Аппроксимация конвективных членов переноса массы и энергии фаз осуществлена по схеме против потока, а по времени реализована полуневяная численная схема.

В программе применяется безытерационный метод расчета поля давления. Трубопроводы моделируются элементом «канал». Для каждого «канала» теплогидравлической системы используются рекуррентные соотношения метода прогонки, которые позволяют определить коэффициенты линейных зависимостей давлений в первой и последней расчетных ячейках (в точках ветвления или на границах). После чего по известным давлениям обратной прогонкой рассчитывается давление в остальных расчетных ячейках «канала», а затем скорости фаз в соединениях, энтальпии и объемные доли фаз.

Основной методикой расчета замыкающих соотношений для определения межфазного и пристеночного трения, теплообмена на стенке и межфазного теплообмена являются карты режимов течения и теплообмена двухфазных потоков. В качестве базовых приняты четыре режима: пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой и дисперсный. Для вертикальных каналов дополнительно включены обращенный кольцевой и стратифицированный режимы, а для горизонтальных – расслоенный.

Для анализа возникновения КГУ в трубопроводах РУ совместно с Институтом теплофизики Сибирского отделения РАН был разработан и внедрен в программу КОРСАР/ГП модуль SLUGGING, который анализирует параметры в ячейках элемента «канал».

При анализе возникновения КГУ важно решить две задачи: во-первых, определить возможность и место возникновения КГУ, а во-вторых, определить интенсивность импульса давления при схлопывании парового объема.

Участок «канала» классифицируется модулем SLAGGING как потенциально опасный с точки зрения наличия КГУ, если у всех расчетных ячеек одинаковая пространственная ориентация, гидравлический диаметр, а на самом участке отсутствуют поперечные соединения и гидравлические сопротивления. Нарушение хотя бы одного из перечисленных условий приводит к тому, что участок теряет статус потенциально опасного.

В заложенной модели предполагается, что в горизонтальных и слабонаклонных трубопроводах КГУ связан с процессом гидродинамической неустойчивости при формировании снарядного режима течения при превышении приведенной скорости пара некоторого критического значения, указывающего на формирование жидких перемычек, которые перекрывают поперечное сечение трубопровода, образуя замкнутые полости.

Численно амплитуда всплеска давления при КГУ определяется на основе фиксированных значений давления и температуры жидкости в момент идентификации КГУ в расчетном модуле. Длины парового снаряда и жидкой пробки, а также истинного объемного паросодержания могут иметь два варианта фиксированных значений в соответствии с моделями «несформировавшегося» и «сформировавшегося» снарядного потока, и не учитывают структуру и характеристики двухфазного потока в трубопроводе.

Величина КГУ существенно зависит от параметров, определяющих интенсивность межфазного теплообмена при конденсации парового снаряда, в частности от величины недогрева, которая входит в безразмерный критерий фазового превращения, представляющий собой отношение энтальпии недогрева вовлекаемой в теплообмен жидкости к количеству теплоты, которое необходимо отвести для конденсации пара в снаряде. Максимально консервативная модель (инерционная) по отношению к критерию фазового превращения соответствует случаю, когда паровой снаряд схлопывается как пустая полость с максимальной скоростью с прак-

тически неизменным до самого удара давлением. Альтернативная модель соответствует низкой интенсивности теплообмена с медленным схлопыванием снаряда без КГУ.

Для вычисления времени инерционного схлопывания снаряда и критерия фазового превращения в модуле SLUGGING заложены соотношения, полученные для простейшего случая «снаряд + пробка». Методика определения амплитуды КГУ основывается на частном случае – динамике схлопывания одиночного парового снаряда в цилиндрической геометрии с учетом множителя, характеризующего уменьшение интенсивности межфазного теплообмена.

Таким образом, модуль SLUGGING позволяет установить количество участков канала, в которых возможен КГУ, идентифицировать его, а также рассчитать значение всплеска давления для «несформированного» и «развитого» снарядного режима.

Предварительные валидационные расчеты показали, что модуль SLUGGING удовлетворительно предсказывает возникновение КГУ в горизонтальных трубопроводах, но значительно завышает интенсивность КГУ [7].

Ниже в статье демонстрируется, что основной теплогидравлический модуль программы КОРСАР/ГП также предсказывает возникновение волн на поверхности жидкой фазы при встречном течении пара и формирование жидких перемычек, которые перекрывают поперечное сечение трубопровода, образуя замкнутые паровые полости. Моделирование схлопывания паровой полости за счет разгона жидкой перемычки еще находится на стадии изучения.

Расчетная модель

Используемая в работе расчетная модель включала экспериментальную модель трубопровода аварийного впрыска с участком подводящего трубопровода, которые были реализованы элементом «Канал» (ch1). Параметры среды в имитаторе КД и подача воды от САВБ моделировались, соответственно, с помощью элементов «Граничное условие» (bvol_t1) и «Источник массы» (smass_t1).

Металл трубопровода моделировался элементом «Теплопроводящая конструкция» (hcs1). На внешней поверхности трубы задавалось гра-

ничное условие третьего рода для моделирования тепловых потерь в окружающую среду.

Схема основных элементов расчетной модели представлена на рис. 2.

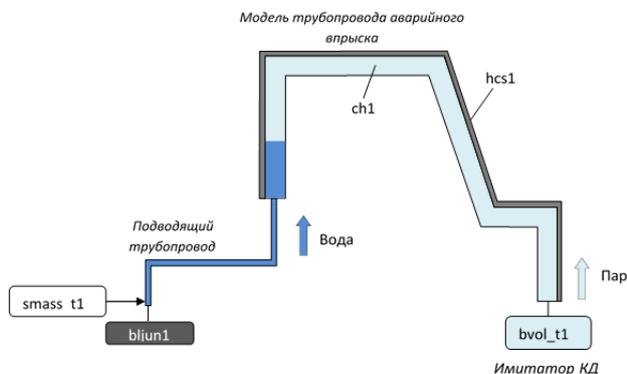


Рис. 2. Основные элементы расчетной модели

Более детальная схема элемента ch1 показана на рис. 3. Номера различных участков трубопровода обозначены на рисунке римскими цифрами, а номера ячеек, которыми заканчиваются участки – арабскими. Кроме того, на рис. 3 отображены места расположения термопар, которые используются в работе, и их обозначения (T10, T13, T12, T11 и T1).

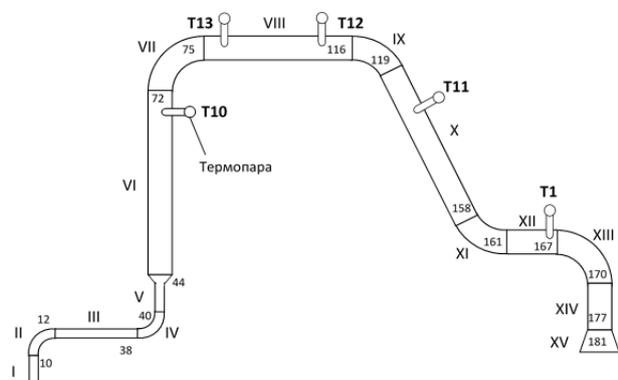


Рис. 3. Детализация расчетной модели трубопровода и места размещения термопар

Результаты расчетных исследований

В рамках представленной работы были выполнены расчетные исследования и проведен анализ двух экспериментов: № 7 и № 21. Эти эксперименты имеют близкие значения расхода впрыска (около 1,6 м³/ч) и отличаются давлением пара в имитаторе КД. В эксперименте № 7 давление пара было около 1 МПа, а в эксперименте № 21 давление пара – около 5 МПа.

Каждый эксперимент состоял из четырех основных фаз. Перед первой фазой эксперимента осуществлялась предварительная продувка модели трубопровода через дренажный вентиль. Таким образом, вся модель и часть подводящего трубопровода была заполнена паром.

На первой фазе (фаза впрыска) включался насос, обеспечивающий подачу «холодной» воды (температура от 21 до 29 °С) в модель по подводящему трубопроводу с заданным расходом. Время увеличения расхода до заданного максимального значения составляло от 6 до 8 с. По показаниям термопар прослеживался процесс заполнения модели трубопровода аварийного впрыска водой начиная от вертикальной части модели, затем вдоль горизонтальной части модели и далее по наклонному опускному участку. После полного заполнения модели подача воды прекращалась. На этом первая фаза эксперимента завершалась.

Вторая фаза эксперимента (фаза замещения) протекала при выключенном насосе и характеризовалась процессом замещения воды в модели трубопровода паром из имитатора КД. Протекание процесса во второй фазе эксперимента также отслеживалось по показаниям термопар. Окончанием второй фазы эксперимента являлось повышение температуры в самом верхнем участке модели трубопровода аварийного впрыска до значений температуры насыщения воды при заданном давлении. Наиболее удаленная от имитатора КД вертикальная часть трубопровода оставалась заполненной водой.

Перед началом третьей фазы эксперимента выдерживалась пауза, во время которой происходило восстановление давления в имитатора КД до требуемого значения. На третьей фазе (повторная фаза впрыска) включался насос до заполнения модели трубопровода аварийного впрыска водой. После этого подача воды прекращалась.

Четвертая фаза эксперимента (фаза замещения) аналогична второй фазе. Как только пар замещал воду в модели трубопровода аварийного впрыска, за исключением вертикальной части, в которой находилась вода, четвертая фаза и эксперимент в целом закачивались.

В ходе проведения экспериментов записывались показания датчиков, в том числе датчиков, расположенных на экспериментальной модели:

погружные и поверхностные датчики температуры; датчики динамического и статического давления. Места расположения термопар, которые используются для сравнения в данной работе, и их обозначения в системе измерения экспериментальной установки отмечены на рис. 3. Рабочий конец погружных термопар в начальном состоянии находился на оси трубопровода.

На рис. 4 приведен график изменения расхода впрыска от времени, а также графики сравнения показаний погружных термопар T10, T13, T12, T11 и T1 (см. рис. 3) в эксперименте № 7 с расчетной температурой жидкой фазы в ячейках, которые соответствуют местам размещения термопар.

В целом результаты расчетов по температуре среды в трубопроводе аварийного впрыска согласуются с экспериментальными данными, но наблюдается некоторые расхождения, которые могут объясняться точечным (локальным) измерением температуры в сечении трубопровода.

Для более точного сопоставления расчетных данных с измеренными значениями температуры необходимо дополнить расчетную схему моделями термопар. Однако остается неопределенность с расположением термопар в экспериментальной модели после возникновения КГУ.

На рис. 5 приведены графики для эксперимента № 21, аналогичные графикам на рис. 4 для эксперимента № 7.

При расходе впрыска около $1,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ критерий Фруда равен примерно 0,11, что меньше единицы, тем самым создаются условия для расслоенного течения теплоносителя в трубопроводе. Вследствие конденсации пара на поверхности «холодной» воды создается локальное снижение давления, что обеспечивает движение пара навстречу потоку воды. Температура воды по мере продвижения по трубопроводу повышается.

При встречном движении воды и пара могут сложиться условия неустойчивости поверхности раздела фаз и образование волн.

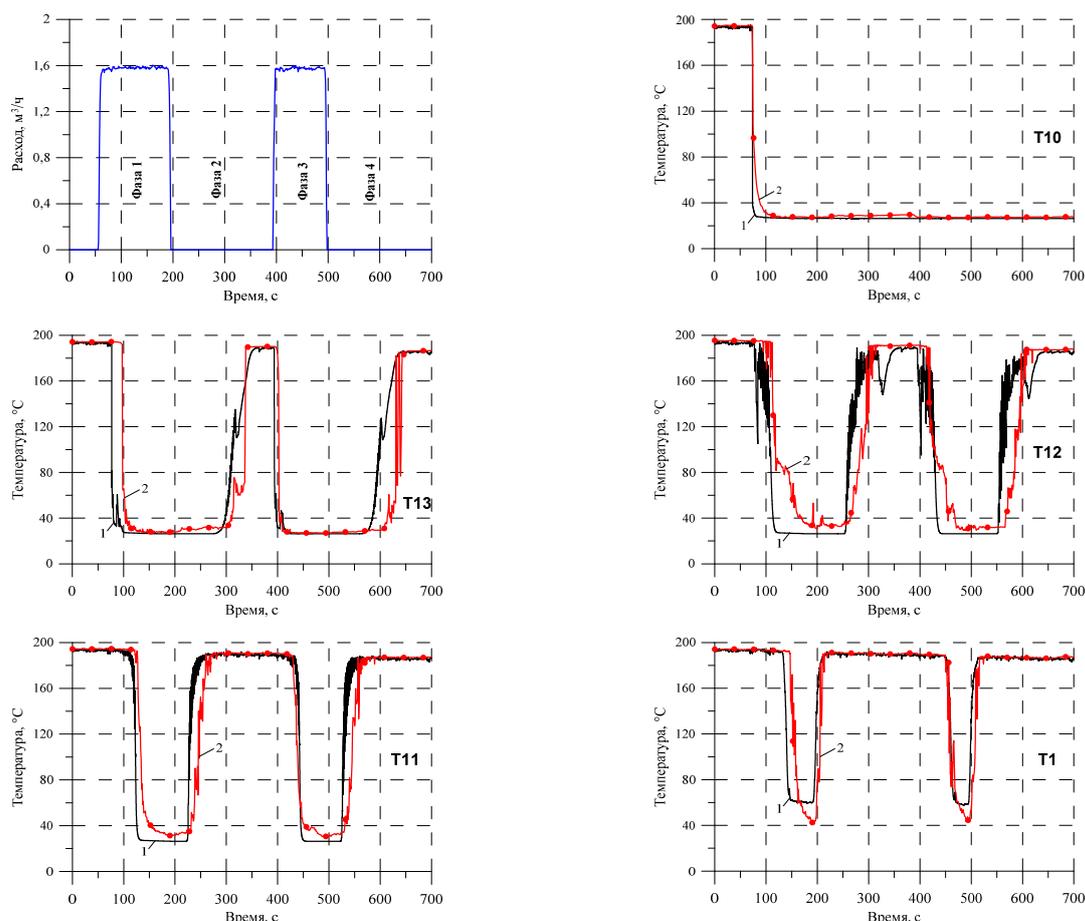


Рис. 4. Расход впрыска и температуры в местах размещения термопар для эксперимента № 7: 1 – расчетная температура жидкой фазы, 2 – показания термопары в эксперименте

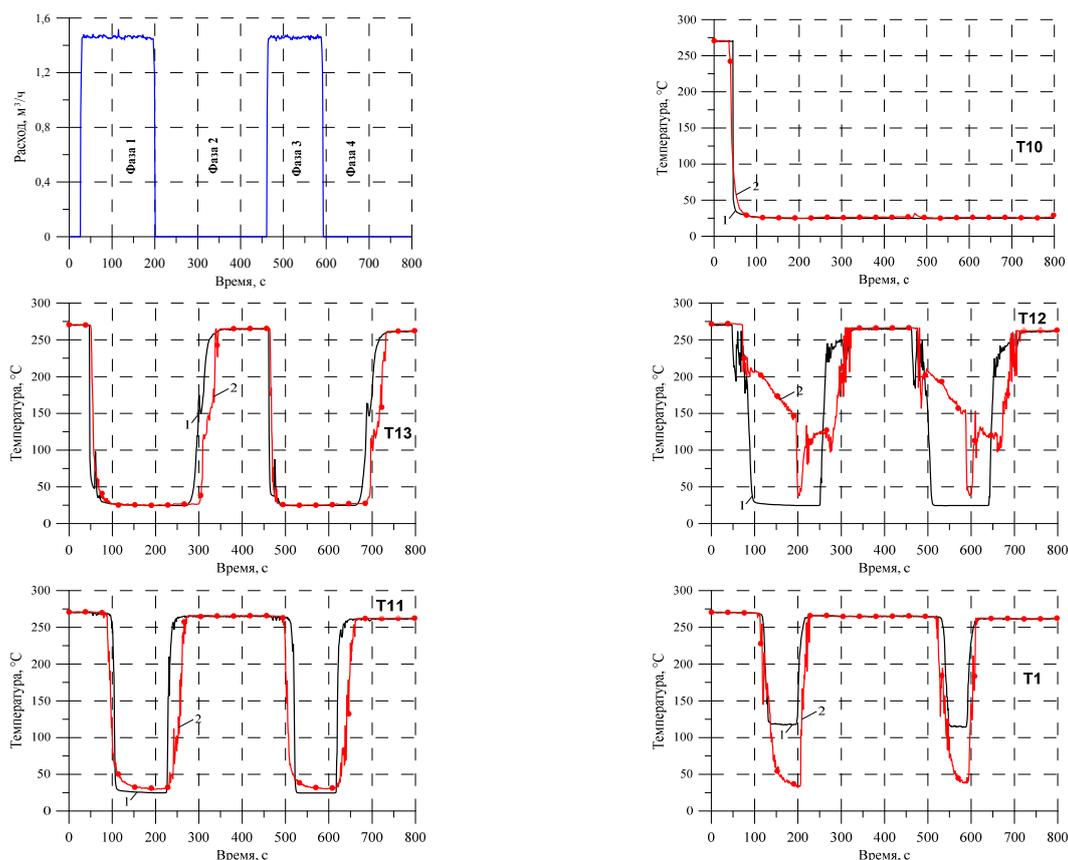


Рис. 5. Расход впрыска и температуры в местах размещения термодпар для эксперимента № 21: 1 – расчетная температура жидкой фазы, 2 – показания термодпары в эксперименте

На рис. 6 показаны графики доли жидкой фазы в сечении трубопровода по длине для экспериментов № 7 и № 21. Видно, что для обоих вариантов в конце опускного участка X (рис. 3) на повороте возникают возмущения (волны), которые затем распространяется против потока воды под напором движущегося пара. Перекрывание проходного сечения трубопровода происходит в конце горизонтального участка VIII. Таким образом, возникает замкнутая паровая полость, которая может коллапсировать с образованием ГУ. Однако выполненные расчеты не воспроизводят схлопывание паровой полости, поскольку моделирование данного явления требует специальных подходов.

На рис. 7 представлены графики скорости пара в различные моменты времени для экспериментов № 7 и № 21. Скорость пара при давлении 5 МПа примерно в два раза меньше, чем при давлении 1 МПа, что связано с более высокой теплоемкостью пара, приходящуюся на единицу объема. Отрицательные значения расхода обозначают движение пара из имитатора КД навстречу воде.

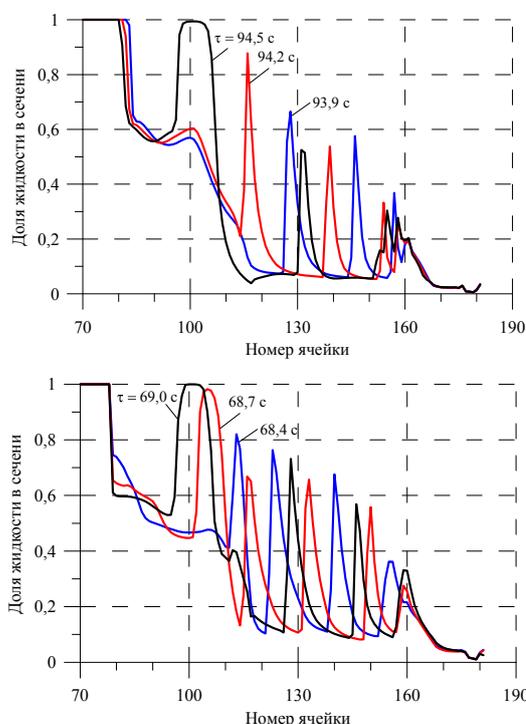


Рис. 6. Распределение доли жидкости в сечении трубы по расчетным ячейкам в различные моменты времени τ

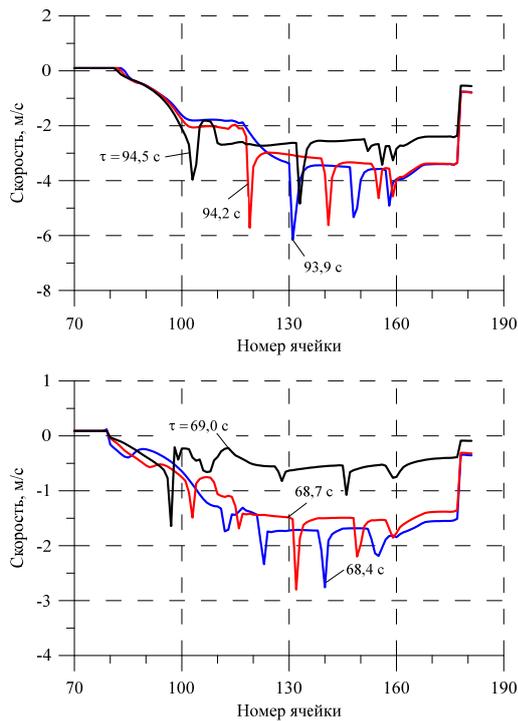


Рис. 7. Распределение скорости пара по расчетным ячейкам

На рис. 8 показано изменение по длине трубопровода температуры жидкой фазы. В рассмотренные моменты времени температура жидкости достигает температуры насыщения уже к началу наклонного участка.

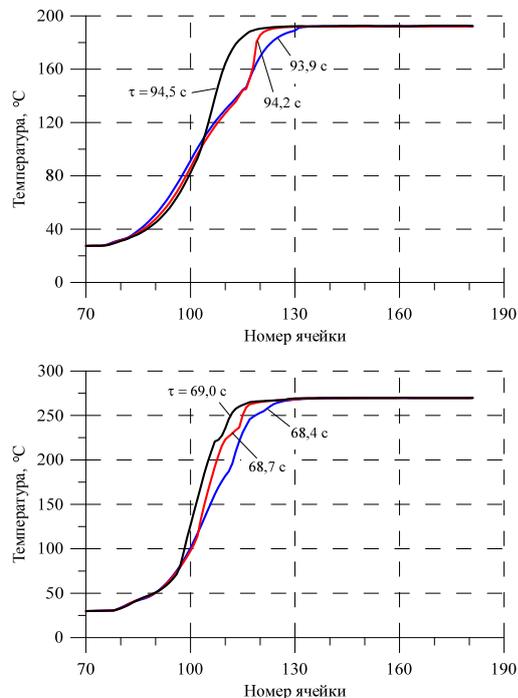


Рис. 8. Распределение температуры жидкой фазы по расчетным ячейкам

Также необходимо отметить, что несмотря на то, что критерий Фруда при рассматриваемых расходах значительно меньше единицы, встречный поток пара тормозит движение воды, заставляя жидкую фазу полностью заполнять трубопровод.

На результаты расчетов сильное влияние оказывают тепловые потери с поверхности трубопровода в окружающую среду. Рис. 9 демонстрирует данное влияние. При уменьшении коэффициента теплоотдачи с поверхности трубопровода в окружающую среду в два раза продолжительность периодов с низкой температурой жидкости на фазе впрыска сокращается.

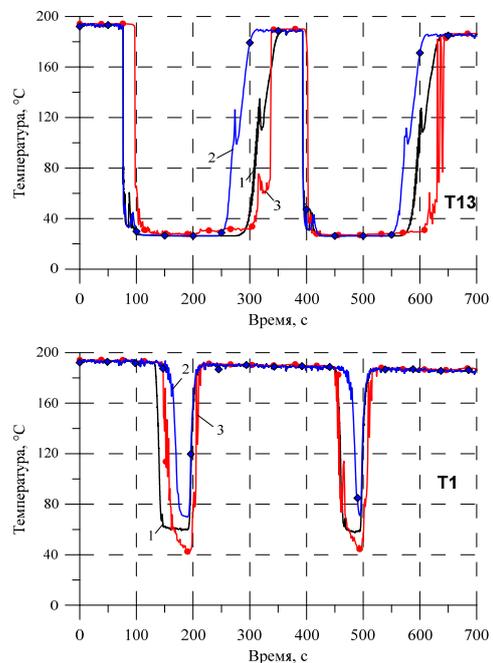


Рис. 9. Сравнение температуры жидкой фазы в расчетах с показаниями термомпар (эксперимент № 7) для различных коэффициентов теплоотдачи в окружающую среду: 1 – базовый расчет, 2 – коэффициент теплоотдачи уменьшен в два раза, 3 – показания термомпары в эксперименте

Заключение

В работе представлены результаты расчетного анализа теплогидравлических процессов в экспериментальной модели трубопровода аварийного впрыска в КД с помощью расчетной программы КОРСАР/ГП.

В целом результаты расчетов по температуре среды в трубопроводе аварийного впрыска согласуются с экспериментальными данными, но обнаружено заметное влияние величины тепловых потерь в окружающую среду.

Программа КОРСАР/ГП предсказывает возникновение волн на поверхности раздела жидкость–пар, а также образование замкнутых паровых полостей, что может привести к возникновению КГУ.

В представленных расчетах коллапсирование замкнутых паровых полостей не возникало. Требуется дальнейшее усовершенствование расчетной модели трубопровода применительно к задачам анализа КГУ.

Список источников

1. **Griffith P.** Screening Reactor Steam/Water Piping Systems for Water Hammer. NUREG/CR-6519, 1997.
2. **Безруков Ю.А., Лисенков Е.А., Селезнев А.В.** Анализ возможности гидроударов в первом контуре реакторов ВВЭР // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 26–29 мая, 2009). Москва: Гидропресс, 2009.
3. **Волков Г.Ю.** Исследование конденсационных гидроударов в горизонтальных и слабонаклонных трубопроводах: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 233 с.
4. **Чуркин А.Н., Богданов А.С., Толмачев Д.Г.** и др. Экспериментальные исследования конденсационных гидравлических ударов в трубопроводах реакторной установки ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2019. № 2. С. 62–69.
5. **Чуркин А.Н., Богданов А.С., Лисенков Е.А.** и др. Экспериментальные исследования конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2023. № 3. С. 13–22.
6. **Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В.** и др. КОРСАР - теплогидравлический расчетный код нового поколения для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 36–43.
7. **Чуркин А.Н., Посысаев Д.А., Байсов А.М., Прибатурин Н.А., Лежнин С.И., Алексеев М.В.** Расчетное исследование конденсационных гидравлических ударов в трубопроводах реакторной установки // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2018. № 2. С. 87–95.

References

1. **Griffith P.** Screening Reactor Steam/Water Piping Systems for Water Hammer. NUREG/CR-6519, 1997.
2. **Bezrukov Yu.A., Lisenkov E.A., Seleznev A.V.** Analiz vozmozhnosti gidroudarov v pervom konture reaktorov VVEHR [Analysis of the possibility of hydraulic water hammer in the first circuit of VVER reactors]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Obespechenie bezopasnosti AEHS s VVEHR» (Podolsk, 26–29 maya, 2009)*. Moscow: Gidropress, 2009.
3. **Volkov G.Yu.** Issledovanie kondensatsionnykh gidroudarov v gorizontaln'nykh i slabonaklonnykh truboprovodakh [Investigation of condensation water hammer in horizontal and slightly inclined pipelines]. Ph. D. thesis. Moscow, 2021, 233 p.
4. **Churkin A.N., Bogdanov A.S., Tolmachev D.G.** et al. Experimental studies of condensation-induced water hammers in the VVER reactor pipelines. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2019, iss. 2, pp. 62–69.
5. **Churkin A.N., Bogdanov A.S., Lisenkov E.A.**, et al. Experimental Investigation of Condensation Water Hammers in Emergency Injection Pipeline of Pressurizer. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2023, iss. 3, pp. 13–22.
6. **Migrov Yu.A., Volkova S.N., Yudov Yu.V.** et al. KORSAR –teplogidravlicheskiy raschetnyi kod novogo pokoleniya dlya obosnovaniya bezopasnosti AEHS s VVEHR [KORSAR. A Thermohydraulic Code Of The New Generation For Substantiating The Safety Of NPSs With VVER Reactor]. *Teploenergetika*, 2001, no. 9, pp. 36–43.
8. **Churkin A.N., Posysaev D.A., Baisov A.M., Pribaturin N.A., Lezhnin S.I., Alekseev M.V.** Calculation-Based Study of Condensation-Induced Water Hammers in Reactor Plant Pipelines. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2018, iss. 2, pp. 87–95.