

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИ-РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗОВЫХ И ДВУХФАЗНЫХ СМЕСЕЙ В СТРУЯХ И КАНАЛАХ

Дается обзор полученных за последние пять лет в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины результатов исследований течений газов и газодисперсных смесей при наличии газофазных и гетерогенных химических реакций, фазовых переходов. Рассмотрены как вопросы формулировки математических моделей и алгоритмов численного решения задач, так и результаты исследования конкретных течений в струях и каналах. В частности, рассмотрены задачи о торможении и горении сверхзвуковых струй в каналах, течений в каналах при подводе тепла и массы, воспламенения влажосодержащих частиц, течения газонасыщенных жидкостей в сложных разветвленных трубопроводах. Указываются области использования результатов.

Наведено огляд отриманих за останні п'ять років в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України результатів досліджень течій газів і газодисперсних сумішей при наявності газофазних і гетерогенних хімічних реакцій, фазових переходів. Розглянуті як питання формулювання математичних моделей і алгоритмів чисельного розв'язування задач, так і результати досліджень конкретних течій у струменях і каналах. Зокрема, розглянуті задачі про гальмування і горіння надзвукових струменів у каналах, течій в каналах при підводі тепла і маси, запалення вологонасичених часток, течій газонасичених рідин у складних розгалужених трубопроводах. Вказуються області використання результатів.

The results of the past five-year research in gas flows and gas dispersive mixtures in the presence of chemical gas-phase and heterogenous reactions, phase transitions, conducted by the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, are presented. Formulation of mathematical models and algorithms of a numerical solution of problems and the results of studies of specific flows through jets and channels are examined. In particular, problems of deceleration and combustion of supersonic channel jets and channel flows in heat-mass addition, ignition of water-content particles, flows of gas-saturated fluids through complex divided manifolds are considered. Applications of the obtained results are specified.

Создание и усовершенствование технологических установок и аппаратов, используемых в энергетике, двигателестроении, химии, металлургии, авиации, требуют изучения течений газов и их смесей с различного рода дисперсными материалами, в особенности при протекании в них высокотемпературных физико-химических процессов. Актуальность этих вопросов в настоящее время определена необходимостью создания энергосберегающих технологий и повышения экологической безопасности многих производственных процессов.

Основные проблемы, имеющие место при численном моделировании процессов горения углеводородных смесей в потоке воздуха, связаны с неопределенностями как в моделях турбулентного переноса в реагирующих смесях, так и в выборе набора реакций, адекватно описывающих химические процессы при локальных значениях температуры, концентраций компонент и давления, и констант скоростей соответствующих реакций. Этим вопросам уделяется основное внимание при проведении исследований, результаты которых описаны в статье. При формулировке математических моделей, разработке алгоритмического и программного обеспечения используется опыт создания методов и алгоритмов численного моделирования процессов сверх- и гиперзвуковой аэротермогазодинамики ракет-носителей и космических аппаратов, исследования влияния термохимического разрушения теплозащитного покрытия на обтекание тел в режиме вязкого взаимодействия, истечения одиночных и составных сверхзвуковых струй двигательных установок ракет-

носителей и др. Полученные при этом результаты изложены в обзорных статьях [1 – 3].

**Алгоритмы численного решения задач.** Проблема описания турбулентных течений химически реагирующих газов находится на уровне, не позволяющем с уверенностью формулировать математические модели таких течений. Поэтому при детальном исследовании процессов горения целесообразно использовать упрощенные модели различного уровня, позволяющие уделить отдельное внимание каждому из аспектов горения, и на основании результатов таких исследований затем формулировать рациональную модель течения с использованием полной системы уравнений Навье–Стокса, дополненной уравнениями переноса отдельных компонент смеси и соотношениями, описывающими кинетику горения.

Наиболее простая модель, описывающая течения в струях и каналах, основана на уравнениях, записанных в приближении «узкого канала». В рамках этого приближения не учитывается изменение давления в поперечных сечениях. Для определения изменения давления в продольном направлении в [4] предложен эффективный алгоритм. При отсутствии локальных зон возвратно-рециркуляционных течений для численного решения уравнений, записанных в приближении «узкого канала», эффективными оказываются маршевые по продольному направлению численные алгоритмы.

Алгоритмы расчета турбулентных течений вязкого газа в каналах с учетом поперечного градиента давления предложены в [5, 6].

В [5] приведен маршевый алгоритм, основанный на неявной схеме решения уравнений, записанных в приближении вязкого слоя. В этом приближении система уравнений разбивается на две подсистемы. К первой подсистеме, рассматриваемой как уравнения относительно давления  $P$  и поперечной компоненты скорости  $v$ , относятся уравнение неразрывности и уравнение сохранения поперечной составляющей импульса. Ко второй – уравнения сохранения продольной составляющей импульса и энергии, а также уравнения для характеристик турбулентности переноса компонент смеси. Вторая подсистема в предположении, что  $P$  и  $v$  известны, имеет параболический тип и допускает решение маршевым методом. Подсистема уравнений первого порядка имеет гиперболический тип и может быть также решена маршевыми методами. Разностная аппроксимация уравнений первой и второй групп приводит к системе уравнений с трехдиагональными матрицами, которые можно решать методом скалярной прогонки.

Представленные в [5] результаты показывают, что этот маршевый алгоритм позволяет проводить расчеты прямооточных турбулентных сверхзвуковых течений с локальными дозвуковыми зонами маршевым методом при условии, что в каждом поперечном сечении среднеинтегральное по сечению число Маха больше единицы. Трудоемкость расчетов сравнима с трудоемкостью расчетов уравнений пограничного слоя.

Для расчета течений с развитыми дозвуковыми зонами эффективным оказывается алгоритм глобальных итераций по давлению. Как показано в [6], этот алгоритм позволяет получить сходящееся решение при незначительном количестве глобальных итераций. Это особенно важно при расчете турбулентных течений многокомпонентных газов при наличии химических реакций, когда количество параметров газа, которые подлежат определению в каждой расчетной ячейке, может достигать нескольких десятков.

В [7, 8] для определения параметров течений с локальными отрывными зонами используется метод установления по времени для решения полной системы уравнений Навье–Стокса, позволяющий рассчитывать течения вязкого газа с развитыми областями отрыва потока и с учетом условий на правой границе расчетной области. Система уравнений Навье–Стокса решается по неявной конечно-разностной схеме Бима–Уорминга с расщеплением векторов конвективных потоков по Стегеру и использованием метода Рое для приближенного решения задачи Римана.

**Алгоритмы расчета параметров струйных течений.** Для исследования струйных течений создано методическое и программное обеспечение, которое нашло применение в различных приложениях в ракетно-космической области [9, 10]. Эти исследования получили дальнейшее развитие в связи с решением задач о перемешивании и горении струй в спутном потоке и решением других технических задач. При численном моделировании течения с горением задача «точного» определения границы струи становится особенно актуальной в связи с необходимостью минимизации размеров расчетной области и, соответственно, уменьшения количества вычислений. В [11] предложен алгоритм расчета асимптотической границы струи в рамках модели «узкого канала» при истечении турбулентной изобарической струи сжимаемого газа в спутный поток или затопленное пространство. Проведена верификация, подтверждающая работоспособность предложенного алгоритма.

В [12] проанализированы особенности применения различных расчетных моделей струйных течений в камерах смешения эжекторов при сверхзвуковом течении эжектирующего газа. Рассмотрены модель «узкого канала», балансовая модель и модель вязко-невязкого взаимодействия. В рамках последней модели течение в сверхзвуковой струе описывается уравнениями невязкого течения, течение в дозвуковом эжектируемом потоке – уравнениями пограничного слоя. Для сращивания решений этих уравнений используются обобщенные уравнения вязко-невязкого взаимодействия. В рамках модели вязко-невязкого взаимодействия определяются параметры критической работы эжектора.

**Торможение сверхзвукового потока в канале<sup>1</sup>.** Актуальность исследований по этому направлению связана с созданием прямоточных воздушно-реактивных двигателей для перспективных летательных аппаратов [13]. Турбулентное торможение сверхзвуковой струи в канале является важным элементом течения газа в воздухозаборниках.

В [14] исследовано течение турбулентной сверхзвуковой струи в спутном дозвуковом потоке в канале. Алгоритм расчета основан на последовательном решении уравнений вязкого слоя в начальной области течения и уравнений «узкого канала» вниз по потоку. Сращивание решений осуществляется в сечении выравнивания давления в поперечном направлении. В качестве примера течения в канале, состоящем из сужающегося участка и участка постоянного поперечного сечения, на рис. 1 показаны поля изомахов (а) и изобар (б). Результаты расчетов показывают, что взаимодействие волновой структуры течения в сверхзвуковой части потока с дозвуковым течением в окрестности

---

<sup>1</sup> Исследования по этому направлению проводились в рамках проекта № 06-01-12(У)/12-01090416(Р) НАН Украины и РФФИ

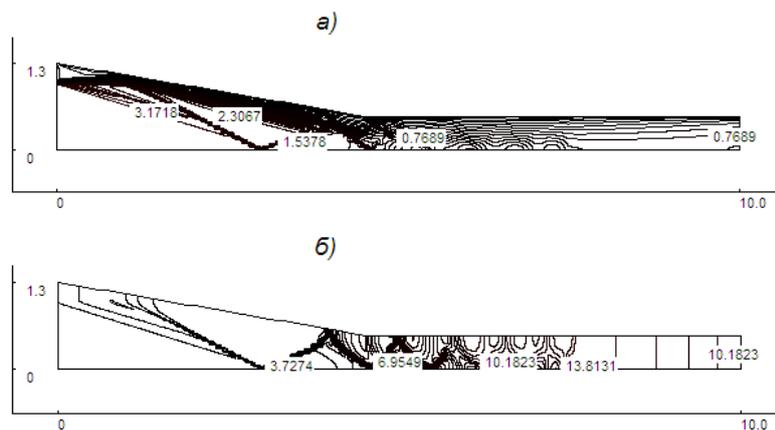


Рис. 1

стенки (пограничным слоем, дозвуковым спутным потоком) приводит к уменьшению поперечных градиентов давления и расширению области дозвукового потока. Для продолжения расчета течения вниз по потоку за сечением, в котором дозвуковая область течения становится доминирующей, маршевый алгоритм расчета уравнений вязкого слоя некорректен. В этом случае расчет осуществляется в рамках модели «узкого канала».

Различные способы торможения сверхзвукового потока в канале при помощи вдува струй проанализированы в [7, 8, 15].

В [7, 8] исследования проведены на основе осредненных по Рейнольдсу двумерных уравнений Навье–Стокса. Моделирование турбулентности осуществляется на основе модели  $\nu_t - 90$ .

В [8] рассматривается подвод одной центральной струи и двух симметрично расположенных пристеночных струй. Показано, что, управляя параметрами и местоположением вдуваемых струй, можно существенно уменьшить неравномерность изменения параметров в выходной части канала.

В связи с вопросами проектирования газодинамических трактов прямоточных воздушно-реактивных двигателей представляет интерес исследование влияния высоты полета на параметры торможения сверхзвукового потока в воздухозаборниках. В [7] изучаются особенности торможения сверхзвукового потока в каналах разной длины при изменении числа Рейнольдса и относительного давления на выходе из канала. Показано, что, управляя противодавлением на выходе из канала, можно сохранять характер течения в канале при изменении числа Рейнольдса.

В [15] в рамках модели вязкого слоя численно исследовано влияние распределенного подвода массы через стенки канала и изменения входных параметров на процесс торможения сверхзвукового потока. Сформулированы рекомендации по выбору моделей турбулентности. Показано, что равномерный распределенный подвод массы сквозь стенки канала является эффективным способом торможения сверхзвукового потока. Увеличение модуля скорости вдуваемого газа приводит к повышению уровня статического давления, уменьшению поперечного градиента давления и скорости течения в канале. Все это способствует снижению неравномерности давления на выходе.

**Горение воздушно-водородной струи в спутном ограниченном потоке.** Создание условий для устойчивого процесса горения и достижения максимальной полноты сгорания горючего на минимально возможном расстоянии является актуальной задачей.

В [16 – 20] в рамках моделей «узкого канала» и вязкого слоя проведены численные исследования процесса смешения, воспламенения и горения в истекающих в спутный поток воздуха дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струях, содержащих водород или углеводородное топливо, с целью определения рациональных параметров неравновесного течения. Кинетика горения водорода в воздухе описывается различными кинетическими моделями. Кинетика горения пропана в воздухе описывается одностадийной стехиометрической брутто-реакцией.

В [16] в рамках модели вязкого слоя численно исследовано влияние моделей турбулентности и характеристик потока на входе в канал при смешении дозвуковых струй углеводородного горючего (водород, метан), истекающих из щелевых сопел, со спутным сверхзвуковым воздушным потоком на длину области перемешивания и предложены рекомендации для ее уменьшения.

Влияние модели турбулентности на характеристики течения при горении показано в [17]. В основу алгоритма расчета положен метод расщепления по физическим процессам. В этой работе приводятся результаты влияния коэффициента избытка окислителя и начальной температуры взаимодействующих потоков на газодинамические параметры и длину области неравновесного течения. В рамках модели диффузионного горения проведены оценки влияния коэффициента избытка окислителя на форму, положение и длину фронта пламени при горении различных углеводородных. Отмечается, что при расчете неравновесных течений необходимо с особой тщательностью подходить к заданию начального компонентного массового состава смеси. Количество и вид реакций, позволяющих с приемлемой точностью описать неравновесный процесс в заданном диапазоне изменения давлений и температур, должны определяться из сопоставления расчетных данных с результатами эксперимента.

В [19] исследовано влияния начальной турбулентности струи и положения сечения искусственного воспламенения на режимы и интенсификацию горения турбулентной дозвуковой струи пропана в спутном потоке воздуха в осесимметричном канале. Показано, что в зависимости от начальной турбулентной вязкости и положения сечения искусственного воспламенения могут реализовываться различные режимы горения: от диффузионного до кинетического. Влияние уровня начальной турбулентности  $\bar{v}_{t0}$  и положения сечения искусственного воспламенения  $\bar{x}_{podz}$  на распределение температуры в потоке иллюстрирует рис. 2 (линейные размеры отнесены к радиусу канала  $r_a$ ).

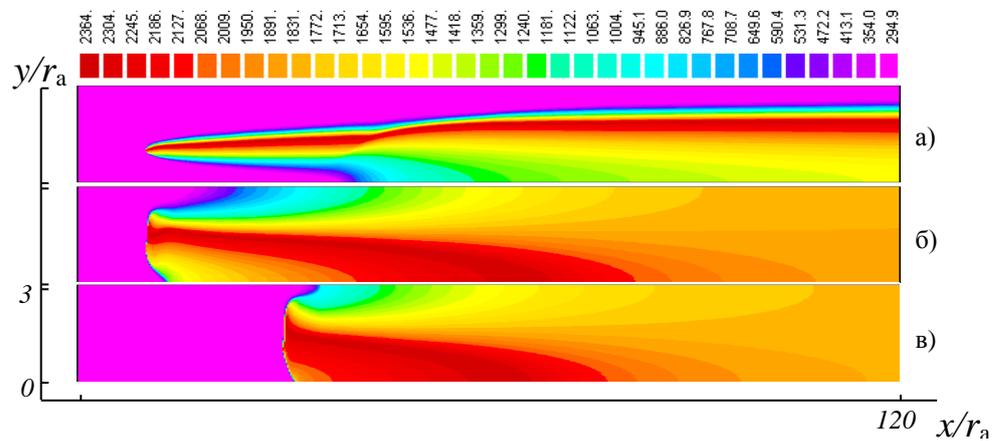


Рис. 2

При малой начальной турбулентности ( $\bar{\nu}_{t0} = 0,1$ ,  $\bar{x}_{podz} = 10$  – рис. 2а) имеет место режим горения, близкий к диффузионному. При этом режиме горение происходит в узком фронте пламени в области смешения, а скорость выгорания лимитируется диффузионным переносом реагентов к нему. При увеличении начальной турбулентной вязкости ( $\bar{\nu}_{t0} = 10$ ,  $\bar{x}_{podz} = 10$  – рис. 2б) ширина области горения увеличивается, процесс горения протекает интенсивнее. Сдвигая положение сечения поджига вниз по потоку ( $\bar{\nu}_{t0} = 10$ ,  $\bar{x}_{podz} = 30$  – рис. 2в), получаем ярко выраженную область кинетического горения.

В большинстве работ, посвященных расчету горения газовых смесей, не учитывается влияние турбулентных пульсаций температуры и концентраций компонентов на параметры воспламенения и горения. В случае «медленных» химических реакций в случае неперемешанной смеси влияние пульсаций температуры и концентраций может быть весомым. В [20] показано, что учет турбулентных пульсаций концентраций компонент химической реакции приводит к замедлению горения и, как следствие, к уменьшению температуры в области горения (почти в 3 раза), уменьшению продольной скорости в потоке (примерно на 20 %).

**Горение газодисперсных смесей.** Практически во всех посвященных изучению газодисперсных течений работах принимается, что размеры частиц настолько малы, что можно пренебречь изменением температуры в пределах частицы – изотермическая частица. Однако характер прогрева определяется не только размерами частиц, но и теплофизическими свойствами материала частиц и процессами, происходящими в объеме частицы при ее нагреве. В частности, одним из таких процессов может быть испарение влаги из материала частиц.

В [21 – 23] анализируется влияние неравномерного прогрева сухих и влагонасыщенных частиц угля на время и характер их прогрева, воспламенения и горения. Используются кинетические модели гетерогенных реакций на поверхности частиц и равновесные модели реакций в газовой фазе. При горении частицы учитываются реакции углерода с кислородом воздуха, парами воды и двуокисью углерода. Для детального анализа влияния неравномерности прогрева частиц на характер их прогрева, воспламенения и горения используется среднеобъемное приближение для газодисперсной смеси.

На примере сухой частицы показано, что в зависимости от величин коэффициента температуропроводности  $a$  и критерия Био могут реализоваться два режима. Например, при  $a/R_n^2 = 7,6$  и  $Bi = 0,22$  температура на поверхности частицы и в ее центре и температура неизотермической частицы практически совпадают, а при  $a/R_n^2 = 0,76$  и  $Bi = 2,2$  температура поверхности частицы остается заметно выше температуры в центре на всем промежутке времени прогрева ( $R_n$  – радиус частицы). Температура изотермической частицы находится почти в середине интервала температур поверхности и центра неизотермической частицы.

Отличительные особенности рассматриваемых моделей сводятся к следующему. Температура изотермической частицы на стадии испарения влаги остается практически постоянной и равной температуре насыщенных паров. После испарения влаги начинается прогрев высохшей частицы с последующим ее воспламенением. Учет изменения температуры внутри частицы изменяет характер изменения параметров. Имеет место нагрев поверхности частицы и повышение ее температуры до температуры воспламенения углерода, что влечет за собой более интенсивное повышение температуры поверхности частицы. Испарение влаги происходит внутри частицы. Температура в центре частицы в течение некоторого времени остается постоянной. После испарения влаги температура в центре частицы резко возрастает и приближается к температуре поверхности. Эти особенности проиллюстрированы на рис. 3, на котором приведены изменения температуры и массовых концентраций  $X_k$  компонент газовой смеси в реакционном пространстве (равновесная модель) при начальной температуре газа  $750^\circ\text{C}$  и начальном содержании влаги  $k_{H_2O} = 0,25$  в частицах диаметра 500 мкм. Пунктир относится к результатам, полученным в среднеобъемном приближении. На рис. 3а показаны температура газа в реакционном пространстве и температура поверхности и центра частицы (линии 1, 2 и 3).

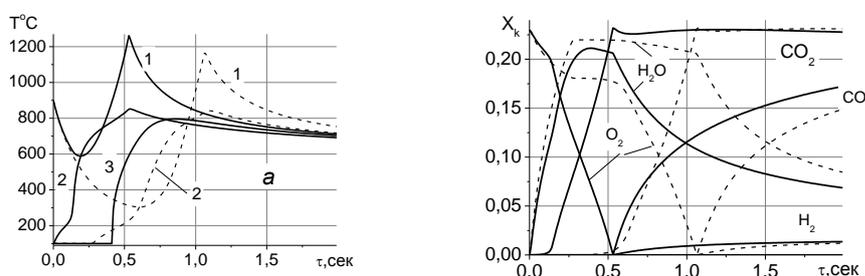


Рис. 3

Для практических приложений важно то, что при учете изменения температуры внутри частицы прогрев и воспламенение частицы происходит значительно быстрее (в два и более раз), чем при постоянной в пределах частицы температуре.

При рассмотрении факельного горения в закрученной турбулентной струе используется двухскоростная, двухтемпературная модель сплошной среды. Течение в струе описывается в приближении «узкого канала».

Расчетные оценки параметров факела горения влагонасыщенных частиц проведены в рамках двухскоростной и двухтемпературной модели сплошной среды [21 – 23]. Турбулентное течение в несущей фазе описывается в приближении «узкого канала». В результате анализа полученных данных показано следующее:

- максимальная температура в факеле горения наблюдается в окрестности внешней границы факела, где частицы максимально нагреваются при взаимодействии с горячей низкоскоростной окружающей средой и к горящим частицам поступает необходимое для процесса горения количество кислорода воздуха;
- эффективным способом интенсификации сгорания частиц является создание закрученных потоков как газовой фазы, так и частиц. Ускорение сгорания частиц происходит вследствие перемещения их основной массы в периферийную область горячего газа. Более технологичным является обеспечение вращательного движения несущего потока воздуха. Естественным ограничением на величину угловой скорости закрутки частиц является требование непопадания частиц на стенки топочной камеры.

Разработанное методическое и программное обеспечение может быть использовано при выборе рациональных условий для сжигания влагонасыщенных частиц угля в топочном пространстве промышленных котлоагрегатов.

**Управление течением газа при помощи комбинированных воздействий.** Изменение параметров течений газов происходит под влиянием различного рода внешних воздействий: изменение площади проходного сечения, подвод тепла, совершение работы, подвод дополнительной массы и др. Хотя наличие нескольких типов воздействий одновременно является составной частью многих практически интересных течений, общие закономерности таких течений описаны мало.

В [24] выяснены характерные особенности влияния массовой доли капель, фазовых переходов и подвода тепла на параметры истечения воздушно-паро-капельной смеси. Для этого течения характерно наличие трех способов воздействия: подвод тепла, подвод дополнительной массы в газовую фазу, являющийся следствием испарения капель, и работа газового потока, связанная с передачей импульса от газовой фазы к каплям при их ускорении. Показано, что при испарении капель, с одной стороны, уменьшается количество тепла, идущее на нагрев несущего газа, и с другой стороны, имеет место увеличение расхода парогазовой смеси, что само по себе может вызвать звуковое заклинивание. Следовательно, испарение может приводить как к увеличению количества тепла, при котором наступает звуковое заклинивание, так и к его уменьшению.

В [22, 25] рассмотрена задача об истечении газа через канал переменного сечения при подводе и отводе тепла. Показано, что имеет место снижение влияния теплового воздействия на изменение скорости сверхзвукового потока в расширяющемся канале по сравнению с каналом постоянного поперечного сечения. Проведено исследование перестройки течения при сверхкритическом подводе тепла. При таком подводе тепла сверхзвуковое течение в канале постоянного поперечного сечения невозможно. Одновременное влияние сверхкритического подвода тепла и изменения площади поперечного сечения

канала вносит качественные изменения в картину течения. На некотором расстоянии вверх по потоку от места подвода тепла формируется скачок уплотнения, за которым течение становится дозвуковым. Далее вниз по потоку скорость дозвукового течения в расширяющемся участке убывает. Расстояние скачка вверх по потоку от сечения подвода тепла определяется условием, что после подвода тепла скорость становится равной скорости звука. В расширяющемся канале вниз по потоку от этого сечения формируется сверхзвуковое течение.

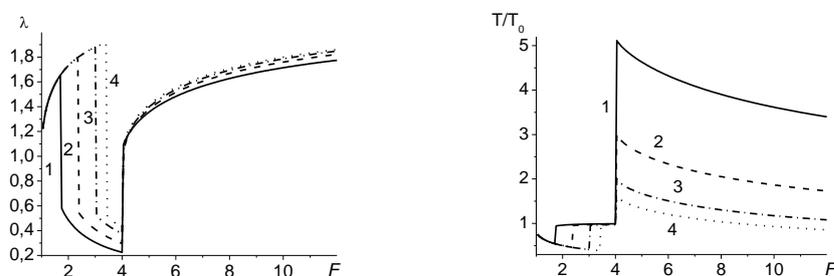


Рис. 4

В качестве иллюстрации на рис. 4 показано изменение коэффициента скорости  $\lambda$  и температуры в расширяющемся канале при выделении тепла вследствие сгорания водорода в сверхзвуковом потоке воздуха. Воспламенение инициируется в сечении  $F = 4$  внешним источником ( $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $T_0$  – исходная температура торможения газа). Количество выделившегося тепла регулируется коэффициентом избытка воздуха  $\beta$ . Линии 1, 2, 3, 4 соответствуют  $\beta = 1; 2,5; 5; 7,5$ . Скачки уплотнения формируются соответственно в сечениях  $F_{sh} = 1,7025; 2,33; 3,025; 3,4025$ .

**Возникновение автоколебательного истечения газа из емкости через канал при комбинированном воздействии.** В [26] расчетным путем выявлена принципиальная возможность возникновения автоколебательных режимов истечения совершенного газа из емкости (ресивера) с заданными полным давлением  $p_0$  и температурой  $T_0$  или энтальпией  $i_0$  в среду с заданным давлением  $p_e$  при распределенном по длине канала подводе тепла. В [27 – 29] показано, что подвод массы вдоль канала приводит к уменьшению количества тепла, необходимого для перехода от стационарного к автоколебательному режиму истечения. Повышение энтальпии подводимой массы газа позволяет инициировать автоколебания и без подвода дополнительного тепла. Воспламенение подводимого газа приводит к сдвигу области автоколебаний в сторону меньшей интенсивности распределенного подвода массы. При истечении паровоздушно-капельной смеси переход к автоколебательному режиму истечения может иметь место только при количестве подведенного тепла, обеспечивающем полное испарение капель. При этом в некотором диапазоне массовых долей капель автоколебания паровоздушно-капельной смеси возникают при меньшем количестве подводимого тепла, чем при истечении воздуха. Увеличение начальных размеров капель приводит к уменьшению амплитуды и к росту частоты колебаний расхода.

Влияние массовой доли воды  $k_0$  на амплитуду колебаний расхода показано на рис. 5, на котором показаны изменения минимального  $G_{\min}$  и максимального  $G_{\max}$  (пунктир) безразмерного расходов во входном сечении канала для значений безразмерного параметра теплового воздействия  $\delta q = 1,0; 1,05; 1,10$  (линии 1, 2, 3). При увеличении  $k_0$  амплитуда колебаний вначале воз-

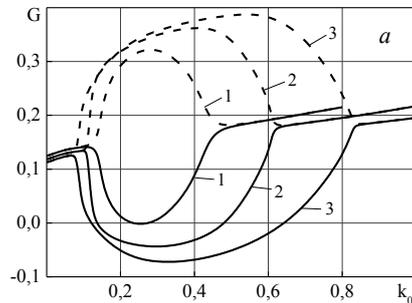


Рис. 5

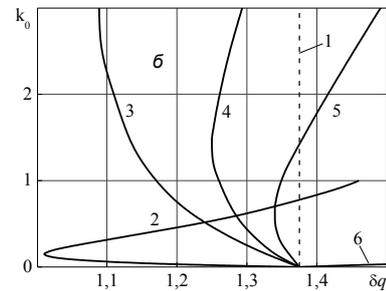


Рис. 6.

растает, достигая максимума, а затем убывает, и при некотором значении  $k_0$  реализуется стационарный режим истечения.

При истечении паровоздушно-капельной смеси имеют место два аспекта. С одной стороны затраты тепла на подогрев и испарение приводят к уменьшению доли тепла, идущего на нагрев газа. С другой стороны испарение капле приводит к вдуву дополнительной массы газа (паров воды) в паровоздушную смесь. Вследствие первого аспекта имеет место сдвиг границы области автоколебательного режима в сторону больших значений  $\delta q$ . Второй приводит к сдвигу этой границы в сторону меньших значений  $\delta q$ . Последний аспект может привести к переходу к нестационарному автоколебательному режиму истечения при меньших по сравнению с чистым воздухом значениях  $\delta q$ . Это видно из рис. 6, на котором показаны границы областей автоколебаний в плоскости  $(k_0, \delta q)$ . Линии 1, 2 относятся к течению воздуха и паровоздушно-капельной смеси с испарением капель; линии 3, 4, 5, 6 – смесь воздуха с неиспаряющимися частицами при отношении удельных теплоемкостей материала частиц и воздуха  $C_s / C_p = 0,3; 0,4; 0,5$  и 4,2 (капли воды).

**Неустановившиеся течения газонасыщенных жидкостей в сложных разветвленных трубопроводных системах.** Обратимые процессы насыщения жидкости газами и выделения из жидкости растворенных газов имеют место в аппаратах с непосредственным контактом газов с жидкостями (сепараторы, барботеры, топливные баки ракетных двигателей) и при движении газонасыщенных жидкостей в элементах теплообменных аппаратов, топливных магистралях энергетических установок. Установление закономерностей гидродинамики потоков с выделением и растворением газов важно для решения технических задач в указанных выше областях.

В [30] рассмотрены проблемные вопросы, возникающие при расчете неустановившихся течений жидкости в сложных разветвленных трубопроводных системах и связанные с переменностью скорости распространения возмущений для газонасыщенных жидкостей, нестационарным гидравлическим

сопротивлением, разрывами оплошности, влиянием работы отсечных клапанов, изменением структуры проточной системы. Рассмотрение этих вопросов проводится на примере системы жидкостных реактивных двигателей малой тяги, обеспечивающей управление полетом космического аппарата или верхней ступени ракеты-носителя. Рассматриваются течения компонентов горючего и окислителя в питающих магистралях, динамика электроуправляемых топливных клапанов и термогазодинамические процессы в камерах сгорания.

В [31, 32] на примерах течения газонасыщенного потока в простом трубопроводе и трубопроводе с жиклером на выходе показано влияние газовой выделению на параметры переходных процессов при выходе на стационарный режим течения. Рис. 7 иллюстрирует влияние газонасыщенности ( $\tilde{n} = 0,17 \text{ кг/м}^3$ ) на характер установления стационарного режима в трубе с жиклерами различного гидравлического сопротивления  $\zeta = 0, 5, 20$  и  $50$  (линии 1, 2, 3 и 4). Линия 4а отражает выход на стационарный режим течения негазонасыщенной жидкости ( $\tilde{n} = 0 \text{ кг/м}^3$ ) для  $\zeta = 50$ .

Газовыделение приводит к уменьшению амплитуды и частоты колебательного процесса и к увеличению гидравлического сопротивления трубопровода. Наличие жиклера в конце трубопровода приводит к снижению интенсивности газовой выделению. В частности, при определенных степенях газонасыщенности установка жиклера может привести к тому, что газовыделение не влияет на конечные установившиеся значения давлений и расходов, оказывая при этом существенное влияние на характер переходного процесса.

Особую важность учет особенностей движения газонасыщенных жидкостей имеет при анализе работы ракетных двигателей малой тяги (ДМТ), используемых для управления полетом космических аппаратов. Топливные магистрали систем таких двигателей (в количестве не менее 8 шт.) представляют собой сложную разветвленную трубопроводную сеть со множеством сосредоточенных гидравлических элементов (шайб, тройников, фильтров, тупиков). Импульсные режимы включения-выключения двигателей определяют неустановившийся характер ее работы [30].

С использованием разработанного программно-методического обеспечения в [33] проведен анализ переходных процессов в системе жидкостно-реактивного управления движением 3-ей ступени ракеты-носителя с питанием газонасыщенными компонентами топлива из баков маршевого двигателя. Рассмотрены две наиболее напряженные циклограммы работы управляющих ДМТ: при одновременной работе в импульсном и непрерывном режимах 6-ти двигателей (маршевый двигатель выключен) и при наличии гидравлических ударов на входах в систему питания ДМТ, сопровождающих запуск и останов маршевого двигателя. Показано, что при определенных условиях для входных давлений и степенях газонасыщения компонентов топлива, возмож-

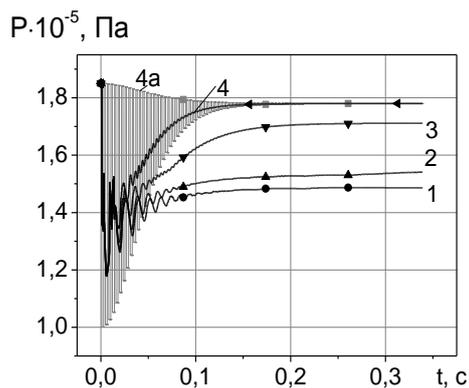


Рис. 7

но возникновение пульсаций давления в камерах сгорания ДМТ, обусловленных газовойделением.

**Выводы.** Основные особенности течения и горения в струях и каналах течений можно выяснить, используя модель «узкого канала» и модель вязкого слоя. При отсутствии зон возвратно-рециркуляционного течения эти модели позволяют получить результаты при существенно меньших затратах машинного времени, чем модели, основанные на полной системе уравнений Навье–Стокса. Полученные результаты и разработанное программно-методическое обеспечение могут быть использованы при отработке конструктивных узлов энергетических установок, выборе режимов смешения и горения, определении параметров работы пневмогидравлических систем различного назначения.

1. *Галинский В. П.* Проблемы создания научно-методического обеспечения по аэрогазодинамике ракет-носителей / *В. П. Галинский, В. И. Тимошенко* // *Космическая наука и технологи.* – 1998. – Т. 4, № 2/3. – С. 64 – 72.
2. *Тимошенко В. И.* Научно-методическое обеспечение исследования процессов аэрогазодинамики объектов ракетно-космической техники / *В. И. Тимошенко* // *Техническая механика.* – 2001. – № 2. – С. 38 – 51.
3. *Тимошенко В. И.* Компьютерное моделирование процессов гипер- и сверхзвуковой аэрогазодинамики летательных аппаратов / *В. И. Тимошенко* // *Аэродинамика: проблемы и перспективы* : сб. статей. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – С. 158 – 175.
4. *Дешко А. Е.* Сравнение алгоритмов расчета продольного градиента давления для модели «узкого канала» в задачах внутренней газодинамики / *А. Е. Дешко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика.* – 2012. – № 3. – С. 35 – 44.
5. *Тимошенко В. И.* Маршевый расчет течения при взаимодействии сверхзвуковой турбулентной струи со спутным ограниченным дозвуковым потоком / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Вісник Дніпропетровського університету. Механіка.* – 2008. – Вип. 11, том 1, № 5. – С. 30 – 41.
6. *Белоцерковец И. С.* Расчет течения при взаимодействии сверхзвуковой турбулентной струи со спутным ограниченным дозвуковым потоком методом глобальных итераций / *И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика.* – 2009. – №2. – С. 23 – 34.
7. *Тимошенко В. И.* Торможение ламинарного сверхзвукового потока в плоском канале при наличии противодействия / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Техническая механика.* – 2013. – № 2. – С. 56 – 63.
8. *Тимошенко В. И.* Влияние вдува струй на торможение воздушного сверхзвукового потока в канале / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Техническая механика.* – 2013. – № 3. – С. 3 – 9.
9. *Тимошенко В. И.* Численное моделирование струйных течений для объектов ракетно-космической техники / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Космическая наука и технология.* – 1999. – Т.5, №1. – С. 78 – 89.
10. *Тимошенко В. И.* Численное моделирование струйных течений / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика.* – 2008. – № 2. – С. 107 – 122.
11. *Тимошенко В. И.* К определению границы вязкой струи сжимаемого газа в спутном потоке / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, А. Е. Дешко* // *Техническая механика.* – 2012. – № 2. – С. 31 – 42.
12. *Тимошенко В. И.* Расчетные модели газоструйного эжектора при сверхзвуковой скорости эжектирующего потока / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика.* – 2008. – №1. – С. 50 – 63.
13. *Тимошенко В. И.* Концептуальные вопросы математического моделирования процессов аэрогазотермодинамики гиперзвукового летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, В. П. Галинский* // *Аэрогидродинамика : проблемы и перспективы* : сб. науч. трудов. – Харьков : Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – Вып. 2. – С. 161 – 181.
14. *Тимошенко В. И.* Влияние геометрии канала на процесс торможения сверхзвуковой струи в спутном дозвуковом потоке / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, Н. В. Гурылева* // *Техническая механика.* – 2009. – №4. – С. 43 – 49.
15. *Тимошенко В. И.* Торможение сверхзвукового потока в канале при распределенном подводе массы / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, Н. В. Гурылева* // *Техническая механика.* – 2012. – № 3. – С. 23 – 34.
16. *Тимошенко В. И.* Смещение истекающих из щелевых сопел дозвуковых струй углеводородного горючего со спутным сверхзвуковым потоком в канале / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, Н. В. Гурылева* // *Техническая механика.* – 2012. – № 4. – С. 36 – 48.
17. *Тимошенко В. И.* Турбулентное смешение и горение сверхзвуковой воздушно-водородной струи в спутном ограниченном дозвуковом потоке / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Аэродинамика и акустика: проблемы и перспективы.* Сб. научн. трудов. – Харьков : «ХАИ», 2009. – Вып. 3. – С. 187 – 201.

18. *Valeriy I. Timoshenko* Problems of providing completeness of the methane-containing block-jet combustion in a rocket ramjet engine's combustion chamber / *Valeriy I. Timoshenko, Igor S. Belotserkovets, Vjacheslav P. Gusinin* // *Acta Astronautica*. – 2009. – V.65. – № 9-10. – P.1231–1237.
19. *Тимошенко В. И.* К вопросу интенсификации горения углеводородного топлива в спутном потоке воздуха / *В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика*. – 2010. – №3. – С. 71 – 80.
20. *Дешко А. Е.* О влиянии модели турбулентности и пульсаций концентраций компонент газовой смеси на расчетные параметры течения при горении углеводородного топлива в спутном потоке воздуха в канале / *А. Е. Дешко* // *Техническая механика*. – 2012. – № 4. – С. 49 – 58.
21. *Тимошенко В. И.* Расчетные исследования процессов воспламенения и факельного горения капель водоугольной суспензии / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий* : VI международная конференции, 20 – 24 сентября 2010, Большая Ялта, Понизовка, Крым, Украина : тезисы докладов. – 2010. – С. 45.
22. *Тимошенко В. И.* Теоретические основы технической газовой динамики / *В. И. Тимошенко*. – Киев : Наукова думка, 2013. – 426 с.
23. *Тимошенко В. И.* Влияние объемного распределения температуры в водонасыщенных угольных частицах на их прогрев и воспламенение в газодисперсном потоке / *В. И. Тимошенко* // *Модели и методы аэродинамики* : 12-ая Международная школа-семинар : материалы школы-семинара. – М. : МЦНМО, 2012. – С. 167 – 168.
24. *Тимошенко В. И.* Влияние комбинированного воздействия на поток и изменение параметров течения / *В. И. Тимошенко* // *Модели и методы аэродинамики* : Восьмая Международная школа-семинар, 7–16 июня, 2008 г., Евпатория : материалы школы-семинара. – М. : МЦНМО. – 2008. – С. 153.
25. *Тимошенко В. И.* Влияние на изменение скорости газа одновременного теплового и геометрического воздействия на поток / *В. И. Тимошенко* // *Вісник Дніпропетровського університету. Механіка*. – 2008. – Вип.11, том 1, №5. – С. 3 – 12.
26. *Тимошенко В. И.* Истечение газа из емкости в среду с противодействием в условиях интенсивного подвода тепла / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Инженерно-физический журнал*. – 2008. – Т.77, №3. – С. 530 – 537.
27. *Тимошенко В. И.* О возникновении автоколебательного режима истечения газа и газокapельной смеси из емкости в среду с противодействием тепла / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Инженерно-физический журнал*. – 2013. – Т.86, №1. – С. 116 – 125.
28. *Тимошенко В. И.* Истечение газа из емкости через канал в среду с противодействием при подводе тепла и массы / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Техническая механика*. – 2009. – №2. – С.70 – 77.
29. *Тимошенко В. И.* Влияние горения и фазовых переходов на установление автоколебательного режима истечения из емкости через канал в среду с противодействием при распределенном подводе массы и тепла / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // *Модели и методы аэродинамики* : десятая Международная школа-семинар. – М. : МЦНМО, 2010. – С. 163 – 164.
30. *Тимошенко В. И.* Неустановившиеся течения жидкости в сложных разветвленных трубопроводных системах / *В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – Т. 92, № 5. – С. 47 – 57.
31. *Тимошенко В. И.* Влияние газонасыщенности жидкости на неустановившиеся процессы течения в трубопроводных системах / *В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко* // *Техническая механика*. – 2010. – №4. – С. 34 – 43.
32. *Тимошенко В. И.* Особенности неустановившихся течений газонасыщенных жидкостей в сложных трубопроводных системах / *В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко* // *Модели и методы аэродинамики* : 11-ая Международная школа-семинар : материалы школы-семинара. – М. : МЦНМО, 2011. – С. 167 – 168.
33. *Тимошенко В. И.* Особенности совместной работы управляющих двигателей малой тяги и маршевого двигателя III ступени РН «Циклон-4» / *В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. М. Дураченко, В. М. Анищенко, А. В. Корельский* // *Космические технологии : настоящее и будущее* : IV Международная конференция : тезисы докладов. – Днепропетровск, 2013. – С. 237 – 238.

Институт технической механики  
НАН Украины и ГКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 16.10.13,  
в окончательном варианте 28.10.13