

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Абайдуллина Булата Равилевича «Критические режимы теплообмена при ламинарном течении обобщённой ньютоновской жидкости в реакторе коаксиального типа», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### *Актуальность темы диссертации*

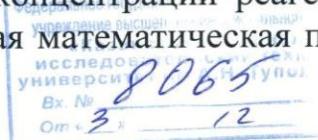
Диссертационная работа посвящена математическому и численному моделированию критических режимов теплообмена (теплового взрыва) в определённых случаях течения жидкости с нелинейными источниками теплоты в коаксиальном канале. Изучение таких явлений весьма важно для обеспечения безопасной работы оборудования, но довольно сложно в теоретическом отношении. И, несмотря на интерес исследователей к такого рода задачам, эта область далека от завершения. Поэтому указанная тематика исследований диссертации является актуальной.

### *Общая характеристика*

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 182 источников. Работа имеет довольно большой объём – 216 страниц текста с 89 рисунками и 3 таблицами.

В диссертации даётся обстоятельный обзор работ по теории теплового взрыва, предшествующих исследованиям автора (1 глава), а также описание схемы и работы технологической аппаратуры, на применение к которой ориентированы эти исследования (начало 2 главы). Далее во 2 главе излагается сущность методики, предлагаемой для расчёта безопасных режимов осуществления технологических процессов, в которых возможен тепловой взрыв. Методика опирается на три частные математические модели, разрабатываемые в этой главе. Сначала излагаются общие допущения, на основе которых строится исходная математическая модель установившегося процесса при ламинарном режиме в коаксиальном канале. Для описания зависимости вязкости от характеристик процесса предлагается использовать реологическую модель Кутателадзе-Хабахашевой, которая подробно обсуждается. На основе исходной модели сначала строится модель МБК для бесконечного коаксиального канала с неменяющимися по длине характеристиками режима. Любопытно, что температурное поле по этой модели при отсутствии диссиPATивного источника теплоты полностью совпадает с полем в покоящейся жидкости. Тепловой взрыв по этой модели означает резкую смену режима при некотором плавном изменении исходных параметров, и связан с существованием в некотором диапазоне параметров нескольких (трёх) решений.

Вторая модель МНУ должна описывать процесс в развитии. Так как его параметры меняются по мере движения среды по каналу, то здесь тепловой взрыв выражается в резком изменении температуры (и других параметров) в некотором месте канала. Третью модель МОР можно считать уточнением, обобщением второй, в частности, она учитывает изменение концентрации реагентов в ходе процесса. Для всех трёх моделей даётся размерная математическая постановка и делается переход к безразмерной.



Далее обсуждается численная реализация моделей, проводится тестирование разработанных методов и программ сравнением с известными аналитическими решениями, также строится численно-аналитическое решение для МБК. Сопоставления показывают работоспособность и достаточно высокую точность численного метода. В частности, им удаётся находить даже среднюю ветвь температурной кривой с неустойчивым решением. Проводится предварительное численное исследование особенностей процессов.

В третьей главе выполняются разносторонние численные исследования МБК и МНУ по установлению закономерностей процесса и его зависимости от различных параметров. Результаты представлены многочисленными двух- и трёхмерными графиками, дающими интересную информацию о проявлении критических режимов и их свойствах.

В четвёртой главе проводятся подобные расчёты по модели МОР, ориентированные на практические данные реального технологического процесса. Рассматривается алгоритм определения диапазонов управляющих параметров, обеспечивающих отсутствие опасных режимов, даются соответствующие рекомендации с примерами практического характера по реальным данным.

#### *Новые научные результаты*

В диссертации разработаны математические и численные модели тепломассопереноса, учитывающие критические режимы теплообмена при ламинарном течении жидкости с нелинейными источниками теплоты в коаксиальном канале. Случай таких каналов типичен для промышленной аппаратуры, но ранее не рассматривался. Кроме того, решен вопрос об учёте в этих моделях реологической зависимости вязкости от распределений температуры и скорости.

По результатам численных исследований выявлены закономерности изменения характеристик процесса теплопереноса в условиях критического режима теплообмена в таком течении.

Предложен алгоритм определения условий возникновения критического режима, представлены рекомендации по выбору безопасных режимов в промышленном оборудовании с коаксиальными каналами.

#### *Теоретическая и практическая значимость результатов, рекомендации по использованию*

Результаты работы представляют интерес для теории критических режимов теплообмена (теплового взрыва) в движущихся жидких средах. Они позволяют проводить расчёт безопасных режимов работы технологических реакторов коаксиального типа, в частности, для производства полиметакрилатов, и могут быть использованы в соответствующих проектных организациях.

*Обоснованность и достоверность результатов* обеспечивается использованием известных апробированных подходов к моделированию и методов расчёта, хорошим согласованием тестовых расчётов с известными решениями.

### *Замечания по материалу.*

1. В работе не указаны и не пояснены допущения, при которых получены упрощенные уравнения движения в моделях МНУ и МОР из общей модели (2.1) (то есть переходы  $(2.1) \rightarrow (2.17)$  и  $(2.1) \rightarrow (2.23) \rightarrow (2.32)$ ). Ссылка на «допущения ... в 2.2» (на самом деле 2.3) представляется неправомерной, так как все они уже использованы в (2.1). Видимо, пренебрегается инерцией и производными скоростей, малыми за счёт различия продольного и поперечного масштабов. Но справедливо ли это в окрестности теплового взрыва?

Также не поясняется использование (2.18) (отбрасывание начального гидродинамического участка), и почему такой приём не применяется для  $T$ . Неясно, почему в расчётах на рис.3.9  $\theta = \theta(\tilde{r}) \neq 0$  при  $\tilde{z} = 0$ , хотя в граничных условиях (2.21)  $\theta|_{\tilde{z}=0} = 0$  (и аналогично рис.3.12 и 3.23, хотя  $\tilde{V}|_{\tilde{z}=0} = 0$  в (2.21))?

Вызывают вопросы принимаемые в МОР граничные условия 1-го рода (2.24) на стенках канала для концентраций  $M = 0$  и  $J = 0$ .

2. Одним из основных моментов исследований в работе является учёт диссипативного тепловыделения. Говорится «о существовании гидродинамического теплового взрыва» (стр.106), и что если диссипативный источник и не приводит к критическому режиму, то вместе с химическим источником существенно влияет на его возникновение (стр.161, 183–186). Вопрос исследуется и по расчётом  $I_2$  (рис. 3.13, 3.24, 4.7, а также 3.16, 3.27, 4.19). Но всё это рассматривается в абстрактной постановке с безразмерными переменными. Вклад диссипативного тепловыделения в реальных, практических случаях, в частности, по сравнению с отброшенными в моделях факторами, остался невыясненным, условия, когда его надо или не надо учитывать, не сформулированы (“взрыв” при  $\chi > 5,8$ , стр.185, а “практическое”  $\chi = 7,8 \cdot 10^{-6}$  на стр.163).

3. В «Выводах» на стр.101, конец п.3, (то же в автореф. на стр.10, около рис.2) указано как необходимое условие  $h_z/h_r^2 \leq 0,5$ , и тут же «получено и использовано наименьшее значение ...  $h_z = h_r = 0,025$ ». Но тогда  $h_z/h_r^2 = 40!?$  Кстати, я не нашёл, где всё это «получено», только про «использовано» на стр.81 в виде  $h_{\tilde{z}} = h_{\tilde{r}} = 0,0025$ , когда вообще  $h_{\tilde{z}}/h_{\tilde{r}}^2 = 400$ , а значения меньше минимально допустимого 0,025!

В тех же «Выводах», стр.101, п.4 упоминается о расчёте по методу Адамса, хотя в тексте это не излагается.

### *Оценка изложения и оформления.*

Изложение и оформление можно считать удовлетворительными, хотя встречаются нечёткость изложения, стилистические и технические дефекты, опечатки. Так, в первых уравнениях систем (2.13) и (2.17), видимо, ошибочный минус перед правой частью; во втором уравнении (2.17) пропущено равенство; в (2.19) оставлен лишний интеграл ( $\int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi$ ); в п.2.4 к функциям одной переменной  $v(r)$  и  $T(r)$  применяется частная производная (символы  $\partial v/\partial r$ ) вместо полной ( $dv/dr$ ); в «Заключении» (стр.199) пропущен первый пункт, и т.д.. Неясен порядок в списке литературы. Нет шрифтового выделения подзаголовков.

Иногда технические дефекты встречаются и в автореферате, но в целом он правильно отражает содержание диссертации. Правда, по-моему, в нем недостаточно раскрыто содержание численно-аналитических исследований, результаты которых выносятся на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы, в том числе в 4 статьях из списка ВАК. Тематика работы отвечает паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### *Заключение.*

Диссертация Абайдуллина Булата Равилевича представляет собой научно-квалификационную работу, содержащую решение задачи о критическом режиме теплообмена в коаксиальных каналах, имеющее существенное значение для теории теплового взрыва. Полученные результаты имеют прикладное значение для процессов химической технологии. Выполнение исследований потребовало большой серьёзной работы. Материал демонстрирует высокую квалификацию автора, его готовность к самостоятельной научной деятельности. Считаю, что диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор Абайдуллин Булат Равилевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Якимов Николай Дмитриевич  
профессор кафедры теоретических  
основ теплотехники

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
420066, г. Казань,

ул. Красносельская, 51,  
8(843)519-42-02, 562-43-25,

доктор физико-математических наук,  
профессор

11 ноября 2015 г.

*Николай*



## СВЕДЕНИЯ О ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Абайдуллина Булата Равилевича

«Критические режимы теплопереноса при ламинарном течении обобщенной ньютоновской жидкости в реакторе коаксиального типа», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности

01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

№	Фамилия, Имя, Отчество	Учёная степень, ученое звание	Сведения о работе		Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)
			Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразде- ления	
1	2	3	4	5	6
1	Якимов Николай Дмитриевич	Д.Ф.-м.н профессор	ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51	профессор кафедры теоретичес- ких основ теплотехники	1) Kacimov A.R., Yakimov N.D. Minimal advective travel time along arbitrary streamlines of porous media flows: the Fermat–Leibnitz–Bernoulli problem revisited. // Journal of Hydrology. 375, 3–4, 2009. Pp.356–362 2) Халитов Ф.Г., Якимов Н.Д., Круглов В.И., Григорьева О.В. Термодинамика и тепломассообмен: лабораторные работы: учебно–методическое пособие/ Ф.Г. Халитов, Якимов Н.Д., Круглов В.И., Григорьева О.В. – Казань: Казан. гос. энерг. ун–т. 2010. 40 с. 3) И.В.Степанов, Н.Д.Якимов. Численная модель подземного влагопереноса с гистерезисом характеристик // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 2012, № 1–2. С. 191–194 4) Ч.И.Галиева, М.Г.Храмченков, Н.Д.Якимов. Численное моделирование массопереноса в процессах карстообразования // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 2012 № 3–4. С. 139–141

Якимов Н.Д.