



ОКБ  
ГИДРОПРЕСС  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «АТОМЭНЕРГОМАШ»

**Акционерное общество  
«Ордена Трудового Красного Знамени  
и ордена труда ЧССР опытное  
конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»  
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)**

ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск,  
Московская область, 142103  
Телефон (495) 502-79-20, (495) 502-79-10,  
факс (4967) 69-97-83, (4967) 54-25-16  
E-mail: grpress@grpress.podolsk.ru  
ОКПО 08624607, ОГРН 1085074009503  
ИНН 5036092340, КПП 503601001

27.10.2021

20712

№ 044-001.4-02/

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

О направлении отзыва на автореферат

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Юдова Юрия Васильевича на тему: «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», подготовленный главным специалистом АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» Корниенко Юрием Николаевичем.

Приложение: отзыв на автореферат – 6 л. 2 экз.

Заместитель генерального конструктора  
по научной работе

В.П.Семишкин

Ясколко Наталья Андреевна  
29-73



## ОТЗЫВ

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

### Актуальность темы

В проблеме обоснования безопасности ЯЭУ с ВВЭР одно из центральных мест занимают расчеты гидродинамических характеристик теплоносителя в ходе аварийных и переходных процессов, создающих условия для возникновения протяженных областей с неравновесным двухфазным потоком и опасность наступления кризисов теплообмена. Здесь предметом исследований являются фундаментальные механизмы переноса импульса, тепла и массы в поле потока и на поверхности раздела фаз, а объектом исследований – их математические модели, алгоритмы и методы численного и аналитического решений. Решению таких комплексных задач посвящены известные зарубежные системные одномерные двух-жидкостные теплогидравлические коды "улучшенной оценки", такие как: TRAC, RELAP5, CATHARE и другие. В Российской Федерации разработан и аттестован в Госкорпорации «Росатом» отечественный теплогидравлический расчетный код (ПК) КОРСАР, одним из основных разработчиков которого является соискатель Ю.В. Юдов. ПК КОРСАР в последние годы продолжает развиваться в направлении наполнения его (в том числе и по инициативе соискателя Ю.В. Юдова) элементами современных CFD и DNS технологий. Таким образом, **актуальность, практическая ценность и вклад соискателя** в разрабатываемую тему, как следует из представленных в автореферате материалов, **не оставляет сомнений.**

### Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Научные положения, изложенные в автореферате диссертации Ю.В. Юдова, опираются на решение систем определяющих уравнений законов сохранения массы, энергии и количества движения (см. 1-ю и 2-ю главы) в системном одномерном много-компонентном (вода, пар, неконденсирующиеся газы) ПК КОРСАР в форме двух-жидкостной модели с замыкающими соотношениями и картой режимов течений двухфазных потоков. При этом особое внимание было уделено описанию поведения 4-х-компонентной смеси

неконденсирующихся газов (в любой комбинации): азота, водорода, кислорода и гелия в рамках допущений характерных для законов Дальтона и Менделеева-Клайперона. В автореферате указано, что предложенная методика с использованием «физических законов (совместное диффузионное и термическое сопротивление теплообмену, аналогия процессов тепло – и массообмена, закон Генри и т.д.) и позволяет моделировать влияние неконденсирующихся компонентов для всех режимов течения двухфазного потока без привлечения дополнительных замыкающих соотношений» (- стр. 16, строки 16-19 сверху).

**Замечание 1а, б.** С таким заключением в качестве общего вывода нельзя согласиться, например, при разработке моделей и проведении расчетов неравновесных двухфазных потоков в типичных для ЯЭУ с ВВЭР режимах кипения с перегревом теплоносителя относительно  $T_s$  в пристенном слое и недогретом до  $T_s$  ядре потока без использования дополнительных моделей генерации пара на стенках твэл и замыкающих соотношений для них. Поскольку наличие дополнительного к объему, генерируемого на стенке «чистого» пара, количества неконденсируемых газов влияет как на а) микро-характеристики (такие как плотность центров парообразования, рост паро-газовой фазы и отрывной диаметр пузырьков, частоту отрыва, влияние процессов коалесценции и дробления пузырьков в том числе и на неоднородность распределений паро-газовой фракции (седлообразные профили) в поле течения на характеристики турбулентности), так и б) макро-характеристики (коэффициенты тепло- и массоотдачи, функции Генерации и Конденсации пара, а также вязкие напряжения) и, следовательно, на температуру стенки и перепады давления. Именно поэтому при проведении экспериментов с двухфазными потоками производится тщательная дегазация рабочих участков.

Нижеследующий материал автореферата посвящен разработкам и обоснованию используемых автором приемов для 1D и 3D расчетных схем и алгоритмов при численном решении гидродинамических задач.

**Во 2-й главе,** на ряду, с описанием примененной в РК КОРСАР полунявной (с линеаризацией по времени нестационарных и источниковых членов) расчетной схемы на шахматной расчетной сетке (подобной кодам RELAP5 и TRAC) приведены детали авторских находок, связанные с аппроксимацией по неявной схеме для обеспечения «мягких» условий Куранта, а также для соблюдения условий консервативности численной схемы при аппроксимации конвективных составляющих в уравнениях сохранения энергии фаз и массы неконденсирующихся компонентов фаз. Кроме того, приведено описание безытерационного, усовершенствованного автором четырехэтапного метода

решения уравнения Пуассона для разветвленного контура циркуляции произвольной топологии, позволяющего снять ограничения на шаг по времени. Для демонстрации работоспособности предложенных автором алгоритмов приведены результаты верификационных расчетов, в частности:

- 1) учет изменения знака скоростей фаз за временной шаг приведены на примере распределения массовой доли азота по ячейкам канала со «знакопеременным» на каждом шаге по времени входным расходом;
- 2) сравнение расчетов с экспериментами по пленочной конденсации и испарению пленки в паровоздушных потоках (30 экспериментов); и
- 3) по выделению азота из перенасыщенного раствора воды. При этом, следует признать, что, несмотря на вполне физически адекватное поведение расчетных параметров на Рисунке 4, (**Замечание по оформлению**) - автор не привязал описание поведения параметров расчета к использованным им фрагментами иллюстраций а), б), в) и г).

**В 3-ей главе** представлена 3D модель турбулентной однофазной слабосжимаемой жидкости для CFD- модуля РК КОРСАР/CFD в расчетных областях сложной геометрии. Решение уравнений сохранения строится на основе метода вложенной границы на декартовых сетках при допущении «обрезанных» ячеек, что обеспечивает упрощение процесса генерации расчетной сетки, дискретизации дифференциальных уравнений законов сохранения, а также использование их консервативной формы при разработке алгоритмов решения. Описана технология формирования базовой сетки и дробления декартовых ячеек с необходимыми дополнительными ограничениями. Приведены иллюстрации укрупнения и измельчения ячеек по направлению потока, а также изложены решения тестовых задач.

**4-я глава** посвящена разработке и реализации автором полунявной численной схемы объединения 1D и 3D моделей теплогидравлики РК КОРСАР/CFD путем использования одномерной модели КАНАЛ. Ее граница с ячейками 3D области представляет новый тип граничных условий. Приведены выражения для связи этих компонент. Эти соотношения связывают матрицы коэффициентов уравнений Пуассона в областях различной размерности с необходимостью расчета объединенного поля давления, что приводит медленной сходимости итерационного процесса. Описаны приемы ускорения этого процесса. Указано на решение тестовой задачи и проведение оценки сходимости многосеточного метода.

**5-я глава** посвящена верификации РК КОРСАР/CFD на задачах с перемешиванием теплоносителя в напорной камере (НК) реакторов от входных патрубков до эллиптического днища (ЭД) в 3D постановке. При этом остальная часть контура циркуляции реакторной установки описана одномерными

элементами кода. Теплоноситель в отверстиях ЭД имитируется элементами *КАНАЛ*, которые на выходе объединены элементами *КОМПЛЕКТОР* для связи с шестигранными каналами кассет активной зоны, включая нижнюю камеру с опорными трубами. Соответствующие сечения в нижней огибающей ЭД и входные сечения холодных патрубков являются общими между 3D и 1D областями.

Верификация выше описанной модели объединения 3D и 1D модулей РК КОРСАР/CFD для процесса перемешивания в напорной камере осуществлена на экспериментах, выполненных на 4-хпетлевом стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС», моделирующем реактор ВВЭР-1000 и на 6-м блоке АЭС Козлодуй. На стенде изучались процессы перемешивания при проникновении из холодной нитки теплоносителя с повышенной концентрацией соли в АЗ при пуске одного циркуляционного насоса (при наличии других насосов). Тогда как, на АЭС Козлодуй эксперимент состоял в фиксации повышения температуры теплоносителя в холодной нитке одной петли вследствие отсечения парогенератора.

Представленные автором результаты 3D расчетов выявили анизотропное растекание жидкости в кольцевой области напорной камеры. При этом для каждого из рассматриваемых случаев (рассмотрена работа одного, или нескольких насосов ГЦН) образуются различные картины распространения языков повышенной концентрации соли. Показанное на Рисунке 15 количественное сопоставление азимутальных распределений концентрации соли в эксперименте и расчетах выявило значительное влияние наклона патрубков при сопоставлении опытных и расчетных результатов. В автореферате указано, что поворот патрубков на  $3^\circ$  по часовой стрелке в расчете привел к повороту сектора поступления концентрации соли против часовой стрелки на  $50^\circ$ , что улучшило сопоставление с опытными данными.

**Замечание 2.** Однако, анализ столь сильного влияния на расчетные результаты незначительного изменения геометрии не представлен.

При верификации РК КОРСАР/CFD по эксперименту на АЭС Козлодуй 3D область включала объем холодных ниток от выхода циркуляционных насосов до патрубков. При этом расчет показал уменьшение осредненных отклонений температур на границах сектора проникновения горячего теплоносителя в АЗ с 30% до 10% (относительно перепада температуры в холодных нитках 13.2 К). Отмечается асимметрия профиля скорости на расстоянии более десяти диаметров трубы от выхода из поворота, вызывающая поворот сектора проникновения на  $\approx 7^\circ$  против часовой стрелки.

Приведено также описание расчетов по 3D коду с подключением ГЦН к двум работающим и описано количественное влияние на поведение расчетных параметров такого варианта.

**Замечание 3.** Следует отметить, изложение проведенных исследований представилось бы более лаконичным и наглядным при использовании в табличной форме многочисленных числовых показателей.

**Замечание 4.** Возникшая впервые «квазитрехмерная 1D модель» (стр.32, сверху строка 2) в качестве кросс-верификационной никак не определена в тексте.

Поэтому ее сопоставление с РК КОРСАР/CFD «повисает в воздухе», ни подтверждая и ни отвергая полученных результатов.

**6-я глава** посвящена разработанной соискателем методике прямого численного моделирования турбулентных потоков в ТВС реакторов с треугольной упаковкой твэл с дистанционирующими решетками и реализующим ее специализированному коду DINUS. Дано описание трансформации поперечного сечения каналов из плоскости декартовых координат к обобщенным криволинейным, что наряду с использованием компактных диссипативных схем для аппроксимации конвективных членов дает выигрыш при прямом численном моделировании. Представлены также основные этапы и элементы метода интегрирования 3D уравнений законов сохранения однофазного турбулентного потока.

Проведено тестирование кода DINUS на задачах установившегося турбулентного потока в щелевом канале и через сборку с треугольной упаковкой с шагом  $S/D=1.2$  при  $Re=10000$ . А также проведена верификация с натурной гидравлической моделью кассеты АЗ ВВЭР-440

( $S/D=1.34$  при  $Re=50000$ ) на грубой ( $2.2 \times 10^6$  ячеек) и мелкой сеткой ( $17.6 \times 10^6$  ячеек). Получено хорошее согласование расчетов с опытом по распределениям скорости и интенсивности турбулентности на различных расстояниях от дистанционирующей решетки. По мере удаления от решетки и размывания струй профили осевой скорости, бывшие асимметричными в межтвэльных ячейках после решеток, выравниваются. Воспроизведено и влияние решетки на дополнительную турбулизацию потока. **Практически важным результатом явилось получение расчетного коэффициента турбулентного перемешивания** и его распределение в продольном направлении. Приведена таблица с сопоставлением полученного данным методом DNS коэффициента межячейкового турбулентного перемешивания с известными эмпирическими корреляциями

**В заключении** по работе перечислены ее основные итоговые выводы, подтверждающие новизну, теоретическую значимость и достоверность полученных результатов.

В целом, указанные замечания и погрешности не снижают научной и практической ценности выполненной соискателем работы, полученные результаты являются новыми научными знаниями в области гидродинамики и теплообмена, а также численных методов и комплексов программ. Диссертация Юдова Ю.В. отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней (в том числе требованиям п. 9), предъявляемым ВАК к научно-квалификационной работе: основные научные результаты опубликованы в 24 рецензируемых изданиях. В ней, на основе разработанных автором программ (имеется три свидетельства о государственной регистрации на программы для ЭВМ), получены численные решения задач гидродинамики и теплообмена, имеющие большое значение для разработки новых, научно обоснованных технических проектов АЭС с ВВЭР с широкой областью применения.

Представленные в автореферате диссертации исследования являются вполне законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно на высоком научном уровне, а её автор Юдов Юрий Васильевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Главный специалист  
Отдел 2.02, Отделение Теплофизики  
доктор технических наук, доцент

27.10.21

Корниенко Юрий Николаевич  
телефон (4967) 65-2668  
8-910-593-4318

e-mail: [grpress@grpress.podolsk.ru](mailto:grpress@grpress.podolsk.ru)

Подпись Корниенко Юрия Николаевича удостоверяю

*Заместитель генерального директора  
по персоналу  
Мамонтова  
27.10.2021*



ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск,  
Московская обл., 142103, РФ  
АО Опытное Конструкторское Бюро «ГИДРОПРЕСС»  
телефон: (4967)54-2516; (495)502-7910; Факс: (4967)54-2733;  
e-mail: [grpress@grpress.podolsk.ru](mailto:grpress@grpress.podolsk.ru)