На правах рукописи

Абайдуллин Булат Равилевич

КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ОБОБЩЕННОЙ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В РЕАКТОРЕ КОАКСИАЛЬНОГО ТИПА

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Казань - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Казанского научного центра Российской академии наук Исследовательском центре проблем энергетики в лаборатории теплофизических исследований (с 01.04.2015 ФГБУН КазНЦ РАН, лаборатории ТФИ)

Научный руководитель: доктор технических наук **Вачагина Екатерина Константиновна.**

Официальные оппоненты: **Якимов Николай Дмитриевич**, доктор физ-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВПО Казанский энергетический университет, профессор «Теоретические основы теплотехники»;

Багоутдинова Альфия Гиззетдиновна, кандидат технических наук, ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», доцент кафедры «Экономико-математического моделирования».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Казанский государственный национальный исследовательский технологический университет, кафедра «Теоретические основы теплотехники», г. Казань.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.02, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ» и на сайте http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Каримова А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Теоретические исследования процессов, в которых происходит явление прогрессивного нарастания температуры, а также проблемы, возникающие в результате этих явлений, в процессе эксплуатации различных теплоэнергетических установок привели к возникновению самостоятельного раздела в науке – теории теплового взрыва.

В классической теории, к которой относятся работы Н.Н. Семенова, О.М. Тодеса, Я.Б Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, явление теплового взрыва определяется как резкий переход от малоинтенсивных тепловыделений к более интенсивным. Для обеспечения безопасности проведения производственных процессов, в которых возможно возникновение явления теплового взрыва, необходимо выявить причины возникновения этого явления, а так же указать на способы управления процессами теплопереноса в теплоэнергетических установках.

В настоящее время накоплен большой опыт исследований влияний некоторых определяющих факторов на возникновение явлений теплового взрыва в производстве. Однако не проведены расчеты тепловых процессов и не описаны характеры влияний этих факторов, в частности для непрерывного процесса производства полимеров.

В связи с тем, что задача по определению безопасных режимов работы технологического оборудования ставит целью получение практических рекомендаций по проведению производственных процессов, необходимо разработать и предложить простую последовательность для расчета диапазонов регулировки управляющих процессом теплообмена параметров.

В настоящее время перспективными на производстве считаются проточные реакторы с коаксиальной геометрией, в связи с тем, что они имеют большую поверхность теплообмена по сравнению с трубчатыми реакторами, а при наличии ленточной вставки коаксиальные реакторы не имеют аналогов по скорости и качеству получаемого продукта. Также большинство теплообменных аппаратов энергетических установок составлены из каналов коаксиальной геометрии, в которых в качестве рабочих сред используются неньютоновские жидкости.

При решении такого рода проблем и задач наиболее эффективен метод математического моделирования. Известные в настоящее время математические модели позволяют решать перечисленные выше задачи, но они не учитывают химическую кинетику процессов, и как следствие влияние состава и физико-химических свойств рабочих сред.

Целью работы является определение условий возникновения и исследование явлений критического режима теплообмена (явления теплового взрыва) для задач сопряженного тепломассопереноса при течении обобщенных ньютоновских жидкостей в коаксиальных каналах и установление диапазонов варьирования управляющих параметров, обеспечивающих безопасное проведение производственных процессов.

Для этого необходимо решение следующих **задач**:

- разработка математических моделей стационарного теплопереноса при

ламинарном движении обобщенных ньютоновских сред на начальном тепловом участке коаксиального канала и тепломассопереноса в проточном реакторе коаксиального типа при тепловых граничных условиях первого рода;

- проведение численных исследований для определения условий возникновения критических режимов теплообмена при ламинарном течении высоковязких обобщенных ньютоновских жидкостей в каналах с коаксиальной геометрией при наличии химического и диссипативного источников тепловыделений, нелинейно зависящих от температуры;
- разработка алгоритма последовательного расчета для получения диапазонов варьирования управляющих параметров, обеспечивающих безопасные режимы проведения процессов, а также разработка рекомендаций по безопасному проведению процессов.

Научная новизна выполненных исследований:

- предложены математические модели тепломассопереноса учитывающие критический режим теплообмена при наличии нелинейных источников тепловыделений в обобщенных ньютоновских жидкостях и дано их обоснование;
- по результатам численных исследований установлены условия возникновения критического режима теплообмена, а также представлены рекомендации по выбору способов безопасного проведения процесса в промышленном оборудовании, рабочие поверхности которых представляют собой коаксиальные каналы;
- выявлены закономерности изменения характеристик процесса теплопереноса в условиях критического режима теплообмена, включая деформирование профиля продольной компоненты скорости, перестройку профиля вязкости.

Достоверность работы обеспечивается использованием стандартных уравнений, моделирующих рассматриваемые процессы тепломассопереноса, и использованием современных стандартных численных методов решения систем дифференциальных уравнений.

Практическое значение

Разработанная в работе методика определения условий безаварийного (без возникновения теплового взрыва) проведения процесса дает возможность установить диапазоны варьирования управляющих параметров, обеспечивающих безопасные режимы проведения процесса. Представленные математические модели позволяют рассчитать границы безопасного управления процессами в заданном конкретном случае на производстве. Результаты численных исследований могут быть использованы для прогнозирования работы теплообменного оборудования в различных отраслях химических производств.

На защиту выносятся:

- математические модели тепломассопереноса в условиях критического режима теплообмена при наличии нелинейных источников тепловыделений в в обобщенных ньютоновских жидкостях;
- результаты численно-аналитических исследований критического режима теплообмена при течении в обобщенной ньютоновской жидкости в

бесконечном коаксиальном канале, зависимости максимальной температуры в канале от интенсивности химического источника тепловыделения;

- результаты численных исследований стационарного тепломассопереноса при ламинарном течении обобщенных ньютоновских жидкостей в коаксиальном канале;
- алгоритм последовательного расчета для получения диапазонов варьирования управляющих параметров, обеспечивающих безопасные режимы проведения процессов, и рекомендации по безопасному проведению процессов.

Личное участие. Основные результаты получены лично автором под руководством член-корр. РАН, д.т.н, профессора Назмеева Ю.Г и д.т.н. Вачагиной Е.К. Автором написаны на языке Си++ программы для расчета диапазонов критического режима теплообмена в бесконечном коаксиальном канале и коаксиальном реакторе. Автором лично проведены численные эксперименты по расчету диапазонов критического режима теплообмена в бесконечном коаксиальном канале и коаксиальном реакторе со сравнением с аналитическими и экспериментальными данными.

Реализация результатов исследования.

Работа выполнена в рамках ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 годы” (государственный контракт с ФАНИ № 02.434.11.5009), ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы” (государственный контракт с ФАНИ № 02.516.11.6025), программы Президиума РАН П-09 “Исследование вещества в экстремальных условиях”, гранта РФФИ № 05-08-50043-а, ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы, государственный контракт № П1115.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на: итоговых научных конференциях за 2005 - 2013 гг. КазНЦ РАН, г. Казань; XIV Симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 2008; Национальной конференции по теплоэнергетике НКТЭ-2006, Казань, 2006; VII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск, 2006; XXI Всероссийском семинаре по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Новосибирск, 2007; XV Международной молодежной научной конференции “Туполевские чтения”, Казань, 2007; VII, VIII, IX Международных конференциях по неравновесным процессам в соплах и струях, Алушта, 2008-2012; ежегодных аспирантских семинарах КазНЦ РАН 2005-2013 гг; V и VI школах-семинарах академика РАН В.Е. Алемасова за 2006 и 2008 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 статей, из них 4 статьи входят в перечень ВАК, 11 тезисов докладов, зарегистрирована 1 программа для ЭВМ, получен 1 патент.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 216 страницах машинописного текста; состоит из введения, четырех глав и выводов, включая 3 таблицы и 89 иллюстраций, списка литературы из 182 источников отечественных

и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы данной диссертационной работы, определены ее основные цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализированы и обобщены результаты по существующим методам расчетов тепломассообмена в условиях критических режимов и моделированию гидродинамических и тепловых процессов. Также приведены основные определения и понятия теории теплового взрыва. Проведена оценка существующих классических и неклассических моделирующих систем уравнений, их структуры, возможностей и недостатков. Установлено, что для эффективного решения теоретических и практических задач на производстве необходимо создание методики, включающей в себя различные математические модели, и позволяющей проводить расчеты для создания технологии управления производственными процессами при эксплуатации промышленного оборудования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей для расчета критических режимов при теплообмене реагирующей обобщенной ньютоновской жидкости, текущей в коаксиальном канале с постоянной температурой на стенках.

После анализа литературных данных и существующих математических моделей процессов теплопереноса в условиях критических режимов осуществлено построение моделей процессов тепло- и тепломассопереноса с использованием реокинетической модели процессов тепломассопереноса, описанной в работах Назмеева Ю.Г. В ранних работах этого автора приведены оценки адекватности предложенных им моделей экспериментальным данным, показаны их преимущества и недостатки.

В этой главе приведены общие этапы предложенной методики определения диапазонов безопасного проведения процессов в условиях возможности возникновения критических режимов теплообмена.

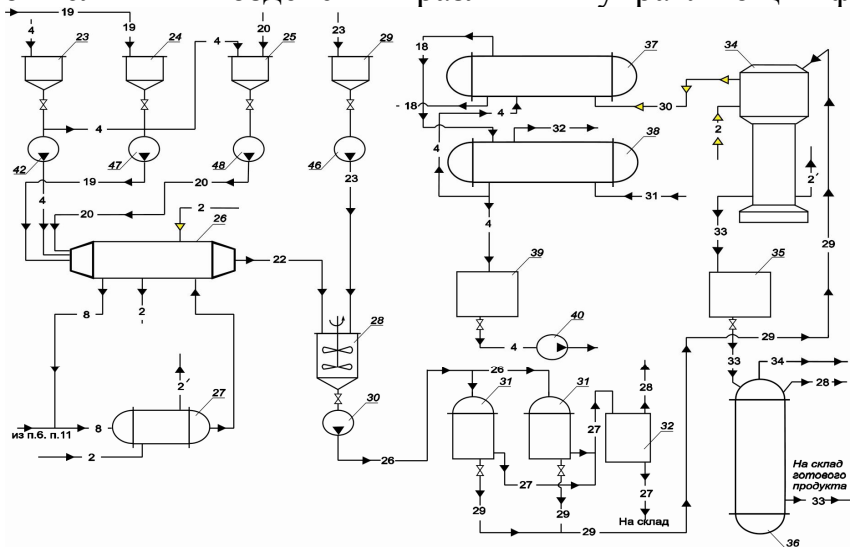
Рассматриваемая часть технологической схемы непрерывного производства полиметакрилатов, для которой была применена методика, представлена на рис. 1а. Полная схема представлена в технологическом регламенте № 8-75 производства полиметакрилата марки “Д” и в технологическом регламенте № 91-80 производства присадки полиметакрилатной марки “В-2” в Дзержинском ПО “Оргстекло”. Была выбрана та часть схемы, которая обслуживает непосредственно рассматриваемый в работе реактор полимеризации. Реактор - полимеризатор 26 представлен на рис 1б.

На схеме рис. 1а присутствуют следующие аппараты: 23-сборник- мерник толуола; 24-сборник- мерник эфиризата; 25-аппарат приготовления раствора перекиси бензоила в толуоле; 26-реактор - полимеризатор; 27-теплообменник; 28-аппарат смешения полимеризата с маслом; 29-сборник- мерник масла; 30-насос-дозатор подачи смеси полимеризата с маслом; 31-фильтр; 32-сборник присадки с поддона фильтров; 33-емкость кислого эфиризата; 34-пленочный испаритель; 35-подземная емкость готовой присадки; 36-монжус готовой присадки; 37-водяной

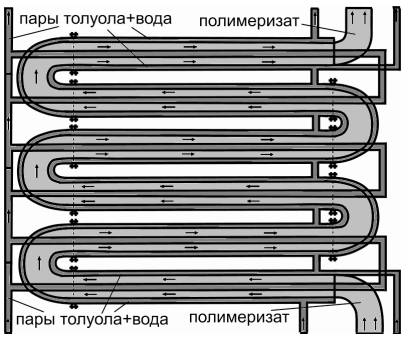
холодильник; 38-рассольный холодильник; 39-емкость толуола; 40-насос-перекачки толуола; 41-шнековый питатель для гидрохинона; 42-насос- дозатор толуола; 43-насос- дозатор метакриловой кислоты; 44-насос- дозатор спиртов; 45-насос- дозатор щелочи; 46-насос- дозатор масла; 47-насос- дозатор эфиризата; 48-насос- дозатор перекиси бензола в толуоле.

Для изучения критического режима теплообмена в коаксиальных реакторах и каналах, подводящих и отводящих реагенты в реакторе, введены три математические модели процессов теплопереноса в условиях критических режимов в каналах с коаксиальной геометрией.

Модель процесса теплопереноса в бесконечном коаксиальном канале (МБК). Моделируется установившийся по длине канала процесс теплопереноса при течении обобщенной ньютоновской жидкости в коаксиальном канале на удалении от его входа при заданной постоянной температуре на стенках. На основании этой модели определяются тепловые режимы, существующие в канале в зависимости от величины воздействия различных управляющих факторов.



а



б

Рис. 1. Технологическая схема непрерывного производства полиметакрилата марки В2 10% второй и третьей стадии.

Исходная моделирующая система уравнений в безразмерном виде была представлена в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\tilde{\mu}\dfrac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right) = -(\sigma+\tilde{r}), \\ \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}}\right) + \chi(\sigma+\tilde{r})\cdot\tilde{\mu}\tilde{I}_2 + \delta(\sigma+\tilde{r})e^{\frac{\theta}{1+\beta\theta}} = 0. \end{cases} \qquad (1)$$

Граничные условия представлялись в виде:

$$1.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=0} = 0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=0} = 0,$$

$$2.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=1} = 0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=1} = 0. \qquad (2)$$

Безразмерная динамическая вязкость и скорость сдвига имели вид:

$$\tilde{\mu} = \exp\left(-\frac{\alpha\theta}{1+\beta\theta}\right)\cdot\frac{1}{c_0-(c_0-1)\cdot\exp\left(-c_1\tilde{\mu}\sqrt{\tilde{I}_2}\right)}, \qquad \tilde{I}_2 = \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right)^2. \qquad (3)$$

Модель процесса теплопереноса на начальном тепловом участке в

коаксиальном канале (МНУ). Моделируется теплообмен при течении высоковязкой обобщенной ньютоновской жидкости в коаксиальном канале в условиях постоянной поддерживаемой температуры на стенках, и при заданной температуре на входе в канал. После перехода к безразмерной постановке система уравнений, описывающая теплоперенос на начальном тепловом участке в коаксиальном канале записывалась следующим образом:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\tilde{\mu}\dfrac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right) = -(\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{z}}, \\ \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}((\sigma+\tilde{r})\tilde{V}) + (\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{z}} = 0, \\ \gamma(\sigma+\tilde{r})\left(\tilde{V}\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} + \tilde{W}\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{z}}\right) = \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}}\right) + \delta(\sigma+\tilde{r})\exp\left(\dfrac{\theta}{1+\beta\theta}\right) + \chi(\sigma+\tilde{r})\tilde{\mu}\tilde{I}_2, \end{cases} \tag{4}$$

а граничные условия первого рода имели вид:

$$\begin{aligned} &1.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=0} = 0,\ \tilde{V}\big|_{\tilde{r}=0} = 0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=0} = 0, \\ &2.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=1} = 0,\ \tilde{V}\big|_{\tilde{r}=1} = 0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=1} = 0, \\ &3.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{z}=0} = \tilde{W}_0(r),\ \tilde{V}\big|_{\tilde{z}=0} = 0,\ \theta\big|_{\tilde{z}=0} = 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Вязкость в (4) представляется формулой (3), а второй инвариант тензора скоростей деформации имел вид:

$$\tilde{I}_2 = \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right)^2 + 2\xi\left(\left(\frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{r}}\right)^2 + \frac{\tilde{V}^2}{(\sigma+\tilde{r})^2} + \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{z}}\right)^2\right). \tag{6}$$

Модель процесса тепломассопереноса в однофазном реакторе коаксиального типа (МОР).

В модели МОР описывается непрерывный процесс гомофазной полимеризации в реакторе коаксиального типа при заданных концентрациях реагентов и температуре смеси на входе в него и на стенках. Данная модель позволяет определить степень влияния выгорания вещества на критические режимы тепломассообмена в различных областях реактора. Она имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\tilde{\mu}(\tilde{I}_2,\theta)\dfrac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right) = -(\sigma+\tilde{r})\displaystyle\int_0^1 \tilde{\mu}(\tilde{I}_2,\theta)\left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}}\right)^2(\sigma+\tilde{r})d\tilde{r}, \\ \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}((\sigma+\tilde{r})\tilde{V}) + (\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{z}} = 0, \\ (\sigma+\tilde{r})\left(\gamma\tilde{V}\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} + \gamma\tilde{W}\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{z}}\right) = \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}}\right) + \delta(\sigma+\tilde{r})\tilde{M}^m\tilde{J}^n\exp\left(\dfrac{\theta}{1+\beta\theta}\right) + \chi(\sigma+\tilde{r})\tilde{\mu}(\tilde{I}_2,\theta)\tilde{I}_2, \\ (\sigma+\tilde{r})\left(\gamma_M\tilde{V}\dfrac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_M\tilde{W}\dfrac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{z}}\right) = \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}}\right) - \delta_M(\sigma+\tilde{r})\tilde{M}^m\tilde{J}^n\exp\left(\dfrac{\theta}{1+\beta\theta}\right), \\ (\sigma+\tilde{r})\left(\gamma_J\tilde{V}\dfrac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_J\tilde{W}\dfrac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{z}}\right) = \dfrac{\partial}{\partial \tilde{r}}\left((\sigma+\tilde{r})\dfrac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}}\right) - \delta_J(\sigma+\tilde{r})\tilde{J}^n\exp\left(\dfrac{\theta}{1+\beta_J\theta}\right). \end{cases} \tag{7}$$

Граничные условия первого рода имели вид:

$$1.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=0}=0,\ \tilde{V}\big|_{\tilde{r}=0}=0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=0}=0,\ \tilde{M}\big|_{\tilde{r}=0}=\frac{\overline{M}}{M_0},\ \tilde{J}\big|_{\tilde{r}=0}=\frac{\overline{J}}{J_0},$$

$$2.\ \tilde{W}\big|_{\tilde{r}=1}=0,\ \tilde{V}\big|_{\tilde{r}=1}=0,\ \theta\big|_{\tilde{r}=1}=0,\ \tilde{M}\big|_{\tilde{r}=1}=\frac{\overline{M}}{M_0},\ \tilde{J}\big|_{\tilde{r}=1}=\frac{\overline{J}}{J_0}, \qquad (8)$$

$$3.\ \tilde{M}\big|_{\tilde{z}=0}=1,\ \tilde{J}\big|_{\tilde{z}=0}=1,\ \theta\big|_{\tilde{z}=0}=0,\ \tilde{\mu}\big|_{\tilde{z}=0}=1,\ \tilde{V}\big|_{\tilde{z}=0}=0,\ \tilde{W}\big|_{z=0}=\tilde{W}_0(r).$$

Динамическая вязкость в безразмерном виде, имела вид:

$$\tilde{\mu}=\frac{1}{\tilde{\varphi}}=\frac{1}{\tilde{\varphi}_\infty-(\tilde{\varphi}_\infty-c_8\tilde{\varphi}_0)\cdot\exp\left(-c_9\tilde{\Theta}\dfrac{c_7\tilde{\tau}}{\tilde{\varphi}_\infty-c_8\tilde{\varphi}_0}\right)},\quad \tilde{\varphi}_\infty=(c_1-(1-\tilde{M}))\cdot\exp\left(\frac{-c_2+c_3(1-\tilde{M})}{\beta(1+\beta\theta)}\right), \qquad (9)$$

$$\tilde{\varphi}_0=(c_4-(1-\tilde{M}))\cdot\exp\left(\frac{-c_5+c_6(1-\tilde{M})}{\beta(1+\beta\theta)}\right),\quad \tilde{\Theta}=(1-\tilde{M})\cdot\exp\left(\frac{-c_5+c_6(1-\tilde{M})}{\beta(1+\beta\theta)}\right),\quad \tilde{\tau}=\tilde{\mu}\sqrt{\tilde{I}_2} \qquad (10)$$

Второй инвариант тензора скоростей деформации представлен в формуле (6).

В моделях (1-10) приняты обозначения аналогичные классической теории теплового взрыва (Франк-Каменецкий и др.).

Представленные три модели независимы, и могут использоваться для решения самостоятельных задач. Например, модель бесконечного коаксиального канала может использоваться для изучения критических режимов теплообмена в процессах, происходящих в трубах большой протяженности (транспортные трубы) и т.д.

При построении математических моделей приняты основные допущения, приведена реологическая модель рассматриваемых сред, показан логический переход от одной модели к другой.

Представленное математическое описание процессов теплопереноса основано на системе уравнений переноса энергии, количества движения, массы. Оно обеспечивает (при принятых в работе допущениях) адекватность моделирования тепломассопереноса при течении жидкости в коаксиальном канале и может служить основой для построения специализированной модели и фундаментом для создания технологии предупреждения критических режимов.

Реальный технологический процесс проводится в конкретных аппаратах, которые включают в себя каналы, подводящие реагенты, сами реакторы и каналы, отводящие реагенты. Для описания всего процесса полимеризации используются все три представленные выше модели.

В классической теории теплового взрыва применяются некоторые допущения такие как, например, излишне упрощенная форма представления процессов в реакторе и химических реакций в нем. В результате в подобной теории отсутствует возможность для учета взаимного влияния тепловых и гидродинамических полей. Предложенные в настоящей работе модели лишены этих недостатков.

В настоящей главе представлена методика численного расчета процессов тепломассопереноса, в условиях критического режима теплообмена в коаксиальном канале. Для увеличения точности и простоты численного расчета

была предложена стандартная методика послойного расчета системы уравнений тепломассопереноса в проточном реакторе полимеризации. Эта методика основана на делении длины канала на слои и использовании в качестве начального приближения для расчета искомых неизвестных на данном слое решение задачи на предыдущем слое. В диапазонах изменения параметров задачи, необходимая точность и сходимость разностной схемы достигалась при $h_z / h_r^2 \le 0{,}5$.

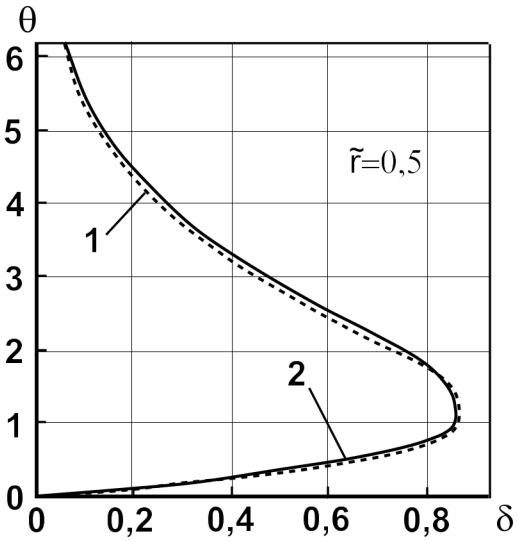


Рис. 2. Результаты апробации метода решения и математической модели.

В работе получено и далее использовано наименьшее значение шага по радиусу и по длине ($h_z = h_r = 0{,}025$), дальнейшее уменьшение которого не приводит к увеличению точности.

В данной главе проведена апробация модели МБК и метода решения на основании сравнений с результатами работ Д.А. Франк-Каменецкого. При поиске литературы в классической теории теплового взрыва не было найдено работ по аналитическому решению задачи теплового взрыва в бесконечном коаксиальном канале. Поэтому было произведено сравнение решений полученных в модели МБК с плоскопараллельным каналом (когда $\sigma \to \infty$).

На рис. 2 а представлены для сравнения зависимости $\theta(\delta)$ для бесконечного плоскопараллельного канала, полученные численным методом (предлагаемом в работе (кривая 1) при $\sigma = 10$), аналитическим методом (представленном в классической теории теплового взрыва Д.А. Франк-Каменецким (кривая 2)).

Разница между решениями составила в среднем 0,8 % для нижней ветви решений и 3,6% для неустойчивой средней ветви решений.

После проведения апробации математической модели и метода решения были проведены численные исследования и построены зависимости определяющих процесс характеристик в различных точках геометрической области, представляющей собой коаксиальный канал в зависимости от определяющих параметров.

Установлено, что начало прогрессивного нарастания температуры начинается на некотором значении z_k при любой радиальной координате, кроме граничных точек, и в связи с этим результаты дальнейших численных исследований было

решено иллюстрировать в точке $\tilde{r} = 0{,}5$, $\tilde{z} = 0{,}5$.

В третьей главе представлены результаты решения задачи теплопереноса при сформировавшемся по длине профиле температуры и продольной компоненты скорости, а также результаты решения задачи теплопереноса на начальном участке коаксиального канала при ламинарном установившемся напорном течении обобщенной ньютоновской жидкости между стенками внешнего и внутреннего цилиндров, с учетом и диссипативного и химического источника тепловыделения.

Задача стабилизировавшегося по длине теплообмена при течении жидкости в канале бесконечной длины сначала решается при различных значениях параметра δ, отвечающего различным интенсивностям химического источника тепла, при этом учитывается малая интенсивность диссипативных тепловыделений. При получении зависимостей использовалась модель МБК, формулы (1)-(3).

Особое внимание уделялось критическим режимам. Под критическими режимами понимаются те значения параметров, при которых происходит резкое скачкообразное нарастание температуры в канале.

На рис. 3а представлена зависимости значения температуры θ в точке $\tilde{r} = 0{,}5$ от параметра δ при различных σ. Из графика $\theta = \theta(\delta)$ для $\sigma = 0{,}02$ видно, что при δ<1,46 зависимость $\theta = \theta(\delta)$ является однозначной, и при увеличении параметра δ, будет происходить увеличение температуры. При δ>1,46 появляется область неоднозначности решений, существует отрезок значений δ, на котором одному и тому же значению δ соответствует уже несколько значений температуры θ. При $\delta \geq 3{,}28$ также будет происходить плавное нарастание температуры при увеличении δ. Таким образом, совокупность значений δ условно делится на три интервала. Первому интервалу (0;1,46) соответствует разогревание жидкости на начальном этапе (низкотемпературный режим). Третьему интервалу (3,28; +∞) соответствует высокотемпературный режим. Второй интервал (1,46;3,28) представляет для исследования наибольший интерес, потому что именно на этом интервале нет однозначного соответствия между δ и θ. Одному значению, например $\delta = 3$ соответствует несколько значений температуры: 0,69; 12,8; 164,13. Решения, соответствующие средней ветви кривой неоднозначности решений $\theta = \theta(\delta)$ неустойчивы, а решения, соответствующие верхней и нижней ветвям кривой – устойчивы. В силу того, что в классической теории нет апробации верхней ветви решений, далее в работе во всех случаях она обозначена штриховыми линиями. В классической теории химический источник представлен в менее точном виде - δe^{θ}, чем в данной работе - $\delta e^{\theta/(1+\beta\theta)}$, поэтому в ней не были получены верхние ветви решений. При малом изменении параметра δ значение θ, соответствующее средней ветви кривой $\theta = \theta(\delta)$ может перейти с нижней ветви на верхнюю. Исходя из этого, можно говорить, что участок неоднозначности решений представляет собой интервал критических точек.

Установлено, что совокупность значений δ для зависимости $\tilde{W}$ от δ (рис. 3 б), как и для температуры θ, также условно делится на три интервала. Первому интервалу (0;1,46) соответствует медленное течение жидкости на начальном этапе (низкоскоростной режим), третьему интервалу (3,28; +∞) - высокоскоростной

режим. Во втором интервале (0,69;3,28) нет однозначного соответствия между δ и $\widetilde{W}$. Таким образом, на данном участке может произойти переход с одной ветви решений на другую (резкое увеличение скорости) при малом изменении параметра δ. Однако при постоянном расходе такой переход не осуществляется.

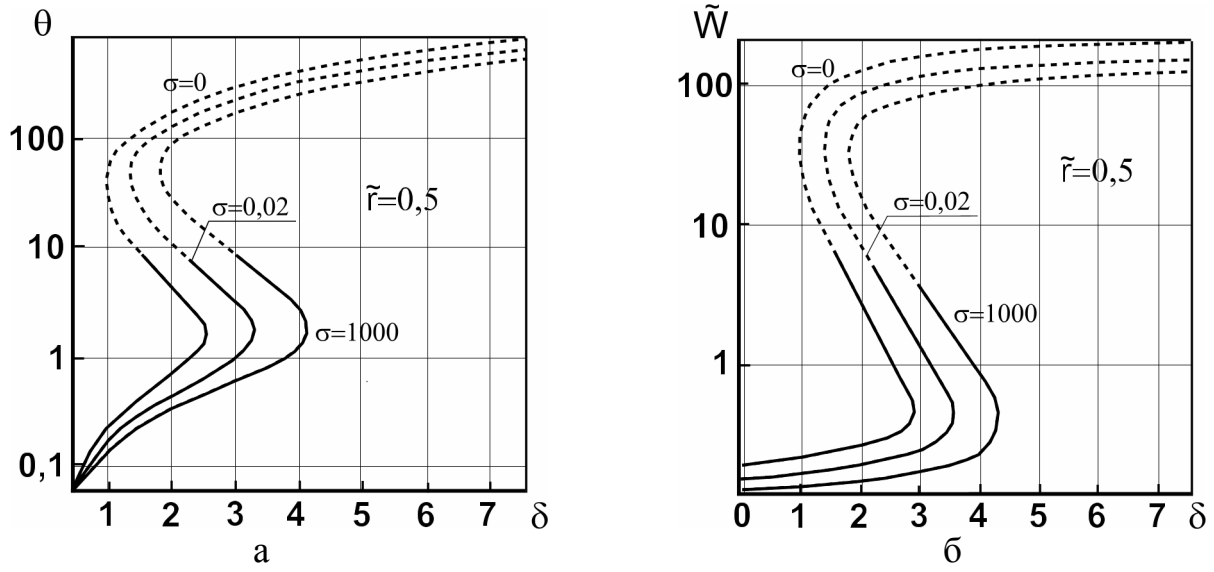


Рис. 3. Зависимости безразмерной температуры θ компоненты скорости $\widetilde{W}$ от параметра δ, при $\tilde{r} = 0{,}5$.

Аналогично были построены зависимости $\widetilde{W}$ и θ от других определяющих параметров $\alpha, \beta, \chi, \sigma, c_0, c_1$, характеризующих интенсивность химического источника тепловыделений, реологию среды, геометрию канала, вид используемой жидкости. Для этих зависимостей также были определены три интервала значений параметров.

Далее в этой главе рассмотрена задача теплообмена при течении жидкости на начальном тепловом участке коаксиального канала. Рассматривалась модельная задача теплопереноса при течении реагирующей жидкости при постоянных концентрациях катализирующих химическую реакцию веществ, что с большими допущениями может происходить в проточных реакторах, либо в каналах, выводящих продукты после химической реакции. В данных каналах может существовать критический или близкий к критическому режим, когда температура в какой-то области канала может резко увеличиться и может произойти тепловой взрыв или разрушение канала.

При решении задачи теплопереноса на начальном тепловом участке значения параметров, при которых на некоторой длине $\tilde{z}$ происходит резкое нарастание температуры являются критическими.

Были рассмотрены все определяющие процесс характеристики, зависимости $\theta = \theta(\tilde{z})$, $\tilde{\mu} = \tilde{\mu}(\tilde{z})$, $\widetilde{W} = \widetilde{W}(\tilde{z})$, $\tilde{V} = \tilde{V}(\tilde{z})$ при варьировании значений одного управляющего параметра δ. При этом остальные определяющие режим параметры при получении этих зависимостей были зафиксированы. При получении зависимостей использовалась модель МНУ, формулы (4)-(6).

Каждый график на рис. 4, показывающий распределение температуры по длине $\tilde{z}$ в коаксиальном канале, отвечает разным значениям параметра δ. Как

следует из рис. 4, каждому критическому значению δ, соответствует свое значение $\tilde{z}$, на котором возникает критический режим теплообмена. На основе полученных результатов введены понятия критической и предкритической областей в канале. Значения $\tilde{z} < 0{,}55$ считались областью предкритического режима теплообмена, $\tilde{z} \geq 0{,}55$ - область критического режима теплообмена (для $\delta = 5$). Как видно из рис. 4, при увеличении значений параметра δ, область предкритического теплообмена уменьшается. На рис. 4 также показаны графики распределения вязкости $\tilde{\mu}$ по длине, при значении $\delta = 2$ и при четырех ($\delta = 5$, $\delta = 6$, $\delta = 7$, $\delta = 60$) критических значениях параметра δ.

На рис. 4 видно, что при критическом значении $\delta = 5$ прогрессивное нарастание температуры θ начинается в точке $\tilde{z} = 0{,}55$. На входе в коаксиальный канал температура жидкости равна температуре стенок, а далее темп ее роста зависит от интенсивности химического источника тепла и скорости отвода тепла через стенки. Для области $\tilde{z} < 0{,}5$ критическими получаются значения $\delta \geq 5{,}1$, поэтому обозначим $\delta^* = 5{,}1$ согласно определениям классической теории.

Зависимости на рис. 4 рассмотрены в центре межстеночной области канала. Ближе к стенкам канала прогрессивное нарастание температуры замедляется при больших значениях координаты $\tilde{z}$ за счет более интенсивного отвода тепла, однако характер распределений $\theta, \tilde{V}, \tilde{W}, \tilde{\mu}$ по длине $\tilde{z}$, как уже было отмечено во второй главе, сохраняется.

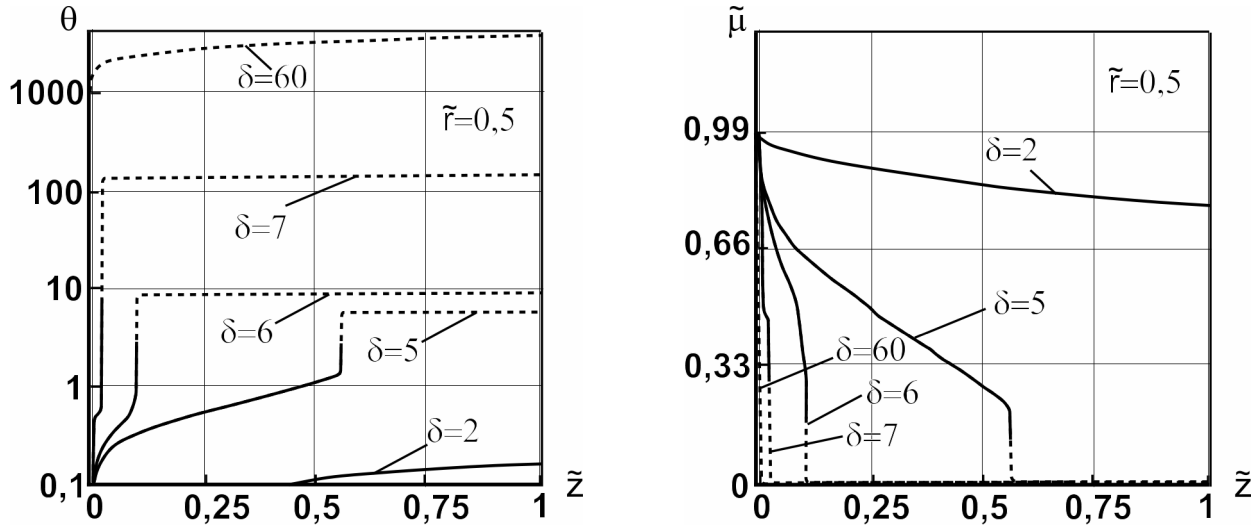


Рис. 4. Зависимости безразмерной температуры θ и вязкости $\tilde{\mu}$ от координаты $\tilde{z}$ в точке $\tilde{r} = 0{,}5$, для различных значений δ.

При значениях параметра δ меньших δ^* при удалении от начала коаксиального канала температура в центре межстеночной области канала принимает фиксированное значение и больше не увеличивается при удалении от входа в канал, так как устанавливается равновесие между теплоприходом за счет источников тепла и теплоотводом на стенках канала. При данном значении параметра δ критический режим теплообмена не возникает.

На рис. 5 представлены графики зависимостей для продольной $\tilde{W}$ и поперечной $\tilde{V}$ компонент скорости от координаты $\tilde{z}$ при разных значениях

параметра δ. Изменение температуры сказывается на изменении вязкости, а также скорости $\tilde{W}$.

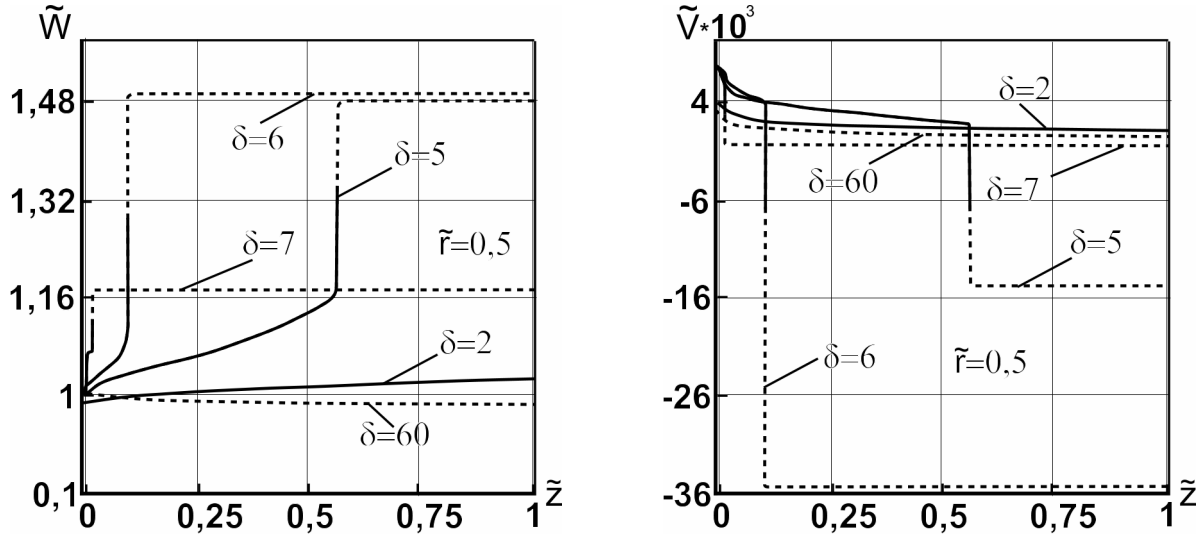


Рис. 5. Зависимости безразмерных компонент скорости $\tilde{W}$ и $\tilde{V}$ от координаты $\tilde{z}$ в точке $\tilde{r} = 0{,}5$, для различных значений δ.

В силу постоянства расхода профиль $\tilde{W}$ деформируется, появляется поперечная скорость $\tilde{V}$. При значениях параметра $\delta < \delta^*$, изменения $\tilde{W}$ и $\tilde{V}$ незначительны. При исследовании зависимости длины предкритической области от критических значений параметра δ на рис. 3 выяснилось, что координата $\tilde{z}$ начала критической области увеличивается при уменьшении критического параметра δ. Поэтому координате $\tilde{z} = 0{,}5$ (начало резкого возрастания температуры) соответствует критическое значение параметра $\delta = 5{,}1$ или δ^*.

Таким образом эффект возникновения критического режима теплообмена в рассматриваемой области канала влияет на все характеристики процесса, то есть на θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$. Происходит деформация профиля компоненты скорости $\tilde{W}$, что в свою очередь приводит изменению компоненты $\tilde{V}$. Очень важно, что на это влияет значение параметра δ, непосредственно не связанного с движением или теплопроводностью жидкости.

Следующим этапом работы согласно принятому порядку проведения численных исследований было проведение серии расчетов для исследования зависимостей θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$ от одного из определяющих процесс управляющих параметров в фиксированной области канала:

1. от δ и χ, характеризующих интенсивность химического и диссипативного источника,
2. от α и β, характеризующих величину энергии активации вязкого течения и химической реакции,
3. от γ и σ, характеризующих геометрию канала и расход жидкости,
4. от c_0 и c_1 - реологических параметров.

При этом другие управляющие параметры были зафиксированы. Было выявлено, что для них существуют три области по $\tilde{z}$, а также диапазоны критических и предкритических значений.

Было установлено, что характер зависимостей определяющих процесс характеристик θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$ от какого-либо управляющего параметра изменяется при варьировании значений других управляющих параметров. Поэтому в работе представлены также и зависимости характеристик θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$ от каждого управляющего параметра при варьировании остальных управляющих параметров.

Четвертая глава посвящена анализу результатов расчетов критических режимов теплообмена при течении обобщенной ньютоновской жидкости в канале с учетом выгорания вещества. Рассматривался проточный реактор коаксиального типа, в котором протекает реакция гомофазной полимеризации метилметакрилата при наличии инициатора перекиси бензоила. Такой процесс описывался моделью (7)-(9).

Результаты решения задачи (7), (8) представлены в виде графиков зависимостей как полных распределений (по $\tilde{r}$ и $\tilde{z}$) определяющих процесс характеристик θ, $\tilde{W}$, $\tilde{V}$, $\tilde{M}$ и $\tilde{J}$, так и их распределений по $\tilde{z}$ при $\tilde{r} = 0{,}5$, а также их профили для различных фиксированных значений координаты $\tilde{z}$ при $\delta = 6$ (рис. 7).

Также как и в главе 3 для данной задачи определяются области: $0 < \tilde{z} < 0{,}74$ - предкритическая область, $\tilde{z} > 0{,}74$ - критическая область теплообмена для $\delta = 6$.

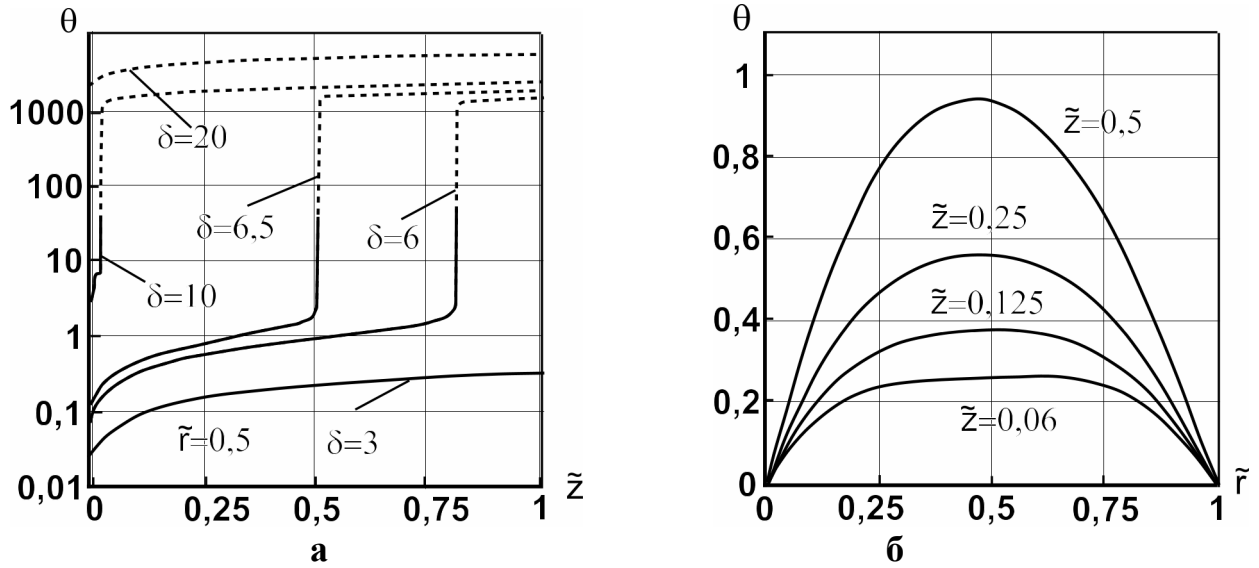


Рис. 7. Распределения (а) $\theta(\tilde{z})$ при различных значениях параметра δ и профили (б) температуры θ при различных $\tilde{z}$ для критического значения $\delta = 6$.

В результате численных исследований получено, что профили температуры в точках $\tilde{z} = 0{,}06$, $\tilde{z} = 0{,}5$, $\tilde{z} = 0{,}74$ разные (рис. 7б). В теории теплового взрыва рассматривается лишь предкритическая область. На основе полученных результатов дано описание форм профилей температуры в каждой точке $\tilde{z} = 0{,}06$, $\tilde{z} = 0{,}5$, $\tilde{z} = 0{,}74$ путем анализа распределений по $\tilde{z}$ характеристик θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{J}$, $\tilde{M}$ процесса полимеризации в реакторе.

Также как и в главе 3 было проведено исследование возникновения критического режима теплообмена при варьировании большинства определяющих процесс управляющих параметров, таких как δ, χ, c_8, c_9.

В результате проведенных исследований зависимостей θ, $\tilde{V}$, $\tilde{W}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{J}$, $\tilde{M}$ от перечисленных управляющих параметров по отдельности (при фиксированных остальных управляющих параметрах), а также построив эти же зависимости при варьировании остальных управляющих параметров выявлено, что критические значения, например, параметра δ изменяются при изменении других безразмерных управляющих параметров. Поэтому для критического параметра δ были построены зависимости его от других параметров.

Данные зависимости задаются поверхностями, которых в классической литературе называют критическими поверхностями. На рис. 8 приведены критические поверхности зависимости параметра δ от параметров c_8 и $c_5\chi$ а также от параметров c_9 и $c_5\chi$. Для полноты исследования зависимостей характеристик, определяющих процесс полимеризации от реологических свойств среды, необходимо было рассмотреть их зависимости от всех параметров $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$. Однако было выяснено, что наиболее существенное влияние на классификацию жидкостей оказывают параметры c_8 и c_9. Поэтому в соответствии с принятой системой классификации на рис. 8 приведены критические поверхности, содержащие именно эти параметры.

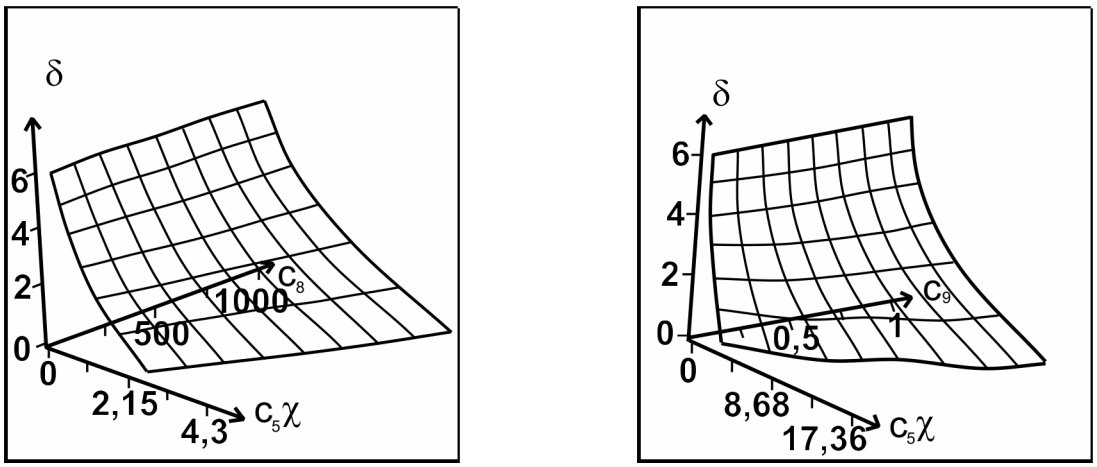


Рис. 8. Критические поверхности зависимостей $\delta = \delta(c_8, c_5\chi)$ и $\delta = \delta(c_9, c_5\chi)$.

Как видно на графиках при увеличении тепловыделений от диссипации при движении реакционной смеси в реакторе критические значения параметра δ уменьшаются. На критической поверхности $\delta = \delta(c_8, c_5\chi)$ на рис. 8 также присутствует точка, где диапазон критических значений параметра δ уменьшается очень существенно, несмотря на небольшое уменьшение значений параметров c_8 и $c_5\chi$. Как следует из графика $\delta = \delta(c_9, c_5\chi)$ на рис 8, реологический параметр c_9 на изменения критических значений параметра δ не влияет.

В этой же главе были представлены диапазоны значений размерных управляющих и характеризующих реальный (рис. 1) процесс полимеризации

параметров соответствующих критическим и безопасным режимам теплообмена. По формулам перехода главы 2 определены соответствующие им безразмерные диапазоны значений параметров и эти диапазоны показаны на графиках.

Рис. 9. Алгоритм определения безопасного диапазона варьирования управляющих параметров

На основе комплекса выполненных расчетов в главе 4 приведен алгоритм определения диапазонов варьирования управляющих параметров для безопасного проведения рассмотренных в работе процессов на производстве (рис. 9). Суть алгоритма в том, что он показывает, каким образом можно воспользоваться результатами численных исследований, приведенных в 3 и 4 главах на практике.

В заключительной части работы приведены рекомендации по проведению производственных процессов (в которых могут существовать критические режимы теплообмена) в безопасном режиме. Данные рекомендации являются обобщением всех проанализированных зависимостей. Представленные в работе зависимости показывают при каких условиях происходит переход к критическому режиму теплообмена.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложены математические модели процессов протекающих с возникновением критических режимов теплообмена при ламинарном течении реагирующей массы со сложной изменяющейся реологией в проточном реакторе коаксиальной формы либо в каналах подающих или выводящих компоненты реакции полимеризации.
2. В результате проведенного комплекса численных параметрических исследований определены:
   - области и условия возникновения явления теплового взрыва на начальном участке в коаксиальном канале и реакторе,
   - интервалы неоднозначности решений в бесконечном коаксиальном канале,

- определено влияние реологии среды и геометрии каналов на условия безопасного проведения процессов.

3. Предложена методика определения диапазонов значений управляющих параметров, при соблюдении которых гарантируется безопасное проведение процессов на производстве.
4. По результатам численных исследований показаны условия возникновения критических режимов теплообмена, а также представлены алгоритм и рекомендации по выбору режимов для безопасного проведения процессов.

Основные содержание диссертации опубликовано в работах:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Абайдуллин, Б.Р. Полные распределения характеристик тепломассообмена в условиях критического режима теплообмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном реакторе / Б.Р. Абайдуллин, Е.К. Вачагина // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2012. – № 19. – С. 59-67.

2. Абайдуллин, Б.Р. Зависимости характеристик тепломассобмена от параметра Франка Каменецкого при критическом режиме теплообмена неньютоновской жидкости в реакторе / Б.Р. Абайдуллин, Е.К. Вачагина // Научный журнал Труды Академэнерго. – 2012. – №4. – С. 24-35.

3. Абайдуллин, Б.Р. Моделирование теплообмена и течения обобщенной ньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала при аррениусовском источнике тепловыделений / Б.Р. Абайдуллин, Ю.Г. Назмеев // Теплофизика высоких температур. – 2008. – т.46. – № 2. – С. 280-283.

4. Абайдуллин, Б.Р. Расчет критических режимов теплообмена при течении обобщенной ньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала / Б.Р. Абайдуллин, Е.К. Вачагина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №3. – С. 23-30.

Работы, опубликованные в других изданиях:

5. Абайдуллин, Б.Р. Изменения продольной компоненты вектора скорости и нелинейной функции вязкости при критических режимах течения структурно вязкой жидкости в плоской щели / Б.Р. Абайдуллин // Труды V школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань, 6-7 сентября 2006. – С.49-52.

6. Назмеев, Ю.Г. Прогрессивное нарастание температуры и бифуркация стационарных режимов течения вязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей в круглой трубе и коаксиальном канале / Ю.Г. Назмеев, Д.В Ананьев, А.И. Кадыйров, Б.Р. Абайдуллин // Труды национальной конференция по теплоэнергетике, – Казань, 5-8 сентября 2006. – С. 13-36.

7. Абайдуллин, Б.Р. Численное исследование теплообмена при критических режимах течения жидкости в плоской щели / Б.Р. Абайдуллин // Труды XXVI Российской школы по проблемам науки и технологий, – Миасс Челябинской обл., 27-29 июня 2006. – С. 36.

8. Абайдуллин, Б.Р. Влияние геометрии бесконечного коаксиального канала и реологических характеристик жидкости на критические значения температуры, скорости и вязкости / Б.Р. Абайдуллин // Труды Академэнерго. – 2006. – №3. – С. 16-27.

9. Абайдуллин, Б.Р. Изменения продольной компоненты вектора скорости и нелинейной функции вязкости при критических режимах течения структурно вязкой жидкости в плоской щели / Б.Р. Абайдуллин // Труды Академэнерго. – 2006. – №2. – С. 27-34.

10. Абайдуллин, Б.Р. Расчет критических состояний течения обобщенной ньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала при диссипативном источнике тепловыделения / Б.Р. Абайдуллин, Ю.Г. Назмеев // Труды VII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, – Красноярск, 1-3 ноября 2006. – С. 33-34.

11. Абайдуллин, Б.Р. Влияние энергии активации вязкого течения текущей в плоско-параллельном канале обобщенной ньютоновсой жидкости на резкое изменение температуры и вязкости / Б.Р. Абайдуллин // Современные наукоемкие технологии. – 2006. – №1. – С. 88.

12. Абайдуллин, Б.Р. Профили продольной скорости, температуры и вязкости при критическом режиме теплообмена для текущей в коаксиальном канале неньютоновской жидкости/ Б.Р. Абайдуллин // Труды ежегодной XVIII Международной Интернет-конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС 2006), – Москва, 20-22 ноября 2006. – С. 6.

13. Абайдуллин, Б.Р. Исследование влияния основных определяющих параметров на критический теплообмен при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала / Б.Р. Абайдуллин // Труды Академэнерго. – 2007. – №1. – С 13-24.

14. Абайдуллин, Б.Р. Численное исследование критических режимов теплообмена в проточном реакторе коаксиального типа / Б.Р. Абайдуллин // Материалы XV международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС ‘2007), – Алушта, 25-31 мая 2007. – С.33-35

15. Абайдуллин, Б.Р. Исследование влияния параметров определяющих реологию на теплообмен при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала / Б.Р. Абайдуллин // Труды Академэнерго. – 2007. – № 3. – С.3-13.

16. Абайдуллин, Б.Р. Влияние реологии жидкости на критические режимы теплообмена при течении жидкости в плоской щели / Б.Р. Абайдуллин // Материалы докладов XXI Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям. – Новосибирск, 15-18 августа 2007. – С.3-4.

17. Абайдуллин, Б.Р. Влияние реологии и энергии активации на критичность теплообмена при ламинарном течении неньютоновской жидкости в плоскопараллельном канале / Б.Р. Абайдуллин // Фундаментальные исследования. – 2008. – №4. – С. 101.

18. Абайдуллин, Б.Р. Исследование влияния параметра отвечающего за геометрию на критический теплообмен при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном канале / Б.Р. Абайдуллин Б.Р. // Тезисы докладов XV Международной молодежной научной конференции XV «Туполевские чтения». – Казань, 9-10 ноября 2007. – Т.1. – С. 265-267.

19. Абайдуллин, Б.Р. Зависимости температуры и продольной скорости от параметра диссипативного тепловыделения на условия возникновения критического режима теплообмена в реакторе / Б.Р. Абайдуллин // Тезисы докладов XVI Международной молодежной научной конференции XVI «Туполевские чтения». – Казань, 28-29 мая 2008. – Т.1. – С. 265-268.

20. Абайдуллин, Б.Р. Влияние расхода жидкости на критические режимы теплообмена при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала / Б.Р. Абайдуллин // Материалы XVI международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС ‘2008). – Алушта, 24-31 мая 2007. – С.33-37

21. Абайдуллин, Б.Р. Распределение температуры в проточном реакторе полимеризации в условиях близких к критическим тепловым режимам. / Б.Р. Абайдуллин, Д.В. Ананьев, А.И. Кадыйров, Е.К. Вачагина // Материалы XVI симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 13-17 октября 2008. – С.6.

22. Абайдуллин, Б.Р. Профили и распределения температуры компонент скорости и вязкости при критическом теплообмене для неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала / Б.Р. Абайдуллин // Труды Академэнерго. – 2008. – № 4. – С.3-13.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и патент:

23. Кадыйров А.И. Программа расчета критических значений гидродинамических и тепломассообменных характеристик потока в гомофазном полимеризационном реакторе типа круглая труба / Халитова Г.Р., Вачагина Е.К., Шамсутдинов Э.В., Абайдуллин Б.Р., Ананьев Д.В., Кадыйров А.И.// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613627. Зарегистрировано 28.02.2007 г.

24. Патент на изобретение № 2332255. Устройство для обеспечения эффективного безопасного режима работы химического реактора. Дата регистрации 27.08.2008. Авторы Назмеев Ю.Г., Халитова Г.Р., Шамсутдинов Э.В., Вачагина Е.К., Абайдуллин Б.Р., Ананьев Д.В., Кадыйров А.И.

Подписано в печать 12.09.2015. Формат 60х84 1/16. Тираж 100 экз.
Бумага ксероксная. Объем 1,0 п.л. Заказ №05/378.
Печать ризографическая.

._____.

._____.

Отпечатано с готового оригинал-макета
На полиграфическом участке ООО “КУРАТОР”
Казань, ул. Сибирский тракт, 34, корп. 10. Тел. 513-00-88