

# ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

С. Лауар\*, \*\*, М.И. Делов\*, Ю.Е. Литвинцова\*, Д.М. Кузьменков\*,  
К.Ю. Мурадян\*, М.В. Навасардян\*, К.В. Куценко\*

\* *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

\*\* *Центр ядерных исследований г. Бирин  
17200, Алжир, Айн Уссера, а/я 180*



Представлен опыт создания теплогидравлического стенда для разработки технических и информационных решений по использованию цифровых двойников энергетического оборудования. Теплогидравлический стенд был разработан и изготовлен в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», и представляет собой двухпетлевую установку, позволяющую исследовать процессы теплообмена в режимах вынужденной и естественной циркуляции воды. Экспериментальная установка позволяет получать новые данные по теплоотдаче и гидродинамике двухфазных потоков при обтекании пучков твэлов, необходимые для проведения верификации вычислительных кодов. Полученные предварительные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетами по различным вычислительным кодам.

В рамках создания цифрового двойника теплогидравлического стенда проводится разработка системы диагностики, контроля и мониторинга переходных режимов теплообмена на основе физически обоснованных методов в реальном масштабе времени. Нейросетевые технологии позволяют предсказывать изменения теплогидравлических параметров стенда при внешнем воздействии. В дальнейшем предполагается использование виртуального аналога экспериментальной установки в учебном процессе и в дистанционном формате.

**Ключевые слова:** теплогидравлический стенд, теплоотдача, гидродинамика, компьютерное моделирование, CFD, цифровой двойник, диагностика, диагностика переходных режимов теплоотдачи.

## ВВЕДЕНИЕ

В любое современное производство предполагается внедрение цифровых технологий на всех этапах жизненного цикла создаваемой продукции [1]. Новые концепции совершенствования «умного производства» включают в себя использование таких современных информационных технологий, как большие данные [2], облачные вычисле-

© *С. Лауар, М.И. Делов, Ю.Е. Литвинцова, Д.М. Кузьменков, К.Ю. Мурадян,  
М.В. Навасардян, К.В. Куценко, 2020*

ния [3], виртуальная и дополненная реальность [4], киберфизические системы [5], человеко-машинный интерфейс [6] и другие. В настоящее время эти технологии успешно внедряются в отдельные производственные процессы; в литературе представлено большое количество работ по внедрению информационных технологий также и в ядерное производство электроэнергии [7]. Наибольшее развитие получило использование технологий виртуальной реальности при проектировании рабочих мест операторов АЭС [8] и разработке систем дозиметрического контроля помещений и территории [9]. Ключевой задачей при эксплуатации и проектировании АЭС является обеспечение должного уровня ядерной и радиационной безопасности, для чего все технологические решения должны базироваться на проведении масштабного математического компьютерного моделирования развития возможных аварийных ситуаций. Цифровизация средств проектирования позволит усовершенствовать подходы к такому моделированию [10 – 11].

Наиболее интересной задачей, относящейся к развитию цифровых производств, можно назвать технологию создания и использования цифровых двойников. В одной из первых работ [12], посвященных концепции цифровых двойников, указано, что цифровой двойник должен включать в себя физический объект в реальном пространстве и виртуальный объект в виртуальном, при этом оба объекта связаны передающимся от одного к другому потоком данных и информации. Для разработки решений в данной области целесообразно начать работу по созданию цифрового двойника более простого объекта – малого прототипа или комплексной экспериментальной установки. Так как большинство единиц оборудования атомной электростанции необходимы для осуществления термодинамического цикла преобразования энергии и не связаны непосредственно с работой ядерного реактора, имеет смысл начать работу по отработке технологий с создания цифрового двойника теплогидравлической экспериментальной установки. В литературе широко представлено описание схожих по требуемому составу оборудования экспериментальных стендов [13 – 15]. Такая установка должна включать в себя сравнительно небольшое число единиц оборудования, по своему назначению схожего с оборудованием реальной АЭС: нагреватели, теплообменные аппараты, накопительные баки, насосы, трубопроводы, регулирующая арматура, датчики различных физических параметров и т.д.

В работе рассматривается концепция цифрового двойника теплогидравлического стенда и приводится описание первого этапа проекта: создание экспериментальной установки, оснащение ее датчиками различного типа, отработка программных решений по визуализации данных и их прогнозированию (на основе физических моделей), а также разработка общей структуры цифрового двойника экспериментальной установки.

### **КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

Создаваемый цифровой двойник теплогидравлического стенда должен проводить сбор и хранение показаний с датчиков физических параметров в режиме реального времени, осуществлять прогнозирование изменений параметров, а также иметь возможность управления состоянием стенда удаленными операторами. Цифровой двойник состоит из следующих девяти систем.

1. Система управления жизненным циклом (Life Cycle Control System) – система верхнего уровня для координации сбора, обработки, хранения и выдачи пользователю информации о параметрах цифрового двойника, а также для управления другими системами и контроля доступа пользователей.

2. Система контроля и мониторинга (Control and Monitoring System) осуществляет сбор, первичную обработку и хранение информации о состоянии стенда с датчиков. Требуется непрерывного накопления информации о режимах работы и параметрах происходящих физических процессов.

3. Система цифрового управления (Digital Control System) обеспечивает управление (через веб-интерфейс) реальным теплогидравлическим стендом и его эксплуатационными параметрами в допустимом диапазоне.

4. Система моделирования физических процессов (System for Modeling of Physical Processes) обеспечивает сбор данных о теплогидравлических характеристиках стенда или его отдельных элементов, полученных с помощью моделирования процессов в расчетных кодах.

5. Система нейросетевого прогнозирования состояний (System of Neural Network Prediction) обеспечивает прогнозирование состояния стенда при помощи нейросетевых технологий на основе данных, полученных из «системы контроля и мониторинга» при длительной эксплуатации и при изменении режимов работы. Дополнительно обеспечивает планирование тестовых экспериментов и моделирование процессов при помощи «системы моделирования физических процессов».

6. Система физического прогнозирования состояний (System for Physical Prediction of States) обеспечивает прогнозирование состояния стенда по флуктуациям параметров, полученных из «системы контроля и мониторинга». Прогнозирование основано на анализе характера изменений флуктуаций теплогидравлических параметров во времени.

7. Система хранения данных (System of Data Storing) обеспечивает обработку и хранение данных о цифровом двойнике на протяжении всего жизненного цикла реального стенда. Должна хранить документацию на оборудование и обеспечивать «систему моделирования физических процессов» всеми необходимыми входными данными для проведения вычислений.

8. Веб-интерфейс (Web Interface) – информационная среда в интернете для обеспечения дистанционного доступа ко всем компонентам цифрового двойника. Работа этой системы подразумевает собой консолидированную выдачу пользователям полной информации о параметрах стенда из базы данных «системы контроля и мониторинга», технической документации на оборудование, дистрибутивов основного программного обеспечения и т.д.

9. Система визуализации параметров в виртуальной реальности (VR Parameter Visualization System) должна обеспечивать визуализацию работы стенда и его теплогидравлических параметров в среде виртуальной реальности. В качестве входных данных необходимо использование показания датчиков «системы контроля и мониторинга» в режиме реального времени.

Отличительной особенностью данного цифрового двойника является наличие различных по своему принципу (нейросетевые технологии или физические модели) систем прогнозирования и мониторинга теплофизических параметров, использование CFD-моделирования теплогидравлических процессов в стенде для обучения нейросети, а также внедрение технологии виртуальной реальности для отображения состояния и параметров стенда.

Разрабатываемая нейросеть должна быть способна прогнозировать локальное закипание теплоносителя на поверхности нагревателей и тепловыделяющих элементов, наличие малых течей и их локализацию, а также давать сведения о локальных физических параметрах на участках стенда без возможности прямого измерения (в том числе при некорректной работе измерительной аппаратуры).

Система физического прогнозирования состояний основана на статистическом и спектральном анализе флуктуаций температур и давления теплоносителя. В работах [16 – 18] описаны методики диагностики и прогнозирования закипания теплоносителя, основанные на статистическом и амплитудно-частотном анализе спектров флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности или сопутствующих физических параметров. Для физического прогнозирования закипания теплоносителя необходимы проведение

в режиме реального времени расчета дисперсий, а также анализ гистограмм распределения и амплитудных спектров для таких флуктуаций. Данная система дублирует возможности системы нейросетевого прогнозирования, однако ее использование расширяет понимание протекающих физических процессов.

### ОПИСАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СТЕНДА

Стенд имеет два контура движения теплоносителя: основной (первый) контур циркуляции для проведения исследования гидродинамики и теплоотдачи к жидкости; вспомогательный (второй) контур, предназначенный для отвода тепла от основного контура циркуляции. Схема расположения основных элементов представлена на рис. 1. Общий объем дистиллированной воды в двух контурах с учетом расширительного и питательного баков – 800 литров, давление в верхней точке контура – атмосферное.

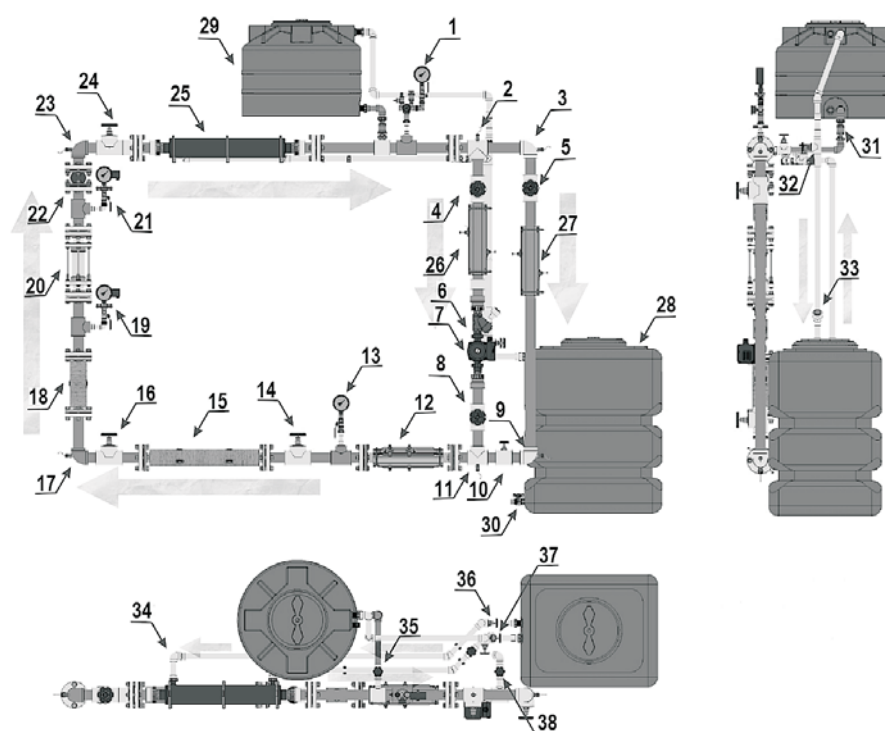


Рис. 1. Схема основных элементов теплогидравлического стенда. Первый контур: 1 – регулирующий блок (воздухоотводчик, предохранительный клапан, манометры); 2, 11 – тройники с термодатчиками; 3, 9, 17, 23 – колена с термодатчиками; 4, 5, 8, 14, 16, 24 – задвижки; 6 – фильтр линии первого контура; 7 – циркуляционный насос; 10 – тройник к линии дренажа; 12, 26, 27 – датчики ультразвуковых расходомеров; 13 – манометр; 15, 18 – участки с нагревателями; 19, 21 – деформационные манометры; 20 – рабочий объем; 22 – компенсатор расширения; 25 – теплообменник; 29 – расширительный бак. Второй контур: 28 – питательный бак; 30 – слив; 31 – обратный клапан; 32, 35, 36, 37, 38 – краны; 33 – фильтр линии второго контура; 34 – трубопровод второго контура

Первый контур циркуляции оснащен прозрачным кварцевым рабочим объемом, в котором располагаются сменные рабочие участки. Каждый рабочий участок представляет собой пучок твэлов с различным диаметром, типом и шагом решетки. Разогрев твэлов происходит за счет джоулева тепловыделения при пропускании по ним переменного электрического тока и позволяет независимо на каждом из них менять плотность теплового потока от нулевого значения до  $5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> до наступления режима пузырькового кипения. Движение теплоносителя в первом контуре может происходить как в условиях естественной циркуляции, так и при вынужденном движении ( $Re \leq 5 \cdot 10^4$ ) теплоносителя.

Для обеспечения необходимой для возникновения естественной циркуляции разности плотностей теплоносителя в подъемном и опускном участках предусмотрен подвод и отвод тепла от теплоносителя первого контура. Подвод тепла к контуру осуществляется восемью накладными нагревателями, закрепленными на поверхности стальных труб 15 и 18. Питание нагревателей осуществляется переменным током от автотрансформаторов с возможностью регулировки подаваемой на каждый нагреватель мощности в диапазоне от 0 до 1 кВт. Отвод тепла от первого контура осуществляется с помощью змеевикового теплообменника 25. Тепло передается ко второму контуру циркуляции 34, соединенному с питательным баком 28 объемом 500 литров. Циркуляция теплоносителя второго контура осуществляется с помощью погружного насоса, расположенного в баке. Бак 29 выполняет функцию расширительного объема первого контура.

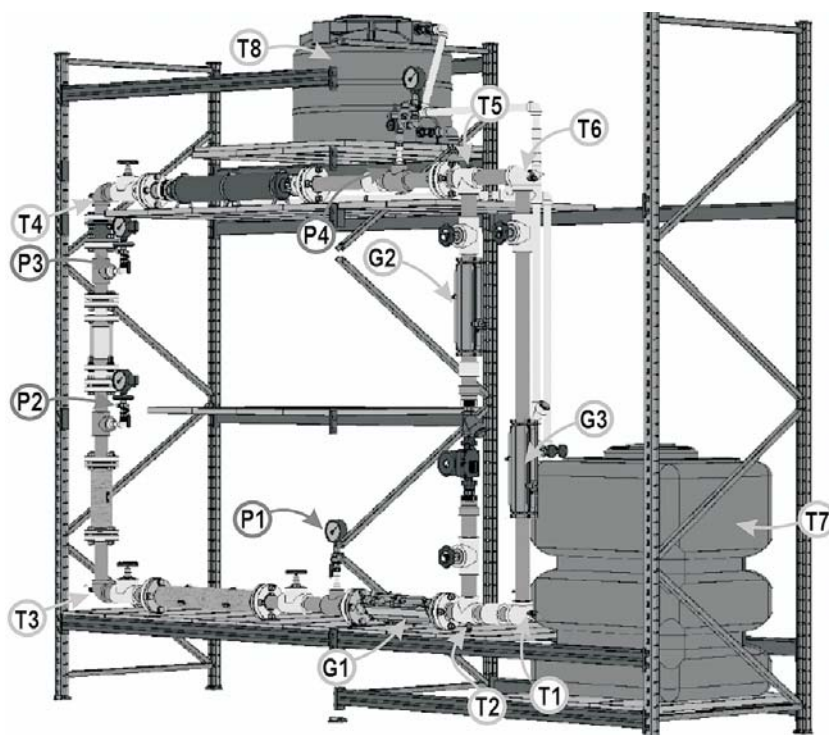


Рис. 2. Схема расположения датчиков контроля параметров теплоносителя: G – расходомеры; T – термодатчики; P – манометры

Измерение параметров теплоносителя проводится при помощи термодатчиков, манометров и расходомеров, схема расположения которых представлена на рис. 2. Измерение расхода проводится с помощью накладных ультразвуковых расходомеров, расположенных на нижнем горизонтальном (G1) и вертикальных опускных (G2 и G3) участках контура. Контроль давления проводится в низшей (P1) и высшей (P4) точках первого контура, перепад давления в рабочем объеме измеряется при помощи двух прецизионных деформационных манометров (P2 и P3). Измерение температуры потока жидкости осуществляется при помощи резистивных платиновых термодатчиков, встроенных во все угловые элементы конструкции (T1, T3, T4 и T6), тройники (T2 и T5), а также расположенных в питательном (T7) и расширительном (T8) баках. Дополнительно проводится контроль температуры накладных нагревателей, теплоизоляции на нагревательных участках, а также окружающей среды.

Все контрольно-измерительные приборы оборудованы аналоговыми электронными выводами. Показания приборов поступают в автоматизированную систему контроля и



мониторинга. Программное обеспечение контроля и мониторинга имеет графическую среду для отображения данных в режиме реального времени. Предварительная обработка данных реального времени осуществляется с помощью встроенного технологического алгоблочного языка программирования нижнего уровня системы, что позволяет получать расчетные данные практически одновременно с результатами прямых измерений. Система контроля и мониторинга ведет запись архивных данных с тактом работы базы данных реального времени, позволяя иметь в архиве данные без каких-либо усреднений.

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Отличительной особенностью создаваемого цифрового двойника является возможность внедрения нейросетевых технологий для прогнозирования изменения параметров стенда. Использование нейросетевых моделей всегда требует статистически большого объема данных для создания алгоритмов прогнозирования изменения параметров. Поэтому помимо проведения длительных экспериментальных серий целесообразно использовать данные, полученные в результате численного моделирования тепловых и гидродинамических процессов в контуре циркуляции стенда.

Для расчета режимных параметров теплогидравлического стенда (расхода, температуры, давления и пр.) были разработаны модели естественной и вынужденной циркуляции теплоносителя в основном контуре теплогидравлического стенда в пакете STAR-CCM+. Расчетная сетка сформирована из 26.7 млн. кубических ячеек со средним размером грани 0.8 мм с 20%-ым четырехслойным призматическим измельчением сетки в пристеночной области. Геометрическая модель контура на вынужденной циркуляции не включает в себя опускной участок естественной конвекции.

Для описания вынужденного течения теплоносителя используется численное решение системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой однофазной среды в стационарной постановке. Модель вынужденной циркуляции дополнена двухслойной реализуемой моделью турбулентности типа  $k$ - $\epsilon$  со стандартными пристеночными функциями, максимальное значение  $Y^+$  = 0.6. Численное решение осуществляется полунявным методом SIMPLE с коэффициентами релаксации 0.7 для поля скоростей и 0.3 для поля давлений. На стенках всех участков движения теплоносителя задано граничное условие прилипания по скорости, а на торце патрубка верхнего расширительного бака граничное условие давления (1 атм). Для снижения потребляемой расчетной мощности в вертикальном центральном сечении стенда использовалось граничное условие симметрии. Циркуляция теплоносителя в замкнутой геометрии модели осуществлялась путем создания объемного источника импульса величиной 30 – 600 кН/м<sup>3</sup> в месте размещения насоса.

Были созданы расчетные модели участков контура и отдельных элементов в SolidWorks (модуль Flowsimulation) для расчета гидродинамических характеристик при вынужденной циркуляции теплоносителя. Для описания течения жидкости используется численное решение уравнения Навье-Стокса с применением двухслойной  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности со стандартными пристеночными функциями. Граничные условия для численной модели в SolidWorks Flowsimulation задавались аналогично тому, как это было сделано для модели STAR-CCM+. Расчетная сетка в SolidWorks Flowsimulation была сформирована из прямоугольных элементов с базовым размером 4 мм в ядре потока и 1 мм в пристеночной области с промежуточным слоем с базовым размером 2 мм. С использованием данных расчетных моделей проводится уточнение гидравлических сопротивлений отдельных элементов контура.

Для проверки корректности снятия показаний термодатчиков был проведен оценоч-

ный расчет возникновения естественной циркуляции согласно известным инженерным методикам. Критерием возникновения естественной циркуляции при неизвестном расходе  $G$  является равенство движущего напора всем гидравлическим потерям теплоносителя. Коэффициенты местных сопротивлений оценивались из справочников [19] либо уточнялись по результатам CFD-моделирования [20]. В качестве примера на рис. 3 показаны результаты численного моделирования протекания теплоносителя через колено в пакете SolidWorks.

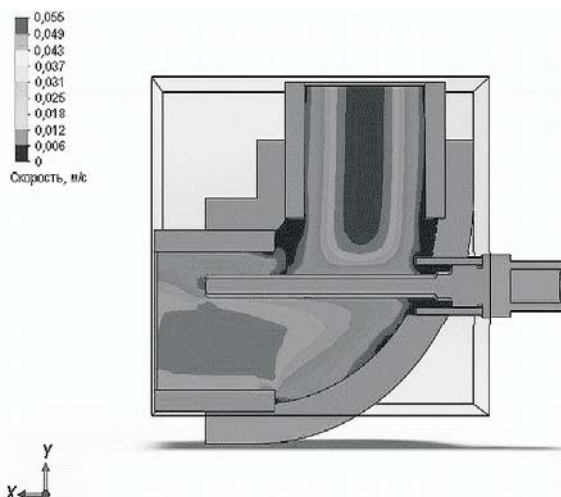


Рис. 3. Контурная карта распределения скорости среды при протекании теплоносителя через колено

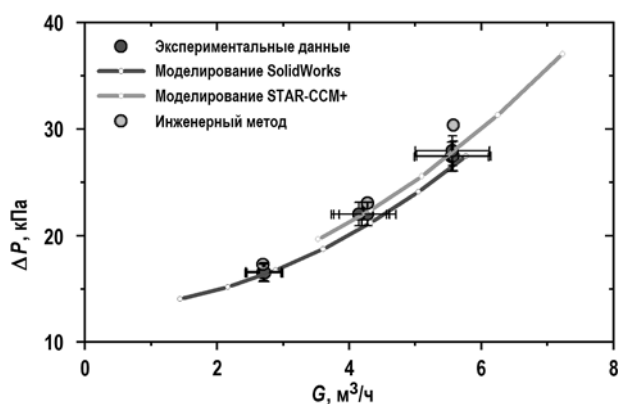


Рис. 4. Зависимость перепада давлений от расхода теплоносителя при вынужденной циркуляции теплоносителя

На рисунке 4 показан график зависимости перепада давлений между манометрами P1 и P3 от расхода теплоносителя при температуре 23°C. На графике представлены экспериментальные данные, а также результаты расчетов перепада давлений по инженерным методикам и с помощью CFD-расчетов в пакетах STAR-CCM+ и SolidWorks. Как видно из графиков, результаты численных расчетов хорошо соответствуют экспериментальным данным. Средняя невязка STAR-CCM+ относительно эксперимента не превышала 0.6%; невязка SolidWorks составила 1%.

На рисунке 5 показан график зависимости расхода теплоносителя при естественной циркуляции в контуре от перепада температур между термодатчиками T1 и T4. Точками на графике показаны экспериментальные данные при изменении минимальной температуры в контуре в диапазоне от 30°C до 40°C и расчет естественной циркуляции в пакетах STAR-CCM+ при температуре T1, равной 23°C, линиями – результаты оценочного

расчета возникновения естественной циркуляции согласно известным инженерным методикам.

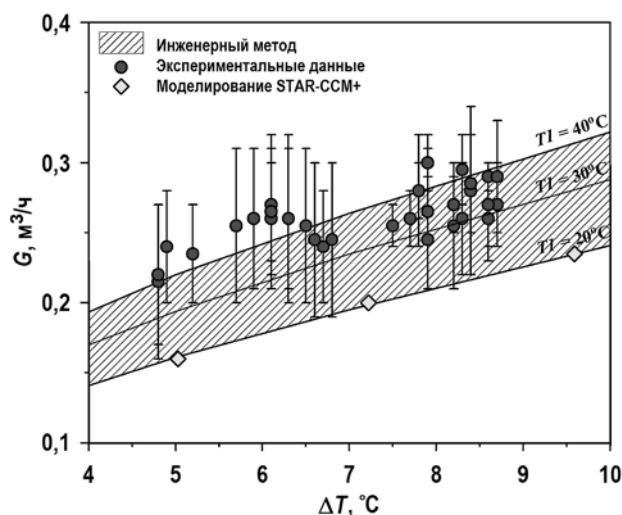


Рис. 5. Зависимость расхода от перепада температур между термодатчиками при естественной циркуляции теплоносителя

Важно отметить, что при проведении исследований при естественной циркуляции теплоносителя наблюдались неустойчивые режимы, в которых расход и давления в различных участках контура испытывали значительные колебания. По-видимому, факт существования таких режимов связан с достижением условий закипания теплоносителя на стенках труб участков с нагревателями. Проведенные оценки показывают, что в этом случае температура внутренней поверхности труб превышает температуру насыщения на 10 и более градусов.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Создание виртуального аналога теплогидравлического стенда ведется в среде Unreal Engine 4, позволяющей визуализировать с помощью инструментов виртуальной реальности как сам стенд, так и протекающие в нем процессы. Процесс разработки включает в себя три основных этапа: разработка трехмерной полигональной модели, работа над алгоритмами взаимодействия пользователя с моделью, а также визуализация экспериментальных данных в режиме реального времени с учетом результатов математического моделирования протекающих физических процессов.

На первом этапе разработки виртуального аналога использовалась подготовленная в SolidWorks твердотельная CAD-модель теплогидравлического стенда, которая в дальнейшем конвертировалась в требуемую Unreal Engine 4 полигональную модель. Основным способом визуализации текущих физических процессов – градиентное окрашивание текстур. Цветовой карте ставятся в соответствие мгновенные значения температур, скорость жидкости или давление. Состояние запорной арматуры отображается с помощью цвета вентиля, а численные значения основных измеряемых параметров отображаются на виртуальном мониторе на стене комнаты. На рисунке 6 показан пример визуализации распределения температур жидкости в первом контуре циркуляции в виртуальной реальности.

Подобного рода виртуальные аналоги активно используются в крупных корпорациях для обучения персонала [21]. Предполагается возможность создания виртуальной учебной лабораторной работы для обеспечения учебного процесса.



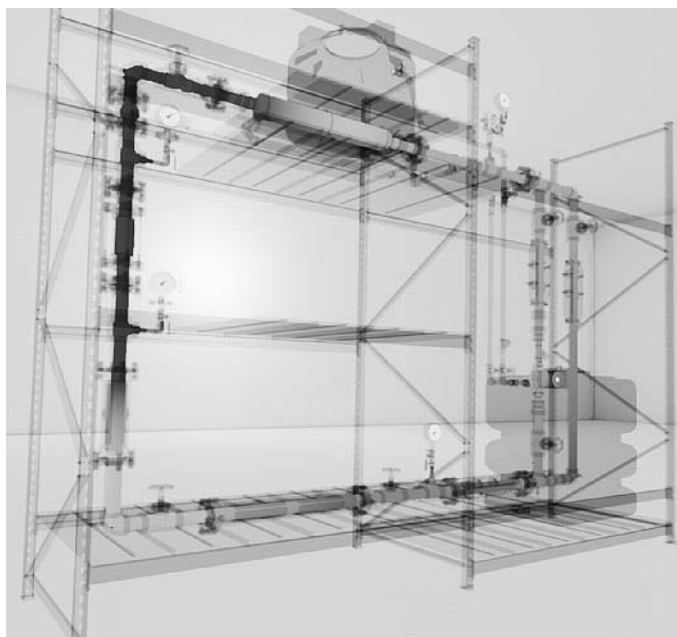


Рис. 6. Вид отображения распределения температур в первом контуре теплогидравлического стенда в среде Unreal Engine

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Создание цифрового двойника теплогидравлического стенда позволит отработать технические и информационные решения по использованию цифровых двойников энергетического оборудования. Непосредственно сам цифровой двойник теплогидравлического стенда будет использован в учебном процессе по подготовке эксплуатационного персонала электростанций. Созданная установка и цифровая инфраструктура позволят проводить ряд исследовательских работ по верификации CFD-кодов и отработке методик диагностирования переходных процессов теплообмена как средствами физического прогнозирования, так и нейросетевыми моделями.

## **Благодарности**

Авторы благодарят коллег из НИЯУ МИФИ (Д.А. Хомяков, П.К. Кирюхин, П.А. Пугачев, В.И. Романенко, А.А. Щербаков и Е.А. Задеба) за разработку модуля визуализации параметров теплогидравлического стенда с использованием инструментов виртуальной реальности. Отдельную благодарность авторы выражают профессору В.Б. Балакину из Университета прикладных наук Западной Норвегии за ценные замечания и обсуждение полученных результатов.

## **Литература**

1. *Muhuri P.K., Shukla A.K., Abraham A.* Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2019. – Vol. 78. – PP. 218-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>.
2. *Wang S., Wan J., Zhang D., et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. // *Computer Networks*. – 2016. – Vol. 101. – PP. 158-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>.
3. *Liu X.F., Shahriar M.R., Al Sunny S.M.N., et al.* Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed. // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2017. – Vol. 43. – PP. 352-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.004>.

4. *Farshid M., Paschen J., Eriksson T., Kietzmann J.* Go boldly!: Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business. // *Business Horizons*. – 2018. – Vol. 61. – PP. 657-663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.05.009>.
5. *Lee J., Bagheri B., Kao H.* A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. // *Manufacturing Letters*. – 2015. – Vol. 3. – PP.18-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
6. *Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zuhlke D.* Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. // *IEEE International Conference on. IEEE*. – 2014. – PP. 289-294. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>.
7. *Гусев И.Н., Соловьев Б.Л., Поваров В.П., Кужиль А.С., Падун С.П.* Использование результатов пусконаладочных работ для создания, настройки и валидации системы интеллектуальной поддержки оператора на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2019. – № 3. – С. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2019.3.01>.
8. *Lee H., Cha W.C.* Virtual Reality-Based Ergonomic Modeling and Evaluation Framework for Nuclear Power Plant Operation and Control. // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 1. – Iss. 2630. – PP. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11092630>.
9. *Machadoa D.M., Cotellia A., Galvaao D., Mola A.C.A. et al.* Use dosimetry virtual tool for security studies physics and nuclear. // *Procedia Manufacturing*. – 2015. – Vol. 3. – PP. 1765-1771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.478>.
10. *Bestion D.* From the direct numerical simulation to system codes – perspective for the multi-scale analysis of LWR thermalhydraulics. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 42. – PP. 608-619. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2010.42.6.608>.
11. *Wu Y.* Development and application of virtual nuclear power plant in digital society environment. // *International Journal of Energy Research*. – 2019. – Vol. 43. – PP. 1521-1533. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4378>.
12. *Grieves M.* Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. // *White paper*. – 2014. – PP. 1-7.
13. *Liu F., Yang Z., Zhang B., Li T.* Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 147. – No. 118954. – PP. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118954>.
14. *Shi S., Schlegel J.P., Brooks C.S. et al.* Experimental investigation of natural circulation instability in a BWR-type small modular reactor. // *Progress in Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 85. – PP. 96-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.06.014>.
15. *Goel P., Nayak A.K., Ghosh P., Joshi J.B.* Experimental study of bubble departure characteristics in forced convective subcooled nucleate boiling. // *Experimental heat transfer*. – 2018. – Vol. 31. – PP. 194-218. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2017.1397821>.
16. *Delov M.I., Litvintsova Y.E., Kuzmenkov D.M. et al.* Diagnostics of transient heat transfer modes based on statistical and frequency analysis of temperature fluctuations. // *Experimental Heat Transfer*. – 2019. – PP. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2019.1662517>.
17. *Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V. et al.* Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime. // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2017. – Vol. 4. – PP. 219-222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.10.015>.
18. *Deev V.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A. et al.* Frequency analysis of fluctuations of the temperature of a heater and of sound noise in boiling used for the diagnostics of the changes in the heat-transfer regimes. // *Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 61. – PP. 590-593. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514080035>.
19. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
20. *Laouar S., Sakib M.N., Muqit Al S., et al.* Pressure drop in valve for different open flow areas. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1439. – No. 012009. – PP. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1439/1/012009>.
21. *Rodenas J., Zarza I., Burgos M.C., Felipe A., Sanchez-Mayoral M.L.* Developing A Virtual

Reality Application for Training Nuclear Power Plant Operators: Setting Up a Database Containing Dose Rates in the Refuelling Plant. // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 111. – PP. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch043>.

Поступила в редакцию 27.03.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом  
XV Международной молодежной научно-практической конференции  
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

#### Авторы

Лауар Суфиан, аспирант

E-mail: [s.laouar@yandex.ru](mailto:s.laouar@yandex.ru)

Делов Максим Игоревич, ассистент

E-mail: [midelov@mephi.ru](mailto:midelov@mephi.ru)

Литвинцова Юлия Евгеньевна, аспирант

E-mail: [yelitvintsova@mephi.ru](mailto:yelitvintsova@mephi.ru)

Кузьменков Дмитрий Михайлович, ассистент

E-mail: [dmkuzmenkov@mephi.ru](mailto:dmkuzmenkov@mephi.ru)

Мурадян Карен Юрикович, аспирант

E-mail: [karenyurik@mail.ru](mailto:karenyurik@mail.ru)

Навасардян Манук Варужанович, аспирант

E-mail: [manuk.navasardyan@gmail.com](mailto:manuk.navasardyan@gmail.com)

Куценко Кирилл Владленович, к.т.н., доцент

E-mail: [kvkutsenko@mephi.ru](mailto:kvkutsenko@mephi.ru)

UDC: 621.039

### **A THERMOHYDRAULIC FLOW LOOP FOR DEVELOPING NOVEL SOLUTIONS IN THE FIELD OF USING DIGITAL TWINS FOR NUCLEAR POWER FACILITIES**

Laouar S. \*\*, Delov M.I. \*, Litvintsova Yu.E. \*, Kuzmenkov D.M. \*,  
Muradyan K.Yu. \*, Navasardyan M.V. \*, Kutsenko K.V. \*

\* National Research Nuclear University MEPHI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

\*\* Nuclear Research Centre of Birine

17200 Algeria, Ain Oussera, OB 180

#### ABSTRACT

The experience is presented in building a thermohydraulic flow loop for developing technical and software solutions in using digital twins of nuclear equipment. The thermohydraulic flow loop was developed and manufactured at National Research Nuclear University MEPHI and represents a two-loop facility that allows investigating the processes of heat and mass exchange at forced and natural water circulation modes. The experimental facility allows one to obtain new data on heat transfer and hydrodynamics of two-phase flows round the fuel element bundles required for verification of computer codes. The obtained preliminary experimental results agree well with the calculations based on various codes.

As part of building a digital twin for the thermohydraulic flow loop, a system is developed to diagnose, control and monitor heat-exchange transients based on physically justified real-time techniques. Neural network technologies will make it possible to predict changes in the flow loop's thermohydraulic parameters in response to external impacts. Further, a virtual prototype of the experimental facility is expected to be used in the training process and for distance learning.

**Key words:** thermohydraulic flow loop, heat transfer, hydrodynamics, computer simulation, CFD, digital twin, diagnostics, diagnostics of heat-transfer transients.

## REFERENCES

1. Muhuri P.K., Shukla A.K., Abraham A. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2019, v. 78, pp. 218-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>.
2. Wang S., Wan J., Zhang D., Li D., Zhang C. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*. 2016, v. 101, pp. 158-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>.
3. Liu X.F., Shahriar M.R., Al Sunny S.M.N., Leu M.C., Hu L. Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017, v. 43, pp. 352-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.004>.
4. Farshid M., Paschen J., Eriksson T., Kietzmann J. Go boldly!: Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business. *Business Horizons*. 2018, v. 61, pp. 657-663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.05.009>.
5. Lee J., Bagheri B., Kao H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015, v. 3, pp. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
6. Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zuhlke D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. *IEEE International Conference on. IEEE*. 2014, pp. 289-294. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>.
7. Gusev I.N., Solovyev B.L., Padun S.P., Mayorova M.M. System development of intelligent operator support at unit No. 1 of the Novovoronezh NPP-2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, v. 3, pp. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.3.01> (in Russian).
8. Lee H., Cha W.C. Virtual Reality-Based Ergonomic Modeling and Evaluation Framework for Nuclear Power Plant Operation and Control. *Sustainability*. 2019, v. 1, iss. 2630, pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11092630>.
9. Machadoa D.M., Cotellia A., Galvaao D., Mola A.C.A., Carvalho P.V.R., Vidal M.C.R. Use dosimetry virtual tool for security studies physics and nuclear. *Procedia Manufacturing*. 2015, v. 3, pp. 1765-1771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.478>.
10. Bestion D. From the direct numerical simulation to system codes - perspective for the multi-scale analysis of LWR thermalhydraulics. *Nuclear Engineering and Technology*. 2010, v. 42, pp. 608-619. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2010.42.6.608>.
11. Wu Y. Development and application of virtual nuclear power plant in digital society environment. *International Journal of Energy Research*. 2019, v. 43, pp. 1521-1533. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4378>.
12. Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*. 2014, pp. 1-7.
13. Liu F., Yang Z., Zhang B., Li T. Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, v. 147, no. 118954, pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118954>.
14. Shi S., Schlegel J.P., Brooks C.S., Lin Y.C., Eoh J., Liu Z., Zhu Q., Hibiki T., Ishii M. Experimental investigation of natural circulation instability in a BWR-type small modular reactor. *Progress in Nuclear Energy*. 2015, v. 85, pp. 96-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/>

j.pnucene.2015.06.014.

15. Goel P., Nayak A.K., Ghosh P., Joshi J.B. Experimental study of bubble departure characteristics in forced convective subcooled nucleate boiling. *Experimental heat transfer*. 2018, v. 31, pp. 194-218. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2017.1397821>.

16. Delov M.I., Litvintsova Y.E., Kuzmenkov D.M., Laouar S., Maslov Y.A., Lavrukhin A.A., Balakin B.V., Kutsenko K.V. Diagnostics of transient heat transfer modes based on statistical and frequency analysis of temperature fluctuations. *Experimental Heat Transfer*. 2019, pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2019.1662517>.

17. Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A. Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime. *Thermal Science j.tsep*. 2017. 10.015.

18. Deev V.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Maslov Y.A., Delov M.I. Frequency analysis of fluctuations of the temperature of a heater and of sound noise in boiling used for the diagnostics of the changes in the heat-transfer regimes. *Thermal Engineering*. 2014, v. 61, pp. 590-593. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514080035>.

19. Idelchik I.E. *Handbook of Hydraulic Resistances. Coefficients of Local Resistance and of Friction*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p. (in Russian).

20. Laouar S., Sakib M.N., Muqit Al S., Navasardyan M.V., Kutsenko K.V. Pressure drop in valve for different open flow areas. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, v. 1439, no. 012009, pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1439/1/012009>.

21. Rodenas J., Zarza I., Burgos M.C., Felipe A., Sanchez-Mayoral M.L. Developing A Virtual Reality Application for Training Nuclear Power Plant Operators: Setting Up a Database Containing Dose Rates in the Refuelling Plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004, v. 111, pp. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch043>.

#### Authors

Laouar Soufiane, PhD Student

E-mail: [s.laouar@yandex.ru](mailto:s.laouar@yandex.ru)

Delov Maksim Igorevich, Assistant

E-mail: [midelov@mephi.ru](mailto:midelov@mephi.ru)

Litvintsova Yuliya Evgenievna, PhD Student

E-mail: [yelitvintsova@mephi.ru](mailto:yelitvintsova@mephi.ru)

Kuzmenkov Dmitriy Mikhaylovich, Assistant

E-mail: [dmkuzmenkov@mephi.ru](mailto:dmkuzmenkov@mephi.ru)

Muradyan Karen Yurikovich, PhD Student

E-mail: [karenyurik@mail.ru](mailto:karenyurik@mail.ru)

Navasardyan Manuk Varuzhanovich, PhD Student

E-mail: [manuk.navasardyan@gmail.com](mailto:manuk.navasardyan@gmail.com)

Kutsenko Kirill Vladlenovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [kvkutsenko@mephi.ru](mailto:kvkutsenko@mephi.ru)