

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ВЕРИФИКАЦИЯ ОБОБЩАЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТОВ
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ТЕПЛООБМЕНУ
ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2021 г. В. А. Курганов^а, Ю. А. Зейгарник^{а, *}, Г. Г. Яньков^б, И. В. Маслакова^а

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^бНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: zeigar@oivtran.ru

Поступила в редакцию 11.12.2020 г.

После доработки 12.01.2021 г.

Принята к публикации 20.01.2021 г.

Теплообмен теплоносителей сверхкритического давления (СКД) продолжает привлекать внимание как исследователей, так и инженеров. Работы по развитию феноменологических моделей процесса, создание универсальных расчетных кодов и поиск надежных обобщающих полуэмпирических соотношений, прежде всего для ухудшенной теплоотдачи, продолжаются. Для обеспечения точности и надежности результатов, получаемых с помощью этих соотношений и кодов, необходимо их верифицировать на одном и том же массиве опытных данных (benchmark). Этот массив должен быть тщательно отобран, проанализирован и проверен на базе большого числа исследований и практических инженерных приложений. Выбор данных для верификации не должен носить избирательный характер, тем более он не должен опираться только на собственные опытные данные авторов предлагаемых соотношений. В статье в виде таблицы представлена сводка работ по теплообмену и гидродинамике в круглых трубах воды и диоксида углерода сверхкритического давления. Эти работы охватывают режимы нормальной и ухудшенной теплоотдачи (с разделением по группам в зависимости от степени влияния сил плавучести и термического ускорения), данные по гидравлическому сопротивлению, профилям скорости и касательным напряжениям. Вместе с тем этот богатейший и проверенный практикой материал должен использоваться достаточно грамотно и аккуратно. Нужно ориентироваться на содержащиеся в этих работах первичные данные и не следует применять для верификации новых расчетных данных обобщающие соотношения из этих работ, полученные с использованием старых стандартов теплофизических свойств. Подчеркивается, что ценность результатов новых расчетов по теплоотдаче существенно возрастает, если они сопровождаются полученными одновременно данными по гидравлическим характеристикам течения.

Ключевые слова: теплоноситель, сверхкритическое давление, гидростатическое сопротивление, нормальная теплоотдача, ухудшенная теплоотдача, обобщающие соотношения, расчетные коды, верификация

DOI: 10.1134/S004036362108004X

Теплообмен при переменных теплофизических свойствах теплоносителя и, в частности, при сверхкритических давлениях продолжает привлекать внимание исследователей и инженеров [1]. Пик экспериментальных исследований теплогидравлики теплоносителей сверхкритического давления, пришедшийся на вторую половину XX в., был обусловлен потребностями тепловой и, в меньшей степени, атомной энергетики и проблемами обеспечения охлаждения ракетных двигателей.

ТЕПЛООБМЕН
ПРИ СКД. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Среди работ этого периода следует выделить исследования [2–29] и многие другие. Совокупны-

ми усилиями исследователей разных стран были получены достаточно надежные данные по нормальной теплоотдаче, в первом приближении были очерчены условия и границы появления ухудшенных режимов, выведены соотношения для расчета характеристик теплоотдачи и сопротивления в этих ухудшенных режимах, разработаны эмпирические соотношения, с приемлемой точностью обобщающие опытные данные для широкого круга теплоносителей СКД, прежде всего воды и CO₂. Среди них по точности описания теплоотдачи в нормальных режимах и охвату типов теплоносителей для каналов простой формы (труб) наилучшими оказались соотношение Краснощекова – Протопопова [7] и формула ИВТАН [1], записанная в

форме аналогии Рейнольдса. Для воды СКД приемлемые результаты были достигнуты при использовании формулы, полученной авторами [3]. Для режимов ухудшенной теплоотдачи единых обобщающих соотношений разработать не удалось, и для каждого из них были получены соответствующие индивидуальные формулы [1]. Важный, хотя и ограниченный, прогресс был достигнут в исследовании внутренней структуры потока теплоносителя СКД [25–27], что позволило создать феноменологическую картину ухудшения теплоотдачи, приемлемо согласующуюся с опытными данными. В табл. 1 представлена примерная классификация режимов ухудшенного теплообмена при смешанной конвекции жидкостей СКД в вертикальных обогреваемых трубах.

Следует заметить, что параметр, характеризующий влияние сил плавучести, — отношение коэффициентов гидростатического сопротивления и сопротивления трения на входе в трубу ($\xi_g/\xi_{вх}$) — не является критерием ухудшения теплоотдачи, а лишь указывает на распределение температуры стенки, которое можно ожидать в режимах данной группы при ухудшении теплоотдачи в области больших тепловых нагрузок. Необходимо также обратить внимание на то, что для первых трех групп ухудшенных режимов используется приведенная координата x/d (x — продольная координата; d — диаметр трубы), а для групп с 4-й по 6-ю — энтальпия потока $h_{ж}$ (см. табл. 1). Такое представление использовано для более рельефного обозначения областей распространения режима ухудшенной теплоотдачи.

Параллельно с экспериментальными работами и созданием на их основе полуэмпирических (или даже чисто эмпирических) обобщающих расчетных соотношений интенсивно велись и расчетно-теоретические исследования. Специально для сред с переменными свойствами разрабатывались алгебраические модели для турбулентной вязкости, учитывающие влияние сил плавучести и термического ускорения на турбулентный перенос, теплообмен и сопротивление при течении в трубах в режимах нагрева или охлаждения теплоносителя СКД.

Наиболее удачной оказалась модель, разработанная авторами [37], прошедшая широкомасштабную верификацию [38, 39] на режимах нагрева и охлаждения газов, капельных жидкостей и различных теплоносителей СКД (вода, диоксид углерода, азот, гелий). В целом эта модель в большинстве случаев позволила получить вполне удовлетворительные результаты и объяснить многие особенности течения и теплообмена при СКД в трубах, подтвержденные позднее экспериментальными исследованиями внутренней структуры потока [26, 27], о которых упоминалось ранее. Тем не менее, принципиальная невоз-

можность учета предыстории течения и диффузии турбулентности, несовершенство привлекаемой модели генерации турбулентности силами плавучести, неизбежная (отвечающая возможностям компьютеров) привязка математической модели к известному приближению пограничного слоя не позволили без дополнительных (весьма экстравагантных) допущений воспроизвести так называемые входные пики температуры стенки при подъемном течении теплоносителей СКД в обогреваемой трубе. Кроме того, модель разрабатывалась исключительно для круглых труб, поэтому ее использование для расчетов теплообмена в каналах сложной формы не представляется возможным. В целом, к концу XX в. алгебраические модели турбулентности исчерпали свои возможности.

НОВЫЕ ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МОДИФИКАЦИЯ ОБОБЩАЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ

С конца 80-х годов прошлого столетия в интенсивности экспериментальных исследований теплоотдачи теплоносителей СКД наблюдался заметный спад, связанный, с одной стороны, со снижением интереса инженерных и деловых кругов к проблеме ухудшения теплоотдачи и предопределенный авариями на АЭС, а с другой — с известным “исчерпанием” этой проблемы. Явными оставались лишь потребности в дополнительных научных знаниях по механизму ухудшения теплоотдачи, данных по интенсивности теплообмена в различного рода сборках твэлов и каналах сложной формы, методам интенсификации теплоотдачи и расширению области нормального теплообмена [1, 40, 41].

Серьезные сложности возникли в связи с иными обстоятельствами. Согласно решению IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam) в 1997 г. был введен новый, обязательный к применению в инженерной практике, стандарт свойств воды и водяного пара (далее в статье характеристики, отвечающие этому стандарту, будут обозначаться буквой F в верхнем индексе), который учитывает наличие при сверхкритических давлениях пиков на зависимости коэффициента теплопроводности от температуры $\lambda(t)$ при фиксированных давлениях в области псевдокритической температуры t_m [аналогичные пики на кривых $\lambda(t)$ были обнаружены и для CO₂]. При давлениях, не очень удаленных от критического значения, для воды эти пики в области t_m существенно (до двух раз) приводят к снижению значения чисел Прандтля Pr по сравнению со значениями в старых стандартах теплофизических свойств (далее в статье характеристики, отвечающие этому стандарту, будут обозначаться буквой A в верхнем индексе),

на которых были основаны указанные ранее популярные и приемлемые для инженерной практики эмпирические формулы. При обычных для СКД-аппаратов значениях числа Рейнольдса $Re = (1-2) \times 10^5$ эти формулы со свойствами F завышают значения числа Нуссельта Nu и, соответственно, занижают температуру стенки.

Общепризнанная, например, за рубежом формула Джексона – Краснощекова в диапазоне тепловых нагрузок $q_c / (\overline{\rho u}) = 0.5-0.8$ кДж/кг ($\overline{\rho u}$ – средняя массовая скорость теплоносителя) и энтальпиях воды 2000, 2100, 2200 и 2300 кДж/кг, т.е. в окрестности t_m , дает значения Nu^F / Nu^A равные соответственно 1.50; 1.65; 1.57 и 1.40. В итоге значения температуры стенки, рассчитанные по стандарту F, в указанном диапазоне тепловых нагрузок оказываются заниженными на десятки градусов и существенно расходятся с указанным ранее массивом надежных экспериментальных данных по температуре стенки, а также с данными таблицы [42], составленной по результатам многих работ для нормальных температур стенки при нагревании воды СКД в широком диапазоне параметров.

Были предприняты попытки скорректировать наиболее эффективные старые расчетные соотношения. Так, для режимов нормальной теплоотдачи была скорректирована расчетная формула Краснощекова – Протопопова [1, 43]. Такая коррекция была достигнута путем введения вместо обычного числа Pr некоего условного скорректированного числа Pr^* (так называемая Pr-модификация). Аналогичным образом благодаря применению такой модификации была “возвращена в строй” формула ИВТАН, полученная на основе аналогии Рейнольдса [1]. Авторами [44] был скорректирован численный коэффициент в формуле из работы [3]. Несколько позднее подобная операция с этой формулой была проделана авторами [45]. Новую, но также берущую начало от соотношения [3] обобщающую формулу для воды предложили авторы [46]. Последние три формулы, менее общие по сравнению с рекомендуемыми в [1, 43], могут применяться для воды СКД и верифицированы на ограниченном числе опытных данных, при этом огромный массив экспериментального материала, о котором упоминалось ранее, оказался в известной мере неиспользованным.

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СКД

В начале XXI в. экспериментальные исследования теплообмена теплоносителей СКД возобновились, хотя и не с той интенсивностью, как ранее. Это связано с вновь возникшим интересом к водяным реакторным СКД-установкам, позволяющим существенно улучшить технико-экономические показатели АЭС [47, 48], проектированием

и созданием пилотных установок замкнутого цикла с ГТУ на CO_2 СКД и ядерным источником тепла, продолжающимся применением теплоносителей СКД в системах охлаждения ракетных двигателей. Среди новых работ можно отметить работы по теплообмену в мини-каналах и каналах, заполненных пористой средой [49, 50], кольцевых каналах [51] и сборках обогреваемых стержней [52–55], каналах с внутренним оребрением [56, 57], спиралеобразных каналах [58, 59] и др.

Получение новых опытных данных сопровождалось разработкой новых эмпирических расчетных соотношений, опирающихся преимущественно на собственные данные и в достаточно ограниченном объеме на данные других исследователей. Описанная ранее ситуация с уточнением в 1997 г. теплофизических свойств воды и CO_2 тоже только стимулировала подобное узко направленное “творчество”, старые достаточно широкие массивы опытных данных по теплоотдаче использовались весьма ограниченно.

Такая ситуация представляется недостаточно продуктивной. Проверенные, надежные старые опытные данные должны продолжать служить интересам развития науки и техники. В табл. 2, заимствованной из [1], систематизированы источники наиболее надежных опытных данных для воды и CO_2 , проверенные соответствующим анализом и практикой. Предлагаемые новые расчетные данные и эмпирические формулы обязательно должны сопоставляться с результатами этих работ (таблицами опытных данных и графиками, содержащимися в оригинальных публикациях) как со своего рода единой общепризнанной верификационной базой (benchmark). Это, несомненно, придаст им дополнительный вес и ценность¹.

Прогресс вычислительной техники, оснащение научных центров мощными компьютерами, способными за приемлемое время численными методами решать сложные задачи гидродинамики и теплообмена, вызвал с начала XXI в. обширный поток публикаций, посвященных расчетно-теоретическим исследованиям процессов теплообмена при СКД. В большой степени этому способствовало появление на компьютерном рынке набора коммерческих кодов, ориентированных на решение разнообразных задач тепло- и массообмена. Основной вопрос, не получивший пока ясного ответа, – насколько можно доверять полученным результатам в усложненных ситуациях, к которым, несомненно, относится теплообмен при СКД. Поскольку к концу XX в. алгебраические модели турбулентности практически исчер-

¹ Использовать для верификации формулы, разработанные с использованием стандарта А, недопустимо ввиду очевидной опасности получения ложных результатов и столь же ложных заключений.

Таблица 1. Примерная классификация режимов ухудшенного теплообмена при смешанной конвекции жидкостей СКД в вертикальных обогреваемых трубах

Группа	Температурный режим стенки в вертикальных обогреваемых трубах при СКД в области существенного влияния подъемных сил и термического ускорения при постоянном тепловом потоке на стенке ($q_c \equiv \text{const}$)	Примерная картина теплоотдачи на стенке	$(\xi_g/\xi)_{\text{вх}}$	Источник
1	Слабые признаки “входного” пика температуры стенки t_c на участке $x/d < 20$ при подъемном течении, исчезающие при дальнейшем увеличении тепловой нагрузки. Монотонное изменение t_c при опускном течении. В обоих случаях существенное уменьшение коэффициентов теплоотдачи при $h_{\text{ж}} \geq h_m$ ($h_{\text{ж}}$ – энthalпия жидкости; h_m – энthalпия в точке максимума теплоемкости жидкости). Стабилизация теплоотдачи вдали от входа ($x/d > 30$)		≥ 800	[8, 14, 28, 30]
2	“Входные” пики t_c при подъемном течении, возникающие в области термического начального участка ($x/d < 20$) и смещающиеся к самому входу с ростом q_c . В нижней половине данного диапазона – режимы, в которых вслед за входным пиком t_c формируется вторая и более протяженная область ухудшения теплоотдачи. Стабилизация теплоотдачи вне областей ухудшения. Монотонное распределение t_c и стабилизация теплоотдачи при опускном течении		800–120	[8, 11, 12, 14, 28, 30, 31]
3	“Входные” пики t_c , возникающие за пределами термического начального участка ($x/d < 20$), при подъемном течении. С ростом q_c пики смешаются ко входу в трубу. Часто входной пик сопровождается вторым (и более) пиком t_c , более размытым по длине. Зависимость теплоотдачи от “входной” энthalпии на значительных участках трубы. При опускном течении и прочих равных условиях – монотонное распределение температуры стенки и стабилизация теплоотдачи		120–25	[2, 5, 10–13, 16, 22, 30–32]

Таблица 1. Окончание

Группа	Температурный режим стенки в вертикальных обогреваемых трубах при СКД в области существенного влияния подъемных сил и термического ускорения при постоянном тепловом потоке на стенке ($q_c \equiv \text{const}$)	Примерная картина теплоотдачи на стенке	$(\xi_g/\xi)_{\text{вх}}$	Источник
4	<p>Пики t_c (значительной протяженности по длине трубы) при $h_{\text{вх}} < h_{\text{м0}}$ ($h_{\text{вх}}$ – энтальпия жидкости на входе в трубу; $h_{\text{м0}}$ – нижняя граница энтальпии области псевдофазового перехода) расположены в начале области псевдофазового перехода ($h_{\text{м0}} < h_{\text{ж}} < h_{\text{м}}$); при $h_{\text{вх}} > h_{\text{м0}}$ часто развиваются от самого входа в трубу подобно “входным” пикам. Существенная зависимость теплоотдачи от энтальпии на входе, особенно во втором из указанных случаев. При опускном течении ухудшение теплоотдачи отсутствует или выражено слабо</p>		25–4	[2, 9, 13, 16, 19, 32–35]
5	<p>Широкая область ухудшенной теплоотдачи с максимумом t_c, развивающаяся в окрестности $h_{\text{ж}} = h_{\text{м}}$ при $h_{\text{вх}} < h_{\text{м}}$ или от входа при $h_{\text{вх}} \geq h_{\text{м}}$ независимо от направления течения в поле силы тяжести. Существенное влияние ориентации потока на тепловую нагрузку начала ухудшения и местную теплоотдачу в области ухудшения. Зависимость теплоотдачи от входной энтальпии жидкости, усиливающаяся при $h_{\text{вх}} > h_{\text{м0}}$</p>		4.0–0.5	[9, 18, 33, 34, 36]
6	<p>То же. Постепенное вырождение влияния ориентации течения на ухудшенную теплоотдачу</p>		≤ 0.5	[34, 36]

Примечания.

1. Сплошные линии – подъемное течение, пунктирные – возможный вариант картины, штриховые – опускное течение.
2. $\xi = 8\tau_c / (\rho_{\text{ж}} u_{\text{ж}}^2)$ – коэффициент сопротивления трения, где τ_c – касательное напряжение на стенке; $\rho_{\text{ж}}$ и $u_{\text{ж}}$ – плотность и скорость жидкости; $\xi_g = 2g\bar{r}d / (\rho_{\text{ж}} u_{\text{ж}}^2)$ – коэффициент гидростатического сопротивления, где \bar{r} – средняя по сечению трубы плотность.
3. Линии 1, 2 и 3 соответствуют тепловым потокам на стенке q_{c1} , q_{c2} , q_{c3} ; $q_{c1} < q_{c2} < q_{c3}$.

Таблица 2. Рекомендуемые источники опытных данных по теплогидравлическим характеристикам воды и диоксида углерода СКД при турбулентном течении в обогреваемых трубах

Предмет исследования	Теплоноситель		
	вода	диоксид углерода	
Гидравлическое сопротивление	Разумовский [29, 60]; Ishigai [18, 19]	Курганов [15, 33, 61]; Анкудинов [62]	
Профили скорости, касательных напряжений и других параметров потока	Licht, Anderson [63]	Курганов, Капительный [25–27]	
Режимы нормальной теплоотдачи	Löwenberg [42]; Шицман [2]; Ishigai [18, 19]; Bishop [3]; Swenson [4]; Yamagata [16]	Hall, Jackson [20, 21]; Краснощеков, Протопопов [6, 7]; Курганов, Анкудинов [15, 61, 62]	
Границы области нормального теплообмена	Грабежная, Кириллов [44]; Yamagata [16]	Hall, Jackson [20–22]; Курганов [1, 64]; McEligot, Jackson [65]	
Режимы ухудшенного теплообмена по классификации табл. 1	1	Watts, Chou [28]; Алферов [8]	Протопопов [14, 66]; Курганов [30]
	2	Watts, Chou [28]; Алферов [8]	Протопопов [14, 66]; Bourke [11]; Курганов [30]
	3	Шицман [2]; Ishigai [18, 19]; Yamagata [16]; Вихрев [67]; Беляков [12]; Аккерман [10]	Протопопов [14, 66]; Shiralkar [9]; Bourke [11, 35]; Курганов [30]; Jackson [20, 22]
	4	Шицман [2]; Ishigai [18, 19]; Yamagata [16]; Вихрев [67]	Протопопов [13, 14]; Shiralkar, Griffith [9]; Bourke [11, 35]; Курганов [30]; Jackson [20, 22]
	5	Ishigai [18, 19]; Вихрев [67]	Shiralkar, Griffith [9]; Курганов, Анкудинов [15, 33, 61, 62]
	6	Вихрев, Барулин [67]	Shiralkar, Griffith [9]; Курганов, Анкудинов [15, 33, 61, 62]

пали свои ограниченные возможности, многообещающим казалось использование дифференциальных моделей турбулентности типа $k-\epsilon$, $k-\omega$ и им подобных. К сожалению, этим надеждам не суждено было сбыться.

Анализ, приведенный в [1], показал, что в настоящее время ни одна модель из класса алгебраических или дифференциальных для турбулентной вязкости, как, впрочем, и из класса моделей для вторых моментов, не может быть с уверенностью рекомендована в качестве универсальной для расчетов любых режимов теплообмена жидкостей СКД в обогреваемых каналах, включая режимы ухудшенной теплоотдачи. Этот пессимистический вывод представляется вполне закономерным, так как обычная практика многих авторов, моделирующих теплообмен при СКД, состоит в простом переборе разных моделей, реализованных в коммерческих кодах типа ANSYS Fluent [68], ANSYS CFX [69], STAR CCM+ [70], COMSOL [71] и др. Более дюжины реализованных в этих кодах моделей турбулентности разрабатывались их авторами отнюдь не для целей описания течений теплоносителей СКД, а для реше-

ния совсем других задач: реламинаризации потока в пограничных слоях с отрицательным градиентом давления (модель Лаундера – Джонса [72]), расчета течения за обратным уступом (классический тест для многих моделей), получения картины обтекания лунок и выступов на твердой поверхности (SST-модель [73]), расчета струй и слоев смешения и др.

Весьма показательна экспериментальная база, используемая для калибровки констант новой модели Менгера с соавторами, недавно внедренной в код ANSYS CFX и получившей название Generalised $k-\omega$ -модели (ГЕКО). Совокупность тестовых задач включает в себя расчет: трения и теплообмена при обтекании обратного уступа; осесимметричного течения в диффузоре; трансзвукового обтекания многочисленных крыловых профилей; свободных сдвиговых течений; вторичных вихрей в углах канала прямоугольного сечения; течений в циклонах; обтекания горизонтальной треугольной призмы. Очевидно, что $k-\omega$ -модель не ориентирована на расчеты гидродинамики и теплообмена при резкопеременных свойствах теплоносителя, характерных для СКД, так как ее раз-

работчики и не ставили перед собой такой цели. Поэтому и чуда при использовании популярной модели Менгера (SST) при расчетах ухудшенных режимов при СКД не произошло. Многочисленные работы, опубликованные за последние 15 лет, убедительно показали бесплодность попыток воспроизвести представительный набор данных по ухудшенным режимам, просто перебирая реализованные в коммерческих кодах модели турбулентности [74]. Пожалуй, пока единственный позитивный факт состоит в том, что стандартная k - ϵ -модель с пристеночными функциями Лаундера – Сполдинга наилучшим образом (по сравнению с другими моделями) воспроизводит хорошо известные нормальные режимы теплоотдачи к воде СКД, экспериментально исследованные в [16] (см., например, [1, 74]).

Лишь в последние 4–5 лет стали появляться работы, авторы которых популярные модели турбулентности пытаются целенаправленно адаптировать к условиям СКД. С этой целью разрабатываются новые модели для турбулентного числа Прандтля [75], калибруются константы в алгебраической модели Лаундера (AFM) для турбулентных потоков тепла [76, 77] и т.д. Пока успехи, достигнутые на этом пути, выглядят довольно скромно.

Известно, что методы DNS и LES² пока не могут быть распространены на режимы течения в длинных трубах ($L/d > 200$; L – длина трубы) при высоких числах Рейнольдса (около 10^5). Однако даже при $Re = 5400$ в трубе с $L/d = 30$ некоторые ухудшенные режимы теплоотдачи диоксида углерода СКД, рассчитанные методом DNS в пионерской работе [78], не воспроизводятся другими исследователями ни с помощью метода DNS [79–82], ни с помощью метода LES [83, 84]. При этом в работах [80, 82] использовались сетки с числом ячеек 7.8 млн, в [81] – 23 млн, в [79] – 73 млн, в [83] – 1.8 млн, в [84] – 3.14 и 8.6 млн. (В [78] сетка имела 7.8 млн ячеек.) Более того, необходимо отметить, что результаты, полученные в упомянутых работах, тоже несколько различаются между собой. Более подробно расчетные данные для режимов из [78] обсуждаются в [84], т.е. и на этом пути реальный прогресс в расчетах режимов СКД еще впереди.

ВЕРИФИКАЦИЯ НОВЫХ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ И ОБОБЩАЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ

Качество и эффективность теоретических положений и дееспособность используемых в расчетах моделей проверяется путем верификации – расчетов режимов теплообмена, для которых имеются

² DNS – прямое численное моделирование турбулентности (от англ. direct numerical simulations); LES – метод моделирования крупных вихрей (от англ. large eddy simulations).

экспериментальные данные, качество которых вызывает доверие. Эталонами являются данные о процессах в круглых трубах. В этой связи вновь следует обратиться к табл. 2. Она включает в себя работы, в которых содержатся наиболее надежные данные как по нормальному, так и по ухудшенному теплообмену с разбивкой по группам, критериям и границам перехода от нормальной к ухудшенной теплоотдаче (к сожалению, экспериментально они получены не для всех случаев), результаты исследований структуры потока и гидравлического сопротивления, местного коэффициента импульса потока и эволюции параметров осредненного течения в “опасной” области – области высоких тепловых нагрузок.

В экспериментальных работах [25, 27, 35], а также в расчетно-теоретических работах [37, 85], а позднее и в упомянутых работах, в которых используется DNS- и LES-моделирование, было наглядно показано, что переход в режим ухудшенной теплоотдачи четко коррелирует с радикальной перестройкой осредненного течения под действием главных факторов воздействия на него – термического ускорения и подъемных сил. Следует отметить, что влияние этих факторов в условиях нормального теплообмена несущественно. В указанных работах установлены основные признаки перехода в режим ухудшенной теплоотдачи:

- опережающий рост скорости в пристеночной области потока и уплощение профилей скорости в ядре;

- резкое снижение касательных и рейнольдсовых напряжений по сравнению с линейной нормой;

- развитие M-образных профилей скорости и одновременно с этим появление обширной зоны отрицательных значений касательного напряжения в центральной части потока;

- в области быстрого роста температуры стенки отмечается и резкое увеличение коэффициента импульса потока, что приводит к дополнительно росту инерционного сопротивления и деформации картины осредненного течения.

Основное внимание авторов расчетных работ на стадии верификации чаще всего уделяется коэффициентам теплоотдачи и температуре стенки, что, несомненно, обусловлено практическими задачами, но в научном плане сильно обедняет расчетную работу. Значительно реже попадаются работы с обстоятельным анализом эволюции структуры осредненного течения при приближении к опасной области тепловых нагрузок. В публикациях почти нет представления и анализа составляющих гидравлического сопротивления, не говоря уже о коэффициентах импульса. Тем самым выхолащивается одна из главных задач расчетной работы – установление физических основ специфических закономерностей процессов течения и теплообмена жидкостей СКД. Сказанное относится к ра-

ботам, в которых для моделирования используются осредненные уравнения Рейнольдса.

Один из ведущих специалистов мира в области теплообмена СКД теплоносителей J.D. Jackson в последнее десятилетие опубликовал несколько обзорных работ, посвященных проблеме обобщения и верификации опытных данных [86–88]. Эти работы осуществлялись в рамках организованной в 2008 г. МАГАТЭ координированной исследовательской программы “Тепловые процессы и верификация теплогидравлических кодов для легководных реакторов сверхкритического давления (SCWR)”. Авторы настоящей статьи также касались в последних своих работах этой проблемы [89–92]. Эти публикации объединяет близкая трактовка физических причин ухудшения турбулентной теплоотдачи в потоках СКД. Их авторы, по сути дела, также едины в необходимости строгого отсева (screening) данных, используемых для обобщения, как и в целесообразности подробного исследования гидродинамической картины течения. Усилия должны смещаться в сторону научного анализа вместо поиска удачи в переборе возможных, зачастую случайных вариантов.

ВЫВОДЫ

1. Верификация методики расчета должна осуществляться на одном и том же массиве авторитетных экспериментальных материалов по теплообмену в круглых трубах (benchmark), выбор данных для верификации не должен носить избирательный характер.

2. Следует проявлять осторожность и аккуратность и не применять для верификации расчетных данных, полученных на базе свойств новых стандартов F, обобщающие формулы, разработанные с использованием старых стандартов свойств A.

3. Представление характеристик теплообмена целесообразно сопровождать данными о гидродинамических характеристиках течения (профилях скорости и касательных напряжениях, полях энthalпии, местных коэффициентах сопротивления и их составляющих в сравнении с результатами “одномерного” анализа, местных коэффициентах импульса потока), статистических характеристик турбулентности, если моделирование выполняется вихререзающими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплообмен** и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: итоги научных исследований и практические рекомендации / В.А. Курганов, Ю.А. Зейгарник, Г.Г. Яньков, И.В. Маслакова. М.: Печатный салон “Шанс”, 2018.
2. **Шицман М.Е.** Ухудшенные режимы теплоотдачи при закритических давлениях // ТВТ. 1963. Т. 1. № 2. С. 267–275.
3. **Bishop A.A., Sandberg R.O., Tong L.S.** Forced convection heat transfer to water at near-critical temperature and supercritical pressures: Report WCAP-2056. Pittsburgh, USA. Dec. 1964.
4. **Swenson H.S., Carver J.R., Kakarala C.R.** Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes // J. Heat Transfer. 1965. V. 87. № 4. P. 477–484. <https://doi.org/10.1115/1.3689139>
5. **Исследование** температурных режимов стенки трубы при теплосъеме водой сверхкритического давления / Г.В. Алексеев, В.А. Силин, А.М. Смирнов, В.И. Субботин // ТВТ. 1976. Т. 14. № 4. С. 769–774.
6. **Краснощеков Е.А., Протопопов В.С.** Экспериментальное исследование теплообмена двуокиси углерода в сверхкритической области при больших температурных напорах // ТВТ. 1966. Т. 4. № 3. С. 389–398.
7. **Протопопов В.С.** Обобщающие зависимости для местных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении воды и двуокиси углерода сверхкритического давления в равномерно обогреваемых круглых трубах // ТВТ. 1977. Т. 15. № 4. С. 815–821.
8. **Алферов И.С., Рыбин Р.А., Балунов Б.С.** Теплоотдача при турбулентном течении воды в вертикальных трубах в условиях существенного влияния свободной конвекции // Теплоэнергетика. 1969. № 12. С. 66–70.
9. **Shiralkar B.S., Griffith P.** Deterioration in heat transfer in fluids at supercritical pressure and high heat fluxes // J. Heat Transfer. 1969. V. 91. № 1. P. 27–36. <https://doi.org/10.1115/1.3580115>
10. **Аккерман Дж.** Теплоотдача при псевдокипении воды в закритической области в гладких и оребренных трубах // Теплопередача. 1970. № 3. С. 183–189.
11. **Forced convective heat transfer to turbulent CO₂ in supercritical region** / P.J. Bourke, D.J. Pulling, L.E. Gill, W.H. Denton // Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. V. 13. Is. 8. P. 1339–1348. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90074-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90074-8)
12. **Теплообмен** в вертикальной подъемной и горизонтальной трубах при закритическом давлении / И.И. Беляков, А.Ю. Красякова, А.В. Жуковский, Н.Д. Фефелова // Теплоэнергетика. 1971. № 11. С. 39–43.
13. **Петухов Б.С., Протопопов В.С., Силин В.А.** Экспериментальное исследование режимов ухудшенного теплообмена при турбулентном течении двуокиси углерода сверхкритического давления // ТВТ. 1972. Т. 10. № 2. С. 347–354.
14. **Икрянников Н.П., Петухов Б.С., Протопопов В.С.** Экспериментальное исследование теплообмена в однофазной околоскритической области при совместном действии вынужденной и свободной конвекции // ТВТ. 1972. Т. 10. № 1. С. 96–100.

15. **Петухов Б.С., Курганов В.А., Анкудинов В.Б.** Новые экспериментальные данные по сопротивлению и теплоотдаче в круглой трубе при нагревании двуокиси углерода околокритических параметров состояния // Конвективный теплообмен. Методы и результаты исследований: сб. статей. М.: ИВТАН, 1982. С. 29–68.
16. **Forced** convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes / K. Yamagata, K. Nishikawa, S. Hasegawa, T. Fujii, S. Yoshida // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1972. V. 15. Is. 12. P. 2575–2593. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90148-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90148-2)
17. **Поляков А.Ф.** О механизме и границах возникновения режимов с ухудшенной теплоотдачей при сверхкритическом давлении теплоносителя // ТВТ. 1975. Т. 13. № 6. С. 1210–1219.
18. **Ишигаи С., Каджи М., Накамото М.** Теплообмен и трение при течении воды в трубах при сверхкритическом давлении // Теплообмен-В. Минск, 1976. Т. 1. Ч. 1. С. 261–269.
19. **Forced** convective heat transfer and pressure drop for supercritical water flowing in tube: 1st Report, Experimental results of heat transfer / S. Ishigai, M. Kaji, M. Nakamoto, Y. Nohara, H. Hashimoto // *JSME. Ser. B*. 1981. V. 47. P. 2333–2342. <https://doi.org/10.1299/kikaib.47.2333>
20. **Hall W.B., Jackson J.D.** Heat transfer near the critical point // *Proc. 6th Intern. Heat Transfer Conf.* 1978. V. 6. N.Y.: Hemisphere, 1978. P. 377–392.
21. **Jackson J.D., Hall W.B.** Forced convection heat transfer to fluids at supercritical pressure // *Turbulent forced convection in channels and bundles* / Eds. S. Kakac and J.B. Spalding. Washington: Hemisphere, 1979. V. 2. P. 563–612.
22. **Jackson J.D., Hall W.B.** Influence of buoyancy on heat transfer to fluids flowing in vertical tubes under turbulent conditions / eds S. Kakac and J.B. Spalding. Washington: Hemisphere, 1979. V. 2. P. 613–640.
23. **Курганов В.А., Анкудинов В.Б.** Расчет нормальной и ухудшенной теплоотдачи в трубах при турбулентном течении жидкостей в околокритической и газовой области состояний // Теплоэнергетика. 1985. № 6. С. 53–57.
24. **Курганов В.А.** Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: некоторые итоги научного исследования // Труды Четвертой российской конференции по теплообмену (РНКТ-4). 23–27 окт. 2006 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. Т. 1. С. 74–84.
25. **Курганов В.А., Анкудинов В.Б., Капильный А.Г.** Экспериментальное исследование полей скорости и температуры при подъемном течении двуокиси углерода сверхкритического давления в вертикальной обогреваемой трубе // ТВТ. 1986. Т. 24. № 4. С. 1104–1111.
26. **Kurganov V.A., Kaptil'ny A.G.** Velocity and enthalpy fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1992. V. 5. Is. 4. P. 465–478. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(92\)90033-2](https://doi.org/10.1016/0894-1777(92)90033-2)
27. **Kurganov V.A., Kaptil'ny A.G.** Flow structure and turbulent transfer of a supercritical pressure fluid in a vertical heated tube under the condition of mixed convection. Experimental data // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993. V. 36. Is. 13. P. 3383–3392. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(93\)90020-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(93)90020-7)
28. **Watts M.J., Chou C.T.** Mixed convective heat transfer to supercritical pressure water // *Proc. of 7th Intern. Heat Transfer Conf. Munchen, Germany*, 6–10 Sept. 1982. V. 3. P. 495–500.
29. **Разумовский В.Г., Орнатский А.П., Маевский К.М.** Гидравлическое сопротивление и теплоотдача в гладких каналах при турбулентном течении воды сверхкритического давления // Теплоэнергетика. 1984. № 2. С. 69–72.
30. **Курганов В.А., Анкудинов В.Б., Капильный А.Г.** Гидравлическое сопротивление и теплообмен в вертикальных обогреваемых трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя / Турбулентный теплообмен при смешанной конвекции в вертикальных трубах / Под ред. А.Ф. Полякова. М.: ИВТАН, 1989. С. 95–160.
31. **Brassington D.J., Cairns D.N.H.** Measurements of forced convective heat transfer to supercritical helium // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1977. V. 20. Is. 3. P. 207–214. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(77\)90207-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(77)90207-1)
32. **Шицман М.Е.** Особенности температурного режима в трубах при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. 1968. № 5. С. 57–61.
33. **Курганов В.А., Анкудинов В.Б., Капильный А.Г.** Гидравлическое сопротивление и сопротивление трения при подъемном и опускном течении жидкости сверхкритического давления в обогреваемых трубах // ТВТ. 1989. Т. 27. № 1. С. 94–103.
34. **Теплообмен** при турбулентном течении в вертикальных и горизонтальных трубах воды сверхкритических параметров состояния / Ю.Д. Барулин, Ю.В. Вихрев, Б.В. Дядякин, А.Н. Кобляков, А.С. Коньков, В.А. Локшин, И.Т. Синицын // ИФЖ. 1971. Т. 20. № 5. С. 929–930. (Деп. ВИНТИ, № 2312-70 Деп.)
35. **Bourke P.J., Pulling D.J.** Experimental explanation of deterioration in heat transfer to supercritical carbon dioxide: Paper ASME. 1971. No 71-HT-24.
36. **Петухов Б.С., Курганов В.А., Анкудинов В.Б.** Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах при турбулентном течении жидкости околокритических параметров состояния // ТВТ. 1983. Т. 21. № 1. С. 92–100.
37. **Heat transfer and hydraulic in turbulent flow in vertical round tubes at supercritical pressures – Part 1: Results from numerical simulations using algebraic turbulent viscosity models** / G. Yankov, V. Kurganov, Y. Zeigarnik, I. Maslakova // *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.* 2021. V. 7. (В печати.)
38. **Попов В.Н., Беляев В.М., Валуева Е.П.** Расчет теплоотдачи и сопротивления при турбулентном течении в круглой трубе жидкости с различными типами зависимости физических свойств от температуры // ТВТ. 1977. Т. 15. № 6. С. 1220–1229.

39. **Попов В.Н., Валуева Е.П.** Теплообмен и турбулентное течение воды сверхкритических параметров состояния в вертикальной трубе при существенном влиянии свободной конвекции // Теплоэнергетика. 1986. № 4. С. 22–29
40. **Курганов В.А.** Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя. Ч. 2. Теплоотдача и сопротивление при больших тепловых нагрузках. Влияние дополнительных факторов. Интенсификация ухудшенного теплообмена // Теплоэнергетика. 1998. № 4. С. 35–44.
41. **Experimental** investigation on heat transfer and frictional characteristics of vertical upward rifled tube in supercritical CFB boiler / D. Yang, J. Pan, C.Q. Zhou, X.J. Zhu, Q.C. Bi, T.K. Chen // Exp. Therm. Fluid Sci. 2011. V. 35. Is. 2. P. 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.09.011>
42. **Löwenberg M.F.** Wärmeübergang von Wasser in vertikalen Rohr-stromungen bei überkritischen Druck // Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) Wissenschaftliche Berichte: FZKA 7320. Mai 2007.
43. **Kurganov V.A., Zeigarnik Yu.A., Maslakova I.V.** On calculating heat transfer and pressure drop of supercritical-pressure coolants // J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2016. V. 2. № 3. P. 031012-1. <https://doi.org/10.1115/1.4032440>
44. **Грабежная В.А., Кириллов П.Л.** Теплообмен при сверхкритических давлениях и границы ухудшения теплоотдачи // Теплоэнергетика. 2006. № 4. С. 46–51.
45. **Development** of heat transfer correlation for supercritical water flowing in a vertical bare tube / S. Mokry, A. Farah, K. King, S. Gupta, I. Pioro, P. Kirillov // Proc. of the 14th Intern. Heat Transfer Conf. (IHTC-14) Washington DC, USA, 8–13 Aug. 2010. Paper 22908.
46. **Анализ** соотношений для расчета “нормальной” теплоотдачи к потоку воды сверхкритического давления в вертикальной трубе / В.И. Деев, В.И. Рачков, В.С. Харитонов, А.Н. Чуркин // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 3. С. 138–144.
47. **Кириллов П.Л.** Переход на сверхкритические параметры – путь совершенствования АЭС с водоохлаждаемыми реакторами // Теплоэнергетика. 2001. № 12. С. 6–10.
48. **Габараев Б.А., Смолин В.Н., Соловьев С.Л.** Перспективное направление развития водоохлаждаемых реакторов АЭС в XXI веке – использование сверхкритических параметров теплоносителя // Теплоэнергетика. 2006. № 9. С. 33–40.
49. **Experimental** investigation of convection heat transfer of CO₂ at super-critical pressures in vertical mini tubes and in porous media / P.X. Jiang, Y.J. Xu, J. Lv, R.F. Shi, S. He, J.D. Jackson // Appl. Therm. Eng. 2004. V. 24. Is. 8–9. P. 1255–1270. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.024>
50. **Convection** heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in a vertical mini tube at relatively low Reynolds numbers / P.X. Jiang, Y.Z. Zhao, C.R. Zhao, R.F. Shi // Exp. Therm. Fluid Sci. 2008. V. 32. Is. 8. P. 1628–1637. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.05.006>
51. **Experimental** study of supercritical water heat transfer deteriorations in different channels / H.-B. Li, M. Zhao, Z.-X. Hu, Y. Zhang, F. Wang // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 119. P. 240–256. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.05.009>
52. **Experimental** investigation on heat transfer behavior in a tight 19 rod bundle cooled with supercritical R134a / J. Chen, H. Gu, Z. Xiong, D. Liu // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 115. P. 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.010>
53. **Eter A., Groeneveld D., Tavoularis S.** An experimental investigation of supercritical heat transfer in a three-rod bundle equipped with wire-wrap and grid spacers and cooled by carbon dioxide // Nucl. Eng. Des. 2016. V. 303. P. 173–191. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.04.002>
54. **A review** on recent heat transfer studies to supercritical pressure water in channels / H. Wang, L.K.H. Leung, W. Wang, Q. Bi // Appl. Therm. Eng. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.007>
55. **Experimental** investigation on heat transfer of supercritical water flowing in the subchannel with grid spacer in supercritical water cooled reactor / W. Wang, L. Guo, G. Zhu, X. Zhu, Q. Bi // Energies. 2020. V. 13. Is. 5. P. 1016. <https://doi.org/10.3390/en13051016>
56. **Experimental** investigation on heat transfer and pressure drop of supercritical water flows in an inclined rifled tube / A. Taklifi, R. Hanafizadeh, M.A.A. Behabadi, A. Aliabadi // J. Supercrit. Fluids. 2016. V. 107. P. 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.09.011>
57. **Experimental** comparison of the heat transfer of supercritical R134a in a micro-fin tube and a smooth tube / D. Wang, R. Tian, Y. Zhang, L. Li, L. Shi // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 129. P. 1194–1205. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.052>
58. **Experimental** and numerical comparison of the heat transfer behaviors and buoyancy effects of supercritical CO₂ in various heating tubes / S. Zhang, X. Xu C. Liu, X. Liu, Z. Ru, C. Dang // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 149. P. 119074. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119074>
59. **Experimental** investigation of heat transfer of supercritical CO₂ cooled in helically coiled tubes based on energy analysis / X. Xiao, Y. Zhang, L. Chao, S. Zhang, C. Dang // Int. J. Refrig. 2018. V. 89. P. 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.03.011>
60. **Разумовский В.Г., Орнатский А.П., Маевский Е.М.** Определение коэффициентов сопротивления при турбулентном течении воды сверхкритического давления в гладких каналах // Промышленная теплотехника. 1985. Т. 7. № 5. С. 24–28.
61. **Экспериментальное** исследование сопротивления и теплоотдачи при турбулентном течении жидкости сверхкритического давления / Б.С. Петухов, В.А. Курганов, В.Б. Анкудинов, В.С. Григорьев // ТВТ. 1980. Т. 18. № 1. С. 100–111.

62. **Анкудинов В.Б.** Экспериментальное исследование сопротивления и теплообмена при турбулентном течении в трубах жидкости сверхкритических параметров: дис. ... канд. техн. наук. М.: ИВТАН СССР, 1982.
63. **Licht J., Alex P., Anderson M.** Heat transfer to water through the critical point // Proc. of Intern. Heat Transfer. Conf. Sidney, Australia, 8–13 Aug. 2010. Paper NCL-06.
64. **Kurganov V.A., Zeigarnik Y.A.** Results of studying of turbulent heat transfer deterioration in channels and their application in practical calculations of heat transfer and pressure drop of supercritical pressure coolants // NURETH-11. Avignon, France, 2–6 Oct. 2005. Paper 235.
65. **McEligot D.M., Jackson J.D.** “Deterioration” criteria for convective heat transfer in gas flow through non-circular ducts // Nucl. Eng. Des. 2004. V. 232. Is. 3. P. 327–333.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.05.004>
66. **Икрянников Н.П., Петухов Б.С., Протопопов В.С.** К расчету теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционно-гравитационном течении // ТВТ. 1973. Т. 11. № 5. С. 1068–1075.
67. **Вихрев Ю.В., Барулин Ю.Д., Коньков А.С.** Исследование теплообмена в вертикальных трубах при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. 1967. № 9. С. 70–82.
68. **ANSYS FLUENT Theory Guide.** ANSYS, Inc. <http://www.ansys.com>
69. **ANSYS CFX – Solver Theory Guide.** ANSYS, Inc. <http://www.ansys.com>
70. **Siemens PLM Software Inc.** STAR-CCM+® User Guide, ver. 12.06, 2017.
71. **AC/DC Module User’s Guide,** pp. 75–84. COMSOL Multiphysics® v. 5.4. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2018.
72. **Gibson M.M., Launder B.E.** On the calculation of horizontal turbulent, free shear flows under gravitational influence // Trans. ASME. Ser. C. J. Heat Transfer. 1976. V. 98. P. 81–87.
73. **Menter F.R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application // AIAAJ. 1994. V. 32. № 8. P. 1598–1605.
<https://doi.org/10.2514/3.12149>
74. **Heat transfer and hydraulic resistance in turbulent flow in vertical round tubes at supercritical pressures – Part II: Results from numerical simulation with differential turbulent viscosity models / G. Yankov, V. Kurganov, Y. Zeigarnik, I. Maslakova // J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2021. V. 7. (В печати.)**
75. **Bae Y.Y.** A new formulation of variable turbulent Prandtl number for heat transfer to supercritical fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 92. P. 792–806.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.039>
76. **Pucciarelli A., Ambrosini W.** Use of AHFM for simulating heat transfer to supercritical fluids: Application to carbon dioxide data // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 127. Part B. P. 1138–1146.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.125>
77. **Jiang P.-X., Wang Z.-C., Xu R.-N.** A modified buoyancy effect correction method on turbulent convection heat transfer of supercritical pressure fluid based on RANS model // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 127. Part B. P. 257–267.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.042>
78. **Bae J.H., Yoo J.Y., Cho H.** Direct numerical simulation of turbulent supercritical flows with heat transfer // Phys. Fluids. 2005. V. 17. Is. 10.
<https://doi.org/10.1063/1.2047588>
79. **Mean statistics of a heated turbulent pipe flow at supercritical pressure / H. Nematì, A. Patel, B.J. Boersma, R. Pecnic // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 83. P. 741–52.**
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.039>
80. **Direct numerical simulation of convective heat transfer in a vertical pipe for supercritical pressure CO₂ / J. Yan, W. Wang, P. Jiang, S. He // 16th Intern. Heat Transfer Conf. 2018. Beijing, China. 10–15 Aug. 2010.**
81. **Chu X., Laurien E.** Direct numerical simulation of heated turbulent pipe flow at supercritical pressure // J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2016. V. 2. Is. 3. P. 031019.
<https://doi.org/10.1115/1.4032479>
82. **Direct numerical simulation study for fluid-to-fluid scaling for fluids at supercritical pressure / J. He, J. Yan, W. Wang, S. He // 16th Intern. Heat Transfer Conf. 2018. Beijing, China, 10–15 Aug. 2018.**
83. **Kunik C., Otic I., Schulenberg T.** Large eddy simulations of turbulent flows at supercritical pressure // Proc. NURETH14-488. 2011. Toronto, Ontario, Canada, 25–29 Sept. 2011.
84. **Artemov V.I., Kudimkin I.S., Yankov G.G.** Numerical analysis of heat transfer and hydraulic resistance during an upward turbulent flow of supercritical pressure carbon dioxide in a heated tube // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1683. P. 022096.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022096>
85. **Bankston C.A., McEligot D.M.** Turbulent and laminar heat transfer to gases with varying properties in the entry region of circular ducts // Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. V. 13. Is. 2. P. 319–344.
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90110-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90110-9)
86. **Jackson J.D.** Progress in developing an improved empirical heat transfer equation for use in connection with advanced nuclear reactors cooled by water at supercritical pressure // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Nuclear Engineering. ICONE-17. Brussels, Belgium, 12–16 July 2009. Paper 76022.
87. **Categorizing and interpreting experimental data on forced and mixed convection to supercritical pressure fluids in heated tubes using physically-based models / J.D. Jackson, P.X. Jiang, B. Lin, C.R. Zhao // Proc. of 5th Intern. Symp. on Supercritical Water-Cooled Reactors. SCWR-2011. Vancouver, British Columbia, Canada, 13–16 March 2011. Paper 103.**
88. **Jackson J.D.** Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure // J. Nucl. Eng. Des.

2013. V. 264. P. 24–40.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.09.040>
89. **Kurganov V.A., Zeigarnik Yu.A., Maslakova I.V.** Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical–pressure coolants. Part I: Specifics of thermophysical properties of supercritical pressure fluids and turbulent heat transfer under heating conditions in round tubes (state of the art) // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2012. V. 55. Is. 11–12. P. 3061–3075.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.031>
90. **Kurganov V.A., Zeigarnik Yu.A., Maslakova I.V.** Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical–pressure coolants. Part II: Experimental data on hydraulic resistance and averaged turbulent flow structure of supercritical pressure fluids during heating in round tubes under normal and deteriorated heat transfer conditions // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. V. 58. Is. 1–2. P. 152–167.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.072>
91. **Kurganov V.A., Zeigarnik Yu.A., Maslakova I.V.** Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants. Part III: Generalized description of SCP fluids normal heat transfer. Empirical calculating correlations. Integral method of theoretical calculations // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. V. 67. P. 535–547.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.056>
92. **Kurganov V.A., Zeigarnik Yu.A., Maslakova I.V.** Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants. Part IV: Problems of generalized heat transfer description, methods of predicting deteriorated heat transfer; empirical correlations; deteriorated heat transfer enhancement; dissolved gas effects // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2014. V. 77. P. 1197–1212.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.014>

Verification of New-Generation Generalizing Correlations and the Results from Predictions and Theoretical Studies on Heat Transfer of Supercritical-Pressure Coolants

V. A. Kurganov^a, Yu. A. Zeigarnik^{a, *}, G. G. Yankov^b, and I. V. Maslakova^a

^a *Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT), Moscow, 125412 Russia*

^b *National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia*

**e-mail: zeigar@oivtran.ru*

Abstract—Heat transfer of supercritical–pressure (SCP) coolants continues to attract the attention of both researchers and engineers. Works on developing phenomenological models of the process, elaboration of universal computer codes, and search for reliable semiempirical generalizing correlations, primarily for deteriorated heat-transfer conditions, are continued. To ensure sufficiently accurate and reliable results obtained using these correlations and codes, they should be verified using the same array of experimental data (benchmark). This data array should be carefully selected, analyzed, and checked on the basis of many studies and practical engineering applications. The choice of data for verification should not be selective in nature; the more so, it should not be based solely on the experimental data of the authors of the proposed correlations. The article presents a tabulated summary of experimental studies on heat transfer and fluid dynamics of supercritical pressure water and carbon dioxide in round tubes. These studies cover normal and deteriorated heat-transfer conditions (with sorting into groups depending on the extent of influence caused by buoyancy and thermal acceleration effects) and data on pressure drop, velocity profiles, and tangential stresses. At the same time, these richest and practically tested data should be used in a very competent and accurate manner. Preference should primarily be given to the use of primary data reported in these studies, and it is not recommended to verify the new calculated data by applying the generalizing correlations from these studies obtained using the old standards on thermophysical properties. It is emphasized that the results from new calculations of heat transfer become essentially more valuable if they are accompanied by simultaneously obtained data on the flow hydraulic characteristics.

Keywords: coolant, supercritical pressure, hydrostatic resistance, normal heat transfer, deteriorated heat transfer, generalizing correlations, computer codes, verification