

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЖИДКОСТИ НА НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

На основе численного метода характеристик предложен алгоритм расчета движения газонасыщенной жидкости в трубопроводной системе, учитывающий выделение газа с образованием двухфазного газожидкостного потока. Реализация предложенного алгоритма проиллюстрирована на основных гидравлических элементах сложных трубопроводных магистралей. Выявлены особенности протекания переходных гидродинамических процессов, обусловленных эффектами газовыделения.

На основі чисельного методу характеристик запропоновано алгоритм розрахунку руху газонасиченої рідини в трубопровідній системі, що враховує виділення газу з утворенням двофазного газорідного потоку. Реалізація запропонованого алгоритму проілюстрована на основних гідравлічних елементах складних трубопровідних магістралей. Виявлено особливості протікання перехідних гідродинамічних процесів, обумовлених ефектами газовиділення.

Based on the numerical method of characteristics, an algorithm is proposed to calculate flow of a gas-saturated liquid in a pipe system taking into account gas liberation with the formation of a two-phase gas-liquid flow. The implementation of the proposed algorithm is illustrated by the example of basic hydraulic elements of pipe manifolds. The features of hydrodynamic transients caused by gas liberation are revealed.

Течение газонасыщенных жидкостей является основой ряда технологических процессов в химической промышленности, энергетике и ракетной технике. 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 магистральных энергетических установок. Установление закономерностей гидродинамики потоков с выделением и растворением газов важно для решения технических задач в указанных выше областях.

Особую важность представляет знание закономерностей движения газонасыщенных компонентов топлива в системах питания ракетных двигателей малой тяги, используемых для управления полетом космических аппаратов. Топливные магистрали таких двигателей представляют собой сложную разветвленную трубопроводную сеть со множеством сингулярных в гидравлическом смысле элементов (шайб, тройников, фильтров, тупиков).

Одной из особенностей течения газонасыщенной жидкости является наличие граничного давления, зависящего от физических и химических характеристик газов и жидкостей, составляющих газожидкостную смесь, ниже которого происходит выделение газа и превращение однофазной чисто жидкостной среды в двухфазную газожидкостную.

В литературе [1, 2] сформулирована полная математическая постановка задачи об одномерном течении газонасыщенной жидкости, учитывающая неравновесные процессы образования газовых пузырьков, тепло- и массообмен на границе раздела фаз, решение которой даже для простейшего однониточного трубопровода представляет определенные трудности в части выбора метода численной реализации. При небольших содержаниях газа устанавливается пузырьковый гомогенный режим течения, характеризуемый равномерным распределением газовой фазы в виде дисперсных пузырьков, что позволяет применить для описания течений модель сплошной среды с параметрами, зависящими от степени газовыделения.

Целью данной работы является разработка на базе численного метода характеристик алгоритма расчета движения пузырьковой гомогенной сплошной среды в сложных разветвленных трубопроводах и иллюстрация характерных особенностей влияния газовыделения на параметры течения.

**Физические особенности образования газожидкостных потоков. Формулировка математической модели.**

Закономерности процессов растворения газов в жидкостях достаточно хорошо изучены и с достаточной степенью точности описываются законом Генри, в соответствии с которым равновесная концентрация растворенного в жидкости газа определяется [1, 2]

$$c = \chi p_{\Gamma}, \quad (1)$$

где  $c$  – равновесная концентрация газа на границе раздела газ – жидкость;  $\chi$  – коэффициент растворимости, зависящий от рода жидкости, рода газа и температуры;  $p_{\Gamma}$  – парциальное давление газа над свободной поверхностью жидкости.

Если в газонасыщенной жидкости происходит падение давления, нарушающее равновесие, определяемое законом Генри (1), т.е. имеет место неравенство  $p(x) < c/\chi$ , то начнется процесс газовыделения и переход к пузырьковому режиму течения. При этом переходе меняется скорость распространения упругих возмущений (скорость звука), зависящая от количества газа, выделившегося из жидкости (объемной концентрации).

При повышении давления выше равновесного размеры пузырьков уменьшаются и, после достижения ими критического размера, происходит их схлопывание, а газ, находящийся в них, повторно растворяется в жидкости, что опять влияет на скорость распространения возмущений в потоке. Оценки переходных процессов на границе жидкость – газовый пузырек показывают [2, 3], что времена перехода жидкостного потока в газожидкостной не превышают 2 – 10 мс.

Величина скорости звука является основным параметром, определяющим динамику газожидкостного потока, поэтому при построении математической модели и алгоритмов расчета течений газонасыщенных жидкостей можно использовать упрощенный подход, в рамках которого процессы газовыделения в жидкости учитываются только при определении изменения скорости звука. Это позволяет остаться в рамках обычно применяемых моделей течения жидкости в трубах.

Вопрос определения скорости звука в газожидкостном потоке рассматривается во всех работах, посвященных исследованию газожидкостных сред [1 – 2, 4 – 7]. Как следует из этих работ, зависимость скорости звука при течении газожидкостной среды в трубопроводе от определяющих параметров имеет вид

$$a_{\Gamma ж} = \frac{a_{ж}^{\infty}}{\sqrt{(1-\varphi)^2 + \frac{\varphi(1-\varphi)\rho_{ж}(a_{ж}^{\infty})^2}{kp} + \frac{KD}{E\delta}}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $a_{ж}^{\infty}$  – скорость звука в неограниченном потоке жидкости;  $\varphi = (c - p\chi)/(c - p\chi + \rho_{\Gamma})$  – объемная концентрация выделившегося в жидкость газа;  $p$  – давление в жидкости;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа в пузырьках, определяемая из уравнения состояния;  $k$  – показатель адиабаты га-

за, растворенного в жидкости;  $E$  – модуль упругости материала трубопровода;  $D$  – диаметр трубопровода;  $\delta$  – толщина стенки трубопровода;  $K$  – модуль объемной упругости жидкости.

При отсутствии газа в жидкости ( $\varphi = 0$ ) формула (2) переходит в известную формулу Жуковского для скорости распространения возмущений в жидкости с учетом упругости стенок трубопровода.

Возникновение в трубопроводе двухфазного газожидкостного потока оказывает определенное влияние на коэффициенты потерь на трение и давление  $\Delta p_{гж}$ . В работе [2] предложено следующее выражение для определения коэффициента гидравлического сопротивления при течении газожидкостной среды в трубопроводах

$$\lambda_{гж} = \lambda_{ж} \left(1 - \frac{\varphi}{1 - \varphi}\right),$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент гидравлического сопротивления при течении чистой жидкости.

Гидравлическое сопротивление газожидкостного потока в стационарных или квазистационарных условиях определяется по зависимости, справедливой для условий  $\rho_{г} \ll \rho_{ж}$  и  $\varphi_{г} \ll 1$

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

где  $V_{гж}$  – скорость газожидкостной среды;  $L$  – длина трубопровода.

Аналогичным образом рассчитываются гидравлические потери и на местных сопротивлениях.

Коэффициент динамической вязкости газожидкостной смеси в приближении ячеечной модели может быть найден в соответствии с данными [1, 2].

Приведенные выше зависимости, позволяющие учесть влияние газовой фазы на параметры жидкостного потока, проявляющееся в выделении в жидкость при определенных условиях газовых пузырьков, изменяющих свойства жидкостной среды, необходимо учитывать при формулировке и реализации математической модели неустановившегося движения жидкости с образованием на отдельных участках трубопровода газожидкостного потока.

Для исследования течений в трубопроводной системе ее конструктивная схема в соответствии с [8] 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.

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

Течения сплошной среды (газонасыщенной жидкости) 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 [3, 8]

$$\begin{cases} \frac{\partial p_i}{\partial t} + a_i^2 \frac{\partial G_i}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial G_i}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial x} = \psi_i(p_i, G_i), \end{cases} \quad (3)$$

где  $x$  – координата по длине конструктивного участка трубопровода;  $i$  – номер конструктивного участка;  $p_i = p_i(x, t)$  – давление;  $G_i = \rho_i U_i$  – плотность потока массы;  $\rho_i, U_i$  – плотность и скорость жидкости (газожидкости) в сечении  $x$  соответственно;  $a_i$  – скорость распространения возмущений (скорость звука);  $\psi_i = -\lambda_i G_i |G_i| (2D_i \rho_i)^{-1}$ ;  $\lambda_i, D_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления и диаметр трубопровода на  $i$ -ом участке.

Решение системы (3) проводится при следующих начальных условиях. При пуске системы и выходе ее на установившийся режим принимаются нулевые значения расходов и постоянные значения давлений во всех расчетных точках. При полном останове или изменении структуры трубопроводной сети в качестве начального режима течения принимается стационарный режим с соответствующим распределением давлений и расходов во всех расчетных точках.

Интегрирование системы (3) осуществляется методом характеристик. В отличие от [3, 8] в случае течения газонасыщенной жидкости с участками выделения газа и образования двухфазного потока скорость звука становится величиной переменной, зависящей от величины текущего давления в каждом из расчетных сечений трубопровода. Это необходимо учитывать при построении алгоритма численного решения этих уравнений.

Уравнения характеристик для системы (3) будут

$$\begin{cases} x_i + \int_0^t a_i dt = \xi_i \\ x_i - \int_0^t a_i dt = \eta_i, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\xi_i$  и  $\eta_i$  – параметры, определяющие линию каждого семейства характеристик.

Дифференциальные соотношения вдоль характеристик каждого из семейств будут

$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} + a_i \frac{dG_i}{dt} = a_i \psi_i(p_i, G_i) \\ \frac{dp_i}{dt} - a_i \frac{dG_i}{dt} = -a_i \psi_i(p_i, G_i). \end{cases} \quad (5)$$

Разобьем плоскость переменных линиями  $x_i = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ , при этом шаг разбиения по координате связан с шагом по времени соотношением  $\Delta x_i = \Delta t a_i$ .

Уравнения (5) можно представить с точностью до малых высшего порядка в виде

$$\begin{cases} \Delta p_i + a_i \Delta G_i = a_i \psi_i(p_i, G_i) \Delta t = \psi_i(p_i, G_i) \Delta x_i \\ \Delta p_i - a_i \Delta G_i = -a_i \psi_i(p_i, G_i) \Delta t = -\psi_i(p_i, G_i) \Delta x_i. \end{cases}$$

Применяя эти формулы к расчетной сетке с учетом направлений характеристик (рис. 1)

$$\begin{cases} p_k^1 + a_D G_k^1 = p_{k-1} + a_D G_{k-1} + \psi_{k-1} \Delta x_D \\ p_k^1 - a_C G_k^1 = p_{k+1} - a_C G_{k+1} - \psi_{k+1} \Delta x_C. \end{cases} \quad (6)$$

При разработке алгоритма расчета неустановившегося течения газонасыщенной жидкости в сложной трубопроводной системе 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.

**Расчетные зависимости метода характеристик с учетом газовыделения.**

Полагаем, что на начальном временном слое скорость звука постоянна и соответствует течению жидкости без газовыделения. Допустим, что на следующем временном слое в отдельных расчетных узлах  $k-1$  и  $k+1$  произошло падение давления до величины, при которой начинается газовыделение, скорость звука стала меньше скорости звука в жидкости без газовыделения  $a_0$ . Из

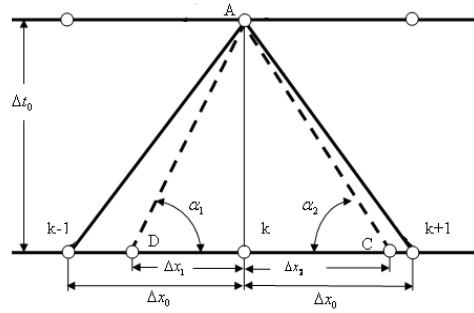


Рис. 1

условий устойчивости выбираем шаг по времени исходя из максимальной скорости звука, т.е.  $\Delta t_0 = \Delta x_0 / a_0$ . Это приводит к тому, что положительная и отрицательная характеристики, исходящие из расчетных точек  $k-1$  и  $k+1$  не пересекутся на временном слое  $t = t + \Delta t_0$  в точке  $k$ .

Для того чтобы характеристики с предыдущего временного слоя пришли в точку  $k$ , они должны исходить из точек  $D$  и  $C$ .

Из рис. 1 следует

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \Delta t_0 \operatorname{ctg} \alpha_1 = \Delta t_0 a_D \\ \Delta x_2 = \Delta t_0 \operatorname{ctg} \alpha_2 = \Delta t_0 a_C. \end{cases}$$

Для определения функций  $p$ ,  $G$ ,  $\rho$  и  $a$  в точках  $D$  и  $C$  использована линейная интерполяция значений этих функций по их значениям в точках  $k-1$ ,  $k$  и  $k+1$ . Результаты интерполяции для скоростей звука и функций  $p$ ,  $G$ ,  $\rho$  имеют вид (выражения для интерполяции функций  $G$  и  $\rho$  не приводятся, поскольку они аналогичны функциям  $p_D$  и  $p_C$ )

$$a_D = \frac{a_0 a_k}{a_0 + a_k - a_{k-1}}; \quad a_C = \frac{a_0 a_k}{a_0 + a_k - a_{k+1}};$$

$$p_D = \frac{a_D}{a_0} p_{k-1} + \frac{a_0 - a_D}{a_0} p_k; \quad p_C = \frac{a_C}{a_0} p_{k+1} + \frac{a_0 - a_C}{a_0} p_k.$$

Используя соотношения на характеристиках, исходящих из точек  $C$  и  $D$ , получим зависимости для определения функций  $p^1$  и  $G^1$  в расчетном узле  $k$  на новом временном слое  $t + \Delta t_0$

$$p_k^1 + a_D G_k^1 = p_D + a_D G_D + \psi_D \Delta t_0 a_D = R_D. \quad (7)$$

$$p_k^1 - a_C G_k^1 = p_C - a_C G_C - \psi_C \Delta t_0 a_C = R_C. \quad (8)$$

Из уравнений (7) – (8) находим

$$G_k^1 = \frac{R_D - R_C}{a_D + a_C}; \quad p_k^1 = \frac{R_D a_C + R_C a_D}{a_D + a_C}.$$

Полученные зависимости справедливы для внутренних точек расчетной сетки.

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

В общем виде  $2n_s$  уравнений ( $n_s$  – количество трубопроводов в расчетном узле) для определения давления и расхода в сингулярных точках трубопроводной системы имеют вид

$$p_{k,j}^1 + (-1)^{m_j} a_{D,j} G_{k,j}^1 = p_{D,j} + (-1)^{m_j} a_{D,j} G_{D,j} + (-1)^{m_j} \psi_{D,j} \Delta x;$$

$$\sum_{j=1}^{n_s} G_j^1 = 0;$$

$$p_{k,j}^1 = p_{k+1,j}^1 + \alpha_j (G_j^1)^2,$$

где  $\alpha_j$  – приведенный коэффициент местного гидравлического сопротивления, определяемый геометрией труб и условиями течения в расчетном узле;  $m_j = 0$  – для положительной характеристики;  $m_j = 1$  – для отрицательной характеристики;  $j = 1, 2, \dots, n_s$ .

В случае, когда сингулярной точкой является стык трубопровода с источником давления (баком, насосом), уравнения для определения давления и расхода состоят из соотношения на отрицательной характеристике (8), при-

ходящей в граничную точку из соседнего узла на предыдущем временном слое, и заданной функции давления от расхода, учитывающий возможное гидравлическое сопротивление. Для граничной точки на выходе из трубопроводной системы имеется соотношение на положительной характеристике (7), 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 атмосферу без учета гидравлических потерь на выход давление равно атмосферному. 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.

Если граничная точка трубопровода соответствует тупику, то расчетные уравнения состоят из соотношения на положительной характеристике (7) и условия равенства нулю расхода в тупиковом сечении.

### Результаты.

Выяснение особенностей влияния газовыделения на гидродинамические процессы проиллюстрировано на примерах выхода на установившийся режим течения газонасыщенного потока в отдельных узлах, являющихся составными элементами любой сложной трубопроводной системы: в простом трубопроводе и трубопроводе с жиклером на выходе. В качестве жидкости рассмотрена четырехокись азота, насыщенная азотом ( $\rho_{ж} = 796 \text{ кг/м}^3$ ,  $E_{ж} = 7,1 \text{ Н/м}^2$ ,  $a_{ж} = 1440 \text{ м/с}$ ,  $\chi = 12,5 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{Па)}$ ,  $c = 0 \dots 0,225 \text{ кг/м}^3$ ). Параметры трубопровода:  $D = 10 \text{ мм}$ ,  $\delta = 1 \text{ мм}$ ,  $L = 2,7 \text{ м}$ ,  $E_m = 2 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ ,  $p_b = 1,85 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p_a = 10^5 \text{ Па}$ ,  $\Delta x_0 = 50 \text{ мм}$ .

В таблице 1 представлена зависимость граничного давления (давления насыщения) для рассматриваемого диапазона степени газонасыщения.

Таблица 1

| $c$ , $\text{кг/м}^3$                 | 0 | 0,05 | 0,10 | 0,13 | 0,17 | 0,20 | 0,225 | 0,25 |
|---------------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|------|
| $p_{\text{нас}} = 10^{-5}, \text{Па}$ | 0 | 0,4  | 0,8  | 1,04 | 1,36 | 1,60 | 1,80  | 2,00 |

На рис. 2 приведены изменения во времени давления (кривые 1, 2, 3) и

относительной скорости звука  $a/a_0$  (кривые 1а, 2а, 3а) в сечениях трубопровода  $x/L = 0,2; 0,4; 0,8$  при  $c = 0,20 \text{ кг/м}^3$ , показывающие связь между падением давления ниже граничного (при данной степени газонасыщенности) и уменьшением скорости звука.

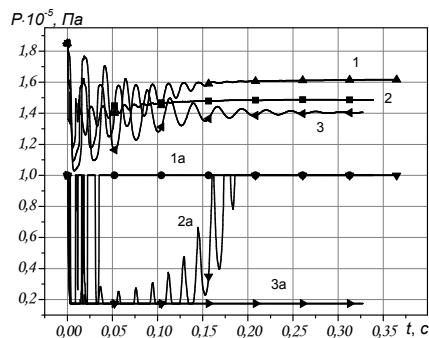


Рис. 2

На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения во времени давления на входе в трубопровод и расхода в процессе установления стационарного режима течения для различных значений степени газонасыщенности ( $c = 0; 0,17; 0,20; 0,225 \text{ кг/м}^3$ , линии 1, 2, 3 и 4 соответственно).

Из приведенных результатов следует, что с ростом степени газонасыщенности  $c$  происходит падение давления во входном сечении трубопровода и снижение расхода по сравнению с течением жидкости без газовыделения.

На рис. 5 приведены распределения давления и скорости звука по длине трубопровода после выхода на установившийся режим течения. При  $c=0$  и  $0,20 \text{ кг/м}^3$  имеет место течение с постоянной скоростью звука. В первом случае нет газовыделения, во втором – полностью пузырьковое течение со скоростью звука, существенно меньшей, чем в жидкости без газовыделения, (линии 1 и 5). Видно, что в обоих случаях имеет место линейный характер распределения давления по длине трубопровода с более сильным увеличением перепада давления по длине трубы для газонасыщенного потока. Ступенчатое изменение вдоль трубопровода скорости звука, связанное с переходом от участка течения без газовыделения к течению с образованием двухфазного газожидкостного потока (кривые 2, 3 соответствующие  $c=0,17; 0,20 \text{ кг/м}^3$ ), приводит к появлению излома в распределениях давления в месте резкого изменения скорости звука.

Газовыделение вносит особенность в распределение давления и в переходном нестационарном течении. Одна из возможных ситуаций иллюстрируется линией 4 на рис. 5а и 5б, относящейся к моменту времени  $t=0,001 \text{ с}$  для  $c=0,17 \text{ кг/м}^3$ . Передний фронт волны давления движется по среде, имеющей постоянную скорость звука  $a = a_0$ . Это приводит к появлению скачкообразного изменения давления (сечение  $x/L \sim 0,45$ ). Между сечениями  $x/L = 0,45$  и  $x/L = 0,8$  давление медленно уменьшается (имеет место «плато» давления), что приводит к выделению газа из жидкости и к постепенному снижению скорости звука. Задний фронт волны давления «растянут» от сечения 0,8 до сечения 0,95. Это связано с тем, что волна на данном участке движется по жидкости с возрастающей скоростью звука.

Течение в трубопроводе с жиклером на выходе проиллюстрировано данными, приведенными в таблице 2 и на рис. 6 и 7. Наличие жиклера в конце трубопровода приводит к повышению давления в трубопроводе (таблица 2) и, как следствие, к снижению интенсивности газовыделения. В частности, на установившемся режиме параметры течения при  $c = 0$  и  $c = 0,017$  практически совпадают, то есть газовыделение отсутствует. На рис. 6 показаны изменения давления в среднем сечении трубопровода при  $c = 0$  с жиклерами, коэффициенты гидравлического сопротивления которых составляют  $\zeta = 0$  (кривая 1),  $\zeta = 5$  (кривая 2) и  $\zeta = 50$  (кривая 3). Рис. 7 иллюстрирует влияние газонасыщенности ( $c = 0,17 \text{ кг/м}^3$ ) на характер установления стационарного режима в трубе с жиклерами различного гидравлического сопротивления  $\zeta = 0$  (кривая 1),  $\zeta = 5$  (кривая 2),  $\zeta = 20$  (кривая 3) и  $\zeta = 50$  (кривая 4). Кривые 4а отражают выход на режим стационарного течения для случая  $\zeta = 50$  и  $c = 0$ .

Приведенные данные свидетельствуют, что рост степени газонасыщенности до определенных значений (в рассмотренном случае до  $c = 0,17 \text{ кг/м}^3$ ) не влияет на конечные установившиеся значения давлений и расходов, хотя характер переходного процесса существенно отличается от условий при  $c = 0$  (линии 4 и 4а). При этом, поскольку частота пульсаций давления в



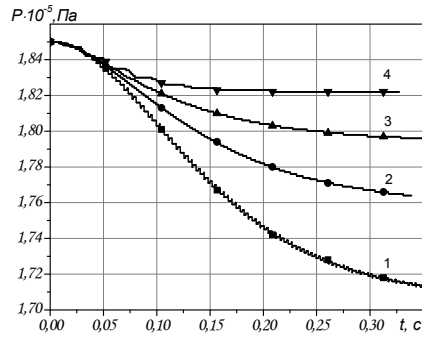


Рис. 3

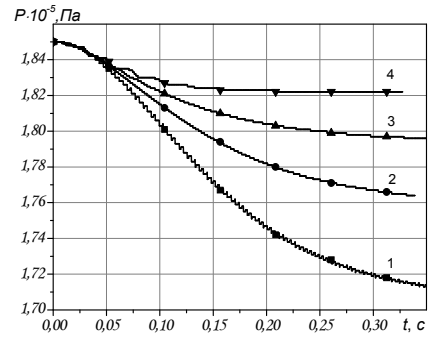
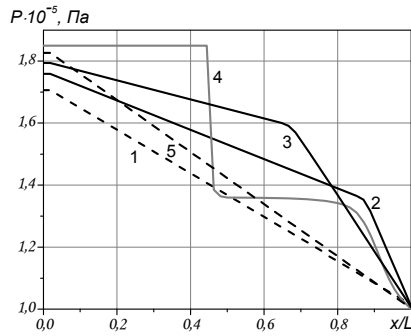
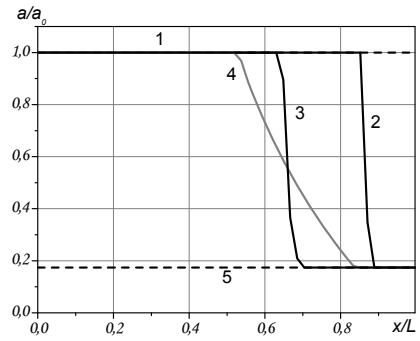


Рис. 4



а)



б)

Рис. 5

процессе установления пропорциональна отношению скорости звука в среде к длине трубопровода, снижение скорости звука при газовыделении уменьшает частоту пульсаций, а амплитуда этих пульсаций, ограниченная давлениями на входе и выходе из трубопровода, уменьшается в газожидкостной среде быстрее, чем в чисто жидкостной.

Еще более существенны отличия переходного процесса при равенстве параметров  $\zeta$  и  $c$  для трубопровода с тупиковым отводом, хотя стационарные значения давлений и расходов не зависят от параметров отвода (диаметра и длины).

Эти результаты показывают, что при течении газонасыщенных потоков по сложным трубопроводным системам могут возникать условия, не обеспечивающие достижение необходимых режимов течения в заданных сечениях. Например, при импульсных режимах работы, когда длительности импульсов сопоставимы с временами переходных процессов газонасыщенных потоков, возможны искажения импульсов вплоть до их пропусков.

Таблица 2

| Параметры потока                           | Газонасыщенность, $c$ , кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент сопротивления жиклера |             |              |              |
|--|---|-----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
|  |   | $\zeta = 0$                       | $\zeta = 5$ | $\zeta = 20$ | $\zeta = 50$ |
| $p_{\text{вх}} \cdot 10^{-5}$ , Па         | 0   | 1,70                              | 1,78        | 1,82         | 1,84         |
|  | 0,17                                      | 1,76                              | 1,78        | 1,82         | 1,84         |
|  | 0,225                                     | 1,82                              | 1,83        | 1,83         | 1,84         |
| $p_{\text{вых}} \cdot 10^{-5}$ , Па        | 0,0                                       | 1,00                              | 1,38        | 1,64         | 1,74         |
|  | 0,17                                      | 1,00                              | 1,38        | 1,64         | 1,74         |
|  | 0,225                                     | 1,00                              | 1,13        | 1,37         | 1,61         |
| $G \cdot 10^{-3}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с) | 0,0                                       | 4,76                              | 3,43        | 2,24         | 1,58         |
|  | 0,17                                      | 3,63                              | 3,43        | 2,24         | 1,58         |
|  | 0,225                                     | 2,11                              | 1,96        | 1,70         | 1,38         |

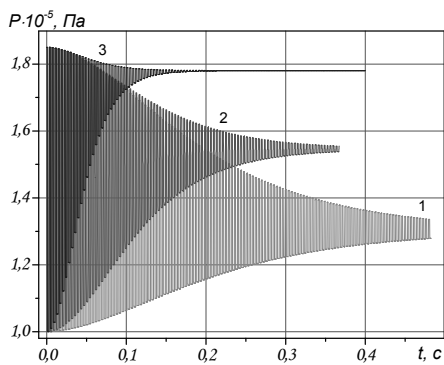


Рис. 6

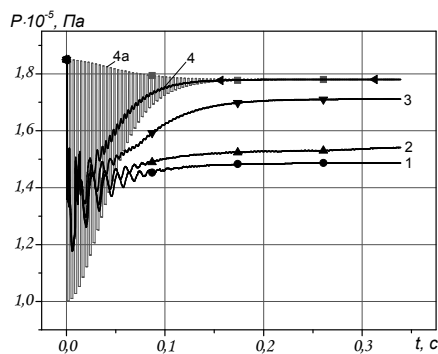


Рис. 7

### Заклучение.

На примерах течения газонасыщенного потока в простом трубопроводе и трубопроводе с жиклером на выходе показано влияние газовыделения на параметры переходных процессов при выходе на стационарный режим течения. Газовыделение приводит к уменьшению амплитуды и частоты колебательно-го процесса и к увеличению гидравлического сопротивления трубопровода. Наличие жиклера в конце трубопровода приводит к снижению интенсивности газовыделения. 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.

1. Венгерский Э. В. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок / Э. В. Венгерский, В. А. Морозов, Г. Л. Усов. – М. : Машиностроение, 1982. – 128 с.
2. Полухин Д. А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД / Д. А. Полухин, В. М. Орещенко, В. А. Морозов. – М. : Машиностроение, 1987. – 247 с.
3. Лямаев Б. Ф. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ / Б. Ф. Лямаев, Г. П. Небольсин, В. А. Нелюбов. – Л. : Машиностроение, 1978. – 192 с.
4. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с.
5. Мамаев В. А. Гидродинамика газо-жидкостных смесей в трубах / В. А. Мамаев, Г. Э. Одишария, Н. И. Семенов, А. А. Точигин. – М. : Недра, 1969. – 208 с.
6. Фокс Д. А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах : пер. с англ. / Д. А. Фокс. – М. : Энергоиздат, 1981. – 248 с.
7. Неупокоев А. Л. Основные положения математической модели и методики расчета нестационарных гидравлических процессов в напорных трубопроводах инерционного насоса / А. Л. Неупокоев // Сборник научных трудов Московского государственного университета природообустройства. Природообустройство и рациональное природопользование – необходимое условие социально-экономического развития России. – 2005. – № 1. – С. 28 – 33.
8. Тимошенко В. И. Расчетно-экспериментальное обеспечение разработки реактивных двигательных установок малой тяги / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, М. И. Кошкин // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 50 – 64.