

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ГИДРОУДАРОВ<sup>1</sup>

© 2021 г. Г. Ю. Волков<sup>а</sup>, И. В. Ёлкин<sup>б</sup>, А. В. Капустин<sup>с</sup>, В. И. Мелихов<sup>а, \*</sup>,  
О. И. Мелихов<sup>а</sup>, С. М. Никонов<sup>б</sup>, О. Н. Трубкин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>б</sup>АО “Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС”,  
ул. Святого Константина, д. 6, г. Электрогорск, Московская обл., 142530 Россия

<sup>с</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,  
Большая Тульская ул., д. 52, Москва, 115191 Россия

\*e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 04.12.2019 г.

Принята к публикации 18.12.2019 г.

Опыт эксплуатации АЭС показывает, что в результате аварийных ситуаций или неверных действий персонала могут происходить гидроудары, оказывающие дополнительные воздействия на трубопроводы и оборудование. Одним из наиболее разрушительных видов гидроударов является конденсационный гидроудар (КГУ). Экспериментальные исследования КГУ проводились в различных научных организациях по всему миру. В данной работе рассмотрены основные особенности используемых в мире экспериментальных установок. В целях изучения КГУ в горизонтально расположенном канале в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности АЭС (ЭНИЦ) в 2018 г. была создана специальная экспериментальная установка. Описаны характеристики рабочего участка установки и параметры экспериментальных режимов. На установке проведено 52 эксперимента при различных начальных и граничных условиях: при трех значениях расхода подаваемой воды (1, 3 и 5 т/ч), двух значениях температуры воды (30 и 60°C) и двух значениях давления пара в рабочем участке (0.6 и 1.0 МПа). Во всех экспериментах были зафиксированы КГУ. В качестве примера детально рассмотрен один режим и на основе показаний датчиков давления, температуры и уровня описан механизм возникновения КГУ. Выполнено моделирование описанного экспериментального режима с помощью теплогидравлических кодов RELAP5 и WANA. Проанализировано влияние размера ячеек нодализационной схемы и временного шага интегрирования на результаты расчетов. Полученный значительный объем экспериментальных точек может быть использован для создания базы данных для валидации расчетных кодов.

**Ключевые слова:** гидроудар, конденсационный гидроудар, экспериментальные исследования, математическое моделирование, двухфазные течения, межфазное взаимодействие, RELAP5, WANA

**DOI:** 10.1134/S0040363621020089

Опыт эксплуатации водо-водяных реакторов (ВВЭР) указывает на то, что в результате аварийных ситуаций или неверных действий персонала происходят гидроудары, оказывающие дополнительные воздействия на трубопроводную арматуру и оборудование АЭС. Гидроудары могут возникать, в частности, в системе аварийного газоудаления, в коллекторах и трубчатке парогенераторов, в трубопроводах питательной воды парогенераторов АЭС с ВВЭР, в деаэрационно-питательной установке АЭС с ВВЭР при пусконаладочных работах, а так-

же при срабатывании быстродействующей редуциционной установки для сброса пара в атмосферу. Гидроудары происходили в коллекторе питательной воды парогенератора АЭС с ВВЭР-440 “Ловииса”, в узлах водопитания АЭС с ВВЭР-1000 Нововоронежской и Калининской АЭС, трубопроводах  $D_y = 300$  мм системы аварийного расхолаживания парогенератора (ПГ), маслосистемах смазки и регулирования энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС с ВВЭР-1200.

Конденсационный гидроудар возникает тогда, когда изолированный паровой объем оказывается окруженным более холодной жидкостью. Быстрая

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00647).

конденсация и схлопывание парового объема приводят к резкому росту давления [1].

В то время как классический гидроудар, вызванный внезапной остановкой потока, изучен достаточно хорошо, во многом благодаря теоретическим основам, заложенным в конце XIX в. Н.Е. Жуковским, явление конденсационного гидроудара и способы его моделирования по-прежнему являются предметом многочисленных исследований. Экспериментальные исследования КГУ проводились в различных научных организациях по всему миру. Далее рассматриваются основные особенности экспериментальных установок, на которых проводились такие исследования.

Стенд РМК-2 (Венгрия) является многоцелевой установкой для изучения теплогидравлических процессов, характерных для ВВЭР-440 [2, 3]. Рабочий участок для исследования конденсационных гидроударов представляет собой горизонтальную трубу. Изучался противоточный режим течения пароводяной смеси с возможным возникновением конденсационных гидроударов. В экспериментах варьировались: степень недогрева воды, давление и расход воды. Наблюдавшиеся пики давления составили 1.6–17.0 МПа, а их длительность – от 1 до 2 мс.

Установка ROSA была сооружена в Японии для исследования различных проблем безопасности на АЭС, одна из них – конденсационный гидроудар [4]. В экспериментах изучалось влияние давления на КГУ. Было установлено, что максимальные гидроудары возникают при давлении в рабочем участке 1 МПа, при давлении более 4 МПа они снижаются, а при 7 МПа практически исчезают. Эти данные отличаются от результатов, полученных на РМК-2. Во всех опытах там не было зарегистрировано пиков давления при системном давлении 3 МПа и более. Эксперименты на стенде ROSA при давлении 2.8 МПа показали, что пик давления может достигать даже 32 МПа.

В Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) была сооружена установка для исследования конденсационных гидроударов в горизонтальной трубе [5, 6]. Выяснилось, что в стратифицированном потоке недогретой жидкости через эту трубу, заполненную насыщенным паром, в течение длительного времени реализуются повторяющиеся гидроудары. При этом каждому гидроудару предшествовало заметное падение давления, и распределение значений максимальных давлений по порядку их появления было довольно произвольным. Интервал времени между гидроударами составлял в среднем 2.4 с. Изменения же давления в паровой зоне были относительно небольшими.

Экспериментальные исследования конденсационного гидроудара проводились и в Технологическом университете Гамбурга (Германия) [7]. В экспериментах варьировались недогревы воды

до температуры насыщения (40 и 60 К) и число Фруда ( $Fr = 0.3, 0.6, 0.9, 1.1$ ), которое определяли по расходу подаваемой воды. Для каждого сочетания параметров выполнялось по 20–30 опытов с одинаковыми начальными и граничными условиями, что позволило установить статистические характеристики возникновения конденсационного гидроудара. Наибольшая вероятность возникновения КГУ соответствовала  $Fr = 0.6$  для обоих значений недогрева. При  $Fr = 0.3$  и недогреве 40 К конденсационных гидроударов не наблюдалось. Максимальные значения давления в экспериментах составляли 5.0–13.2 МПа.

Недавно в Китае была сооружена установка и выполнены эксперименты по исследованию конденсационных гидроударов [8]. На основе проведенных экспериментов была составлена карта возникновения конденсационных гидроударов в зависимости от температуры воды и массовой скорости пара.

Основная информация о созданных установках и полученных результатах сведена в табл. 1.

Более подробный обзор расчетных и экспериментальных исследований конденсационных гидроударов в оборудовании ядерных энергетических установок представлен в [9, 10].

Специальная установка для изучения конденсационных гидроударов была создана в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности АЭС (ЭНИЦ) в 2018 г., на которой проводится серия экспериментов. В настоящей статье дается описание этой установки, приводятся основные параметры экспериментов и детальный анализ одного из режимов, в том числе с использованием двух расчетных кодов RELAP5 и WANA.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ЭНИЦ

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой горизонтально расположенную металлическую трубу внутренним диаметром 64 мм, наружным диаметром 76 мм и длиной 3 м (рис. 1). С одного конца труба подключена к патрубку подачи холодной воды, с другого – к вертикально расположенному сепарационному сосуду (СС). Рабочий участок оборудован датчиками давления  $P1$  и  $P2$ , термопарами  $T1$  и  $T2$  (измеряющими температуру рабочего тела) и термопарами  $T_{ст1}$ ,  $T_{ст2}$ ,  $T_{ст3}$  (измеряющими температуру наружной стенки горизонтальной трубы). Датчики давления  $P1$  и  $P2$  расположены на верхней образующей горизонтальной трубы на расстоянии 500 мм от ее концов. Термопары  $T1$  и  $T2$  установлены соответственно в нижней и верхней образующих горизонтальной трубы. Термопара  $T1$  находится на расстоянии 500 мм от патрубка подвода воды, а термопара  $T2$  – на расстоянии 1 м от сепарационного сосуда. В его верхнюю часть подводится пар.

## Основные параметры различных экспериментальных установок по исследованию конденсационных гидроударов

Установка	Длина рабочего участка $L$ , м	Диаметр рабочего участка $D$ , м	$L/D$	Давление пара в рабочем участке, МПа	$t_{вх}$ , °С	Недогрев воды до температуры насыщения, °С	Расход подаваемой холодной воды, кг/с	Приведенная скорость воды*, м/с	Число Фруда	Пик давления, МПа
РМК-2	2.870	0.073	39.32	0.98–1.50	25–30	148.8–171.6	0.66–1.66	0.15–0.40	0.18–0.47	1.60–18.85
ROSA**	Н.д.	0.207	Н.д.	Менее 7.00	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	32 (при давлении в рабочем участке 2.8 МПа)
ФЭИ	2.910	0.040	72.75	0.50	27	123.0	Не контролировался	Н.д.	Н.д.	0.8
Технический университет (Гамбург)***	2.495	0.513	48.64	0.37	Н.д.	40 и 60	Н.д.	Н.д.	0.3; 0.6; 0.9; 1.1	5.0–13.2
Сианьский университет Цзяо Тун (Китай)	1.400	0.050	28.00	0.10	20–75	25.0–80.0	Вода не подавалась****	Вода не подавалась****	Н.д.	1.2

Примечание. Н.д. – нет данных.

\* Отношение объемного расхода воды к площади поперечного сечения рабочего участка.

\*\* Конденсационные гидроудары наблюдались при давлении в рабочем участке 1 МПа, при 4 МПа они снижались, а при 7 МПа – исчезали.

\*\*\* Чаще всего КГУ происходили при  $Fg = 0.6$  для обоих значений недогрева. При  $Fg = 0.3$  и недогреве  $40^\circ\text{C}$  гидроударов не наблюдалось.

\*\*\*\* Вместо воды подавался насыщенный пар с удельным расходом  $1.0\text{--}3.5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , приведенная скорость составляла  $1.69\text{--}5.93 \text{ м/с}$ .

В качестве генератора пара в экспериментальной установке КГУ используется компенсатор давления (КД) полномасштабного стенда безопасности ВВЭР. На линии подвода пара находятся датчики давления  $P_0$ , расходомер  $F_0$  и термopара  $T_0$ . К нижней части сепарационного сосуда подключена линия отвода конденсата, которая используется для опорожнения рабочего участка перед началом каждого режима.

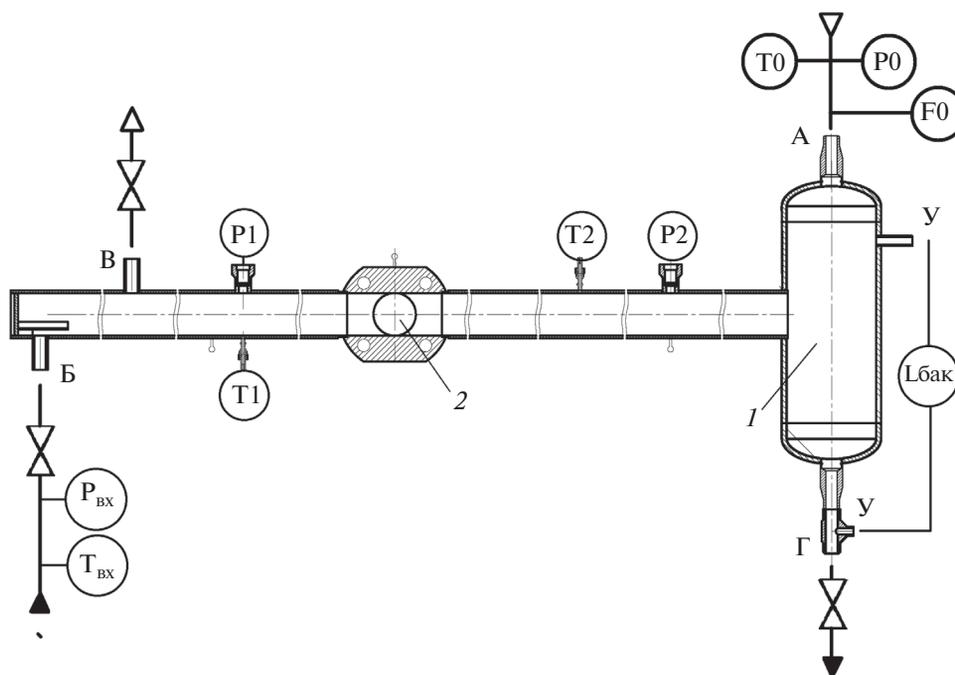
Сепарационный сосуд оборудован уровнемером (Лбак). Нижний вывод уровнемера подведен к патрубку отвода конденсата, а верхний – к обечайке СС. Расстояние между выводами уровнемера составляет 465 мм. На расстоянии 200 мм от места подключения патрубка подвода воды в горизонтальную трубу врезан патрубок отвода пара, который предназначен для сброса части пара при прогреве рабочего участка. Клапан, установленный на этой линии отвода пара, перекрывается по окончании выхода экспериментальной установки на стационарный режим, после этого начинается подача холодной воды в рабочий участок, заполненный паром.

В экспериментах изучалось влияние следующих режимных параметров на значение конденсационного гидроудара:

- давления пара в рабочем участке  $p$ ;
- мощности парогенератора  $N$ ;
- температуры воды на входе в рабочий участок  $t_{вх}$ ;
- расхода воды  $G$ .

На стенде КГУ было выполнено 52 эксперимента по исследованию конденсационных гидроударов. (Один из этих режимов будет рассмотрен в следующем разделе.) Экспериментальные исследования КГУ были проведены для двух давлений (1.0 и 0.6 МПа), при этом варьировались расход недогретой воды (1.0, 3.0 и 5 т/ч) и ее температура (30 и  $60^\circ\text{C}$ ). Во время выполнения каждого из экспериментов фиксировалось несколько конденсационных гидроударов. Эксперимент прекращался при полном заполнении рабочего участка водой.

Во всех исследованных режимах наблюдались конденсационные гидроудары, которые идентифицировались по характерным резким скачкам давления (пикам). Максимальное увеличение дав-



**Рис. 1.** Конструкция рабочего участка.

*I* – сосуд для подвода пара и отвода конденсата; 2 – узел видеосъемки.

Патрубки: А – подвода пара; Б – подвода воды; В – отвода пара; Г – отвода конденсата; У – штуцера уровнемера.

T1, T2 – термопары измерения температуры воды и пара; P1, P2 – датчики измерения давления с частотой записи 1 кГц

ления при КГУ составляло 1 МПа. Гидроудары происходили в среднем через каждые 2–3 с, они возникали через некоторое время после начала подачи холодной воды в рабочий участок и продолжались до момента его полного заполнения (момент полного заполнения соответствовал резкому снижению температуры, которое определялось по показаниям датчика T2). По мере увеличения расхода подаваемой холодной воды количество КГУ снижалось. При повышении начального давления амплитуда пиков при КГУ росла, в то время как при повышении температуры подаваемой холодной воды эта амплитуда уменьшалась.

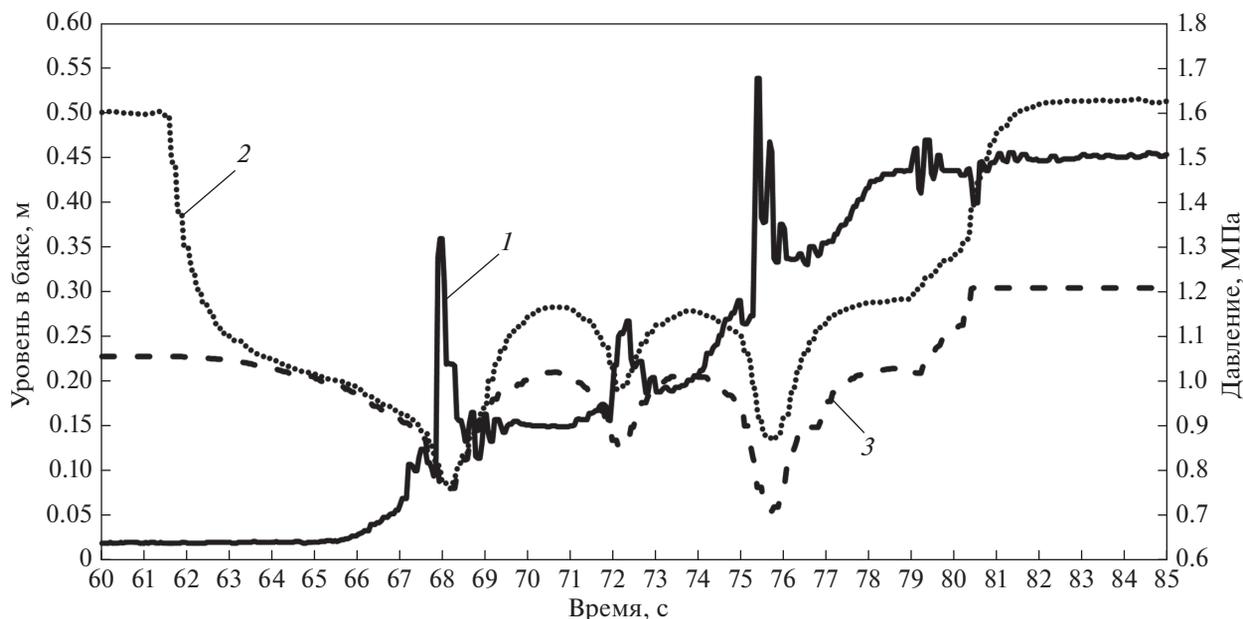
Проведенные исследования позволили создать базу экспериментальных данных для верификации расчетных кодов.

### АНАЛИЗ ТИПИЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2–4 приведены показания измерительных приборов для экспериментального режима, осуществленного при следующих параметрах:

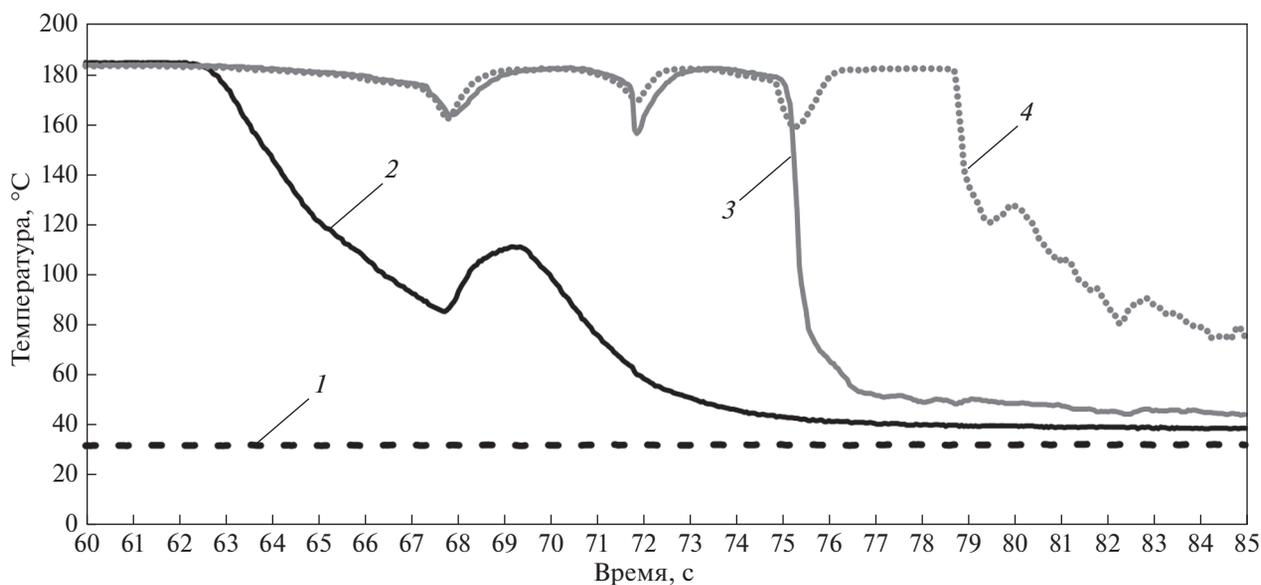
Давление пара в рабочем участке, МПа .....	1.0
Температура подаваемой холодной воды, °С .....	30
Расход подаваемой холодной воды, т/ч .....	5.0
Мощность генератора пара, кВт .....	20

Начало подачи холодной воды в рабочий участок можно идентифицировать по резкому изменению давления подаваемой холодной воды  $p_{вх}$ . Этот момент соответствует времени 61.5 с после начала записи данных экспериментальных измерений (см. рис. 2–4). Спустя несколько секунд  $p_{вх}$  становится равным  $p_0$  – давлению пара на входе в СС. Затем давление в рабочем участке начинает снижаться вследствие интенсивной конденсации пара на поверхности раздела недогретой воды (недогрев  $\Delta t = t_s - t_b = 150^\circ\text{C}$ ,  $t_s$  – температура насыщения;  $t_b$  – температура недогретой воды) и контактирующего с ней насыщенного пара. Скорость падения давления растет, поскольку в процессе растекания стратифицированного потока увеличивается площадь межфазной поверхности. При расходе 5 т/ч мощная струя воды выбрасывается из рабочего участка и, сталкиваясь со стенками СС, разбрызгивается (до 68.2 с). Пар, находящийся в СС, быстро конденсируется. Происходит резкое падение давления, перепад которого регистрируется уровнемером. Вследствие резкого падения давления в СС часть воды из рабочего участка устремляется в сосуд. Термопара T1 частично осушается и с 68-й по 69-ю секунду греется паром. После 69-й секунды поступающая холодная вода вновь достигает термопары T1 и температура вновь начинает снижаться. После первого скачка давления  $p_{вх} \neq p_0$ . Это связано с ростом гидравли-



**Рис. 2.** Изменение во времени уровня воды в баке СС и давления на входе в рабочий участок и в СС для рассматриваемого режима.

1 – уровень воды в СС; 2 – давление подаваемой холодной воды; 3 – давление пара на входе в СС



**Рис. 3.** Изменение во времени температуры для рассматриваемого режима.

1 – температура подаваемой холодной воды  $t_{вх}$ ; 2 – показания термопары Т1; 3 – показания термопары Т2; 4 – температура пара на входе в СС

ческого сопротивления при проталкивании воды через горизонтальный участок (в режимах с малым расходом холодной воды различие между  $p_{вх}$  и  $p_0$  существенно меньше). В момент времени 71.8 с происходит первый КГУ (см. рис. 4). По показаниям датчика давления Р2 пик давления составил 1.75 МПа. Этот гидроудар происходит вследствие

схлопывания замкнутого парового объема в рабочем участке. Этот объем предположительно был образован с левой стороны верхней частью фронта затекающей холодной воды, а с правой – волной воды из СС. Второго КГУ происходит в конце заполнения рабочего участка (75.1 с). Пик давления при втором КГУ составил 1.17 МПа. Этот ска-

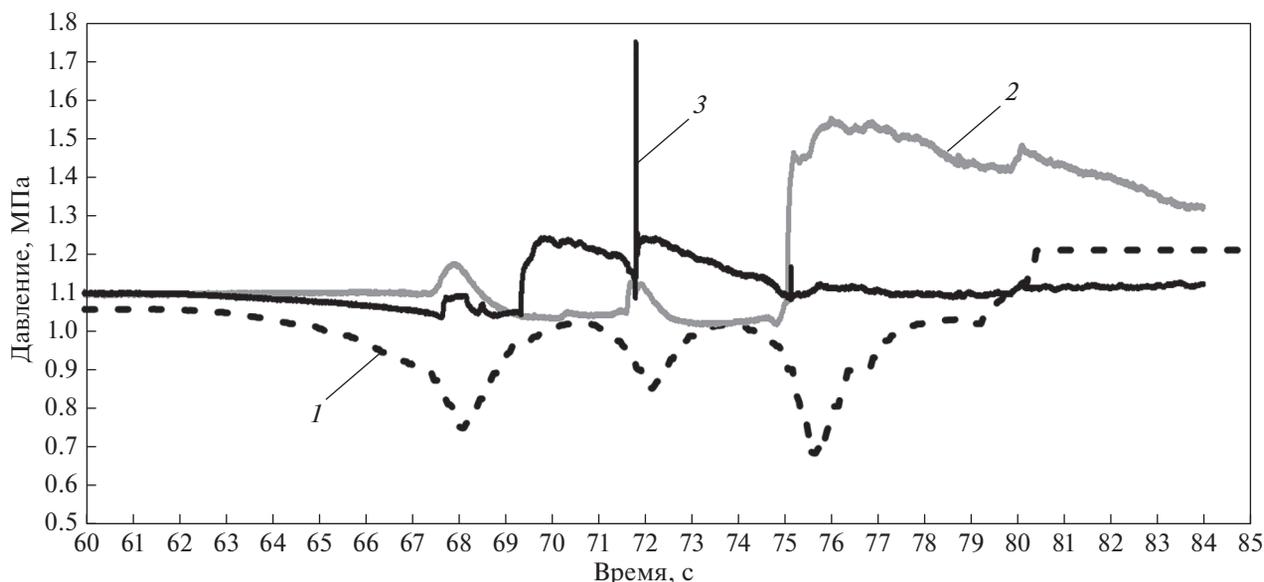


Рис. 4. Показания датчиков давления P0 (1), P1 (2) и P2 (3) для рассматриваемого режима

чок давления меньше, чем при первом КГУ, поскольку и образовавшийся в почти заполненном рабочем участке замкнутый паровой объем меньше, чем при первом КГУ. Режим заканчивается после полного заполнения рабочего участка водой. Момент достижения водой уровня патрубка подвода пара можно идентифицировать по резкому увеличению  $p_{вх}$ .

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОДОВ RELAP5 И WANA

Для анализа полученных экспериментальных результатов, приведенных в предыдущем разделе, были использованы расчетные теплогидравлические коды RELAP5 [11] и WANA [12]. Код RELAP5 — один из наиболее часто применяемых во всем мире кодов для анализа теплогидравлических процессов на АЭС. Полученный многочисленными группами исследователей значительный объем результатов валидационных расчетов, произведенных по этому коду с использованием экспериментальных данных, обеспечивает достаточно надежное моделирование нестационарных двухфазных процессов и явлений, возникающих при авариях.

В отличие от RELAP5, имеющего широкую область применения, код WANA разработан непосредственно для моделирования конденсационных гидроударов. Этот код был создан в рамках европейского проекта WANALoads, посвященного расчетным и экспериментальным исследованиям конденсационных гидроударов. Код WANA использовался для анализа экспериментов по конденсационным гидроударам на установках

РМК-2, ROSA и ФЭИ [3, 4, 13, 14]. Проведенные вычисления показали хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных по полученным значениям пиков давления. Код WANA относится к классу программного обеспечения с открытым исходным текстом (open source code), доступ к нему сотрудникам кафедры АЭС НИУ МЭИ был любезно предоставлен профессором Iz-tok Tiselj (Институт им. Стефана, Словения), который является одним из разработчиков этого кода.

Оба кода имеют схожие математические модели пароводяной среды, основанные на двухфазном подходе, при котором паровая и жидкая фазы описываются с помощью взаимопроникающих и взаимодействующих континуумов, для которых формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом взаимодействия между фазами и взаимодействия фаз со стенками канала [15]. Каждая фаза описывается своей скоростью и своей температурой, давление в фазах одинаковое. Замыкающие соотношения, которые используются в этих кодах для описания силового и энергетического взаимодействия между фазами и со стенкой канала, одинаковы или достаточно близки. Расчетный код RELAP5 был разработан для комплексного описания нестационарных двухфазных теплогидравлических процессов, происходящих в контуре ядерной энергетической установки при авариях с потерей теплоносителя, в то время как код WANA при его разработке был нацелен на численное моделирование гидроударов в системе трубопроводов, включая конденсационные гидроудары.

Наибольшее различие между этими кодами связано с численными методами решения диф-

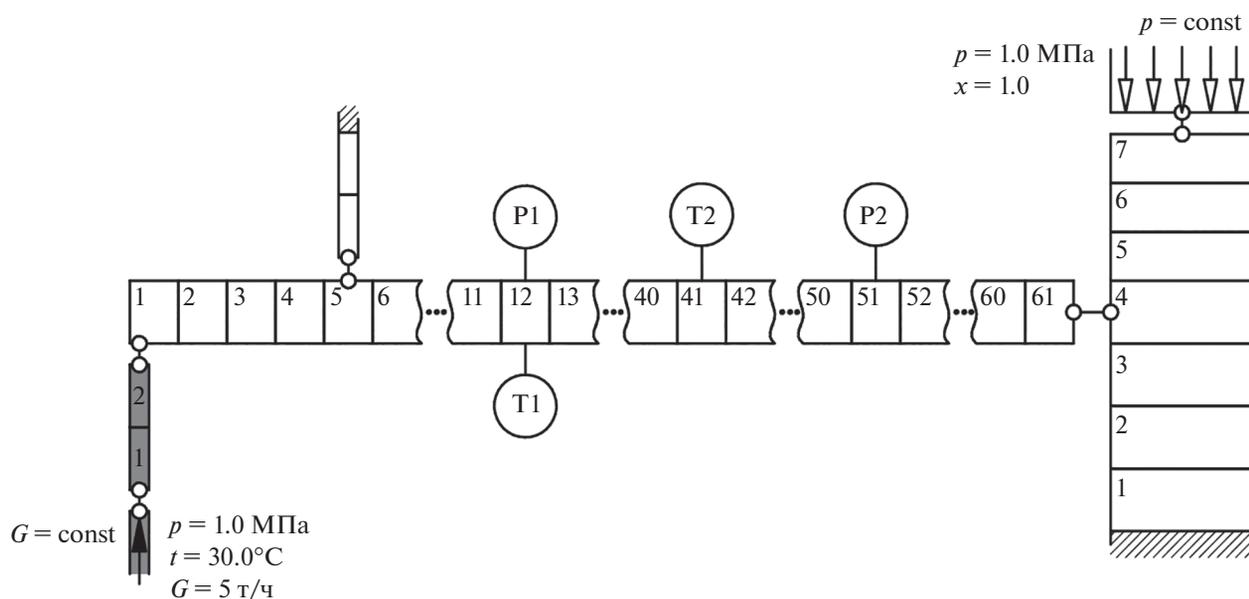


Рис. 5. Нодализионная схема рабочего участка для RELAP5 ( $x$  – массовое паросодержание)

ференциальных уравнений двухжидкостной модели пароводяной среды. В коде RELAP5 используется довольно распространенная для подобных кодов полунейвная разностная схема, позволяющая универсальным образом рассчитывать как быстрые волновые процессы, так и медленные существенно дозвуковые течения. В коде WANA применен явный численный метод С.К. Годунова, ориентированный на моделирование волновых процессов. Как показало проведенное исследование, код WANA, в отличие от кода RELAP5, не позволяет проводить расчеты двухфазных потоков в системах с разветвлением трубопровода (тройнике). Это ограничение оказывается существенным при анализе экспериментов, в которых используются тройники для разделения парового и жидкого потоков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОДОМ RELAP5

Нодализионная схема установки представлена на рис. 5. В начальный момент времени в рабочий участок, заполненный насыщенным паром при давлении 1 МПа, началась подача холодной воды ( $32^{\circ}\text{C}$ ) с расходом 5 т/ч. Расчет выполнялся до полного заполнения рабочего участка. Результаты расчетов кодом RELAP5 приведены на рис. 6.

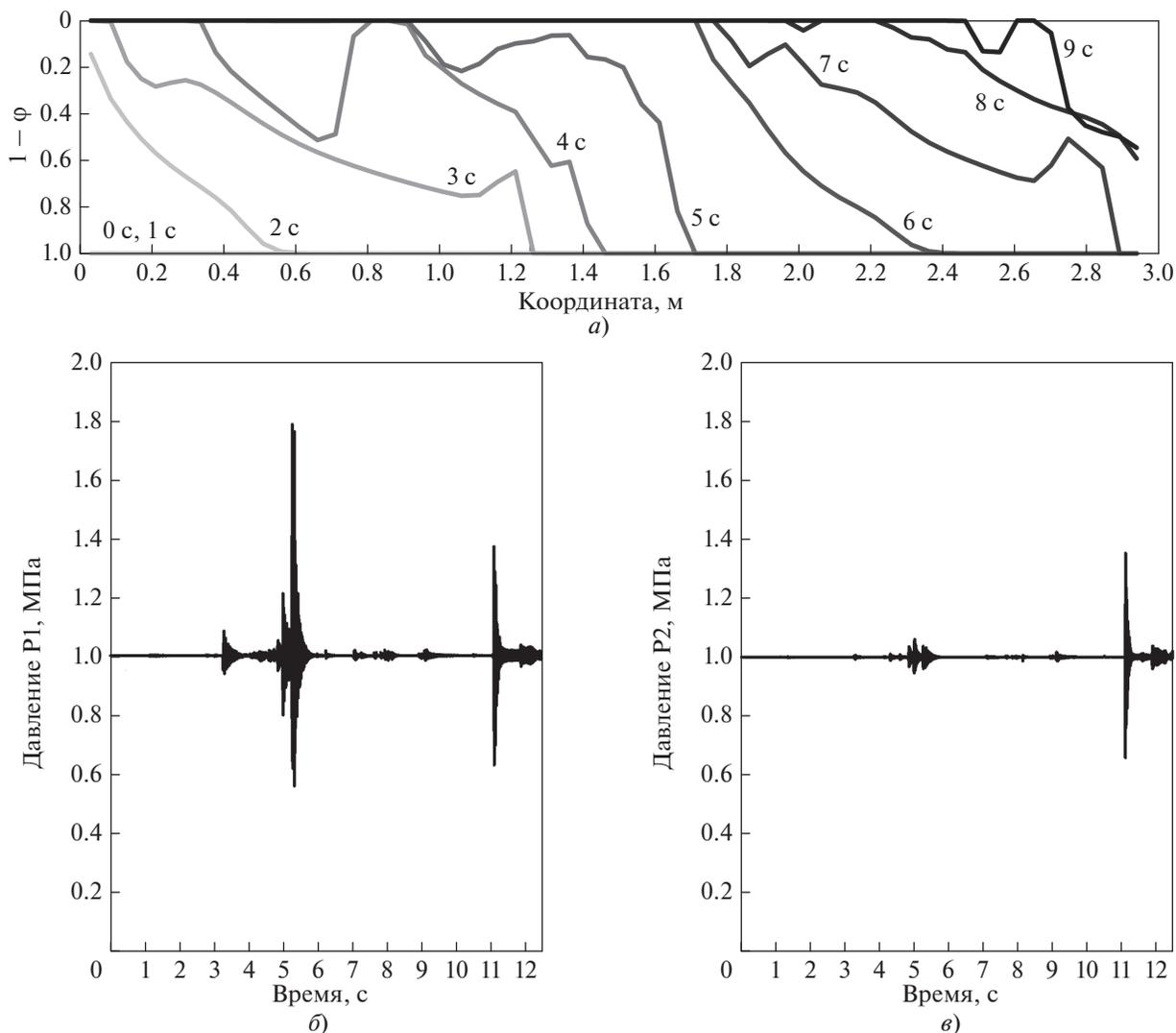
На рис. 6, *a* показаны профили объемной доли воды по длине рабочего участка для десяти моментов времени с интервалом 1 с. Видно, что сначала наблюдается горизонтальная стратификация потока. В момент времени 4 с образуется водяная перемычка, которая вследствие разных скоростей

конденсации на задней и передней границах начинает ускоряться в сторону парового объема. Паровой объем резко схлопывается с сопутствующим гидроударом.

На рис. 6, *b* показано изменение во времени давления в местах расположения датчиков P1 и P2. Гидроудары можно идентифицировать по характерным пикам давления. Первый гидроудар происходит на 5-й секунде (пик 1.8 МПа), второй – на 11-й секунде (пик 1.4 МПа). Максимальный скачок давления при первом гидроударе вблизи датчика P1 в 2 раза выше, чем около датчика P2. Это является следствием того, что первая образовавшаяся паровая полость схлопнулась вблизи датчика P1. Образовавшаяся ударная волна, распространяясь по всему рабочему участку, частично затухает. При распространении в сторону запаренной части рабочего участка ударная волна затухает значительно сильнее, чем при ее прохождении в сторону заполненной водой части. Из рис. 6, *a* видно, что рабочий участок на 5-й секунде заполнен только наполовину. Второй гидроудар происходит уже при полностью заполненном водой рабочем участке, и повышение давления около датчиков P1 и P2 примерно одинаково.

В целом картина качественно и количественно соответствует данным, полученным экспериментально.

Было исследовано влияние размеров ячеек нодализионной схемы, а также значение временного шага интегрирования на результаты расчетов. Исходная схема, по которой были получены приведенные результаты, была разработана исходя из условий примерного равенства разме-



**Рис. 6.** Результаты расчетов с использованием кода RELAP5.  
*a* – профили объемной доли воды по длине рабочего участка в разные моменты времени ( $\phi$  – объемное паросодержание); *б, в* – изменение во времени давления в местах расположения датчиков P1 и P2

ров ячеек гидравлическому диаметру трубы и совпадения с местами расположения отборов датчиков давления. Увеличение размеров ячеек приводит к снижению расчетных пиков давления, а при размерах ячеек, соответствующих примерно двум гидравлическим диаметрам, гидроудары в расчетах перестают наблюдаться. Уменьшение размеров ячеек вплоть до значений, соответствующих половине гидравлического диаметра, не приводит к заметным изменениям в решении.

При моделировании гидроударов важное значение имеет правильный выбор временного шага интегрирования на основе критерия Куранта. В руководстве кода [11] приводится пример успешного расчета конденсационного гидроудара с использованием значения числа Куранта равного 0.2. Для условий рассматриваемого в данной статье

эксперимента это значение соответствует временному шагу  $10^{-5}$  с. Расчет с этим значением временного шага по исходной нодализационной схеме дал пики давления несколько ниже экспериментальных. При снижении временного шага пики давления увеличиваются, в приведенных расчетах использовалось значение  $10^{-7}$  с.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОДОМ WANA

Нодализационная схема установки для проведения расчетов кодом WANA показана на рис. 7. Задавались следующие граничные условия: на левом конце рабочего участка постоянный расход, на правом конце – постоянное давление. В начальный момент времени весь рабочий участок, кроме первой ячейки, заполнен насыщенным па-

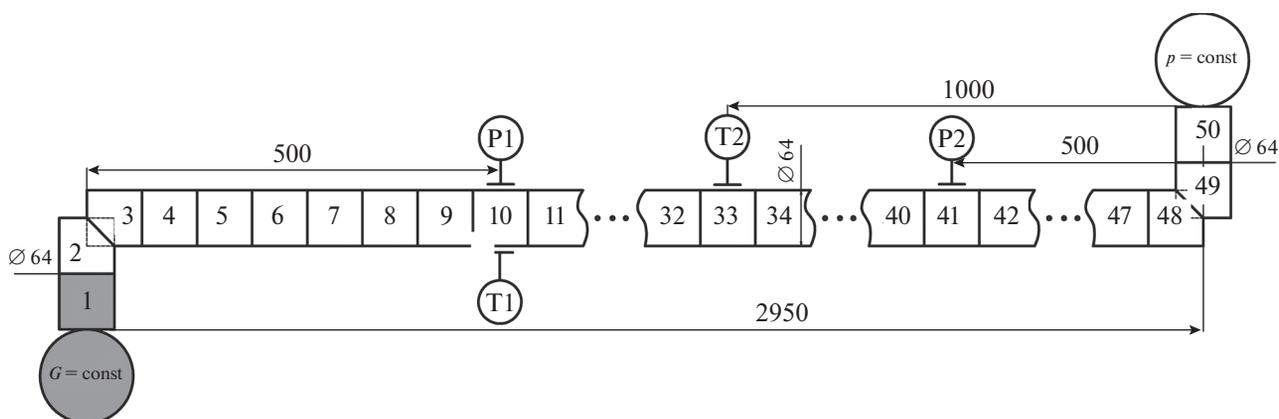


Рис. 7. Нодализация рабочего участка для кода WANA

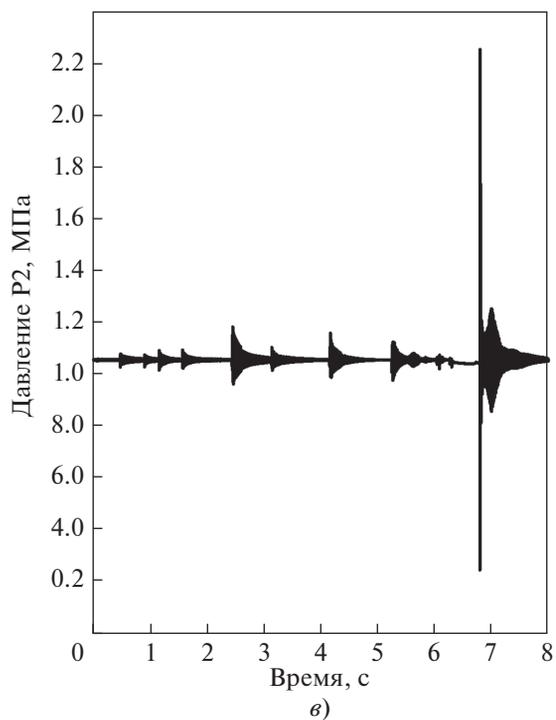
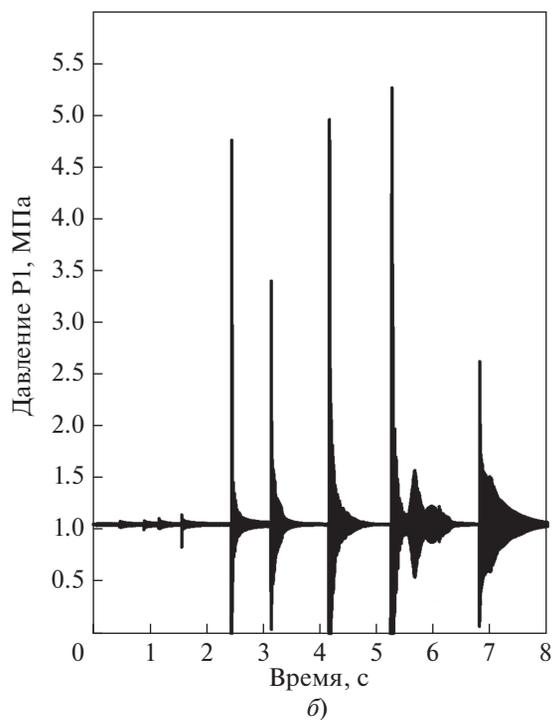
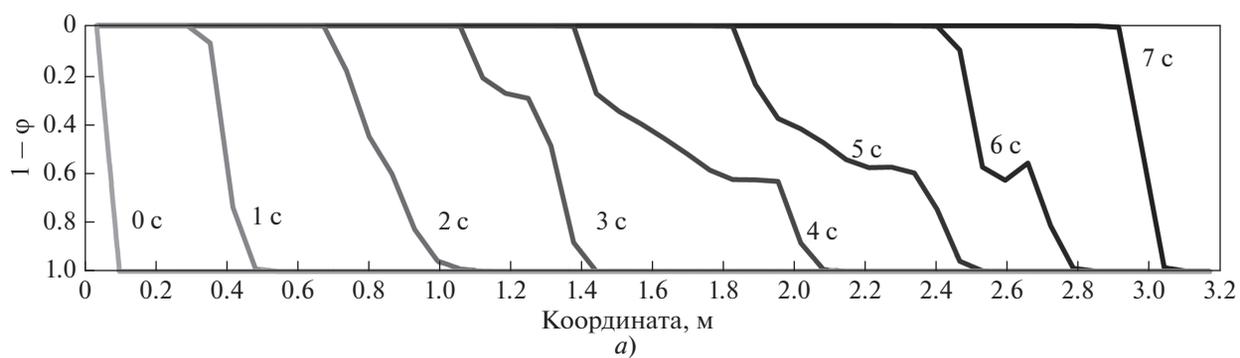


Рис. 8. Результаты расчетов с использованием кода WANA. Обозначения см. рис. 6

ром. Первая ячейка заполнена холодной водой. Расчеты проводились с учетом сил трения о стенку, межфазного трения и межфазного теплообмена.

Результаты расчета с использованием кода WANA представлены на рис. 8. Из сопоставления профилей объемного содержания воды (рис. 8, а) можно сделать вывод о том, что горизонтальная стратификация потока наблюдается только в небольшой области вблизи фронта затекания. Образующиеся не слишком протяженные паровые полости схлопываются в среднем каждую секунду, а скачки давления при этом достигают довольно высоких значений 3–5 МПа. Таким образом, в расчетах кодом WANA также получаются конденсационные гидроудары, но они возникают чаще, чем в эксперименте, а пики давления превосходят экспериментальные значения в 2.0–2.5 раза. Следует отметить, что имеется некоторая неопределенность в экспериментальном измерении пиков давления, связанная с невозможностью точно зафиксировать максимальные значения давления из-за дискретности работы датчиков (1000 измерений в секунду).

Так же как и при использовании кода RELAP5, было исследовано влияние размера ячеек нодализационной схемы и временного шага интегрирования на результаты расчетов. Установлено, что оптимальный размер расчетных ячеек, так же как и для кода RELAP5, примерно равен гидравлическому диаметру. В целом влияние размеров ячеек на результаты расчетов такое же, как для кода RELAP5, однако значение числа Куранта, при котором были получены наилучшие результаты, оказалось больше и составило 0.4.

## ВЫВОДЫ

1. Во всех 52 экспериментах, проведенных на специально созданной в 2018 г. в ЭНИЦ установке для изучения конденсационных гидроударов в горизонтальной трубе, были зафиксированы КГУ, причем при различных начальных и граничных условиях.

2. Конденсационные гидроудары начинались, как правило, после растекания холодной воды по всей горизонтальной трубе и достижения передним фронтом затекания холодной воды вертикального сосуда, а заканчивались после полного заполнения рабочего участка водой.

3. Частота возникновения КГУ слабо зависит от режимных параметров и составляет в среднем 3–4 с. В свою очередь, максимальное повышение давления при КГУ лежит в широком диапазоне и зависит как от температуры и расхода подаваемой холодной воды, так и от давления пара в рабочем участке.

4. В описанном в данной работе эксперименте максимальный пик давления при КГУ составил 1.75 МПа. Всего в этом режиме было зафиксировано два гидроудара, произошедших с разницей во времени в 3 с.

5. Расчет кодом RELAP5 показал довольно хорошее согласие с экспериментальными данными по частоте возникновения пиков давления и их амплитуде. Кодом WANA также были получены КГУ, однако их значения превышают экспериментальные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rayleigh O.M.** On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // *Phyl. Mag.* 1917. V. 34. № 200. P. 94–98.
2. **Experimental** and theoretical study of steam condensation induced water hammer phenomena / I.F. Barna, A.R. Imre, G. Baranyai, G. Ézsöl // *Nucl. Eng. Des.* 2010. V. 240. Is. 1. P. 146–150.  
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.09.027>
3. **Barna I.F., Ézsöl G.** Multiple condensation induced water hammer events, experiments and theoretical investigations // *Kerntechnik.* 2011. V. 76. Is. 4. P. 231–236.  
<https://doi.org/10.3139/124.110154>
4. **Overview** of recent efforts through ROSA/LSTF experiments / H. Nakamura, T. Watanabe, T. Takeda, Yu. Maruyama, M. Suzuki // *Nucl. Eng. Technol.* 2009. V. 41. Is. 6. P. 753–764.  
<https://doi.org/10.5516/NET.2009.41.6.753>
5. **Selivanov Yu.F., Yefanov A.D., Kirillov P.L.** Water hammer phenomena occurring in nuclear power installations at filling horizontal pipe containing saturated steam with liquid // *Proc. of the 7th Intern. Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics. NURETH-7. NUREG/CP-0142.* 1995. V. 4. P. 2916.
6. **Селиванов Ю.Ф., Ефанов А.Д., Мартынов А.Д.** Исследование режимов возникновения и величин конденсационных гидроударов в элементах оборудования реакторных установок с ВВЭР // *Труды междунар. конф. “Теплофизика-98”*, “Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР”. Обнинск, 26–29 мая 1998 г. В 2 т. Т. 1. С. 180.
7. **Urban C., Schluter M.** Investigations on the stochastic nature of condensation induced water hammer // *Int. J. Multiphase Flow.* 2014. V. 67. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.08.001>
8. **Experimental** investigation on the phenomenon of steam condensation induced water hammer in a horizontal pipe / L. Wang, Y. Xiaoyu, Ch. Daotong, Ch. Weixiong, Y. Junjie // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2018. V. 91. P. 451–458.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.10.036>
9. **Аналитический** обзор публикаций по экспериментально-расчетному исследованию конденсационных гидроударов в оборудовании легководных ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Часть 1 / Ю.Б. Хрипачев, А.Н. Чуркин, Ю.А. Безруков, Е.А. Лисенков, А.В. Селезнев // *Тяжелое машиностроение.* 2016. № 1–2. С. 27–33.

10. **Аналитический** обзор публикаций по экспериментально-расчетному исследованию конденсационных гидроударов в оборудовании легководных ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Часть 2 / Ю.Б. Хрипачев, А.Н. Чуркин, Ю.А. Безруков, Е.А. Лисенков, А.В. Селезнев // Тяжелое машиностроение. 2016. № 3–4. С. 22–28.
11. **RELAP5/MOD3.3** Code Manual. V. 1–8. NUREG/CR-5535, Idaho National Engineering Laboratory, 2001.
12. **WAHA3** Code Manual / I. Tiselj, A. Horvat, G. Černe, J. Gale, I. Parzer, B. Mavko, M. Giot, J.M. Seynhaeve, B. Kucienska, H. Lemonnier // Josef Stefan Institute Report IJS-DP-8841, Rev. mar-04. Ljubljana, March 04.
13. **Theoretical** study of steam condensation induced water hammer phenomena in horizontal pipelines / I.F. Bar-na, M.A. Pocsai, A. Guba, A.R. Imre // Kerntechnik. 2015. V. 80. Is. 5. P. 1–4. <https://doi.org/10.3139/124.110537>
14. **Тестирование** и верификация кода WAHA, предназначенного для моделирования конденсационного гидроудара / Е.В. Вилюра, Г.Ю. Волков, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2019. № 1. С. 45–55.
15. **Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И.** Современное состояние и тенденции развития математического моделирования теплофизических процессов на АЭС // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2018. № 4. С. 61–73.

## Experimental and Calculated Studies of Condensation-Induced Water Hammer

G. J. Volkov<sup>a</sup>, I. V. Elkin<sup>b</sup>, A. V. Kapustin<sup>c</sup>, V. I. Melikhov<sup>a, \*</sup>, O. I. Melikhov<sup>a</sup>,  
S. M. Nikonov<sup>b</sup>, and O. N. Trubkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup>AO Elektrogorsk Research and Engineering Center for Nuclear Power Plants' Safety, Elektrogorsk, Moscow oblast, 142530 Russia

<sup>c</sup>Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191 Russia

\*e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

**Abstract**—Experience gained from the operation of nuclear power plants shows that emergencies or incorrect actions of the personnel may give rise to water hammer phenomena, which exert additional impacts on the pipelines and equipment. Condensation-induced water hammer (CIWH) is one of the most destructive kinds of water hammer. Experimental studies of CIWH were carried out in a number of scientific organizations around the world. The main features of the experimental facilities used in the world are considered. For studying the CIWH phenomena occurring in a horizontal channel, a special experimental test facility was set up in 2018 at the Elektrogorsk Research and Engineering Center for Nuclear Power Plants' Safety (EREC). The facility's test section and the parameters of experimental regimes are described. Fifty-two experiments were carried out on the facility under different initial and boundary conditions for three values of the water flowrate supplied to the facility (1, 3, and 5 t/h), two values of water temperature (30 and 60°C), and two values of vapor pressure in the test section (0.6 and 1.0 MPa). In all experiments, CIWH phenomena were recorded. As an example, one experimental regime was considered in detail, and the CIWH occurrence mechanism is described proceeding from the readings of pressure and level gages and temperature sensors. The described experimental regime was modeled using the RELAP5 and WAHA thermal-hydraulic codes. The effect that the size of nodalization diagram cells and the integration time step have on the computation results is analyzed. The significant amount of experimental points obtained from the study can be used for setting up a database for validating computer codes.

**Keywords:** water hammer, condensation-induced water hammer, experimental studies, mathematical modeling, two-phase flows, interphase interaction, RELAP5, WAHA