

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ
ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ
С ОГРАНИЧЕННОЙ ИСКУССТВЕННОЙ
ГАЗОВОЙ КАВЕРНОЙ. Ч. 1**

П. М. Шкапов, М. М. Благовещенская

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва (e-mail: spm@bmstu.ru)

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования динамики течения жидкости с развитой искусственной газовой каверной, возникающей в потоке жидкости при вдуве газа за кавитатор. Рассмотрены особенности структуры и динамики течения при осевом ограничении развития каверны в трубопроводе в результате ее замыкания на местном гидросопротивлении типа дроссельной шайбы.

Ключевые слова: гидродинамика, искусственная кавитация, математическое моделирование, поверхностные волны, время запаздывания.

**THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS OF DYNAMICS OF FLUID
FLOWS WITH A LIMITED ARTIFICIAL GAS CAVITY (Part 1)**

P. M. Shkapov, M. M. Blagoveshchenskaya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
Russia (e-mail: spm@bmstu.ru)

A synthesis of theoretical and experimental study of dynamics of a fluid flow in a pipe with a limited artificial gas cavity is presented. This cavity appears in the stream as a result of gas injection behind a cavitator and limited in its axial development by a local throttle washer-type hydroresistance at the exit of the pipeline.

Keywords: hydrodynamics, an artificial cavern, mathematical modeling, surface waves, the time lag.

Течения с развитой каверной, возникающей в зоне отрыва потока жидкости за плохо обтекаемыми телами или специальными кавитаторами — распространенная форма кавитационных течений. Закрутка потока, поддув газа в зону отрыва, сепарация и коагуляция в ней пузырьков из набегающего двухфазного потока, так же как и наличие стесняющих поток стенок магистрали приводят к интенсификации развития этой формы кавитационного течения и существенному изменению критического числа кавитации по сравнению с развитой формой кавитации в неограниченных или полуограниченных потоках [1–9]. Как показано в работах Л. Вудса, А.Н. Иванова, Г.В. Логвиновича, Э.В. Парышева, В.П. Карликова и других исследователей, развитое локальное кавитационное образование во многих случаях неустойчиво и характеризуется колебаниями определяющих параметров течения фаз. Для искусственных газовых каверн в неограниченных потоках и однородных протяженных магистралях колебания носят локальный

характер. При видимом существенном изменении формы и размеров каверн пульсации давления внутри каверны и в окружающем потоке в этом случае малы. В случае же ограничения развития каверны в осевом направлении из-за наличия в гидрролинии ниже по потоку местных гидросопротивлений пульсации становятся более выраженными, охватывают всю гидросистему и в предельном случае переходят в релаксационный режим в виде последовательных гидроударов с периодическим изменением средней осевой скорости потока жидкости вплоть до изменения ее направления [10–13].

Среди известных математических моделей, описывающих динамику подобных кавитационных образований, можно выделить модель А.Н. Иванова [5], по которой изменение осевого размера каверны описывается уравнением

$$m \frac{d^2 l_k(t)}{dt^2} = F (P_k - P^*), \quad (1)$$

где $l_k(t)$ — характерная длина каверны; t — время; m — присоединенная масса; F — площадь миделевого сечения; P_k — давление газа в каверне; P^* — давление в потоке жидкости за каверной.

В предложенной модели полагалось, что масса газа в объеме каверны остается неизменной, $P^* = \text{const}$, волновыми процессами в газовой фазе пренебрегалось. В итоге линеаризованное дифференциальное уравнение, описывающее изменение размеров каверны, имеет вид, характерный для пассивного колебательного звена:

$$\lambda \frac{d^2 \delta l_k}{dt^2} + C \delta l_k = 0, \quad (2)$$

где $\lambda = m/F$ — коэффициент присоединенной массы; C — приведенный коэффициент упругости газа в каверне, δ — символ вариации параметра.

Более сложная модель Э.В. Парышева [6] базируется на известном принципе независимости расширения каверны, сформулированным Г.В. Логвиновичем [3], согласно которому каждое поперечное сечение каверны развивается независимо от других под действием разности давлений внутри каверны и во внешнем обтекающем потоке. Основой этой схемы является уравнение

$$\mu_r \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2} = P_k - P; \quad (3)$$

здесь μ_r — коэффициент присоединенной массы каверны при ее радиальном развитии; $F(x, t)$ — площадь поперечного сечения каверны; x — продольная координата; P_k, P — давление в каверне и в окружающем потоке.

Введя в рассмотрение длительность процесса изменения объема каверны при перестройке площади каждого сечения в связи с движущейся со скоростью v волной поверхностного возмущения, Э.В. Парышев получил систему интегро-дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом в виде [7]

$$\frac{1}{C}\ddot{P}_k(t) + \dot{P}_k(t) + \dot{P}_k(t - \tau) - \frac{2}{\tau}P_k(t) + \frac{2}{\tau}P_k(t - \tau) = 0;$$

$$\ddot{V}_k = \frac{\xi_k v \tau}{\rho_{ж}} [P_k(t) + P_k(t - \tau)] - \frac{2\xi_k v}{\rho_{ж}} \int_{t-\tau}^t P_k(\theta) d\theta, \quad (4)$$

где $\tau = l_{k0}/v$ — время запаздывания; V_k — объем каверны; ξ_k — коэффициент сопротивления кавитатора; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; $C = \frac{P_{k0}}{nV_{k0}} \frac{\xi_k v \tau}{\rho_{ж}}$; n — показатель адиабаты. Здесь и далее индекс 0 соответствует осредненным или невозмущенным значениям параметров.

Решение системы уравнений (4) может быть проведено лишь численными методами и требует дополнительных упрощений. Основным допущением, как и в предыдущем случае, является предположение о том, что унос и поддув газа отсутствуют, т.е. масса его в объеме каверны остается постоянной [7].

Время запаздывания τ , отражающее физический механизм реагирования каверны на изменившиеся условия в месте ее замыкания, использовалось также в качестве основного параметра и в модели пульсаций искусственных каверн, предложенной Л. Вудсом [1]. Основой ее послужило гипотетическое предположение о постоянстве объема газа в каверне и образующемся за ней следе. Уместно отметить, что характерными формами уноса газа из каверны в свободных потоках и каналах являются отрыв ее части в результате периодического воздействия обратной струйки или отрыв, связанный с перемыканием газовой полости при развитии волновой неустойчивости поверхности контакта фаз [1, 4–9].

Приведенные выше модели, описывающие динамику развитых присоединенных каверн относятся к случаю их образования в неограниченных или малостесненных внутренних потоках. Исследования, проведенные Л.А. Эпштейном [2], показали, что учет наличия стесняющих поток стенок трубопровода приводит к существенному изменению критического числа кавитации, спрямлению линий тока на границе каверны и ее неограниченному распространению по потоку. Как уже отмечалось, в реальных гидролиниях неограниченному увеличению размеров зоны расслоения фаз препятствуют изменения внутреннего диаметра трубопровода, искривление его осевой линии,

установленные в магистрали ниже по потоку вентили, диафрагмы, шнеки, любые другие местные гидросопротивления, влияющие на перестроения профилей давления и скорости потока.

Результаты исследований подобного вида течений в системах с закруткой потока специальными шнековыми завихрителями представлены в работах [4, 10, 11]. Исследования, проведенные В.Г. Базаровым [10], позволили оценить влияние автоколебаний в камере закрутки газожидкостной форсунки на дисперсность капель в факеле распыла. Создаваемые шнековой газожидкостной форсункой пульсации потока использованы в медицинской технике в гидромассажном аппарате Ю.А. Кныша [11].

Математическая модель ограниченной искусственной газовой каверны, образующейся в результате вдува свободной газовой фазы за кавитатор без закрутки потока была впервые представлена в [12], и предложено использовать автоколебания рассматриваемого кавитационного течения для создания пульсаций потока при гидродинамических испытаниях и в технологиях различных производств [13]. В осно-

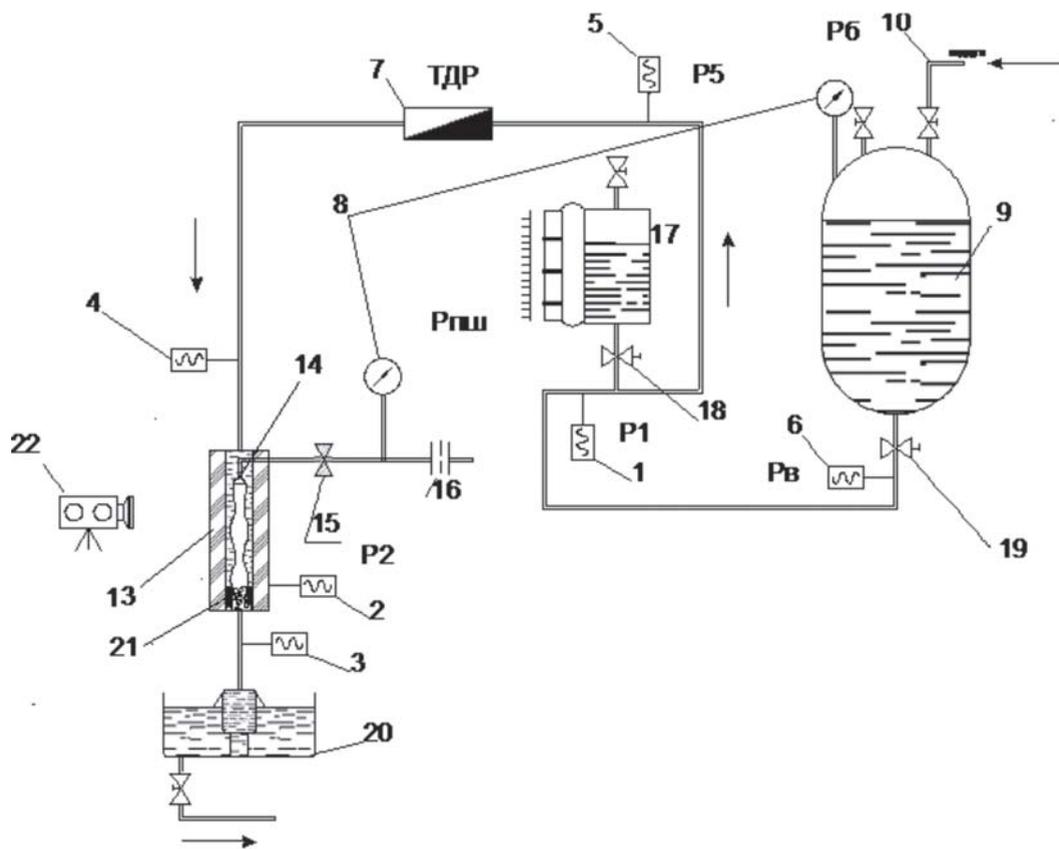


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1-6 — датчики давления; 7 — турбинный датчик расхода жидкости; 8 — образцовые манометры; 9 — напорный бак с жидкостью; 10 — магистраль наддува бака; 11 — расходный трубопровод жидкости; 12 — магистраль подачи газа; 13 — участок гидросистемы с исследуемой ограниченной искусственной газовой каверной; 14 — кавитатор; 15 — критическая шайба на магистрали подачи газа; 16 — фланец подсоединения газовой магистрали; 17 — пассивно регулируемый газожидкостной аккумулятор; 18, 19 — запорные вентили; 20 — сливной бак; 21 — местное гидросопротивление на выходе рабочего участка; 22 — скоростная кинокамера

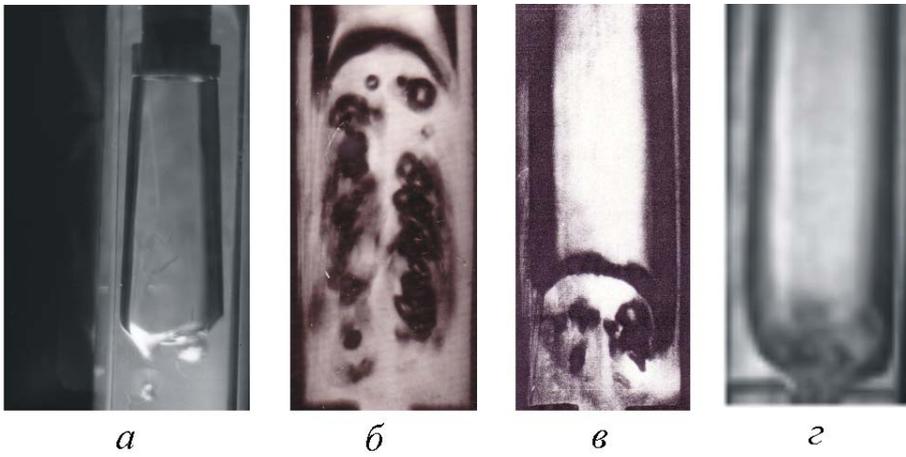


Рис. 2. Фотографии течения в хвостовой части каверны на входе в местное гидросопротивление

ву данных работ были положены результаты большого цикла экспериментальных исследований, проведенных при участии С.Н. Курочкина и Е.А. Данилова, на созданном модельном гидродинамическом стенде, схема которого приведена на рис. 1.

Рабочий участок гидростенда в месте создания ограниченной искусственной газовой каверны был выполнен прозрачным и представлял собой в одних вариантах плоский канал с проходным сечением $10 \times 31,4$ мм, а в других — осесимметричный канал с внутренним диаметром 20 мм. С использованием фото- и скоростной киносъемки были выявлены основные структурные и волновые особенности развития ограниченной искусственной газовой каверны при колебаниях. На рис. 2 приведены фотографии каверны, отражающие последовательность изменения ее формы и характерной структуры с увеличением подачи газа за кавитатор. Виден вихревой характер уноса газа из каверны на рис. 2, а–в. Существенных пульсаций в системе при этом не фиксировалось. Только с момента непосредственного замыкания каверны на местном гидросопротивлении (рис. 2, г) в системе при определенных режимах возникали заметные низкочастотные колебания не только размеров каверны, но и расходов и давления фаз. На рис. 3 представлены фотографии с видимой бегущей волной на поверхности каверны при колебаниях в системе. Подобные

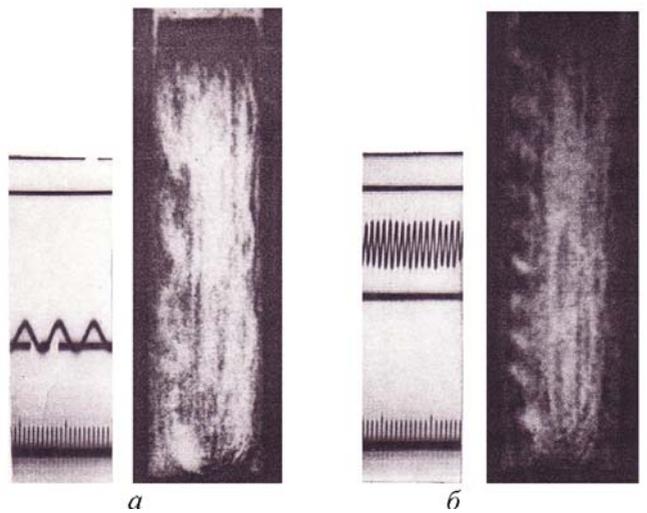


Рис. 3. Осциллограммы пульсаций давления и фотографии ограниченной газовой каверны:
а — частота колебаний $f = 13,3$ Гц; *б* — $f = 76,6$ Гц

волновые структуры на границе раздела фаз для похожих течений были зафиксированы в исследованиях, представленных в работах [1, 4, 8–10].

Результаты экспериментального исследования явились основой для введения схематизации рассматриваемого течения и создания его математической модели.

Исследования проводились при частичной поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-5271.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В у д с Л. О неустойчивости вентилируемых каверн // Механика: Сб. переводов и рефератов период. иностр. литературы. 1967, № 5. – С. 103-124).
2. Э п ш т е й н Л. А. О минимальном числе кавитации при струйных течениях в цилиндрических каналах // Труды ЦАГИ. – 1967. – Вып. 1062. // – С. 3–8.
3. Л о г в и н о в и ч Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. – Киев: Наукова думка, 1969. – 250 с.
4. Х а с и м о т о. Продольные волны в вихревом потоке с полостью в круглой трубе // Труды ASME. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов: Пер. с англ. 1969, № 4. – С. 160–167.
5. И в а н о в А. Н., Н а с ы р о в А. М., Р у з а н о в В. Е. Экспериментальное исследование искусственных кавитационных каверн как квазиупругой колебательной системы // Сб. НТО им. А.Н. Крылова. – 1971. Вып. 165. – С. 45–51.
6. П а р ы ш е в Э. В. Система нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, описывающих динамику нестационарных осесимметричных каверн // Труды ЦАГИ. – 1978. Вып. 1907. – С. 3–16.
7. П а р ы ш е в Э. В. Численное моделирование пульсаций вентилируемых каверн // Труды ЦАГИ. – 1985. – Вып. 2272. – С. 19–28.
8. К а р л и к о в В. П. и др. О возможном механизме возникновения автоколебаний в развитых искусственных кавитационных течениях и затопленных газовых струях // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1987. – № 3. – С. 76–83.
9. П р о к о ф ь е в В. В. и др. О возникновении автоколебаний в струйной завесе, разделяющей области с различным давлением // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 1062–1064.
10. Б а з а р о в В. Г. Динамика жидкостных форсунок. – М.: Машиностроение, 1979. – 136 с.
11. К н ы ш Ю. А., К н ы ш О. Ю. Гидромассажный аппарат Кныша // Патент RU № 2095047 С1 от 10.11.97. (Бюл. № 31).
12. К и н е л е в В. Г., Ш к а п о в П. М., Б о н д а р е н к о Н. И. Колебания в гидравлической магистрали при наличии расслоенного течения фаз газ–жидкость / Межвуз. сб. науч. трудов “Нефтепромысловая и нефтезаводская механика”. – Грозный: ГНИ, 1987. – С. 40–50.
13. К и н е л е в В. Г., К у р о ч к и н С. Н., Ш к а п о в П. М. Устойчивость течения в трубопроводах при наличии в потоке ограниченной газовой каверны // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конференции “Проблемы динамики пневмогидравлических и топливных систем летательных аппаратов”, сентябрь 1990 г. – Куйбышев, 1990. – С. 35.

Статья поступила в редакцию 24.10.2011