



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

Россия, Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д.1. Тел.: (812) 316-2394, факс: (812) 490-0591,  
e-mail: komdep@bstu.spb.su, www.voenmeh.ru  
ИНН 7809003047

19.10.2021 № 3/12

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«Утверждаю»

Ректор университета  
Д.Ф.н., профессор

К.М. Иванов

2021 г.



**Отзыв ведущей организации**

**БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова**

на диссертационную работу Юдова Юрия Васильевича «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация Ю.В. Юдова посвящена разработке и численной реализации математических моделей теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем. Такие установки имеют ряд преимуществ и их эксплуатация и модернизация соответствуют современным тенденциям в реакторной индустрии.

**Актуальность темы исследования**

Математическое и численное моделирование сложных процессов при создании современных промышленных объектов является в последние несколько десятилетий мировым трендом. Это особенно относится к космической, атомной и другим высокотехнологичным отраслям. Разработка соответ-

ствующего программного обеспечения связана с развитием математических моделей и алгоритмов, что в стратегически важных отраслях промышленности является первостепенной задачей, обеспечивающей технологический суверенитет. В диссертации рассмотрены задачи, имеющие прямое отношение к проектированию, расчетно-теоретическому сопровождению и прогнозированию возможных нештатных ситуаций в атомной промышленности. Среди этих задач разработка теплофизической и гидродинамической модели и метода расчета двухфазного течения с учетом неконденсирующихся газовых компонентов, разработка экономичных численных схем интегрирования уравнений многокомпонентных двухфазных потоков, разработка трехмерного CFD-модуля для расчета теплогидравлических процессов в напорных камерах водородных реакторных установок, тщательная валидация создаваемого программного обеспечения, изучение тепло- и массопереноса в циркуляционных контурах в штатных и нештатных ситуациях. Таким образом, тема диссертационного исследования бесспорно актуальна.

### **Научная ценность**

В результате обстоятельного обсуждения существа и деталей диссертационного исследования на научном семинаре в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова была прояснена научная новизна и соответственно научная ценность работы, которая может быть сформулирована следующим образом.

Автором разработана комплексная мультифизическая математическая модель очень сложных процессов тепло- и массопереноса в реальных циркуляционных контурах реакторов с водяным теплоносителем. Эта модель включает в себя несколько сопряженных между собой моделей, описывающих с различной степенью подробности теплофизические и гидродинамические процессы в контурах реакторов. Все модели основаны на фундаментальных законах физики (сохранения массы, импульса и энергии), универсальных соотношениях термодинамики и химической кинетики, разумных допущениях о процессах фазовых переходов и взаимодействии фаз в двухфазных средах. Созданы численные модели, которые реализованы в виде собственных компьютерных программ (решателей уравнений гидромеханики, согласования решений в различных областях, постпроцессорной обработки результатов расчетов и т.п.). Часть алгоритмов, включенных в компьютерный код, является полностью оригинальной (эффективная полунявная численная схема для решения линеаризованных уравнений динамики многокомпонентных двухфазных потоков с корректировкой решения, учитывающей невязку между исходными нелинейными

и линеаризованными уравнениями; безытерационный метод расчета поля давления в разветвленных контурах циркуляции произвольной топологии; метод согласования решений одномерных и трехмерных уравнений гидромеханики в смежных областях; алгоритм определения межячеечного турбулентного переноса в тепловыделяющих сборках с учетом влияния дистанционирующих решеток с помощью псевдо-прямого численного моделирования на основе полных уравнений Навье–Стокса). Адекватность комплексной модели подтверждена согласием численных результатов с большим количеством опытных данных, полученных на экспериментальных стендах и в натуральных условиях. Разработанный и протестированный код является составной частью программного обеспечения для моделирования штатной работы водо-водяных реакторов, а также для прогнозирования нештатных ситуаций, возникающих, в том числе, из-за человеческого фактора.

Дополнительно следует отметить разработку оригинального метода учета влияния неконденсирующихся газов в пароводяном теплоносителе на процессы межфазного теплообмена в рамках двухжидкостной модели. Показано, что присутствие неконденсирующихся компонентов приводит к снижению интенсивности конденсации (генерации) пара из-за уменьшения (увеличения) температуры межфазной поверхности относительно температуры насыщения при парциальном давлении пара. В результате трехмерного численного моделирования растекания теплоносителя, поступающего из входных патрубков в напорную камеру реакторных установок, получена сложная анизотропная картина течения. Показано, что вследствие анизотропии малые возмущения условий на входе могут приводить к существенному изменению профиля температуры в активной зоне. Предложено объяснение полученных данных.

Научная новизна полученных результатов подтверждена многочисленными опубликованными статьями в ведущих российских журналах «Теплоэнергетика», «Математическое моделирование», «Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов», «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник».

Разработанные комплексная модель процессов тепло- и массопереноса в контурах реакторных установок, алгоритмы и компьютерный код соответствуют современному уровню подобных разработок за рубежом, а в отдельных составляющих они превосходит их, обеспечивая суверенитет России в области

создания современного программного обеспечения для нужд развития атомной энергетики.

### **Практическая значимость**

Разработанные автором диссертации модели процессов тепло- и массопереноса и алгоритмы расчета теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах вошли в программный комплекс (ПК) КОРСАР, который развивается с 1999 г. сначала под эгидой Минатома, а затем Росатома. На комплекс получены аттестационные паспорта Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (регистрационные номера паспортов 168, 263, 355). ПК предназначен для численного моделирования стационарных состояний, переходных и аварийных режимов водо-водяных реакторных установок АЭС, а также теплогидравлических процессов на экспериментальных стендах с водяным теплоносителем. ПК может использоваться для обоснования безопасности новых ВВЭР на стадии проектирования и на всех стадиях жизненного цикла АЭС с ВВЭР.

Как следует из текста диссертации, алгоритмы и компьютерные коды, используются на предприятиях атомной промышленности, ведущими конструкторскими организациями для анализа и обоснования безопасности АЭС с ВВЭР – АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и АО «АТОМПРОЕКТ», – в частности, Балаковской АЭС, Балтийской, Калининской (4-й энергоблок), Ленинградской АЭС-2, Нововоронежской (4-й энергоблок), а также и Белорусской, «Белена» в Болгарии, «Бушер» в Иране, «Куданкулам» в Индии), Тяньваньской в Китае, «Ханхикиви» в Финляндии.

Код КОРСАР используется также для расчетов ядерных энергетических установок транспортного назначения в АО «ОКБМ Африкантов» и в учебных целях в ряде университетов.

Практическая значимость диссертационного исследования не вызывает вопросов, и это исключительно сильная сторона работы.

### **Замечания и комментарии**

Диссертация не лишена некоторых недостатков, которые, на наш взгляд, не являются существенными.

1. В диссертации рассматриваются, моделируются и анализируются двухфазные течения, однако отсутствуют ссылки на хорошо известные работы отечественных авторов в области двухфазной гидромеханики (например, на

монографии М.Е.Дейча и Г.А. Филиппова (1968), Р.И. Нигматулина (1978), Г.А. Салтанова (1979) и ряда других).

2. Желательно было бы привести в качестве приложения к диссертации копии имеющихся аттестационных паспортов разработанных программных средств, прошедших экспертные советы и рекомендованных для практического использования.

3. Использованное допущение о пропорциональности межфазной поверхности объемной концентрации пузырьков является спорным, так как на эволюцию межфазной поверхности существенно влияют процесс зарождения пузырьков, их рост, слияние и распад, которые не учитываются в принятой модели. Перечисленные явления следует учесть при дальнейшем усовершенствовании комплексной модели и компьютерного кода.

4. В областях пограничных слоёв использована изометрическая сетка (ячейки имеют близкий размер вдоль и поперек течения), что, очевидно, не экономично с точки зрения вычислительных ресурсов.

5. В работе неоправданно разделены CFD (Computational Fluid Dynamics) методы численного моделирования течений и DNS (Direct Numerical Simulation) метод. Во всей литературе по вычислительной гидромеханике DNS является частью CFD.

6. В работе обоснование адекватности математических и численных моделей автор называет верификацией, в то время как общепринятый термин здесь «валидация».

Данные замечания не влияют на однозначно положительную оценку работы.

## **Заключение**

На основе изложенного считаем, что диссертация **Юдова Юрия Васильевича «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем»** удовлетворяет п. 9 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года, № 842, утвержденного постановлением Правительства РФ, с последующими изменениями. Она является научно-квалификационной работой, в которой решена важная задача разработки и реализации комплексной математической модели сложных теплогидравлических процессов в контурах реакторных установок для нужд атомной промышленности. Результаты имеют

большое значение для проектирования, обоснования безопасности, диагностики и прогнозирования функционирования водо-водяных реакторов различного назначения.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, так как объектом исследования в ней являются процессы тепло- и массопереноса в реакторных установках.

Автор диссертации Юдов Юрий Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Подробный доклад автора по завершенной диссертации был представлен и обсужден на научном семинаре кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» и получил одобрение. Отзыв утвержден на заседании кафедры (протокол № 8 от 15 октября 2021 г.).

И.о. зав. кафедрой  
«Плазмогазодинамика и теплотехника»  
кандидат технических наук

И.В. Тетерина

Научный руководитель семинара  
по механике жидкости, газа и плазмы  
доктор физико-математических наук, профессор,  
проф. кафедры «Плазмогазодинамика  
и теплотехника»

Ю.М. Циркунов

Тетерина Ирина Владимировна, E-mail: [teterina\\_iv@voenmeh.ru](mailto:teterina_iv@voenmeh.ru)

Циркунов Юрий Михайлович, E-mail: [tsirkunov\\_iu@voenmeh.ru](mailto:tsirkunov_iu@voenmeh.ru)