

УДК 519.67-7:519.63

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРОВОЙ КАВИТАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ<sup>1</sup>

© 2004 Е.А. Каракулин, А.В. Русецкая<sup>2</sup>

Представлены зависимости изменения параметров неустановившихся течений кавитирующей жидкости при гидроударах в трубопроводе, рассчитанные с учетом и без учета переменности по координатам и времени скоростей звука. Их можно использовать при проектировании устройств и систем для оценки необходимости (целесообразности) применения метода расчета неустановившихся течений кавитирующей жидкости в трубопроводе, освоение и применение которого требуют значительных трудозатрат и затрат времени.

Приведены система уравнений для расчетов переменных по координатам и времени скоростей звука в трубопроводе с парожидкостной смесью и рассчитанные зависимости изменения скорости звука по длине трубопровода для различных степеней развития кавитации.

### Введение

При разработке и исследованиях современных высокофорсированных тепловых энергетических установок (например, жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ), атомных и на природном горючем топливе паротурбинных двигательных установок, поршневых двигателей с воспламенением от сжатия), систем гидравлического управления технологическим оборудованием, технологических установок для переработки нефтепродуктов и синтеза жидкостей и систем дальнего транспортирования жидкостей может возникать потребность предварительной оценки целесообразности выполнения расчетов неустановившихся течений жидкости в трубопроводах (проточных частях) систем с учетом переменных по координатам ( $x$ ) и времени ( $t$ ) скоростей ( $a$ ) звука. Эта потребность возникает из-за неизвестности возможного влияния уменьшений и увеличений  $a(x, t)$  на

<sup>1</sup>Представлена доктором физико-математических наук профессором Ю.Н. Радаевым.

<sup>2</sup>Каракулин Евгений Алексеевич (niipma@mail333.com), Русецкая Алла Валерьевна, Научный институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89а.

следующие динамические характеристики трубопровода и всей системы: амплитудно-частотные и фазочастотные (АФЧХ), коэффициенты усиления и ослабления сигналов и гидроударов, размеры запаздываний прихода к исполнительному механизму управляющих сигналов, переходные процессы, декременты колебаний, собственные частоты и др. При этом, например, изменение АФЧХ проточной части трубки Вентури регулятора ЖРДУ с присоединенными трубопроводами может приводить к потере устойчивости системы автоматического регулирования по отношению к колебаниям и переходу ЖРДУ на колебательный режим работы, который неприемлем из-за повышенных напряжений в деталях, из-за неблагоприятного (динамического) характера их нагружений и пониженной экономичности ЖРДУ. В двигателях внутреннего сгорания запаздывание впрыска горючего в камеру над поршнем из-за кавитации горючего и снижения скорости звука в трубопроводе с форсункой приводит к уменьшению коэффициента полезного действия двигателя. Кавитация жидкости в импульсной трубке гидропровода системы управления технологическим оборудованием приводит к запаздыванию реализации управляющего сигнала и к сбоям или снижению качества работы системы. Снижение  $a(x, t)$  из-за наличия паровых включений в жидкости приводит к повышению давлений при гидроударах и к сдвигу фаз [1, 2]. Изменение собственных частот колебаний жидкости в трубопроводах системы в широком диапазоне из-за многократного уменьшения скорости звука в нем при незначительных ( $< 2\%$ ) по объему паровых (газовых) включений в жидкости в некоторых системах (устройствах) может приводить к возникновению неучтенных опасных или нежелательных резонансов, и др.

В настоящее время известен общий метод [1], позволяющий рассчитывать неустановившиеся течения жидкости в трубопроводе при  $a(x, t) \neq \text{const}$ , которые возникают из-за соответствующих изменений сжимаемости жидкости при паровой, газовой или парогазовой кавитации и из-за изменений податливости стенок проточной части при изменениях модуля упругости материала стенок, их формы и размеров, как из-за изменений их конструктивных параметров, так и из-за изменений давлений и температуры жидкости и температуры стенок. Расчетным путем подтвержден также факт "усиления удара волн в жидкости с пузырьками пара" [2].

В данной работе рассматривается частный метод расчета неустановившихся течений жидкости в трубопроводе в условиях паровой кавитации, который, как и общий метод, применим для расчетов неустановившихся течений жидкости в простых, составных и разветвленных трубопроводах систем и устройств любой степени сложности и при любых законах изменения  $a(x, t)$ .

Цель этой работы состоит в определении на основе расчетов ранее неизвестных влияний учета распределенности по длине трубопровода паровых включений в жидкости (при  $a(x, t) \neq \text{const}$ ) на основные характеристики неустановившихся ее течений, а также в разработке ранее неизвестного спо-

соба расчета объемов суперкаверн, образующихся в трубопроводе между объемом жидкости с кавитационными пузырьками и заслонкой закрытого клапана.

Приведены система уравнений для расчетов переменных по координатам и времени скоростей звука в трубопроводе с парожидкостной смесью; способ расчета упомянутых объемов суперкаверн; зависимости изменения основных параметров неустановившихся течений кавитирующей жидкости при гидроударах в трубопроводе, рассчитанные с учетом и без учета распределенности паровых включений вдоль трубопровода, т.е. с учетом и без учета переменных по координатам и времени скоростей звука; и рассчитанные для различных моментов времени зависимости  $a(x, t) \neq \text{const}$ .

Из анализа последних следует, что упомянутые влияния очень большие: их необходимо учитывать. Однако для освоения и применения основного и дополнительного методов требуются значительные трудозатраты и время. Поэтому прежде чем разрабатывать математическую модель и соответствующую ей программу расчетов на ЭВМ для разрабатываемой (исследуемой) системы или устройства, целесообразно оценить необходимость и возможность выполнения такой работы в располагаемое время. Информация, содержащаяся в данной работе, может быть полезной и при принятии такого решения.

## 1. Постановка задачи

Необходимо на основе расчетов определить влияние распределенности по длине трубопровода паровых включений в жидкости (паросодержаний и скоростей звука) на основные характеристики неустановившихся ее течений, а также разработать способ расчета объемов "суперкаверн", образующейся между объемом жидкости с кавитационными пузырьками и заслонкой закрытого клапана.

## 2. Исследование влияния учета переменности по координатам и времени паросодержаний и скоростей звука в трубопроводе с кавитирующей дегазированной жидкостью на результаты расчетов основных параметров гидроударов и неустановившихся течений жидкости и парожидкостной смеси в нем

Для получения наиболее наглядного решения этой задачи принята схема гидравлической системы с наиболее простыми граничными условиями. Подача жидкости в трубопровод производится из присоединенной к одно-

му из его концов емкости с постоянным уровнем жидкости и постоянным давлением в ее газовой подушке, а дросселирование жидкости на противоположном конце этого трубопровода производится с помощью клапана типа "сопло-заслонка".

Математическая модель для расчетов неустановившихся течений жидкости в трубопроводе при переменных по координатам и времени скоростях звука приведена в [1].

Исследования выполнены для системы (отопления), заполненной горячей водой.

В примере расчета эта система имеет следующие основные размеры и параметры: внутренний диаметр трубопровода  $D = 0,3$  м; длина трубопровода  $L = 915,9$  м; толщина стенки трубы  $\delta = 0,007$  м; шероховатость внутренней поверхности стенки трубы  $\Delta = 0,00135$  м; превышение геодезической высоты расположения поперечного сечения трубопровода с координатой  $x_i$  над поперечным сечением на входе в трубопровод с координатой  $x_0 = 0$ ,  $h(x_i) = 0$ ; температура воды  $T_1 = 75$  °С; плотность воды  $\rho(T_1) = 974,8$  кг/м<sup>3</sup>; давление насыщенного пара воды  $P_p(T_1) = 0,3927 \cdot 10^5$  Па; кинематическая вязкость воды  $\nu(T_1) = 0,39 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; атмосферное давление воздуха  $P_a = 1,0134 \cdot 10^5$  Па; заторможенное (полное) давление воды в емкости на входе в трубопровод  $P^*(x_0, t_j) = 16,3028 \cdot 10^5$  Па; на установившемся режиме, непосредственно предшествующем времени начала закрытия клапана ( $t_0$ ), расход воды в трубопроводе  $G(x_i, t_0) = 229$  кг/с; приведенное давление воды на входе в трубопровод  $P(x_0, t_0) = 16,249 \cdot 10^5$  Па; соответственно приведенное и истинное давление воды перед заслонкой клапана ( $x_i = x_n = 915,9$  м)  $P(x_n, t_0) = P'(x_n, t_0) = 11,56 \cdot 10^5$  Па; скорость звука в трубопроводе до начала кавитации воды  $a(x_i, t_0) = 1195,5$  м/с; клапан закрывается полностью пружиной и потоком воды с постоянной скоростью; при этом суммарное гидравлическое сопротивление дросселя клапана  $R_\Sigma(x_n, t_j)$  рассчитывается по [1, 1, формула (1.20)], где постоянные  $C = 6,035$  (кг · м)<sup>-1</sup>,  $R = 20,11$  (кг · м)<sup>-1</sup>,  $t_0 = 0$  с, время конца закрытия клапана  $t_k = 0,10064$  с, время прекращения расчета  $R_\Sigma(x_n, t_j)$   $t_1 = 0,1$  с,  $R_\Sigma(x_n, t_1) = 10^7$  (кг/м)<sup>-1</sup>, но принимается  $G(x_n, t \geq t_1) = 0$  как при  $R_\Sigma(x_n, t_1) = \infty$ .

Расчет  $a(x_i, t_j) \neq \text{const}$  производится по следующей системе уравнений.

В соответствии с дополнительным методом для расчетов скоростей звука ( $a(x_{\mu-0,5}, t_j)$ ) в участке трубопровода, заполненном кавитирующей водой (пароводяной смесью), его максимальная длина ( $L_{km}$ ) разделяется неподвижными поперечными сечениями ( $x_\mu$ ) на такое число ( $m$ ) дополнительных  $\mu$ -х расчетных участков одинаковой длины, при котором в их пределах с достаточной точностью обеспечивается определение промежуточных значений зависимостей  $a(x_i, t_j)$ ,  $P(x_i, t_j)$ ,  $G(x_i, t_j)$  с помощью линейной интерполяции:

$$L_{km} = L - x_{km}(t_{km}),$$

где  $x_{km}$ ,  $t_{km}$  — соответственно минимальная координата границы, где  $P(x_i, t_j) = P_p$ , и время ее появления. В первом приближении  $L_{km}^{(1)}$  (и расположение участка трубопровода с кавитирующей водой) определяются путем выполнения упомянутого расчета при  $a(x_i, t_j) = \text{const} = 1195,5 \text{ м/с}$  до  $t_j = t_{km}$ . В рассматриваемом примере участок трубопровода с кавитирующей водой располагается у заслонки дросселя. Так как обычно  $L_{km}^{(1)} < L_{km}$ , то с достаточным запасом принимается

$$m \approx \frac{1,3 \cdot L_{km}^{(1)}}{x_{\mu-1} - x_{\mu}}.$$

В рассматриваемом примере  $L_{km} \approx 620 \text{ м}$ ,  $x_{\mu-1} - x_{\mu} = 5 \text{ м}$ ,  $m = 63$ .

$$P(x_{\mu-0,5}, t_j) = P(x_i(t_{j-1}), t_j) + \frac{P(x_{i-1}(t_{j-1}), t_j) - P(x_i(t_{j-1}), t_j)}{x_i(t_{j-1}) - x_{i-1}(t_{j-1})} (x_i(t_{j-1}) - x_{\mu-0,5}), \quad (2.1)$$

при этом  $x_i(t_{j-1})$  и  $x_{i-1}(t_{j-1})$  являются ближайшими к  $x_{\mu-0,5}$ .  $G(x_{\mu-0,5}, t_j)$  рассчитываются аналогично. Так как  $Pa = \text{const}$  и  $P_p = \text{const}$ , то при  $P(x_{\mu-0,5}, t_j) = P_p$  суммарный объем кавитационных пузырьков в воде в  $\mu$ -м участке трубопровода рассчитывается по формуле

$$W_{p\mu}(t_j) = \sum_{t_{k\mu}}^{t_j} (\rho_{c\mu}(t_j) + \rho_{c\mu}(t_{j-1}))^{-1} \times \\ \times (G(x_{\mu}, t_j) + G(x_{\mu}, t_{j-1}) - G(x_{\mu-1}, t_j) - G(x_{\mu-1}, t_{j-1})) \tau_j, \quad (2.2)$$

где  $t_{k\mu}$  — время начала кавитации воды в  $\mu$ -м участке.

Среднее в  $\mu$ -м участке трубопровода объемное паросодержание ( $\alpha_{\mu}$ ) определяется по формуле [4, с. 106], [3, с. 171, формула (1.20)].

$$\alpha_{\mu}(t_j) = \frac{|W_{p\mu}(t_j)|}{W_{\mu}(t_j)} = \frac{|W_{p\mu}(t_j)|}{S(x_{\mu-1} - x_{\mu}) \left(1 + \frac{D(P_p - P_a)}{E\delta}\right)},$$

где  $W_{\mu}(t_j)$  — объем проточной части  $\mu$ -го участка трубопровода;  $E$  — модуль упругости материала стенки трубы, здесь  $E = 20,6 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ .

Средняя скорость звука в пароводяной смеси в  $\mu$ -м участке [4, с. 106]

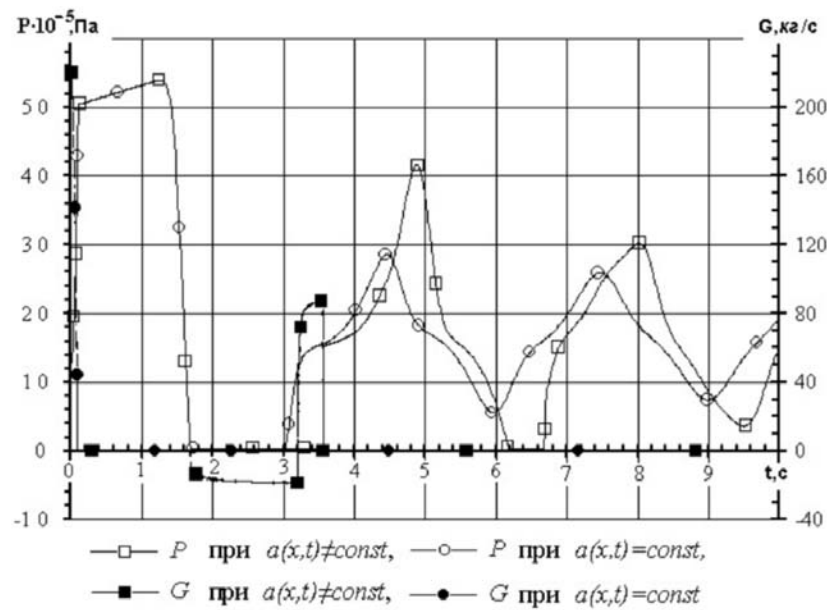
$$a_{c\mu}(t_j) = \sqrt{\frac{P_p}{\alpha_{\mu}(t_j)(1 - \alpha_{\mu}(t_j))\rho(T)}}.$$

Плотность пароводяной смеси в  $\mu$ -м участке [4, с. 105]

$$\rho_{c\mu}(t_j) \approx (1 - \alpha_{\mu}(t_j))\rho(T).$$

Средняя скорость распространения волн (звука) в  $\mu$ -м участке трубопровода с пароводяной смесью [5, с. 329]

$$a_{\mu}(t_j) = a_{c\mu}(t_j) \sqrt{1 + \frac{(a_{c\mu}(t_j))^2 \rho_{c\mu}(t_j) D}{E\delta}}.$$

Рис. 1. Зависимости  $P(x_n, t)$ ,  $G(x_n, t)$ 

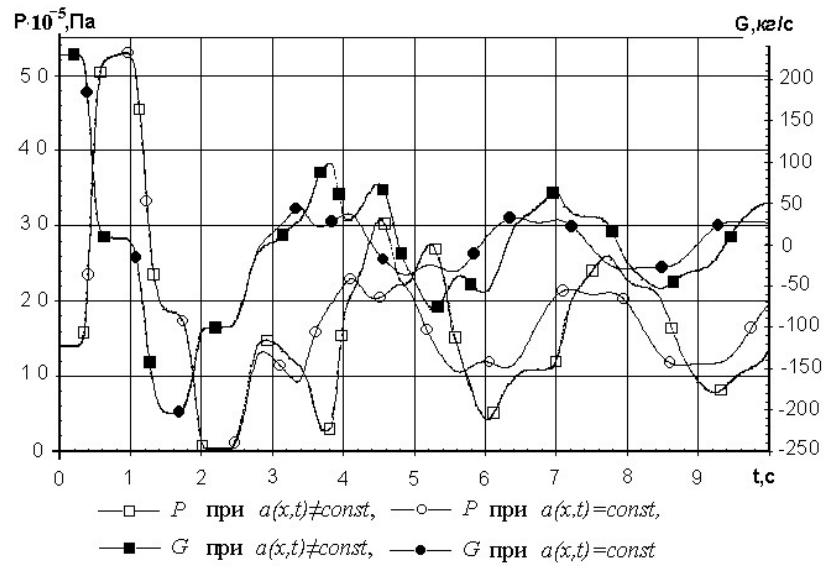
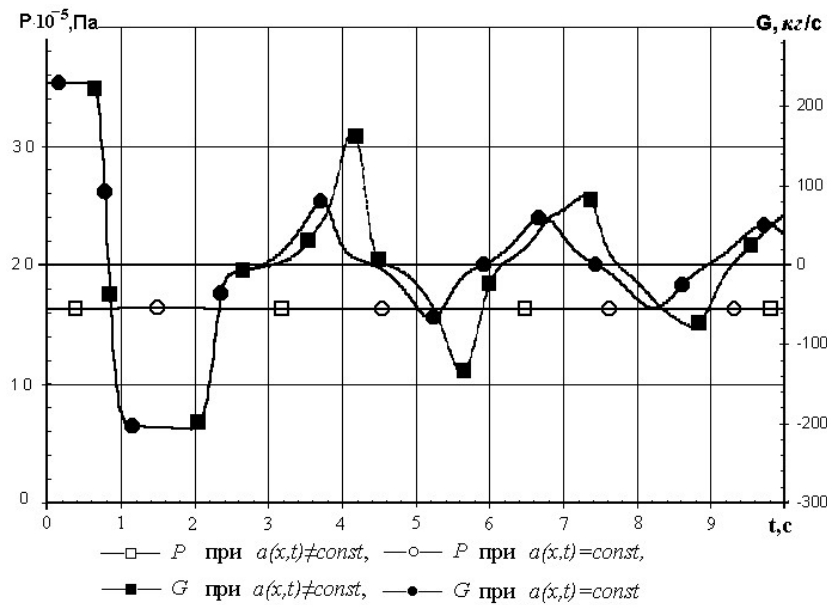
Расчет объема кавитационной полости ("суперкаверны"), при условии  $P_a = \text{const}$  и  $P_p = \text{const}$ , также выполняется по (2.2), но дополнительно к  $\mu$ -м участкам вводятся  $\varphi$ -е участки с достаточно мелким шагом (например, через 0,02м). При этом для обеспечения достаточной точности определения расходов и давлений на границах  $\varphi$ -х расчетных участков путем интерполяции по (2.1) число  $i$ -х расчетных участков увеличивается приблизительно на порядок. Изменение объема суперкаверны фиксируется ступенчато при полном опорожнении от жидкости каждого  $\varphi$ -го расчетного участка.

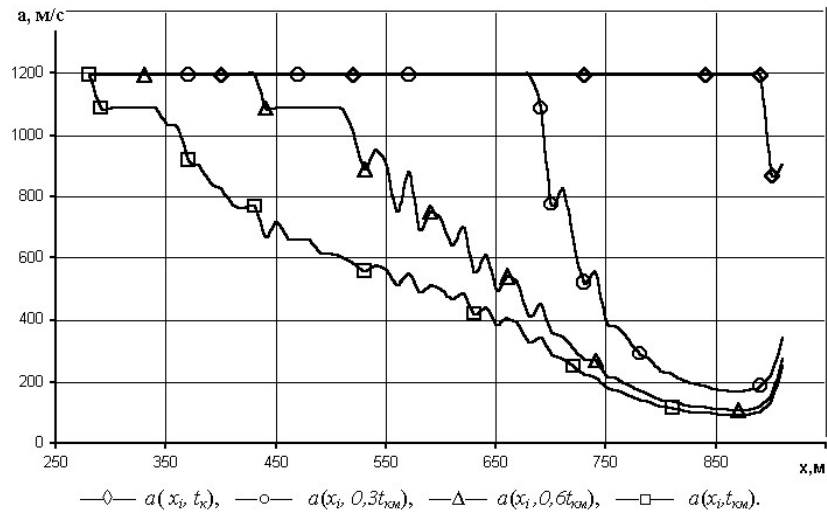
Результаты расчетов в виде компьютерных распечаток графических зависимостей изменения параметров неустановившихся течений жидкости в трубопроводе при первичном и последующих (после прохождения волн разряжения) гидроударах приведены на рис. 1–4.

Из рис. 1–3 следует, что характер известных основных закономерностей изменения  $P(x, t) = P'(x, t)$  и  $G(x, t)$  у дросселя по середине трубопровода и у емкости как в расчетах с сосредоточенной у дросселя "суперкаверной" (когда  $a(x, t) = \text{const}$ ), так и при парожидкостной смеси с распределенной по длине трубопровода концентрацией пузырьков пара (когда  $a(x, t) \neq \text{const}$ ) в основном одинаковый.

1. Результаты расчетов неустановившихся течений жидкости в трубопроводе в течение времени первого гидроудара (при отсутствии кавитации жидкости) по обоим методам (при  $a(x, t) = \text{const}$  и  $a(x, t) \neq \text{const}$ ) совпадают (рис. 1–3).

2. После окончания закрытия клапана расходы жидкости у клапана по обоим методам равны нулю (рис. 1) (при этом отрицательный расход жид-

Рис. 2. Зависимости  $P(x, t)$ ,  $G(x, t)$ , при  $x = 0,5L$ Рис. 3. Зависимости  $P(x_0, t)$ ,  $G(x_0, t)$

Рис. 4. Зависимости  $a(x, t)$ 

кости на рис. 1, рассчитанный при  $a(x, t) \neq \text{const}$ , есть расход жидкости на фронте жидкости, оторвавшемся от клапана, но вблизи к нему).

3. Заторможенные (полные) давления жидкости у емкости, рассчитанные по обоим методам, равны полным давлениям жидкости в емкости.

Отличие состоит в том, что в расчете при  $a(x, t) \neq \text{const}$  кроме суммарного объема ( $W_{pp}(t_j)$ ) пузырьковых паровых каверн удается рассчитать также объем ( $W_{k2}(t_j)$ ) относительно небольшой "суперкаверны", а в расчетах при  $a(x, t) = \text{const}$  рассчитывается суммарный объем паровых каверн ( $W_{\Sigma 1}(t_j)$ ), который принимается равным объему ( $W_{k1}(t_j)$ ) "суперкаверны" (т.е. принимается, что пузырьковой паровой кавитации нет). Однако при  $a(x, t) \neq \text{const}$  максимальный  $W_{k2} \approx 26,9 \text{ л}$ ,  $L_{k2} = 0,38 \text{ м}$  и максимальный суммарный объем всех каверн  $W_{\Sigma 2} \approx 45,9 \text{ л}$ , а при  $a(x, t) = \text{const}$  максимальные  $W_{\sigma 1} = W_{k1} \approx 41 \text{ л}$ .

$$W_{\Sigma 2} = \sum_{\mu=1}^{\mu=63} W_{p\mu}(t_j); \quad W_{pp}(t_j) = W_{\Sigma 2}(t_j) - W_{k2}(t_j).$$

## Заключение

Из анализа этих зависимостей следует, что учет переменных по координатам и времени скоростей звука в расчетах неустановившихся течений кавитирующей жидкости в трубопроводе приводит к весьма значительным изменениям скоростей звука, амплитуд и фаз колебаний давлений и расходов жидкости. Например, при содержании в горячей воде паровых пузырьков по объему  $\leq 2\%$  скорость звука уменьшается в  $\leq 100$  раз. Амплитуды колебаний давления при вторичном гидроударе увеличиваются на  $44,2\%$ , а сдвиг фаз между максимумами давлений равен  $0,29T_{\Phi}$ , где фаза гидроудара в сплошной жидкости  $T_{\Phi} = 1,52 \text{ с}$ . В тех случаях, когда такое же

распределение паросодержаний будет вызвано не гидроударом, а местными частичными вскипаниями жидкости (например, в зарубашечном пространстве камеры сгорания ЖРДУ), то учет распределенности паросодержаний по длине упомянутой проточной части при расчетном определении ее динамических характеристик является недопустимым.

Некоторые авторы в расчетах учитывают распределенную по длине проточной части сжимаемость парожидкостной смеси путем введения сосредоточенной податливости объема пара ("суперкаверны"), примыкающей к поперечному сечению проточной части, где начинается кавитация жидкости [6, 7]. Как здесь показано, это может приводить к большим погрешностям расчета.

## Литература

- [1] Каракулин Е.А. Метод расчета неустановившихся течений жидкости в трубопроводе при переменных скоростях звука // Математическое моделирование, 2004. Т. 16, №4. С. 67–79.
- [2] Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губайдулин А.А. и др. Усиление удара волн в жидкости с пузырьками пара // Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск, 1977. С. 67–73.
- [3] Чарный И.А. Неустановившиеся движения реальной жидкости в трубах. 2-е изд., переработ. и доп. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [4] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 840 с.
- [5] Мостков М.А. Прикладная гидромеханика. М.; Л.: Гозэнергоиздат, 1963. 463 с.
- [6] Пилипенко В.В., Натанзон М.С., Задонцев В.А. Кавитационные колебания и динамика двухфазных систем. Киев: Наукова думка, 1985. 310 с.
- [7] Немировский И.А. Графо-аналитический метод расчета гидроприводов. М.: Машиностроение, 1968. 144 с.

Поступила в редакцию 19/VI/2003;  
в окончательном варианте — 19/VI/2003.

**EFFECT OF VAPOUR CAVITATION ON UNSTABLE  
FLOW PARAMETERS IN A PIPE<sup>3</sup>**© 2004 E.A. Karackulin, A.V. Rusetskaya<sup>4</sup>

Dependencies of parameters changing on unstable cavitating flow during hydroimpact in a pipe, obtained under consideration of variability on coordinates and acoustic velocity time are presented. They can be used in designing devices and systems to estimate the application necessity (practicability) of calculation method of cavitating liquid changing flow in a pipe. Such an operation requires much efforts and significant time of computations.

System of equations for variables computed on coordinates and acoustic velocity time in a pipe with paraliqid mixture and acoustic velocity changing along the pipe for different levels of cavitation are presented.

Paper received 19/*VI*/2003.

Paper accepted 19/*VI*/2003.

---

<sup>3</sup>Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. Y.N. Radayev.

<sup>4</sup>Karackulin Evgenij Alekseevich ([niipma@mail333.com](mailto:niipma@mail333.com)), Rusetskaya Alla Valerjevna, Institute of Applied Mathematics and Automation of Kabardino Balkarian Scientific Center of RAS, Nalchik, 360000, Russia.