На правах рукописи

Байгулова Анастасия Ивановна

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ, СМЕШЕНИЯ ГАЗОВ, ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ И ГОРЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ С ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Матвиенко Олег Викторович

#### Официальные оппоненты:

**Перминов Валерий Афанасьевич,** доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Отделение контроля и диагностики, профессор

Пахомов Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита состоится 20 сентября 2019 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

в Научной библиотеке С диссертацией можно ознакомиться И на официальном государственного сайте федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/BaigulovaAI20092019.html

Автореферат разослан «\_\_\_\_» мая 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук

Пикущак Елизавета Владимировна При создании современного инновационного оборудования для химической промышленности, машиностроения и энергетики одной из основных задач является повышение эффективности тепломассообмена, характеристик смешения, повышение устойчивости горения и стабилизация пламени в компактной зоне горения. Для достижения этой цели возможно использование различных методов интенсификации тепломассообменных процессов.

Одним из перспективных способов интенсификации тепломассообмена, смешения, а также стабилизации пламени в технологических устройствах является использование в них пористых вставок. Эффективность использования этого метода обусловлена значительной извилистостью траекторий элементарных объемов сплошной среды, увеличивающей время пребывания газового потока в аппарате, а также развитой поверхностью соприкосновения газовой фазы и пористого каркаса, способствующей интенсификации теплообмена и протеканию каталитических реакций [1, 2].

В настоящее время с использованием различных технологий, в первую очередь на основе порошковой металлургии, созданы пористые материалы различной структуры. Большой диапазон свойств пористых материалов, простота изготовления, высокая интенсивность протекания в них тепломассообменных процессов обусловили их широкое использование в промышленности в качестве осушителей, охладителей, нагревателей и химических реакторов.

Заполнение пространства технологических аппаратов пористым каркасом не только интенсифицирует протекание тепломассообмена и стабилизирует горение [3], но и значительно увеличивает гидравлическое сопротивление [4]. Таким образом, становится **актуальным** использование высокопористых структур, имеющих низкое гидравлическое сопротивление. Технология производства современных пороматериалов [5] позволяет получать образцы из различных металлов с размерами ячеек в диапазоне от 10мкм до 10мм с пористостью до 99%.

Анализ литературы [1 – 10] показывает, что подавляющее большинство исследований структуры течения, смешения и горения выполнены для малой и средней пористости каркаса. При этом исследование структуры течения, тепломассообмена и горения в высокопористых вставках остается исследованным не достаточно глубоко. Поэтому изучение влияния газодинамических, тепловых и химических факторов на процессы переноса и горения в турбулентных закрученных потоках в каналах с пористыми вставками представляет актуальную задачу.

**Целью** настоящей работы является исследование влияния характеристик пористого каркаса на структуру течения, смешение, а также химическое реагирование и горение потока при наличии закрутки на входе в канал.

Для выполнения этой цели необходимо решить следующие задачи:

• выбрать основные математические модели для проведения исследований;

• проверить адекватность математических моделей течения газов в пористом слое;

• провести исследования структуры течения и характеристик смешения закрученных потоков в каналах с пористыми вставками;

• осуществить исследование процессов химического реагирования, горения и каталитического окисления в каналах с пористыми вставками.

Осуществление этих задач предполагает:

• исследование структуры течения, характеристик турбулентности, процессов смешения и химического реагирования закрученных потоков в каналах с пористыми вставками;

• исследование влияния структуры пористого слоя на характеристики течения, массообмена и горение.

Научная новизна работы заключается в следующем:

• изучено влияние закрутки на структуру течения в каналах с пористыми вставками;

• установлен механизм влияния параметров пористого каркаса на процессы турбулизации и ламинаризации закрученного потока;

• определено влияние закрутки на процессы смешения газов в каналах с пористыми вставками;

• определены условия, обеспечивающие наилучшее качество смешения в пористом инжекторе;

• установлено, что с уменьшением пористости возрастает роль кондуктивного теплообмена в каркасе, что приводит к стабилизации горения и уменьшению длины предпламенной зоны;

• определены условия, обеспечивающие высокую степень каталитического окисления метана в каналах с пористой вставкой.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается результатами верификации численной процедуры с использованием известных аналитических решений, сравнением с результатами других авторов, как численными, так и экспериментальными.

#### Теоретическая и практическая значимость работы.

Выполненное исследование позволяет определить особенности течения и смешения, химического реагирования и горения закрученных потоков в каналах с пористыми вставками, исследовать структуру течения и процессы массообмена в технологических устройствах. Результаты работы могут применяться для создания инновационного оборудования и организации технологических процессов в химической промышленности и задачах охраны окружающей среды.

#### Положения, выносимые на защиту:

• вытеснение газа из пористого каркаса происходит интенсивнее при уменьшении пористости и размеров частиц, из которых состоит пористый каркас;

• вблизи границы пористого слоя наблюдается турбулизация течения тем более значительная, чем интенсивнее идет вытеснение газа из пористого слоя;

• закрутка потока способствует интенсификации процесса смешения в каналах с пористыми вставками и формированию более однородных распределений концентраций;

• роль кондуктивного теплообмена в пористом каркасе с уменьшением пористости становится более значимым, что приводит к уменьшению длины предпламенной зоны;

• высокая теплопроводность пористого каркаса обеспечивает устойчивое горение в непосредственной близости к входному сечению;

• для улучшения характеристик химического превращения в каталитическом реакторе необходимо обеспечить равномерное радиальное распределение осевой скорости;

**Личный вклад автора** заключается в физической и математической постановках рассматриваемых задач, участии в разработке алгоритмов и программ расчета, проведении расчетов и анализе их результатов, подготовке публикаций.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях, научных конгрессах, школах-семинарах: Первая Всероссийская научная конференция молодых ученых «Перспективные международным участием материалы в технике с И строительстве (ПМТС-2013)» (Томск, 2013); I Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (МНТ-2014) (Томск, 2014); I Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск, 2014); VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника, Электротехнология, Энергетика» (Новосибирск, 2015); 62-я Научно-техническая конференция студентов и молодых ученых ТГАСУ (Томск, 2016).

Публикации. Материалы диссертационного исследования изложены в 12 работах, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 публикация в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus, 2 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входятв WebofScience, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которых входит в Scopus), 6 публикаций в сборниках материалов международных научных и университетской научно-технической конференций (из них 1 опубликована также на английском языке); получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 116 наименований. Работа содержит 138 страниц, включая 100 рисунков.

Во введении обоснованы актуальность и практическая значимость работы, дана общая характеристика решаемой задачи, сформулирована цель исследования.

B первой главе представлен обзор литературы, посвященной исследованию течений, теплломассообмена и горения в пористых средах. В основе математической постановке задачи лежит объемно – усредненная модель взаимопроникающих континуумов. Рассматривается недеформируемая с корпускулярной постоянной по объему пористостью среда природы, образованная укладкой монодисперсных частиц сферической формы. Моделируемая система описывается уравнениями неразрывности и движения для газовой фазы с необходимыми граничными условиями, уравнениями теплопроводности для пористого слоя и газовой фазы, а также уравнениями диффузии компонент газовой фазы, с учетом возможности протекания в потоке химической реакции. Течение в рассматриваемой области предполагается осесимметричным, движение газа характеризуется наличием областей ламинарного, переходного и полностью турбулентного режимов течения, химическое реагирование происходит в диффузионно-кинетическом режиме. При моделировании поля течения используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Бринкмана – Форчхеймера, записанные относительно осредненных по времени осевой и, радиальной v, тангенциальной w составляющих скорости, а также давления *p*:

$$\frac{\partial(\gamma \rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\gamma \rho v r)}{\partial r} = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial(\gamma\rho uvr)}{\partial r} = -\gamma\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\gamma\mu_{\text{eff}}\left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial vr}{\partial r}\right)\right)\right] +$$
(2)

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \gamma \mu_{\text{eff}} r \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \gamma \rho F u,$$

$$\frac{\partial (\gamma \rho u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\gamma \rho v^2 r)}{\partial r} = -\gamma \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \gamma \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] +$$

$$(3)$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\gamma\mu_{\rm eff}r\left(2\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial vr}{\partial r}\right)\right)\right]-\gamma\mu_{\rm eff}\frac{v}{r}+\frac{\gamma\rho w^{2}}{r}-\gamma\rho Fv,$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho uw)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(\gamma\rho vwr)}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\gamma\mu_{\rm eff}\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial r}\left[\gamma\mu_{\rm eff}r^{3}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)\right]-\frac{\gamma\rho vw}{r}-\gamma\rho Fw.$$
(4)

Для определения сопротивления пористой среды используем уравнения Эргуна:

$$F = 72 \frac{\mu \zeta^2 (1-\gamma)^2}{\rho \gamma^2 d^2} + 0.585 \frac{\zeta^3 (1-\gamma)}{d} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2},$$
(5)

где d – диаметр частиц образующих пористый слой,  $\zeta = \gamma + \frac{1-\gamma}{2}\pi$  – относительная длина извилистого канала для укладки сферических частиц.

Исследования характеристик турбулентности осуществлялось с использованием составной модели MeнтерaSST (ShearStressTransport) [29, 30], адаптированной для расчета течений в каналах при наличии пористой вставки:

$$\frac{\partial \rho \gamma u k}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho \gamma v k r}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \sigma_k \mu_i \right) \gamma \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \mu + \sigma_k \mu_i \right) \gamma r \frac{\partial k}{\partial r} \right] + F_2 \tilde{G} - C_\mu \rho \omega k - \gamma \rho F k$$
(6)

$$\frac{\partial \rho \gamma u \omega}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho \gamma v \omega r}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \sigma_{\omega} \mu_{\iota} \right) \gamma \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \mu + \sigma_{\omega} \mu_{\iota} \right) \gamma r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right] + \left( \frac{C_{\beta}}{C_{\mu}} - \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{C_{\mu}}} \varkappa^{2} \right) \frac{\rho}{\mu_{\iota}} F_{2} \widetilde{G} - C_{\beta} \rho \omega^{2} + (1 - F_{1}) C_{k\omega} - \gamma \rho F \omega.$$
(7)

Распределение температуры в газе и пористом слое определялось путем решения уравнения энергии для газовой фазы и пористого слоя. При записи уравнения для газовой фазы предполагалось протекание в газе химических реакций.

$$C_{p}\left(\frac{\partial(\gamma\rho uT_{G})}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(\gamma\rho vT_{G}r)}{\partial r}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\lambda_{\text{eff}}\frac{\partial T_{G}}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\gamma\lambda_{\text{eff}}r\frac{\partial T_{G}}{\partial r}\right)+\alpha_{\text{vol}}\left(T_{S}-T_{G}\right)+\gamma\sum_{\alpha=1}^{N}Q_{\alpha}\Phi_{\alpha},$$
(8)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( (1-\gamma) \lambda_{\rm s} \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( (1-\gamma) \lambda_{\rm s} r \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial r} \right) - \alpha_{\rm vol} (T_{\rm s} - T_{\rm g}) \cdot$$
(9)

Коэффициент объемного теплообмена системы пористый каркас – газ определялся как:

$$\alpha_{\rm vol} = \frac{6\lambda_{\rm g}(1-\gamma)}{d^2} \left[ 2 + 1.1 \left( \frac{\mu C_p}{\lambda_{\rm g}} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho d \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}{\mu} \right)^{0.6} \right].$$
(10)

Баланс массы компонентов многокомпонентной газовой смеси (горючее, окислитель, инертный разбавитель) описывается уравнением диффузии с учетом протекания в потоке химических реакций:

$$\frac{\partial (\gamma \rho u M_{\text{fl}})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\gamma \rho v r M_{\text{fl}})}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \gamma \rho D_{\text{eff}} \frac{\partial M_{\text{fl}}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \gamma \rho D_{\text{eff}} r \frac{\partial M_{\text{fl}}}{\partial r} \right] - \gamma \sum_{\alpha=1}^{N} \Phi_{\alpha} , \qquad (11)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho\mu M_{ox})}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial(\gamma\rho\nu rM_{ox})}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\gamma\rho D_{\text{eff}}\frac{\partial M_{ox}}{\partial x}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\gamma\rho D_{\text{eff}}r\frac{\partial M_{ox}}{\partial r}\right] - \nu\frac{W_{ox}}{W_{\text{fl}}}\gamma\sum_{\alpha=1}^{N}\Phi_{\alpha}, \qquad (12)$$

$$\frac{\partial (\gamma \rho u M_{\rm in})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\gamma \rho v r M_{\rm in})}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \gamma \rho D_{\rm eff} \frac{\partial M_{\rm in}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \gamma \rho D_{\rm eff} r \frac{\partial M_{\rm in}}{\partial r} \right].$$
(13)

Плотность газовой фазы определена с помощью уравнения состояния совершенного газа:

$$\rho = \frac{p}{R_G T_G} \left( \frac{M_{\rm fl}}{W_{\rm fl}} + \frac{M_{\rm ox}}{W_{\rm ox}} + \frac{M_{\rm pr}}{W_{\rm pr}} + \frac{M_{\rm in}}{W_{\rm in}} \right)^{-1},\tag{14}$$

Уравнения (1–4, 6–9, 11–13) были решены численно с использованием метода конечного объема. Вычисления проведены на сетке с 2000 узлами в осевом направлении и 2000 узлами в радиальном. Вблизи стенок, а также в областях с большими градиентами скорости и концентрации проводилось сгущение сетки.

Результаты проведенной верификации математической модели и численного метода подтверждают их корректность, хорошее совпадение рассчитанных значений с известными экспериментальными и теоретическими данными других авторов и аналитическими решениями, а также возможность использования разработанного алгоритма для дальнейших исследований.

Вторая глава посвящена исследованию структуры течения и характеристик, турбулентности в каналах с пористыми вставками. В первом параграфе второй главы приводятся результаты исследования структуры течения в реакторе с пристеночнной пористой вставкой (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема реактора с пристеночной пористой вставкой

Реактор представляет собой цилиндрическую трубу радиусом R, внешняя поверхность которой выложена засыпкой из шаров диаметром d. Центральная часть реактора радиусом  $r_{in}$  является свободной для прохода газа. Ввод газа в реактор осуществляется, как через центральную часть, так и через пористую засыпку.



Осевая координата х, м

Рисунок 2 – Распределение безразмерного давления  $(p-p_{in})/p_{in}$  ( $p_{in}$  – давление на входе) в канале:  $u_{in}$ =20 м/с, d=0.001м,  $\gamma$ =0.7

На рисунке 2 приведено типичное распределение поля давления в реакторе. Наличие пористой вставки приводит к повышению давления в периферийной области вблизи от входа в канал. Как следствие этого наблюдается вытеснение потока из пористого каркаса в центральную область течения (рисунок 3a).



Рисунок 3 – Линии тока в канале с пристеночной пористой вставкой:  $u_{in}=20 \text{ м/c}$ ,  $d=0.001 \text{ м}, \gamma=0.7$ , а:  $\varphi=0^{\circ}$ , б:  $\varphi=80^{\circ}$ 

Результаты выполненных расчетов показывают, что это вытеснение тем интенсивнее, чем меньше объем поровых пустот и чем меньше размер частиц, из которых состоит пористый каркас. Закрутка потока вызывает радиальное движение, направленное от оси к стенкам канала, что препятствует оттоку вещества из пористого слоя. При сильной закрутке потока ( $\phi$ >70°) оттеснение потока к стенке, вызванное центробежными силами, становится настолько большим, что в приосевой области возникает зона разряжения, вызывающая рециркуляцию (рисунок 36).

На границе пористого слоя и центральной области наблюдается турбулизация течения, тем более значительная, чем интенсивнее идет вытеснение газа из пористого слоя. Интенсивный отток из пористого слоя в области расположенной за задней кромкой рециркуляционной зоны вызывает в этой области значительный рост турбулентных возмущений.

Во втором параграфе второй главы рассматриваются результаты исследования структуры течения, в цилиндрическом канале с приосевой пористой вставкой. Реактор представляет собой цилиндрическую трубу радиусом *R*.



Рисунок 4 – Схема реактора с приосевой пористой вставкой

Центральная часть реактора радиусом  $r_{in}$  выложена засыпкой из шаров диаметром d (рисунок 4). Пристеночная зона реактора является свободной для прохода. Ввод газа в реактор осуществляется, как через центральную часть, так и через пористую засыпку.



Рисунок 5 – Линии тока в канале с приосевой пористой вставкой: *u<sub>in</sub>=20 м/с*, *d*=0.001 м, γ=0.7, а: φ=0°, б: φ=80°

На рисунке 5 представлены линии тока в канале с приосевой пористой вставкой. На некотором удалении от входа в камеру, в пористом слое образуется область пониженного давления, в которую втягивается часть потока из пристеночной области. В результате этого в пористом слое образуется область возвратных течений. Интенсивность циркуляции в этой зоне увеличивается с увеличением пористости и уменьшается при уменьшении диаметра частиц. Увеличение закрутки приводит к понижению давления на оси канала на начальном участке течения, что приводит в высокопористых средах к формированию приосевой зоны возвратных течений, вызванной центробежной силой.

В третьем параграфе второй главы рассматриваются результаты исследования структуры течения, в цилиндрическом канале с трубчатой пористой вставкой, расположенной внутри канала.



Рисунок 6 – Схема реактора с кольцевой пористой вставкой

Реактор представляет собой цилиндрическую трубу радиусом R в которую помещена трубчатая пористая вставка с внутреннем радиусом  $r_1$  и внешнем  $r_2$ , образованная засыпкой из шаров диаметром d (рисунок 6). Пристеночная и центральная часть реактора является свободной для прохода газа. Ввод газа в реактор осуществляется, как через центральную часть, так и через пористую засыпку.

Скорость потока в пористом слое для у<0.7 быстро падает почти до нуля. Радиальное распределение скорости в пристеночной области характеризуется наличием максимума, расположенным вблизи стенки. В отсутствии закрутки, а также при малых значениях закрутки (ф≤50°) распределение осевой скорости в приосевой зоне является монотонным с максимумом на оси симметрии. Однако при больших углах закрутки ( $\phi$ >50°) на оси течения наблюдается формирование «провала» осевой скорости. Но даже при очень сильной начальной закрутке (φ=85°) для пористости  $(\gamma = 0.5)$ образование центральной потока рециркуляционной зоны не происходит. Это объясняется поступлением в приосевую зону уже прекратившего вращение газа из пористого слоя.

**Третья глава**посвящена исследованию процесса смешения в каналах с пористыми вставками.

В первом параграфе третьей главы приводятся результаты математического моделирования процесса смешения в канале с пристеночной пористой вставкой. Через пористую вставку проходит метан, через свободный канал – кислород. На начальном участке наблюдается вытеснение метана из пористой вставки, связано это с влиянием пористого каркаса. В результате на границе пористого слоя формируется слой смешения. На начальном участке течения внешняя граница этого слоя совпадает с границей пористого слоя, а внутренняя распространяется к центру канала. С увеличением угла закрутки толщина слоя смешения увеличивается, внутренняя граница слоя смешения достигает оси канала на более коротких длинах. При этом метан обнаруживается в непосредственной близости от входа.

Во втором параграфе исследуется смешение в канале с приосевой пористой вставкой. Как и прежде, через пористую вставку проходит метан, через свободный канал - кислород. Характерной особенностью течения в канале с приосевой пористой вставкой является наличие рециркуляционной зоны в пористом слое.Подаваемый через пористую вставку метан, большей своей частью вытесняется в пристеночную область, где он смешивается с кислородом. Образовавшаяся смесь сносится вниз по потоку. Слои, движущиесяся вблизи границы пористого слоя, вовлекаются рецикуляционным течением внутрь пористого слоя, тем самым понижая концентрацию метана в нем. На достаточном удалении от входа, там, где процесс рециркуляции завершился, наблюдается движение метана из приосевой области в периферийную, что приводит к вытеснению смеси кислорода и метана из пористого слоя. При сильной закрутке потока ( $\phi$ =85°) на начальном участке течения процесс смешения характеризуется вытеснением метана в пристеночную область и незначительным поступлением кислорода в пористый слой после завершения процесса вытеснения метана из пористого слоя.

В параграфе третьей третьем главы приводятся результаты математического моделирования процесса смешения в канале с кольцевой пористой вставкой. В пористый слой вдувается метан, в приосевую часть поступает воздух, а в пристеночную область вдувается водород. Вследствие процесса диффузии и конвекции происходит проникновение кислорода (М1) в пористый слой. При удалении от входного сечения x/R>7 радиальное распределение концентрации М1 характеризуется практически постоянными значениями в приосевой и пористой вставке резким градиентом концентраций вблизи внешней границы пористого слоя. Перенос метана (M<sub>2</sub>) характеризуется проникновением из пористого слоя в приосевую и пристеночную области с постепенным образованием равномерного профиля концентрации. Течение азота М<sub>3</sub> происходит в основном в пристеночной области. Лишь незначительная его часть проникает в пористый слой, локализуясь вдоль внешней его границы. С ростом vгла закрутки формирование более однородных распределений концентраций происходит на меньших длинах. В высокопористых средах процесс вытеснения метана из пористого слоя ослабевают. В потоках со слабой и умеренной закрутках ( $\phi$ <70°) смешение  $M_1$  и  $M_3$  не наблюдается. В случае сильной закрутки (70°≤ $\phi$ ) происходит смешение всех трех компонентов.

В четвертом параграфе третьей главы **рассматривается** процесс смешения в пористом инжекторном смесителе.



Рисунок 7 – Схема канала с пористым инжектором

Инжекторный смеситель содержит цилиндрический корпус радиусом *R*. В центральной части камеры находится цилиндрическая соосная вставка с внутренним радиусом  $r_1$  и внешним радиусом  $r_2$ . Эта вставка является сплошной на расстоянии  $0 \le x \le X_1$ ,  $X_2 \le x \le L$  и пористой на участке  $X_1 < x < X_2$ . (Рисунок 7). В качестве расчетных параметров аппарата взяты следующие данные: R=0.1 м, L=1 м, h=0.2 м, d=0.05 м. В областях удаленных от инжектора радиальная скорость близка к нулю. И лишь в области инжектора наблюдается значительные радиальные движения. Наибольшее значение радиальной скорости наблюдается вблизи инжектора, по мере продвижения к оси канала значение радиальной скорости уменьшается. При слабой ( $\phi=20^\circ$ ) и умеренной ( $\phi<50^\circ$ ) закрутке потока качественного изменения радиальной скорости не наблюдается. В случае сильной закрутки потока (φ≥50°) в области за инжектором жидкость движется по направлению к стенке, тем интенсивней, чем ближе инжектор находится к завихрителю. Таким образом, интенсивная закрутка потока интенсифицирует перенос вещества в радиальном направлении. После прохождения инжектора радиальное распределение осевой скорости характеризуется тремя участками: приосевым участком с высокими значениями осевой скорости, областью центрального течения, в котором величина осевой скорости фактически постоянна, а также областью пограничного слоя. После прохождения инжектора скорость на оси канала резко возрастает. Закрутка потока приводит к формированию в центре канала на участке до инжектора области минимального значения осевой скорости. В приосевой зоне наблюдается квазитвердое вращение.

В центральной части потока вращение характеризуется постоянством угла закрутки, а в пристеночной области реализуется потенциальное вращение. Инжектирование вещества, приводит к оттеснению потока к центру канала. Чем ближе инжектор находится к входному сечению, тем шире становится область слоя смешения. Закрутка потока приводит к улучшению характеристики смешения. При этом интенсивные радиальные движения в потоке с закруткой приводят к быстрому выравниванию концентрации в потоке (рисунок 8).



Рисунок 8 – Радиальное распределение концентрации φ=70°, X<sub>1</sub>=0.15, X<sub>2</sub>=0.25: 1x=0.285м, 2-x=0.485м, 3-x=0.685м, 4-x=0.885м

**В четвертой главе** приводятся результаты исследования горения в каналах с пористыми вставками.

В первом параграфе приводится описание математической модели горения газа в пористом слое. Горение в турбулентных диффузионных пламенах определяется как химической кинетикой, так и процессами турбулентного смешения. В качестве критерия, характеризующего режим горения можно использовать турбулентное число Дамкелера:

$$Da = z_G \rho \exp\left(-\frac{E_G}{R_G T}\right) \frac{k}{\epsilon}.$$
(15)

Аррениусовская кинетика определяет химическое реагирование при  $Da \le 1$ . При Da > 1 химическое реагирование определяется турбулентного перемешиванием [18]. Скорость химической реакции  $\Phi$  равна:

$$\Phi = \begin{cases} z_G \rho^2 M_{ox} M_{fl} \exp\left(-\frac{E_G}{R_G T}\right), & \text{Da} \le 1\\ z_t \rho^2 \min\left[M_{fl}, \frac{1}{2} M_{ox}\right] \left[\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2}\right]^{\frac{1}{4}}, & 1 < \text{Da}. \end{cases}$$
(16)

Параметры химической реакции и теплофизические данные взяты в соответствие с [27–29]:  $z_G=2.2\cdot10^8$  кг/(м<sup>3</sup>·c),  $E_G=1.04\cdot10^5$ Дж/(моль·К),  $z_i=23.8$  кг/(м<sup>3</sup>·c),  $C_s=1300$  Дж/(кг К),  $\rho_s=4000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{s0}=1.87$  Вт/(м К).

Во втором параграфе рассматриваются особенности горения перемешенной метановоздушной смеси в канале с пристеночной пористой вставкой.



Рисунок 9 – Изотермы в канале: *u<sub>ent</sub>*=15м/с, γ=0.9, *d*=0,003м: а) φ=0°, б) φ=40°, в) φ=80°

На рисунке 9 показано положение фронта пламени. В отсутствии закрутки фронт пламени является искривленным. В приосевой зоне, горение локализуется на меньших длинах, чем в области, примыкающей к пористому каркасу. Последнее связано с тепловым взаимодействием потока с каркасом. Кроме того, большие градиенты скорости, наблюдаемые на границе пористого слоя, уменьшают устойчивость горения в этой зоне и приводят к искривлению пламени.

Умеренная закрутка приводит к движению фронта пламени против потока, при этом фронт пламени становится плоским. В случае сильной закрутки потока происходит формирование зоны возвратных течений, пламя резко смещается к входу в канал и стабилизируется в окрестности передней кромки рециркуляционной зоны.

В третьем параграфе приводятся результаты исследования горения в канале с приосевой пористой вставкой. В качестве материала, составляяющий пористый слой выбран циркон.



Рисунок 10 – Изотермы в канале  $\varphi = 0$ , а –  $\gamma = 0.9$ , б –  $\gamma = 0.7$ , в –  $\gamma = 0.5$ 

На рисунке 10 представлены изолинии температуры горючей смеси (стехиометрическая смесь СН<sub>4</sub> с воздухом) в канале с приосевой вставкой в отсутствии закрутки для различных значений пористости. В результате теплообмена между газом и пористой вставкой тепло выделенное в результате химической реакции расходуется на разогрев пористого каркаса, что затрудняет горение в пористом слое. В высокопористых средах горение происходит только в уменьшением возрастает периферийной области. С пористости роль кондуктивного теплообмена в пористом слое. В результате тепло, выделяемое в периферийной зоне горения, передается в пористую вставку, обеспечивая воспламенение газа в приосевой части канала. С дальнейшим уменьшением пористости зона горения приближается ко входу в канал, при этом фронт пламени становится менее изогнутым. Искривление пламени наблюдается только в пристеночной области, что связанно с охлаждением потока возле стенки.



При увеличении закрутки потока происходит продвижение фронта пламени к входу в канал и формирование более равномерного фронта пламени. В сильно закрученном потоке, температура в зоне рециркуляционных течений минимальна, так как в ней рециркулируетнепрореагировшая смесь. Стабилизация горения осуществляется кондуктивной теплопроводностью пористого каркаса. В этом заключается стабилизация горения в сильно закрученных потоках в канале с приосевой пористой вставкой и без нее. Если в канале без пористой вставки рециркуляционная зона является стоком тепла. При увеличении теплопроводности пористого каркаса фронт пламени локализуется на меньших длинах. Высокая теплопроводность каркаса (в качестве материала – вольфрам) обеспечивает устойчивое горение в непосредственной близости ко входу в канал для значений пористости  $\gamma < 0.9$  и для любых значений закрутки.

**В пятой главе** приводятся результаты исследования каталитического окисления метана в канале с пористой вставкой.

Моделируемая система описывается уравнениями неразрывности и движения для газовой фазы (1–7). В качестве рабочей смеси рассматривалась стехиометрическая смесь метана с воздухом. Температура в газе и пористом слое определялась путем решения уравнения теплопроводности для газовой фазы и пористого слоя (8, 9). Химическое реагирование описывается уравнениями баланса массы компонент с учетом протекания в потоке необратимой экзотермической химической реакции. Скорость химической реакции в газовой фазе  $\Phi_{\rm G}$  определялась уравнением (16). Скорость химической реакции в пористом слое с учетом процесса каталитического окисления определяется зависимостью:

$$\Phi_{\rm cat} = z_{\rm cat} \frac{\gamma(1-\gamma)}{d} \rho^2 M_{\rm ox} M_{\rm fl} \exp\left(-\frac{E_{\rm cat}}{R_G T}\right).$$
(17)

Параметры каталитической реакции имеют следующие значения:  $E_{cat}=5.1\cdot10^4$ Дж/(моль·К),  $z_{cat}=5.6\cdot10^8$  кг/(м<sup>2</sup>·с).



Рисунок 12 - Схема каталитического реактора

Закрученный поток газа из подводящего патрубка радиуса  $r_{in}$  подается в цилиндрическую камеру радиусом R, перегороженную в сечении х=X<sub>1</sub> пористым фильтром толщиной h (рисунок 12). Структура пористого фильтра моделируется засыпкой из шаров диаметром d с пористостью  $\gamma$ . При моделирования поля течения диапазон изменения параметров был выбран следующим: радиус каталитической камеры был выбран R=0.1 м радиус подводящего патрубка  $r_{in}$ =0.05 м, длина канала L=1 м, толщина пористого слоя h=0.1÷0.25 м, координата  $X_1$  варьировалась в диапазоне 0.25 – 0.75 м. Среднерасходная скорость изменялась в диапазоне  $u_{in}$ =10÷30 м/с, угол закрутки –  $\phi$ =0÷80°.



Рисунок 13 – Линии тока в каталитическом реакторе  $u_{ent}$ =20м/с, d=300мкм,  $\xi$ =0.2,  $x_{por}$ =0.5м, h=0.2м;  $a - \phi$ =0,  $\delta - \phi$ =30°,  $B - \phi$ =60°,  $\Gamma - \phi$ =70°

На рисунке 13 представлены рассчитанные линии тока. В случае подачи в камеру прямоточного потока  $\phi=0$  на входе в камеру возникает струйное течение с границей, расширяющейся в направлении оси Х. В угловой части камеры, ограниченной с одной стороны ее торцом, с другой стороны границей струи и с цилиндрической стенкой формируется третьей стороны угловая рециркуляционная зона. Эта зона занимает пристеночную часть химического реактора вплоть до пористой вставки (рисунок 13). Поток газа, попадая в пористый слой из приосевой области, совершает разворот и начинает двигаться в радиальном направлении к стенке камеры. В пристеночной части пористой вставки поток вновь разворачивается и выходит из пористого слоя вдоль линий тока параллельных оси течения. Для всех исследованных значений параметров

пористого слоя картина течения характеризуется оналичием ядра потока с постоянным значением осевой скорости, пристеночной зоной возвратных течений, ограниченной торцевой и цилиндрической стенками канала, а также пористым слоем, зоной разворота потока в пористом слое и осевым течением в области, лежащей ниже пористой вставки. Основные различия заключаются в размере рециркуляционной зоны и интенсивности рециркуляции в ней. С появлением закрутки потока (φ≠0) картина течения претерпевает изменения. При малой интенсивности закрутки ( $\phi < 50^\circ$ ) происходит уменьшение длины участка свободной струи И. следовательно, уменьшение размеров угловой рециркуляционной зоны за завихрителем. При большой закрутке ( $\phi$ >50°) в окрестности оси возникает большее разряжение, которое приводит к образованию центральной зоны возвратных течений. Закрученный поток прижимается к торцевой и цилиндрической стенкам канала вдоль которых происходит движение основной массы подаваемого в камеру газа. Протяженность угловой зоны в осевом направлении уменьшается с ростом ф, и при ф>60° она полностью исчезает. Дальнейшее увеличение интенсивности закрутки потока приводит к увеличению размеров приосевой рециркуляционной зоны.

Рассмотрим особенности химического реагирования (рисунок 14). При выбранных аэродинамических и термодинамических параметрах химическое превращение реагентов в газовой фазе является незначительным. Основные химические преобразования происходят в каталитическом пористом слое. При этом особенности аэродинамики потока в значительной мере определяют распределение концентраций компонентов в камере.



Рисунок 14 – Изолинии относительной концентрации метана  $M_{fl}/M_{fl,ent}$ в каталитическом реакторе  $u_{ent}$ =20м/с, d=300мкм,  $\xi$ =0.2,  $x_{por}$ =0.5м, h=0.2м;  $a - \phi$ =0,  $\delta - \phi$ =30°,  $B - \phi$ =70°

В отсутствии закрутки потока радиальное распределение осевой скорости характеризуется существенной неравномерностью. Время пребывания

высокоскоростных приосевых слоев реагента в каталитическом слое мало. Это приводит к низкой степени превращения вещества в приосевой зоне и выносу из этой части камеры непрореагировавшего реагента. Поток газа, поступающий в периферийную область каталитического слоя, движется с невысокими значениями осевой скорости, что приводит к увеличению времени пребывания реагента в каталитическом слое и способствует более полному завершению Умеренная закрутка потока ( $\phi < 40^\circ$ ) приводит химической реакции. к расширению, подаваемой в камеру струи реагента и выравниванию радиального профиля осевой скорости. Время пребывания реагента в приосевой области в закрученном потоке увеличивается по сравнению с незакрученным потоком, а в пристеночной области – уменьшается. Однако, несмотря на уменьшение времени пребывания реагента в пристеночной зоне каталитического слоя при умеренной закрутке потока химическая реакция в нем завершается практически полным разложением реагента, и из реактора поступают только продукты реакции. В сильнозакрученном потоке, подаваемый в камеру реагент движется в окрестности твердых стенок. Увеличение скорости течения в окрестности стенки в сильнозакрученных потоках приводит к уменьшению времени пребывания в каталитическом слое реагента, движущегося в пристеночной области. В окрестности стенки требуемый уровень превращения не достигается, и из реактора выходит не полностью переработанная смесь. При этом количество непрореагировавшей смеси увеличивается с ростом закрутки.

**В** заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации с единых методических позиций проведено комплексное исследование структуры течения, смешения, химического реагирования и горения закрученных потоков в каналах с пористыми вставками. Результаты работы можно сформулировать в виде следующих выводов.

1. Вытеснение газа из пористого каркаса происходит тем интенсивнее, чем меньше объем поровых пустот и чем меньше размер частиц, из которых состоит пористый каркас. Для высокопористой среды ( $\gamma \approx 0.9$ ) закрутка потока, характеризуемая углом закрутки  $\phi = 80^{\circ}$ , приводит к увеличению расхода через пористую вставку примерно в два раза по сравнению с незакрученным потоком. Инжекция незакрученного потока из пористого слоя в свободную для прохода газа центральную область приводит к уменьшению тангенциальной скорости и в этой зоне, увеличению осевой составляющей скорости и давления.

2. Течение газа в пористом слое является ламинарным. На границе пористого слоя и области свободной для прохода газа наблюдается турбулизация течения, тем более значительная, чем интенсивнее идет вытеснение газа из пористого слоя.

3. Закрутка потока способствует интенсификации процесса смешения в каналах с порстыми вставками и формированию более однородных распределений концентраций на меньших длинах.

4. Пористый каркас играет роль теплового резервуара, аккумулирующего тепловую энергию. С уменьшением пористости роль кондуктивного теплообмена в пористом каркасе становится более значимым, что приводит к уменьшению длины предпламенной зоны.

5. Высокая теплопроводность пористого каркаса обеспечивает устойчивое горение в непосредственной близости ко входу в канал для различных значений пористости и значений закрутки.

6. Для улучшения характеристик химического превращения в каталитическом реакторе, необходимо организовать течение таким образом, чтобы при заданном расходе уменьшить среднерасходную скорость течения в реакторе и обеспечить как можно более равномерное радиальное распределение осевой скорости.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ.ред. Гортышова Ю. Ф. – Казань: Центр инновационных технологий. –2007. – 240 с.

2. Добрего К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: ИТМО. –2002. – 204 с.

3. BearJ.,BachmatY. Introductionto Modelingof Transport Phenomena in Porous Media. – Dorderecht: Kluwer. –1991. – 352 p.

4. Аэров М. Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия. –1979. – 176 с.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Матвиенко О. В. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе / О. В. Матвиенко, В. П. Базуев, Н. Г. Туркасова, А. И. Байгулова // Вестник Томского государственного архитектурностроительного университета. – 2013. – № 3. – С. 202–213. – 0,7 / 0,17 а.л.

2. Матвиенко О. В. Математическое моделирование каталитического окисления метана в канале с пористой вставкой / О. В. Матвиенко, А. И. Байгулова, А. М. Бубенчиков // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1245–1260. – 1,0 / 0,33 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Matvienko O. V. Mathematical Modeling of Catalytic Oxidation of Methane in a Channel with a Porous Insert / O. V. Matvienko, **A. I. Baigulova**, A. M. Bubenchikov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. -2014. - Vol. 87,  $N_{0}$  6. - P. 1298–1312. - DOI: 10.1007/s10891-014-1133-y.

3. Matvienko O. V. Mathematical Modelling of the Flow Structure and Heat Transfer in a Channel With a Porous Insert / O. V. Matvienko, A. M. Bubenchikov, **A. I. Baigulova** // Advanced Materials Research. -2014. - Vol. 1013. - P. 257–263. - DOI: 10.4028/www.scientific.net.AMR.1013.257. -0.4 / 0.13 a.π. (*Scopus*).

4. Матвиенко О. В. Численное исследование влияния кольцевой пористой вставки на структуру закрученного потока / О. В. Матвиенко, А. И. Байгулова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 3. – С. 11–17. – 0,4 / 0,2 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Matvienko O. V. Numerical Study of the Influence of a Porous Ring Insert on the Structure of a Swirling Flow / O. V. Matvienko, **A. I. Baigulova** // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, № 3. – P. 297–303. – DOI: 10.1007/s11182-015-0498-5.

5. Матвиенко О. В. Исследование влияния приосевой пористой вставки на горение закрученного потока метановоздушной смеси / О. В. Матвиенко, А. И. Байгулова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 3. – С. 18–23. – 0,3 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Matvienko O. V. Study of the Influence of a Paraxial Porous Insert on Combustion of a Swirling Flow of a Mixture of Methane and Air / O. V. Matvienko, A. I. Baigulova // Russian Physics Journal. -2015. - Vol. 58, No 3. - P. 304–310. - DOI: 10.1007/s11182-015-0499-4.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610332. Рогозіту / Матвиенко О. В. (RU), Байгулова А. И. (RU); правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурностроительный университет» (RU). Заявка № 2017661540; дата поступления – 13.11.2017; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 10.01.2018.

Публикации в прочих научных изданиях:

7. Байгулова А. И. Численное исследование процессов смешения закрученного потока в канале с периферийной пористой вставкой / А. И. Байгулова, О. В. Матвиенко // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2014) : материалы I Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 10–14 ноября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 544–545. – 0,1 / 0,05 а.л.

8. Байгулова А. И. Численное исследование структуры закрученного потока в канале с периферийной пористой вставкой / А. И. Байгулова, О. В. Матвиенко // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2014) : материалы I Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 10–14 ноября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 546–547. – 0,1 / 0,05 а.л.

9. Байгулова А. И. Математическое моделирование горения метановоздушной смеси приосевой пористой вставкой В канале с / А. М. Бубенчиков, О. В. Матвиенко Электротехника. А. И. Байгулова, // Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 02-06 декабря 2014 г. -Новосибирск, 2014. – Ч. 2. – С. 203–206. – 0,2 / 0,07 а.л.

на англ. яз.:

**Baygulova A. I.** Mathematical Modelling of Methane-Air Combustion in a Channel with a Porous Axial Insert / A. I. Baigulova, A. M. Bubenchikov, O. V. Matvienko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering – EEM 2014. Novosibirsk, December 02–06, 2014. – P. 660–663. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.660.

10. Байгулова А. И. Электрогидродинамика турбулентного закрученного потока / А. И. Байгулова, А. М. Бубенчиков, О. В. Матвиенко // Электротехника. Электротехнология. Энергетика : сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 09–12 июня 2015 г. – Новосибирск, 2015. – Ч. 3. – С. 17–20. – 0,2 / 0,07 а.л.

11. Байгулова А. И. Исследование смешения закрученного потока в канале с пористой вставкой / А. И. Байгулова // 62-я Университетская научнотехническая конференция студентов и молодых ученых (УНТК-2016) : материалы. Томск, 26 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 1741–1744. – 0,2 а.л.

12. Байгулова А. И. Исследование закрученного потока в канале с пористой вставкой / А. И. Байгулова // 62-я Университетская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых (УНТК-2016) : материалы. Томск, 26 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 1745–1746. – 0,2 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции. Отпечатано на участке цифровой печати Издательского Дома Томского государственного университета Заказ № 6006/19 от «29» апреля 2019 г. Тираж 100 экз. г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28