

УДК 629.7.01

**В.И. ТИМОШЕНКО, Ю.В. КНЫШЕНКО***Институт технической механики Национальной академии наук Украины  
и Национального космического агентства Украины, Украина***НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СЛОЖНЫХ  
РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ**

*Рассмотрены проблемные вопросы, возникающие при расчете неустановившихся течений жидкости в сложных разветвленных трубопроводных системах, связанные с переменностью скорости распространения возмущений для газонасыщенных жидкостей, нестационарным гидравлическим сопротивлением, разрывами оплошности, влиянием работы отсечных клапанов, изменением структуры проточной системы. Описана математическая модель системы жидкостных реактивных двигателей малой тяги, обеспечивающая управление полетом космического аппарата или верхней ступени ракеты-носителя, включающая расчетные модули течений компонентов топлива в питающих магистралях, динамики электроуправляемых топливных клапанов и термогазодинамических процессов в камерах сгорания.*

**Ключевые слова:** *трубопровод, двигатель малой тяги, камера сгорания, математическая модель, скорость ударной волны, гидравлический удар*

**Введение**

История изучения нестационарных гидродинамических процессов в трубопроводных системах, включающих в частности гидравлический удар, насчитывает уже более ста лет и начинается со ставшей классической работы Н.Е. Жуковского [1], опубликованной 1899 г. В этой работе теоретически и экспериментально показано, что уровень гидроударного давления может в несколько раз превышать характерные значения давления в трубопроводе при стационарном режиме течения и зависит от скорости жидкости, скорости распространения ударной волны, плотности жидкости и времени закрытия крана. Известные формулы Жуковского, позволяющие определить скорость движения ударной волны в напорном трубопроводе, величину максимального давления при гидравлическом ударе и время закрытия задвижки, обеспечивающее снижение давления гидроудара до допустимого значения, лежат в основе гидравлических расчетов напорных трубопроводов и имеют вид

$$c = \frac{c_{ж}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж}}{E_{тр}} \frac{D}{\delta}}}; \Delta P = c_{рж} U; t \geq \frac{2L\rho U}{[p]} \quad (1)$$

где  $c_{ж}$ ,  $c$  – скорость распространения звука в жидкости и скорость ударной волны в трубопроводе с жидкостью соответственно;

$E_{ж}$ ,  $E_{тр}$  – модули сжимаемости жидкости и ма-

териала трубопровода;

$D$ ,  $\delta$  – диаметр и толщина стенки трубопровода;

$\Delta P$  – максимальное давление при гидроударе;

$\rho$ ,  $U$  – плотность и скорость жидкости соответственно;

$L$  – длина трубопровода до источника давления;

$[p]$  – допустимое из условий прочности давление гидроудара.

В последующие годы явление гидравлического удара неизменно привлекало внимание ученых и инженеров во многих странах в связи с научным и практическим аспектами. К началу шестидесятых годов прошлого столетия основные физические и гидродинамические процессы, протекающие в элементах трубопроводных систем при гидравлическом ударе, были в основном изучены. В то же время было установлено, что в реальных разветвленных гидросистемах при наличии участков трубопроводов различного проходного сечения, клапанов, диафрагм, колен, тройников, кольцевых участков трубопроводов, изменяемой структуры трубопроводной системы, за счет срабатывания регулирующих устройств, специфика переходных процессов, в основном, определяется многократным наложением отраженных от конструктивных неоднородностей систем волн давления и трансформацией их при прохождении по длине трубопроводов. Фактически неустановившиеся процессы в таких системах представляют собой взаимодействие гидроударных воз-

мущений типа прямых или не прямых гидроударов и их отражений.

Описанию этих результатов посвящено значительное количество публикаций, в числе которых работы И.А. Чарного, Б.Ф. Лямаева, Д.Н. Попова, Д.А. Фокса, Б.Ф. Гликмана, Н.М. Беляева, Н.П. Белика, Э.В. Венгерского, Д.А. Полухина и др. [2 – 11]

Особый всплеск внимания к исследованиям в данном направлении произошел в связи с развитием ракетно-космической техники в части разработки пневмогидравлических систем жидкостно-ракетных маршевых двигателей и управляющих двигателей малой тяги.

Широкий круг вопросов возникает при расчетном обосновании конструктивных и режимных параметров системы управления движением космического аппарата или верхней ступени ракеты-носителя с помощью реактивных двигателей малой тяги (ДМТ). Это связано со следующими обстоятельствами:

- сложная пространственная конфигурация топливных трубопроводов и большое количество двигателей;

- режимы работы двигателей определяются возмущениями, действующими на летательный аппарат при его полете;

- количество конструктивных элементов (линейных участков, клапанов, жиклеров, разветвлений) исчисляются десятками, даже при минимальном количестве ДМТ равно восьми;

- эффективная работа системы управления полетом летательного аппарата с минимальными энергозатратами обеспечивается импульсами тяги ДМТ с продолжительностью, не превышающей 10 – 40 мс.;

- характерные времена гидродинамических, механических и электрических процессов сопоставимы между собой и близки к длительности управляющих импульсов тяги; так, времена распространения гидроударных возмущений составляют 10 – 20 мс, а времена срабатывания применяемых электроуправляемых топливных клапанов многократно го действия имеют порядок 20 – 30 мс.

- при использовании газонасыщенного топлива с образованием газожидкостных потоков времена распространения гидроударных возмущений в магистралях одного из топливных компонентов по отношению к возмущениям в магистралях другого компонента могут отличаться в 5 – 10 раз.

Эти факторы в совокупности оказывают существенное влияние на величину и форму управляющих импульсов тяги и, в конечном счете, на энергетическую эффективность управляющих ДМТ.

Целью данной работы является анализ проблемных вопросов и описание методики расчета

функционирования в системе двухкомпонентных управляющих ракетных двигателей, состоящей из двух индивидуальных разветвленных трубопроводных систем, соединяемых между собой в отдельные промежутки времени через объемы камер сгорания.

## 1. Проблемные вопросы при расчете неустановившихся процессов в сложных трубопроводных системах

При постановке и численном решении задачи о нестационарном течении жидкости в реальных гидравлических системах необходимо учитывать следующие проблемы.

1. Скорость распространения волны гидравлического удара (ударной волны) может изменяться по различным участкам в соответствии с формулой Жуковского в зависимости от диаметра, толщины стенки и материала труб.

Дальнейшим развитием этой зависимости является учет газонасыщенности жидкости газами, что имеет место либо в силу технологической специфики функционирования гидросистемы (например, при добыче и транспортировке нефтегазовых сред), либо в силу преднамеренной газификации жидкости при использовании газового наддува емкостей с используемой жидкостью (например, топливные баки ракет для нормальной работы насосных агрегатов, при вытеснительном способе обеспечения движения жидкости по трубопроводной системе). Это приводит к тому, что при понижении давления на отдельных участках системы происходит выделение растворенного газа в виде пузырьков с образованием двухфазной газожидкостной среды, сжимаемость которой существенно уменьшается, что в соответствии с формулой Жуковского приводит к локальному падению скорости перемещения ударной волны.

Скорость распространения ударной волны в трубопроводе с газожидкостной средой при относительной объемной концентрации газовых пузырьков не более 2-3% может быть найдена по зависимости [10-12]

$$c_{гж} = \frac{c_{ж}}{\sqrt{(1-\phi)^2 + \frac{\phi(1-\phi)\rho_{ж}(c_{ж})^2}{k\rho} + \frac{E_{ж}D}{E_{тр}\delta}}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;

$\phi$  – объемная концентрация выделившегося в жидкость газа;

$p$  – давление в жидкости;

$k$  – показатель адиабаты газа, растворенного в жидкости.

Зависимость (2) подтверждена экспериментально на различных жидкостях и газах и свиде-

тельствует о сильном влиянии объемной концентрации на величину скорости звука газожидкостной среды. Так, наличие в потоке воды газовой фазы при нормальных условиях с относительной объемной концентрацией 1% снижает скорость распространения возмущения до 118 м/с, т.е. до величины примерно в 3 раза меньшей, чем в газовой среде и более чем в 10 раз меньшей, чем в жидкости. В связи с этим построение расчетного алгоритма должно учитывать появление в расчетной области участков со значительно сниженной скоростью звука.

При отсутствии газа в жидкости ( $\phi = 0$ ) формула (2) переходит в формулу Жуковского для скорости звука в трубопроводе.

2. Определение гидравлического сопротивления трения при расчете неустановившихся режимов течения является в настоящее время открытым вопросом. Об этом свидетельствуют результаты многочисленных экспериментов по гидравлическому удару в простом трубопроводе, показывающие, что использование гипотезы квазистационарности дает достаточно хорошее согласование величины и формы первого пика ударной волны, а расчет последующих пиков, обусловленных отражением и перетражением ударных волн, существенно отличается от экспериментальных данных. В работе [13] предложен метод учета влияния предистории нестационарного процесса течения на величину коэффициента гидравлического сопротивления, справедливый для условий ламинарного течения. Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления пульсирующих потоков в режимах турбулентных течений имеют противоречивый характер и не дают однозначного ответа о границах использования квазистационарных моделей для расчета гидравлических потерь.

В случае газожидкостного потока эта проблема даже в рамках гипотезы о квазистационарности усложняется зависимостью гидравлического сопротивления от объемной концентрации газа, размеров газовых пузырьков, находящихся на внутренней поверхности трубопровода и миграции их в движущейся жидкости. Опираясь на результаты экспериментов, в [10, 11] предложена зависимость предельного радиуса газового пузырька

$$r_{\text{п}} \approx \frac{0,48\sigma}{\lambda\rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}^2},$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Полагая, что диаметр пузырька равен величине шероховатости, коэффициент  $\lambda_{\text{ГЖ}}$  в соответствии с формулой Прандтля-Никурадзе может быть найден

из соотношения

$$\lambda_{\text{ГЖ}} = \left[ (1,74 + 21g) \left( \frac{\lambda_{\text{ГЖ}} D \rho_{\text{ж}} V_{\text{ГЖ}}^2}{1,92\sigma} \right) \right], \quad (3)$$

где  $V_{\text{ГЖ}}$  – скорость газожидкостной среды.

Гидравлическое сопротивление газожидкостного потока в квазистационарных условиях определяется по зависимости, справедливой для условий  $\rho_{\text{Г}} \ll \rho_{\text{ж}}$  и  $\phi_{\text{Г}} \ll 1$

$$\Delta p_{\text{ГЖ}} \approx \lambda_{\text{ГЖ}} \frac{L}{2D} \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ГЖ}}^2}{(1-\phi)},$$

Аналогичным образом рассчитываются гидравлические потери и на местных сопротивлениях. Хотя экспериментальные данные показывают, что коэффициент местного гидравлического сопротивления газожидкостного потока может намного превышать его значение для чисто жидкостного потока. Так, коэффициент гидравлических потерь при повороте двухфазного потока в 6-7 раз превышает его значение для однофазного течения, если за поворотом оказывается вертикальный или наклонный участок [12].

Коэффициент динамической вязкости газожидкостной смеси, который необходимо знать для определения числа Рейнольда, в приближении ячеечной модели может быть найден в соответствии с данными [10] по зависимости

$$\mu_{\text{ГЖ}} = \mu_{\text{ж}} \left[ 1 + \frac{5\bar{\mu} + 2 - 21/5\phi^{2/3} - 4/5(\bar{\mu} - 1)\phi^{7/3}}{2(\bar{\mu} + 1) - 7\bar{\mu}\phi^{5/3} + 5(\bar{\mu} - 2)\phi^{7/3}} \phi \right],$$

где  $\mu_{\text{ж}}$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;

$$\bar{\mu} = \mu_{\text{Г}} / \mu_{\text{ж}}.$$

При  $\bar{\mu} \gg 1$  эта зависимость имеет вид

$$\mu_{\text{ГЖ}} = \mu_{\text{ж}} \left[ 1 + \frac{2 - 21/5\phi^{2/3} + 4/5\phi^{7/3}}{2 - 10\phi^{7/3}} \phi \right].$$

3. Явление провала давления по окончании первой фазы гидроудара может вызвать разрыв сплошности потока. Этот эффект имеет место в случае, если минимальное значение давления провала оказывается по абсолютной величине ниже атмосферного. Физически это невозможно в силу того, что при давлении ниже давления насыщенных паров жидкость вскипает с образованием кавитационной области, наполненной парами жидкости. Обычно эта область образуется вблизи запорного устройства, хотя при определенных не исключено ее возникновение в тупиковых трубопроводах. Используя подход [3], при численном решении задачи можно выявить эти области.

4. Динамика регулирующих органов (клапанов, редукторов) играет существенную роль при расчете гидравлических систем, работающих в импульсных

режимах, когда длительность рабочего импульса сопоставима со временем срабатывания клапана. В гидравлических системах космической техники широко применяются электроуправляемые клапаны. Использование таких клапанов с достаточно сложной функциональной связью между командным электрическим сигналом, величиной проходного сечения и соответствующим гидравлическим сопротивлением усложняют алгоритм расчета.

5. Математическое описание конфигурации сложной разветвленной гидравлической системы с переменной во времени структурой, обусловленной срабатыванием управляющих отсечных клапанов, является одним из этапов решения задачи о неустановившихся течениях жидкости в сложных разветвленных трубопроводных магистралях. Для этих целей возможно применение различных методов: использование графов [8], метода декомпозиции Лямаева [3, 4], метода авторов [14 – 16].

## 2. Особенности конструкции и режимов работы системы управляющих реактивных двигателей малой тяги

Количество двигателей и характер их размещения на летательном аппарате выбирается из условия обеспечения по каждой из осей управления, требуемых моментов сил тяги, равных по величине и противоположных по направлению. На практике для этих целей, с учетом максимального быстродействия, резервирования и решения ряда других полетных задач, используется от 8 до 20 двигателей.

Двухкомпонентные жидкостные реактивные двигатели малой тяги (ЖРДМТ), использующие в качестве окислителя азотный тетраоксид, а в качестве горючего – несимметричный диметилгидразин, относятся к достаточно эффективным системам по суммарному импульсу и уровню тяги. Питание двигателей компонентами топлива осуществляется из собственных топливных баков, что обеспечивает высокую степень автономности их работы.

Стремление снизить «сухую» массу ракеты-носителя, при условии использования одинаковых компонентов топлива, как для маршевого двигателя, так и для системы управляющих двигателей, приводит к поиску технического решения, основанного на использовании для работы управляющих двигателей топливных баков маршевого двигателя. При этом открываются дополнительные возможности для повышения суммарного импульса тяги ДМТ за счет значительно более полного использования, так называемых, «гарантийных остатков топлива» в топливных баках маршевого двигателя, используемых, в частности, для «пассивации» последних ступеней ракет-носителей (выработки остатков топлива,

сброса газа из пневмосистем, увода ступени с траектории). При этом должны быть учтены эффекты возможного газовыделения в компонентах топлива, обеспечивающих работу управляющих двигателей [17].

Особенности режимов работы (непрерывный, импульсный с различными сочетаниями включения, длительности импульсов и выключения), а также сложный пространственный характер топливных магистралей, изменяющийся в процессе работы (различное количество включаемых двигателей), предопределяют необходимость наличия математической модели, способной легко адаптироваться к любой конструктивной схеме управляющих двухкомпонентных двигателей и соответствующего стендового оборудования, обеспечивающего верификацию расчетных результатов. На различных этапах проектирования и эксплуатации управляющих двигателей используется различное расчетное и стендовое обеспечение [18]. В работах [14, 16] представлено взаимодействие математических моделей различного уровня и стендового методического обеспечения на основных этапах проектирования и эксплуатации управляющих двигателей, начиная от обоснования технического задания до летной эксплуатации.

Методическое обеспечение, представляющее собой комплекс математических моделей отдельных систем и стендового оборудования, после уточнения по результатам летных испытаний, служит для сопровождения эксплуатации данной системы при расчете запасов топлива на борту и организации оптимального управления.

Характерной особенностью систем ЖРДМТ является запаздывание включения и выключения двигателей по отношению к командным электрическим сигналам. Это обусловлено электрической и механической инерцией топливных клапанов [9, 14, 16]. В связи с этим, при больших интервалах между командными импульсными сигналами, каждое новое включение двигателя происходит в одинаковых условиях по массовому и тепловому состоянию в камере сгорания (КС). С уменьшением этих интервалов появляется связь между импульсами – сначала по тепловому состоянию КС, а затем и по остаточной массе продуктов горения в КС. При этом большое значение имеет степень одновременности срабатывания клапанов окислителя и горючего, определяющая текущее соотношение компонентов топлива, поступающих в КС, от которого, в свою очередь, зависит полнота сгорания компонентов топлива и тяговые характеристики двигателя.

Волновые процессы в трубопроводах с жидкими компонентами имеют характерные времена, сопоставимые со временами функционирования

управляющих двигателей. Учитывая различие в длинах питающих трубопроводов окислителя и горючего, волновые эффекты могут вызвать большие колебания в соотношении компонентов, что может приводить либо к провалу тяги, либо к забросу давления в КС [14].

Расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют, что использование газонасыщенных компонентов топлива в диапазоне давлений, при которых возможно выделение газа и образование двухфазной газожидкостной среды искажает фронты ударных волн [19, 20], снижает пики давлений при гидроударах за счет снижения скорости распространения ударной волны и увеличения гидравлического сопротивления.

Однако при независимом течении компонентов топлива по индивидуальным магистралям из-за различия в свойствах растворимости газов и различия в уровнях давлений, обеспечивающих подачу компонентов, возможны случаи, когда в магистрали одного из компонентов топлива образовался газожидкостный двухфазный поток, а в магистрали другого компонента сохраняется чисто жидкостное течение. В итоге, на входе в камеру сгорания могут иметь место фазовые сдвиги пульсаций давлений и расходов каждой из компонент топлива существенно большие, чем в однофазных потоках за счет существенных различий в скоростях звука и несимметрии длин трубопроводов от баков каждого из компонент к конкретному двигателю. Это может привести к резким колебаниям давления в камере сгорания и снижению уровня тяги данного управляющего двигателя. Помимо влияния на алгоритм управления это приводит к снижению удельной тяги двигателя и нерациональному использованию запаса компонентов топлива. Кроме того, за счет миграции (всплывания) газовых пузырьков в трубопроводах, параллельных вектору ускорения аппарата, возможно образование газовых пробок в местах сужения диаметра трубопроводов, например, перед топливными клапанами, что приведет к задержке запуска двигателя или пропуску импульсных включений.

### 3. Математическая модель неустановившихся течений жидкости в сложной разветвленной трубопроводной системе. Уравнения и метод численного решения

Для исследования течений в трубопроводной системе ее конструктивная схема в соответствии с [14 – 16] должна быть подвергнута декомпозиции с выделением составных элементов. В общем случае система трубопроводов может быть представлена в виде набора простых трубопроводов (конструктивных участков), характеризующихся постоянными

геометрическими параметрами (диаметром, толщиной стенки, материалом), и набора сингулярных элементов (емкостей, клапанов, тройников и т.д.), которые могут трактоваться как сосредоточенные или распределенные на некотором участке трубопровода. Подобное разделение составных элементов системы позволяет общую задачу расчета течений разбить на более простые задачи: задачу о течениях на конструктивных участках трубопроводов и задачу о течениях в сингулярных элементах.

Решение этих задач в сечениях стыка составных элементов согласуется при помощи граничных условий, выражающих конкретные физические законы.

Для условий газонасыщенной жидкости полагается, что газовыделение всего растворенного газа в данном расчетном сечении происходит мгновенно. При превышении равновесного уровня давления в жидкости повторное растворение выделившегося газа также происходит мгновенно. Очевидно, что на участках трубопроводов, где произошло выделение газа и образование газожидкостной смеси вместо плотности жидкости должна использоваться плотность газожидкостной смеси, а коэффициенты гидравлических потерь рассчитываются в соответствии с зависимостью (3).

Течения сплошной среды с малыми дозвуковыми скоростями в разветвленной трубопроводной системе рассматриваются в гидравлическом приближении и описываются системой волновых уравнений для каждого из конструктивных участков трубопровода. Жидкость считается баротропной.

Система уравнений для конструктивных участков имеет вид [14 – 16]

$$\begin{cases} \frac{\partial p_i}{\partial t} + c_i^2 \frac{\partial G_i}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial G_i}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial x} = \psi_i(p_i, G_i), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x$  – координата по длине конструктивного участка трубопровода;

$i$  – номер конструктивного участка;

$p_i = p_i(x, t)$  – давление;

$G_i = \rho_i U_i$  – удельный расход;

$\rho_i, U_i$  – плотность и скорость жидкости (газожидкости) в сечении  $x$  соответственно;

$c_i$  – скорость распространения возмущений (скорость звука);

$$\psi_i = -\lambda_i G_i \left| G_i \right| (2D_i \rho_i)^{-1};$$

$\lambda_i, D_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления и диаметр трубопровода на  $i$ -ом участке.

Интегрирование системы (4) осуществляется

методом характеристик. В случае течения газонасыщенной жидкости с участками выделения газа и образования двухфазного потока, в отличие от [14 – 16] скорость звука, становится зависящей от величины текущего давления в каждом из расчетных сечений трубопровода. Это необходимо учитывать при построении алгоритма численного решения этих уравнений. При этом реализована схема метода характеристик с постоянным шагом по времени и интерполяцией значений функций давления, расхода и плотности в точках пересечения характеристик с координатой  $x$ , представленной на рис. 2 для внутренних расчетных узлов конструктивных участков.

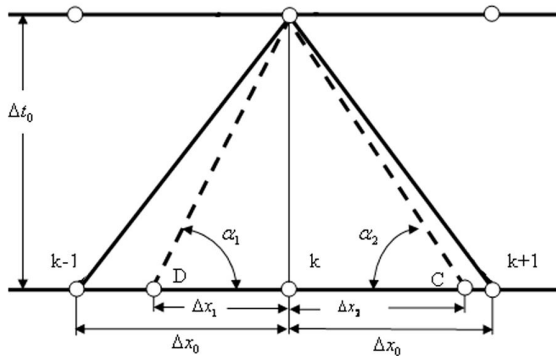


Рис. 1. Схема реализации метода характеристик при переменной скорости звука

В конечном виде расчетные формулы имеют вид

$$G_k^1 = \frac{R_D - R_C}{c_D + c_C}; p_k^1 = \frac{R_D c_C + R_C c_D}{c_D + c_C}.$$

где  $R_C = p_C - c_C G_C - \psi_C \Delta t_0 c_C$

$$R_D = p_D + c_D G_D + \psi_D \Delta t_0 c_D;$$

Для чисто жидкостного течения для постоянной скорости звука интерполяция не проводится и расчетные точки С и D совпадают с точками  $k+1$  и  $k-1$  соответственно.

#### 4. Начальные и граничные условия

В начальный момент времени топливные магистрали считаются заполненными компонентами топлива до закрытых клапанов и находятся под давлением, равным давлению в соответствующих баках.

Решения, получаемые на конструктивных участках трубопроводов, должны быть согласованы с решениями, найденными в сингулярных узлах. Такое согласование осуществляется на основе использования балансовых соотношений для расходов, скоростей, давлений и соотношений на характери-

стиках, исходящих из ближайших узлов на конструктивных участках, примыкающих к сингулярным узлам.

Граница конструктивного участка в общем случае может представлять собой стык с одним или несколькими трубопроводами, быть входным или выходным сечением трубопроводной системы. Для нахождения функций на этой границе можно составить систему нелинейных алгебраических уравнений, включающую соотношения на характеристиках, приходящих в расчетный узел на границе, уравнения баланса расходов и уравнений, определяющих гидравлические потери на границе. Количество соотношений на характеристиках определяется количеством трубопроводов, примыкающих к границе (при стыке двух трубопроводов – две характеристики, при стыке трех трубопроводов – три характеристики и т.д.). Данная система алгебраических уравнений является замкнутой. В случае отсутствия газовыделения и пренебрежения местными гидравлическими потерями количество уравнений сокращается, система уравнений становится линейной.

Если граничная точка трубопровода соответствует тупику, то расчетные уравнения состоят из соотношения на положительной характеристике и условия равенства нулю расхода в тупиковом сечении.

Если сингулярной точкой является стык трубопровода с источником давления (баком, насосом, питательным трубопроводом), уравнения для определения давления и расхода состоят из соотношения на отрицательной характеристике, приходящей в граничную точку из соседнего узла на предыдущем временном слое, и заданной функции давления от расхода, учитывающей возможное гидравлическое сопротивление.

Для граничной точки на выходе из трубопроводной системы имеется соотношение на положительной характеристике, приходящей из смежного узла предыдущего временного слоя, и заданная или определяемая в процессе счета функция давления от расхода с учетом гидравлического сопротивления.

При выходе в проточную реакционную емкость (например, в камеру сгорания, давление в которой зависит от количества поступающего топливного компонента через данное сечение трубопровода) давление в этой емкости определяется совместно с решением задачи о течении жидкости в трубопроводной системе.

Поскольку подача компонентов топлива в камеры сгорания регулируется с помощью электроуправляемых клапанов, находящихся непосредственно на головке камеры сгорания управляющего двигателя, математическая модель клапана должна

входить как составная часть математической модели всей системы. При срабатывании клапана его детали, закрывающие или открывающие проходное сечение, перемещаются из одного фиксированного положения в другое. Срабатывание может быть однократным или многократным. Рассмотрим работу топливного электроуправляемого клапана. Схематически он представлен на рис. 2.

Процесс полного открытия клапана можно разделить на три этапа.

Первый этап, от момента времени  $t = 0$  (замыкание цепи обмотки электромагнита 1) до начала трогания якоря 2, характеризуется нарастанием тока в обмотке электромагнита до такой величины, при которой сила тяги электромагнита станет больше сил сопротивления пружины 3 и перепада давления на клапане 4.

Интервал времени от подачи напряжения на обмотку до трогания якоря называется временем трогания.

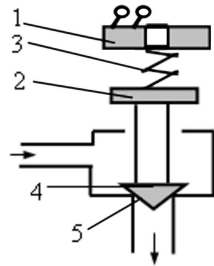


Рис. 2. Схема работы электроуправляемого топливного клапана

Второй этап характеризует движение якоря до упора (полное открытие клапана). Клапан, жестко связанный с якорем, отходит от седла 5, открывая проход для подачи жидкости (компонента топлива) в камеру сгорания. Суммарное время первого и второго этапов является временем срабатывания (открытия) клапана.

Третий этап характеризует выход электрических и магнитных параметров электромагнитного клапана на стационарные значения (положение якоря на упоре).

Процесс закрытия клапана также состоит из трех этапов.

Первый этап, от момента времени  $t = 0$  (снятие напряжения с цепи обмотки электромагнита с одновременным шунтированием ее некоторым омическим сопротивлением) до начала отпускания якоря, характеризуется падением тока в обмотке электромагнита до такой величины, при которой суммарная сила тяги электромагнита и перепада давления на клапане станет меньше силы упругости возвратной пружины. Интервал времени от снятия напряжения

с обмотки до начала движения якоря называется временем залипания якоря.

Второй этап характеризует движение якоря до посадки клапана на седло (полное закрытие клапана). Клапан, жестко связанный с якорем, полностью закрывает проход для подачи жидкости (компонента топлива) в камеру сгорания. Суммарное время первого и второго этапов является временем отпускания (закрытия) клапана.

Третий этап характеризуется выходом электрических и магнитных параметров электромагнитного клапана на нулевые значения (клапан находится на седле).

На первых и третьих этапах открытия и закрытия клапана необходимо решение уравнений, описывающих изменение электрических параметров обмотки электромагнита, которые определяют его тяговые усилия

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt},$$

где  $U$  – электрическое напряжение на обмотке;

$I$ ,  $R$ ,  $L$  – ток, омическое сопротивление и индуктивность обмотки электромагнита.

На вторых этапах открытия и закрытия клапана к уравнению, описывающему процессы в обмотке электромагнита, добавляются уравнения движения тарели клапана под действием электромагнитных сил  $F_{эл}$  и механических сил  $F_{мех}$  (давления и упругости возвратной пружины)

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{эл} - F_{мех}.$$

Подробное описание расчетного алгоритма работы электроуправляемого клапана представлено в [16].

Исходными данными для расчета динамики клапана являются: геометрия седла и тарели, определяющая функцию изменения величины проходного сечения; масса якоря и тарели; жесткость пружины; индуктивность обмотки электромагнита; омическое сопротивление обмотки; электрическое напряжение, подаваемое на обмотку.

Величина проходного сечения клапана в процессе открытия-закрытия определяет гидравлическое сопротивление и расход компонентов топлива в камеру сгорания. Давление в камере сгорания работающего двигателя, функционально зависящее от расхода и соотношения поступающих компонентов, является граничным условием на выходе топливных трубопроводов. Двигатели, отсеченные с помощью электроклапанов от системы питания, с математической точки зрения становятся тупиковыми трубопроводами.

Для математического описания процессов, протекающих в камере сгорания, используется средне-объемная модель [9, 14-16]. При этом принимается допущение, что время от момента впрыска топлива до превращения его в продукты реакции (время запаздывания  $\tau_k$ ) считается постоянным и зависит от геометрических параметров камеры сгорания. Такое допущение позволяет рассматривать камеру сгорания как объем, наполненный газом, в котором в течение времени  $\tau_k$  в виде капель находится впрыснутое топливо. Полагается также, что продукты реакции топлива являются идеальным газом, температура, давление и газовая постоянная которого одинаковы как вдоль камеры, так и по ее радиусу.

Уравнение баланса массы в камере в каждый момент времени

$$\frac{dm_k}{dt} = G_{пр} - G_k, \quad (5)$$

где  $m_k$  – масса продуктов реакции;

$G_{пр}$  – массовый приход газа в камеру;

$G_k$  – массовый расход из камеры.

Расход газа из камеры сгорания определяется

$$G_k = A_n \frac{p_k F_{кр}}{\sqrt{R_k T_k}}, \quad (6)$$

где  $A_n = \sqrt{n \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}}$ ;

$p_k$  – давление в камере сгорания;

$F_{кр}$  – площадь критического сечения сопла;

$R_k, T_k$  – газовая постоянная и температура продуктов реакции соответственно;

$n$  – показатель политропы.

Работоспособность продуктов реакции  $R_k T_k$  можно считать известной кусочно-постоянной функцией коэффициента  $k = G_o/G_r$  на временном шаге численного решения системы (4).

Положив  $G_{пр} = G_o(\tau - \tau_k) + G_r(\tau - \tau_k)$ , используя соотношение (6) и уравнение состояния продуктов реакции в камере сгорания

$$m_k = \frac{p_k V_k}{R_k T_k}$$

уравнение (5) приводится к виду

$$\frac{dp_k}{dt} + \Psi p_k = \frac{R_k T_k}{V_k} [G_o(\tau - \tau_k) + G_r(\tau - \tau_k)], \quad (7)$$

где  $\Psi = A_n \frac{F_{кр}}{V_k}$ ;

$V_k$  – объем камеры сгорания;

$G_o(\tau - \tau_k), G_r(\tau - \tau_k)$  – приход в камеру сгора-

ния окислителя и горючего соответственно.

С приемлемой для практики точностью время запаздывания  $\tau_k$  для камер сгорания управляющих двигателей составляет порядка десятитысячных долей секунды.

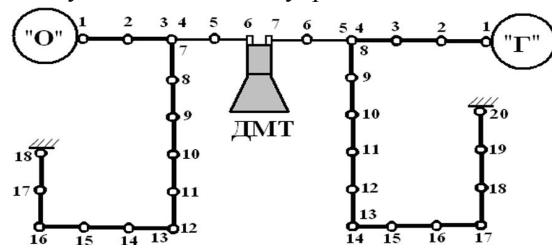
Найденное значение  $p_k$  путем численного интегрирования уравнения (7) на интервале времени, равном шагу по времени в методе характеристик, используется в качестве граничного условия на выходе из трубопроводной системы для задачи о движении компонентов топлива в подводящих магистралях.

### 5. Формализованное описание конфигурации сложных трубопроводных магистралей

Для построения конечно-разностной сетки по координате и времени разветвленная пространственная трубопроводная система преобразуется к плоскому виду и представляется в виде матрицы размерности  $m \times n$ . В этой матрице на местах элементов, соответствующих расчетным точкам трубопровода, стоят номера этих точек. Нумерация их может быть произвольной, но упорядоченной в пределах каждого из внутренних конструктивных участков.

В зависимости от значений элементов матрицы, находящихся в окрестности расчетной точки, она классифицируется либо как регулярная (находящаяся внутри конструктивного участка), либо как граничная или сингулярная (выход из бака, вход в камеру сгорания двигателя малой тяги, сечение тупикового трубопровода, стык трубопроводов, клапан, жиклер и др.).

На рис. 3 приведен пример простейших разветвленных трубопроводных системы и матрицы, описывающей, применительно к магистралям, питающие двухкомпонентного управляющего двигателя,



-1	1	2	3	-1	4	5	6	-6	7	6	5	-1	4	3	2	1	-1
0	0	0	0	7	0	0	0	0	-7	0	0	7	0	0	0	0	0
0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	-19
-17	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	20
18	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	19
17	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	18
16	15	14	13	-1	0	0	0	0	0	0	0	13	-1	14	15	16	17

Рис. 3. Пример разветвленных трубопроводных систем (количество расчетных точек для наглядности существенно уменьшено)



наглядно поясняющий способ классификации расчетных точек.

Классификация расчетных точек проводится по величине суммы значений в окрестности рассматриваемой точки. Для особых (сингулярных) точек в их окрестности вводятся некоторые фиктивные точки (отрицательные), выделенные в матрицах темным фоном, которые позволяют отнести расчетную точку к тому или иному классу и проводить расчет по зависимостям, характерным для точек данного класса. Окрестность любой точки состоит из четырех смежных точек.

Любая расчетная точка  $k$  классифицируется как регулярная, если ее значение определяется по элементам матрицы в ее окрестности как  $k = (k-1+0+k+1+0)/2$ . Например, расчетная точка 2 классифицируется как регулярная, поскольку сумма элементов ее окрестности  $(3+0+1+0)/2$  дает значение 2 (окрестность точки за пределами матрицы принимается равной 0).

Расчетной точке, соответствующей выходу из бака (входу в систему) присваивается номер 1 и она классифицируется как сингулярная, за счет введения фиктивной точки -1, что обеспечивает сумму точек в ее окрестности  $(0+2+0-1=1)$ .

Расчетной точке 6, соответствующей входу в КС ДМТ по окислителю, за счет фиктивной точки -6, окрестность  $(-6+0+5+0)$  дает значение -1, взятое по модулю, что соответствует двигателю №1 (если бы фиктивная точка имела значение -7 то, это соответствовало бы двигателю №2).

Расчетной точке  $k=18$ , соответствует окрестность, состоящая из элементов матрицы  $(16-16+0+0=0)$ , что классифицируется как конечное сечение тупикового трубопровода.

В сечении, соответствующем стыку двух, трех и четырех трубопроводов или любому сосредоточенному местному сопротивлению, в матрицу вводится фиктивная отрицательная расчетная точка (например -1).

Такой порядок нумерации окрестностей расчетных точек позволяет легко трансформировать систему. Например, чтобы превратить тупик (сечение 18) во вход в двигатель № 3 достаточно фиктивную расчетную точку -17 заменить на -20 и наоборот- вход в двигатель № 1 превратить в тупик, заменив фиктивную точку -6 на точку -5.

Ниже рассмотрена задача о течениях компонентов топлива в жидкостно-реактивной системе управления движением верхней ступени ракеты-носителя [14 – 16], схематически изображенной на рис. 4, с моделированием условий гидроударных возмущений на входе; газовыделения, импульсных и непрерывных режимов работы управляющих ракетных двигателей малой тяги (ДМТ) с учетом динами-

ки работы электроуправляемых топливных клапанов.

Питание системы может осуществляться из автономных баков или баков маршевого двигателя (как изображено на рис.4).

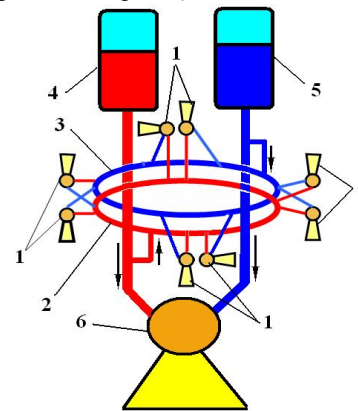


Рис. 4. Схема питания двухкомпонентных управляющих двигателей:

1 – управляющие ДМТ; 2, 3 – коллекторы горючего и окислителя; 4, 5 – баки горючего и окислителя, 6 – маршевый двигатель

## 5. Анализ влияния конструктивных и режимных параметров на функционирование системы ЖРДМТ

Особенности функционирования ЖРДМТ для конкретных систем, выявленные с использованием методического обеспечения, описаны в работах [14 – 16, 19, 20]. В качестве иллюстрации, ниже приведены результаты исследования особенностей функционирования системы питания двухкомпонентных управляющих двигателей, представленной на рис. 4. Расчеты проведены при введении 75 расчетных сечений по каждой из топливных магистралей (рис. 3) и полной схемы с дискретизацией по 400 сечениям с учетом различных факторов, описанных выше.

На рис. 5. приведено изменение давления в камере сгорания для модельной (упрощенной, укороченной) системы, причем часть магистралей с выключенными двигателями моделируются тупиковыми трубопроводами. Рис. 5а иллюстрирует запуск двигателя при постоянном давлении на входах в топливную систему, причем кривая 1 соответствует условиям без образования газожидкостных потоков по обоим компонентам, а кривая 2 – с образованием газожидкостных потоков по обоим компонентам. Приведенные данные показывают более медленный выход двигателя на установившийся режим, связанный со снижением скорости звука в двухфазном потоке.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5б иллюстрируют влияние гидроударных возмущений

на входах в топливные магистрали (провал давления по окислителю 2,5 бара, по горючему 1,3 бара и последующий гидроударный бросок давления по окислителю 20,7 бара, по горючему 11,8 бара) на давление в камере сгорания.

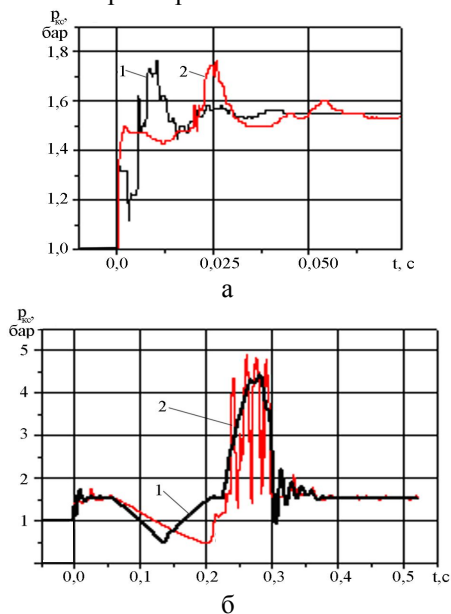


Рис. 5. Влияние газовыделения в топливных компонентах при постоянном давлении и при гидроударных возмущениях на входах в магистрали

В случае отсутствия газовыделения в компонентах топлива (кривая 1), давление в КС практически отслеживает характер возмущений на входах, а в случае газовыделения в горючем и отсутствии газовыделения в окислителе (кривая 2), имеют место пульсации давления в КС, обусловленные существенным различием скоростей движения волновых возмущений.

На рис. 6 представлены результаты расчетов для полной системы без газовыделения при наличии гидроударных входных возмущений для максимального количества работающих двигателей, причем, часть из них работают в непрерывном режиме, а часть в импульсном, без учета динамики топливных клапанов и с учетом конечности времени срабатывания клапана. Для двигателей в непрерывном режиме (рис. 6а) картина изменения давления в КС близка к результатам по упрощенной схеме, некоторые пульсации давления, наложенные на ход кривой давления, обусловлены влиянием работы двигателей в импульсном режиме, а время срабатывания топливных клапанов (порядка 25-30 мс) практически не имеет значения. Для двигателей, работающих в импульсном режиме (рис. 6б) при длительности импульса порядка 40 мс, влияние конечности времени срабатывания клапанов (красная линия) появляется в искажении формы и длительности импульса. Для более коротких командных импульсов кла-

пан открывается неполностью, что приводит к еще более существенным искажениям импульса тяги и уменьшению эффективности двигателя.

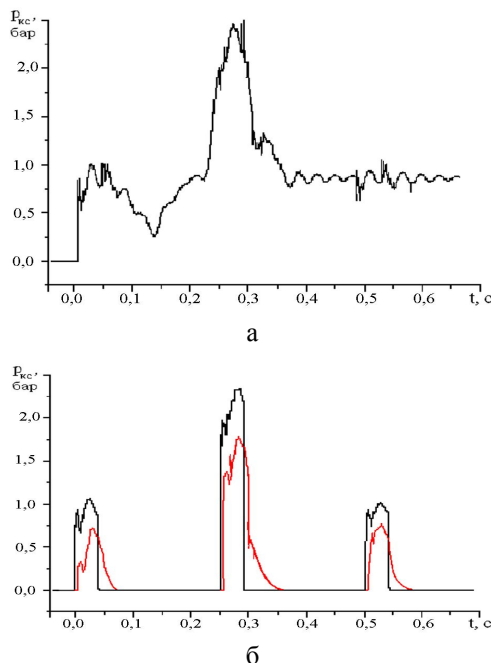


Рис. 6. Влияние гидроударных возмущений на входах в магистрали на импульсные и непрерывные режимы работы двигателей с учетом динамики электроуправляемых клапанов.

## Заключение

Проанализированы проблемные вопросы, решение которых необходимо при разработке математических моделей неустановившихся течений жидкости в сложных трубопроводных системах, сопровождающихся гидроударными процессами.

Описаны разработанные методы математического моделирования различных режимов работы систем управляющих жидкостно-реактивных двигателей космических аппаратов и верхних ступеней ракет-носителей, конструктивные особенности магистралей питания управляющих двигателей; распределенные и сосредоточенные (местные) гидравлические сопротивления; конструктивные, электромагнитные и гидравлические характеристики топливных клапанов; работоспособность продуктов горения.

Это позволяет проводить отработку управляющих двигателей на стадии проектирования с целью выбора оптимального варианта конструкции.

## Литература

1. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н.Е. Жуковский. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 103 с.
2. Чарный, И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах [Текст] / И.А. Чар-

ный. – М.: Недра, 1975. – 294 с.

3. Лямаев, Б.Ф. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ [Текст] / Б.Ф. Лямаев, Г.П. Небольсин, В.А. Нелюбов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 192 с.

4. Лямаев, Б.Ф. Применение современных информационных технологий при расчете гидравлического удара в системах водоснабжения [Электронный ресурс] / Б.Ф. Лямаев, Г.Г. Крицкий, Г.Л. Никутин. – Режим доступа: <http://www.politerm.com.ru/articles/waterhammer.htm> – 24.11.2005 г.

5. Попов, Д.Н. Нестационарные гидродинамические процессы [Текст] / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1982. – 239 с.

6. Фокс, Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах [Текст]: пер. с англ. / Д.А. Фокс. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.

7. Каракулин, Е.А. Новые методы и устройства трубопроводных систем [Текст] / Е.А. Каракулин. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2008. – 227 с.

8. Гликман, Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

9. Беляев, Н.М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов [Текст] / Н.М. Беляев, Н.П. Белик, Е.И. Уваров. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.

10. Венгерский, Э.В. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок [Текст] / Э.В. Венгерский, В.А. Морозов, Г.Л. Усов. – М.: Машиностроение, 1982. – 128 с.

11. Полухин, Д.А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД [Текст] / Д.А. Полухин, В.М. Орещенко, В.А. Морозов. – М.: Машиностроение, 1987. – 247 с.

12. Кутателадзе, С.С. Теплообмен и волны в газожидкостных системах [Текст] / С.С. Кутателадзе, В.Е. Накоряков. – Новосибирск: Наука, 1984. – 301 с.

13. Зилке. Трение, зависящее от частоты, при

неустановившемся течении в трубопроводе [Текст] / Зилке // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1968. – №1. – С. 120–127.

14. Timoshenko, V. I. Methodical support of development of increased safe life propulsion systems of a small thrust [Text] / V.I. Timoshenko, M. I. Koshkin, J. V. Knyshenko // 52nd International Astronautical Congress 1-5 Oct., 2001. – Toulouse, France, 2001. – P. 78–80.

15. Кнышенко, Ю.В. Математическая модель течений сплошной среды в разветвленных трубопроводных системах [Текст] / Ю.В. Кнышенко // Всеукраїнська наукова конференція (23-25 квітня 2001 р.) “Математичні проблеми технічної механіки”: Тези доповідей. – Дніпропетровськ, 2001. – С. 48.

16. Тимошенко, В.И. Расчетно-экспериментальное обеспечение разработки реактивных двигателей малой тяги [Текст] / В.И. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко, М.И. Кошкин // Техническая механика. – 2005. – №2. – С. 50–64.

17. Математическая модель процесса образования несплошности в потоке жидкости [Текст] / В.Л. Джетта, А.А. Дубровский, М.П. Сало, М.И. Кошкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – №9(35). – С. 104–107.

18. Кокорин, В.В. Комплексная оптимизация двигательных установок систем управления [Текст] / В.В. Кокорин, Н.Б. Рutowский, Е.В. Соловьев. – М.: Машиностроение, 1983. – 184 с.

19. Тимошенко, В.И. Влияние газонасыщенности жидкости на неустановившиеся процессы течения в трубопроводных системах [Текст] / В.И. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко // Техническая механика. – 2010. – № 4. – С. 34–43.

20. Тимошенко, В.И. Особенности неустановившихся течений газонасыщенных жидкостей в сложных трубопроводных системах [Текст] / В.И. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко // Модели и методы аэродинамики: тез. докл. Одиннадцатой международной школы-семинара 5-10 июня 2011 г. – Евпатория, 2011. – С. 167–168.

Поступила в редакцию 22.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, вед. научн. сотр. Ю.А. Кваша, Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепрпетровск

## НЕСТАЛІ ТЕЧІЇ РІДИНИ У СКЛАДНИХ РОЗГАЛУЖЕНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ

*В.І. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко*

Розглянуто проблемні питання, що виникають при розрахунку несталіх течій рідини в складних розгалужених трубопроводних системах, пов'язані зі змінністю швидкості поширення збурювань для газонасичених рідин, нестационарним гидравлічним опором, розривами суцільності, впливом роботи відсічних клапанів, зміною структури проточної системи. Описано математичну модель системи рідинних реактивних двигунів малої тяги, що забезпечує керування польотом космічного апарата або верхнього ступеня ракети-носія, що включає розрахункові модулі течій компонентів палива в живильних магістралях, динаміки електрокерованих паливних клапанів і термогазодинамічних процесів у камерах згоряння.

**Ключові слова:** трубопровід, двигун малої тяги, камера згоряння, математична модель, швидкість ударної хвилі, гидравлічний удар.

## UNSTEADY FLUID FLOWS IN COMPLEX MANIFOLD SYSTEMS

*V.I. Tymoshenko, Yu.V. Knyshenko*

We consider problems arising in the analysis of unsteady fluid flows in complex manifold systems from the variability of perturbation propagation velocity for gas-saturated liquids, unsteady hydraulic resistance, discontinuities, the effect of shutoff valve operation, and a change in the structure of the flow system. A mathematical model of a system of liquid-propellant thrusters is presented. The model provides the control of spacecraft or launch vehicle top stage flight and includes modules for the calculation of propellant component flows in the feed pipelines, the dynamics of electrically operated propellant valves, and thermogas dynamic processes in the combustion chambers.

**Keywords:** pipeline, thrusters, combustion chamber, mathematical model, shock wave velocity, hydraulic impact

**Тимошенко Валерий Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корр. НАНУ, заведующий отделом, Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепрпетровск, Украина, e-mail: vitymoshenko@nas.gov.ua

**Кнышенко Юрий Викторович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепрпетровск, Украина, e-mail: knyshenko@ukr.net