

Создание и развитие научных основ теплогидравлики реакторных установок нового поколения

Будущее современной энергетики неразрывно связано с развитием технологий генерации тепловой и электрической энергии с малым потреблением горючих ископаемых и сниженными выбросами парниковых газов. Ядерные энергетические установки решают обозначенные проблемы.

Задачи работы в связи с развитием атомной энергетики России:

- обеспечение технологического лидерства и научно – технической поддержки атомного проекта 2.0,
- повышение мощности и надежности работающих АЭС с реакторами ВВЭР,
- успешное завершение проекта мегасайенс по вводу в строй высокопоточного исследовательского реактора ПИК,
- модернизация наземных атомных станций малой мощности, транспортных реакторных установок, плавучих энергоблоков, создание линейки реакторов малой и средней мощности,
- расширение поставок тепловыделяющих сборок для реакторов западной конструкции типа PWR,
- создание и совершенствование импортозамещающей отечественной уникальной диагностической и экспериментальной базы.



Нововоронежская АЭС.

Подтвержденный социально-экономический эффект работы – 9.6 млрд. руб.

Краткая оценка новизны

Найдены и реализованы новые фундаментальные научно обоснованные технические решения, повышающие эффективность и надежность реакторных установок (РУ) за счет оптимизации локальных процессов при течении теплоносителя в различных элементах реакторов и прежде всего в активной зоне. Исследована теплогидравлика при течении теплоносителей в инновационных реакторных установках с водяным и газовым теплоносителями в интересах ГК «Росатом». На основе прецизионных экспериментальных исследований определены условия интенсификации процессов теплопереноса в активной зоне РУ, предложен и реализован ряд технических решений с сохранением безопасности и минимизации гидравлических потерь.

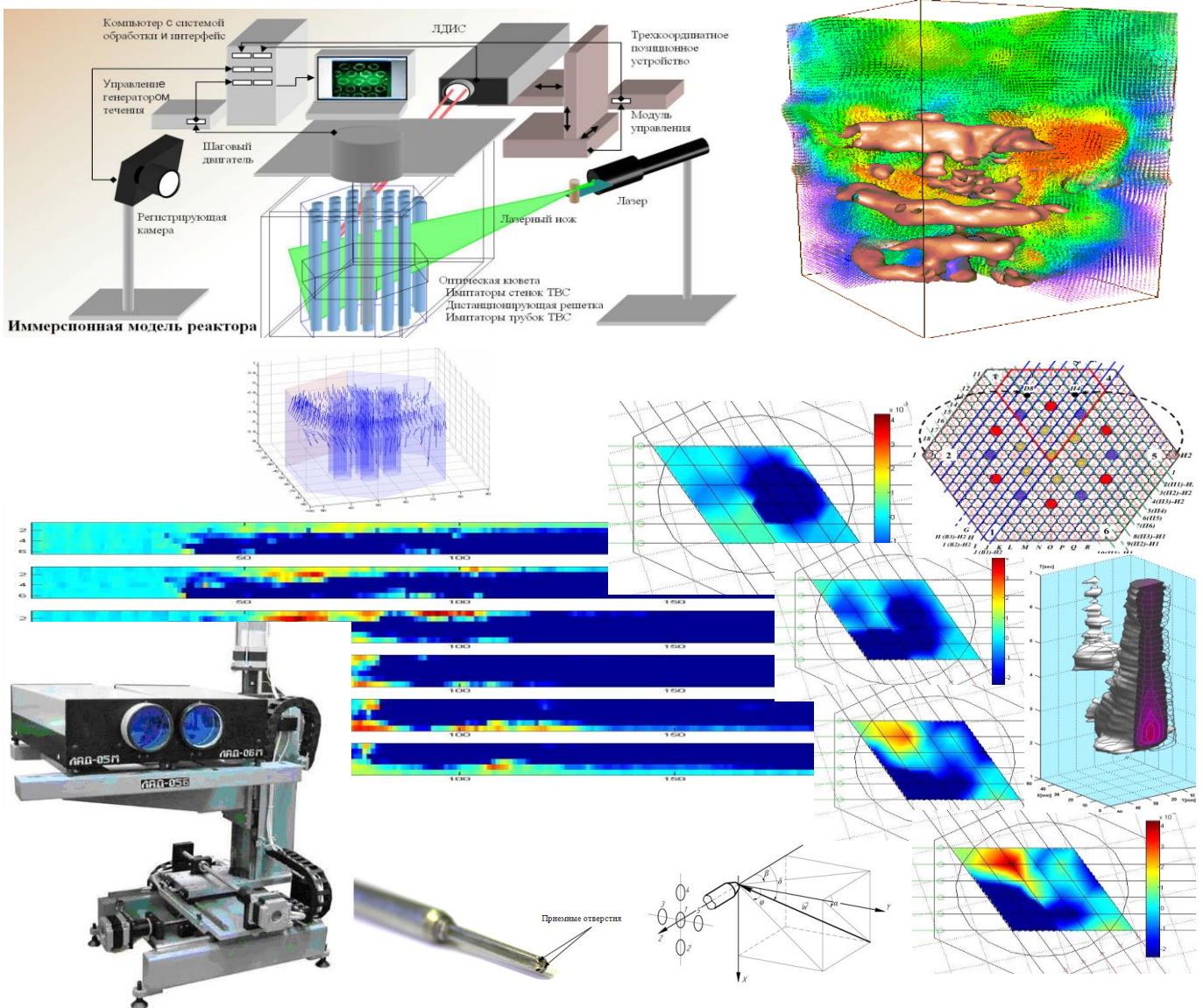
Созданы и развиты новейшие системы диагностики одно- и многофазных течений, тепло- и массообмена на основе комплексных методов измерения: оптических, лазерных, электроимпедансных, акустических, термометрических, зондовых и новых методов обработки данных с использованием искусственного интеллекта. Обеспечена уникальная возможность использования новейшей измерительной базы для выполнения теплогидравлических экспериментов на уровне разработчиков.

Получены данные для оптимизации и повышения эффективности тепловых процессов в РУ на основе научных достижений по моделированию локальных гидродинамических параметров с детализированными измерениями распределений скоростей, температуры, давления, размеров дисперсной фазы, динамики разрушения пленочного течения. Обоснованы методы управления интенсивностью теплообмена при течении теплоносителя в тепловыделяющих сборках (ТВС) и элементах реакторных установок.

Развита верификационная база по гидродинамическим и тепловым эффектам для валидации расчетных кодов, используемых для обоснования принимаемых проектно-конструкторских решений и безопасности АЭС, включающая данные по распределению осредненных и пульсационных тепловых и гидродинамических характеристик одно и двухфазных течений, перемешиванию потоков жидкости, газа с различной температурой, параметров вибрации имитаторов ТВЭЛ в потоке теплоносителя, динамике пузырькового и кольцевого режимов течения теплоносителя.

Вновь созданные уникальные измерительные возможности для проведения теплогидравлических экспериментов

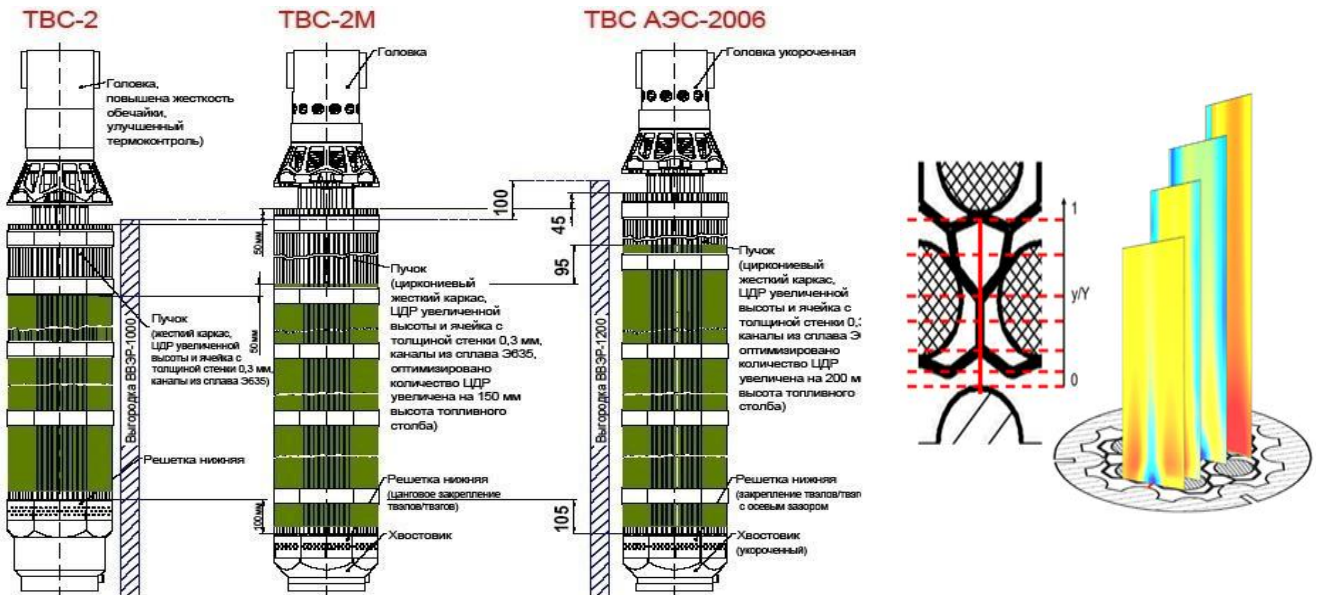
Выполнен полный цикл фундаментальных и мультидисциплинарных исследований, опытно-конструкторские работы и серийное импортозамещающее производство полного спектра методов и средств диагностики теплогидравлики реакторных установок нового поколения, ориентированных «под задачу»: оптических, лазерных, электроимпедансных, акустических, термометрических, зондовых и компьютерной обработки данных с использованием искусственного интеллекта.



Созданы прецизионные импортозамещающие отечественные диагностические системы, подтвердившие «неубиваемость» в полевых и стендовых условиях с транспортировкой, а также перспективность в образовательных целях.

Совершенствования гидродинамических и тепловых процессов ВВЭР

Выполнено совершенствование гидродинамических и тепловых процессов в тепловыделяющих сборках реакторных установок ВВЭР на основе детального исследования и учета локальной гидродинамики и теплообмена, эффектов турбуликации и вихреобразования.



Теплофизическое обоснование новых типов ТВС ВВЭР

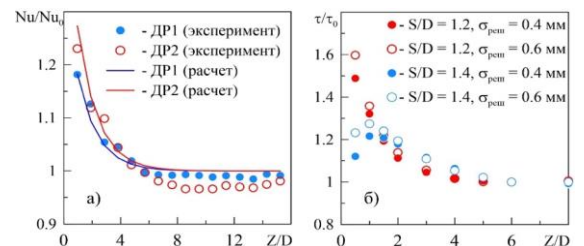
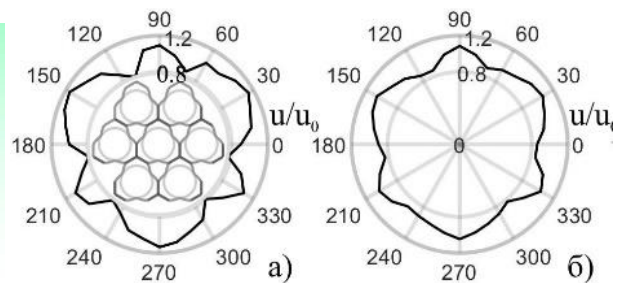
Параметры течения
 Дистиллированная вода,
 Температура 18 °С,
 Расход 8 -13 л/сек,
 Скорость 3-5 м/сек.

Проведенные измерения

Однофазное течение:
 перепад давления, КГС,
 азимутальные измерения: осевой скорости,
 трения на стенке, коэффициента теплообмена,
 влияние расстояния ПР от ДР на изменение
 гидродинамики и теплообмена.

Двухфазное течение:
 режим течения, форма пузырей, распределение
 газосодержания вокруг центрального твэла при
 различных точках ввода газа.

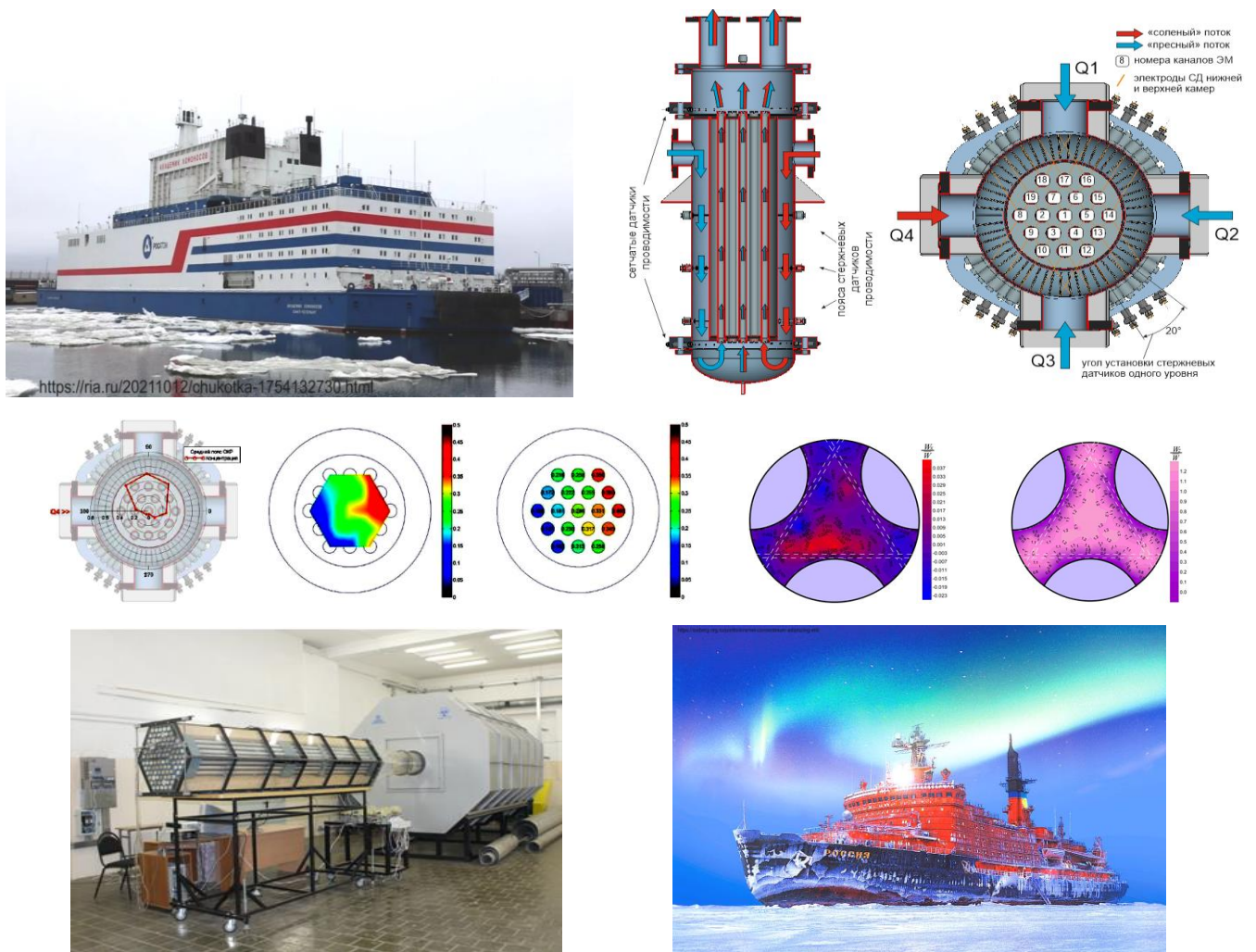
Модель имитатора ТВС:
 17 типов дистанционирующих и
 перемешивающих решеток;
 37 и 7-ми ячейстые каналы;
 37 и 7 ячейстые фрагменты ДР и
 ПР;
 37 имитаторов твэла, диаметром
 9,1 мм, выполненные из
 материала Э110, длиной 1,2
 метра;
 направляющие каналы
 $D = 13 \text{ мм}$ и $D = 12,6 \text{ мм}$



На созданных уникальных стендах смоделирована совокупность всех важных локальных эффектов, определяющих перемешивание теплоносителя и теплообмен с учетом дистанционирующих и перемешивающих решеток. Впервые получены приоритетные результаты по теплофизическому обоснованию новых типов тепловыделяющих сборок с повышенной теплоотдачей. Результаты работы внесли вклад в развитие эволюции ТВС ВВЭР от ТВС-2 до ТВС АЭС-2006.

Модернизация тепловыделяющих сборок транспортных реакторов и наземных атомных станций малой мощности

В рамках создания ядерных энергетических установок для плавучих энергоблоков, перспективных наземных атомных станций малой мощности, транспортных реакторных установок исследована гидродинамика теплоносителя в элементах тепловыделяющей сборки инновационной кассетной активной зоны, экспериментально оптимизированы узлы ТВС, повышена надежность и безопасность работы новой активной зоны.



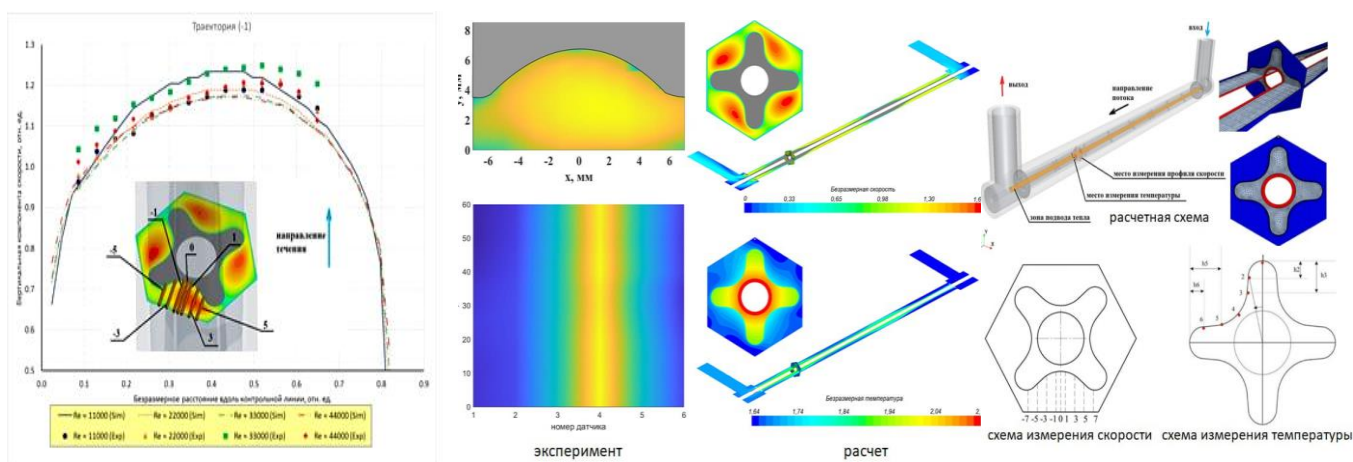
На созданных уникальных стендах смоделирована совокупность локальных определяющих явлений и процессов, происходящих на реальных реакторных установках, с контролем неопределенностей измерения и адекватности полномасштабного моделирования изучаемых процессов. Результаты исследований внесли весомый вклад в создание активных зон для строящихся АСММ с реакторной установкой РИТМ-200Н и плавучего энергоблока КЛТ-40С.

Научное сопровождение проекта «мегасайенс» по вводу в строй высокопоточного исследовательского реактора ПИК

С целью проверки адекватности моделирования поля температуры в ТВЭЛ в условиях ряда факторов, приводящих к его существенной неравномерности по всем трём координатам, и для обоснования пиковых тепловых параметров ТВС РУ ПИК, впервые проведено экспериментальное моделирование изменения локальных значений гидродинамических параметров теплоносителя в ТВС для однофазного и двухфазного течения теплоносителя.



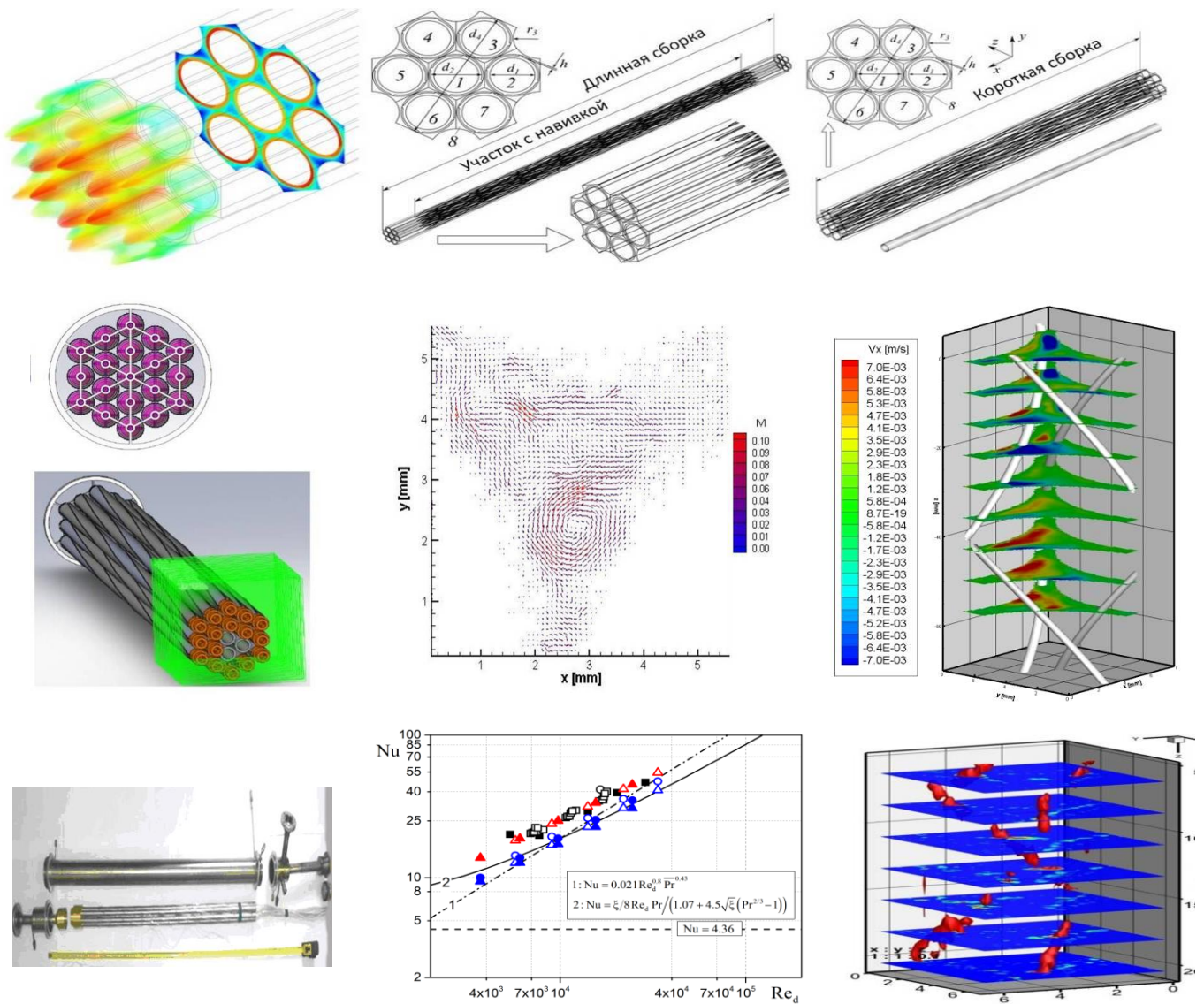
Установка класса мегасайенс - высокопоточный исследовательский реактор ПИК



Результаты работы использованы для валидации расчетных методов, применяемых в АО «НИКИЭТ» для обоснования теплотехнической надежности и работоспособности компактной активной зоны с рекордной плотностью потока нейтронов.

Исследование локальных явлений при течении в тепловыделяющих сборках реакторов различного назначения

Впервые исследованы локальные течения в моделях ТВС реакторных установок, в том числе ТВС КВАДРАТ реакторов типа PWR и ТВС с проволочными витыми дистанционирующими элементами, с целью выявления возможных отрывных зон и локального перегрева стенок теплонапряженных ТВЭЛОВ, охлаждаемых потоком жидкости или газа для обеспечения их надёжности. Впервые для смесей газов с малым числом Прандтля учтены локальные эффекты течения и теплообмена.

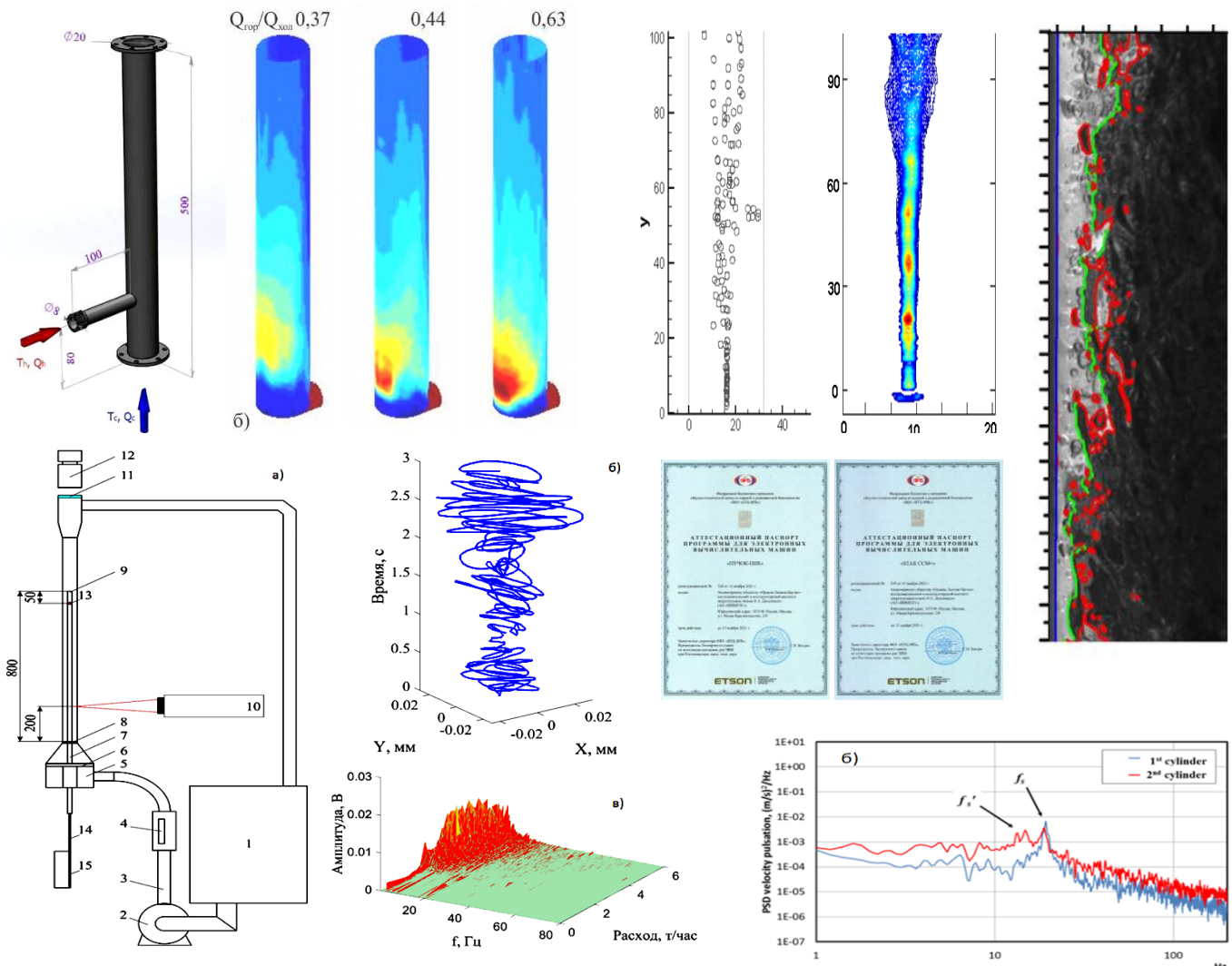


На основе научно обоснованных данных по локальным гидродинамическим и температурным эффектам получены данные для оптимизации и повышения эффективности тепловых процессов в различных типах ТВС. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС разного типа была использована для инженерного обоснования конструкций активных зон.

Развитие валидационной базы

по отдельным гидродинамическим и тепловым эффектам

Развита база экспериментальных данных по гидродинамическим и тепловым эффектам для валидации расчетных кодов при обосновании проектно-конструкторских решений для оптимизации и безопасности АЭС, включающая данные по распределению осредненных и пульсационных тепловых и гидродинамических параметров одно- и двухфазных турбулентных течений, по перемешиванию разнотемпературных потоков жидкости и газа, по вибрации ТВЭЛа в потоке теплоносителя, по динамике пузырькового и кольцевого режимов течения теплоносителя в каналах реакторных установок.



Создан ряд бэнчмарков и развиты научные основы обоснований возможности замены полномасштабных, крайне дорогостоящих и длительных испытаний на модельные при учете критериев подобия теплогидравлики, что обеспечило значительный экономический и социальный эффект работы.

Социально-экономический эффект

Коллективом авторов внесён весомый вклад в фундаментальные научные исследования, разработку уникальных технологий и систем прорывного характера, их внедрение в реальном секторе экономики, в науке и образовании. Созданные наукоемкие системы и технологии соответствуют национальным научно-технологическим приоритетам в части решения актуальных задач создания и развития научных основ теплогидравлики реакторных установок нового поколения. Научные и практические результаты имеют импортозамещающее значение и по ряду параметров превосходят лучшие мировые аналоги. Результаты выполненной работы способствуют долгосрочному развитию технологической модернизации экономики и инновационного потенциала России.

Результаты работы

- **19 монографий и глав в монографиях,**
- **95 патентов, в том числе**
- **26 зарубежных патентов (США, Япония, Китай и др.),**
- **321 научная статья в жестко рецензируемых изданиях,**
- **17 медалей,**
- **31 диплом международных и отечественных конкурсов и выставок,**
- **22 акта внедрения,**
- **40 млрд. рублей - экономический эффект от внедрения результатов работы**

Мало в каких областях Россия имеет подобное преимущество по конкурентоспособному научно-техническому заделу, как в создании и развитии научных основ теплогидравлики реакторных установок нового поколения. Представляющий настоящую работу коллектив еще долгие годы будет на практике успешно поддерживать и развивать технологические модернизации экономики на основе научных и технологических инноваций, а также инновационную инфраструктуру и инновационный потенциал России.