

## Исследование структуры течений с ограниченной искусственной газовой каверной на научно-учебном гидродинамическом стенде

© П.М. Шкапов, И.Г. Благовещенский,  
Е.Б. Гартиг, С.А. Дорошенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Течения с развитой газовой каверной в потоке жидкого компонента во многих случаях являются нестационарными и характеризуются сложным волнообразованием на границе раздела фаз. При колебаниях изменяются размеры кавитационного образования, а также давление в каверне и окружающем потоке. Все это сопровождается порционным уносом газовой компоненты из каверны, механизм которого может различаться в зависимости от расходных параметров течения фаз и других факторов. Наиболее интенсивные пульсации возникают в гидрوليнии в случае замыкания искусственной каверны на расположенном ниже по потоку местном гидросопротивлении типа дроссельной шайбы. Такая ограниченная газовая каверна представляет собой самовозбуждающийся источник возмущений в связанной колебательной системе каверна — трубопровод. Для выяснения особенностей данного процесса, был разработан научно-учебный гидродинамический стенд. Представлены кинограммы развития волн на поверхности каверны при колебаниях в системе в случаях горизонтального и вертикального расположения рабочего участка.*

**Ключевые слова:** гидродинамика, искусственная кавитация, присоединенная каверна, релаксационные колебания, гидродинамический стенд.

**Введение.** Создание и внедрение новых инновационных разработок с использованием вибраций оборудования и пульсаций потока является важным направлением развития многих технологических процессов в пищевой, химической, энергетической, нефтегазовой и других отраслях промышленности, а также в коммунальном хозяйстве. Колебательные режимы течения рабочих сред используют в процессах смешения, растворения, фильтрации, экстракции, мойки сырья, промывки внутренних и внешних поверхностей оборудования, для гидродинамической очистки проточных и непроточных агрегатов гидравлических систем, трубопроводов, интенсификации теплообмена и в других случаях [1]. Их также широко применяют при создании средств и технологий ускоренных эквивалентных динамических и ресурсных испытаний агрегатов, гидравлических и топливных систем летательных аппаратов [2].

При этом для получения пульсирующих потоков используют разные способы и устройства, обеспечивающие создание потока среды с

заданными параметрами колебательного движения. Для создания пульсаций в технологических процессах часто применяют способы, основанные на регулировании проходного сечения внутреннего потока с помощью различных механических устройств дроссельного типа. Кроме того, рабочий участок последовательно подключают к магистралям высокого и низкого давления, используют гидродинамическую кавитацию, автоколебания клапанов, вибрации мембран и др.

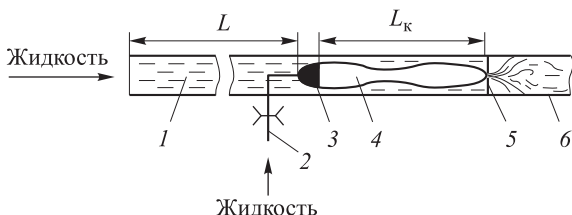
Как показали исследования, возбуждения пульсаций течения жидкости в трубопроводе можно добиться путем создания в трубопроводе газовой каверны, образующейся за кавитатором в результате поддува газа и замыкающейся на местном гидросопротивлении ниже по потоку. Такая ограниченная искусственная каверна является потенциально неустойчивой и может генерировать возмущения, передающиеся в поток протекающего компонента [1, 3–6].

Таким образом, течение жидкости с развитой формой присоединенной каверны, образующейся в зоне отрыва потока за плохо обтекаемыми телами или специальными кавитаторами, является актуальным предметом исследований ввиду важных прикладных задач, связанных с созданием пульсационных режимов течения в гидросистемах.

В процессах массообмена и пульсационного взаимодействия развитой каверны с потоком жидкости возможен равномерный или порционный механизм уноса газа из каверны. Первый механизм реализуется при спиралевидном сворачивании струй в хвостовой части каверны и, как правило, имеет квазистационарный характер [7]. Вторым может быть обусловлен наличием обратной струйки, когда из хвостовой части выносятся газовая фаза в виде отдельных порций пузырьков [8], либо может быть связан с неустойчивостью и прогрессивным волнообразованием на поверхности каверны, приводящим к периодическому перемыканию каверны, отрыву и сносу вниз по потоку ее значительной части [9]. Возможно и одновременное проявление нескольких механизмов уноса. Колебания искусственных газовых каверн в неограниченных потоках и однородных протяженных магистралях носят локальный характер. При видимом существенном изменении формы и размеров каверн пульсации давления внутри каверны и в окружающем потоке являются при этом незначительными.

Вместе с тем для внутренних кавитационных течений в проточных каналах и трубопроводах гидросистем характерно ограничение развития каверны в осевом направлении из-за наличия в гидролиниях ниже по потоку вентилей, задвижек, другой регулирующей трубопроводной арматуры, гидроагрегатов или поворотов гидролиний. При замыкании развитой искусственной газовой каверны на таких местных гидросопротивлениях, где происходит перестроение потока, каверна локализуется, а пульсации становятся более выраженными, охватывают всю гидроси-

стему и в предельном случае переходят в релаксационный режим в виде последовательных гидроударов с периодическим изменением средней осевой скорости потока жидкости в подводящем трубопроводе вплоть до изменения ее направления [3–6]. Принципиальная схема такого течения с ограниченной искусственной газовой каверной приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема течения с ограниченной искусственной газовой каверной: подводящий трубопровод с потоком жидкости длиной  $L$  (1); магистраль подачи газа с установленной на ней критической шайбой (2); кавитатор (3); ограниченная искусственная газовая каверна на участке длиной  $L_k$  (4); дроссельная шайба на выходе рабочего участка (5); выходной участок трубопровода (6)

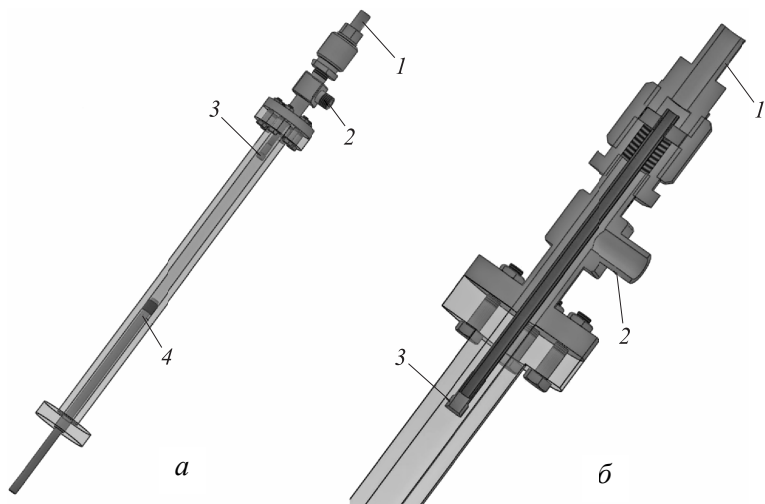
Первоначальные экспериментальные исследования рассматриваемого кавитационного течения с ограниченной искусственной газовой каверной проводились на гидродинамическом стенде, схема которого приведена в работе [3]. Стенд включал в себя: вытеснительную систему подачи жидкости на вход рабочего участка; систему подачи газа за кавитатор через критическую шайбу; свободный слив потока через дроссельную шайбу на выходе рабочего участка или сливной трубопровод в бак большого объема «под уровень»; системы регистрации давления и расхода жидкости и газа; системы фотофиксации и скоростной киносъемки (50 и 1000 кадр/с), синхронизированной с записью показаний датчиков давления. Длина трубопровода подачи жидкости от расходного бака составляла 20 м. На расстоянии 5 м до кавитатора был установлен регулируемый по уровню заполнения газожидкостный аккумулятор, обеспечивающий изменение акустической податливости гидролинии, и в том числе формирование полной акустической развязки в виде «акустически открытого» сечения трубопровода. Прозрачный рабочий участок стенда имел два варианта исполнения: осесимметричный с проходным диаметром 20 мм и симметричный плоский с эквивалентным проходным сечением  $10 \times 31,4 \text{ мм}^2$ . Расстояние от кавитатора до замыкающего рабочий участок гидросопротивления составляло 200 и 400 мм. Рабочий участок располагался вертикально, поток проходил через него сверху вниз. Проведенные исследования позволили выявить особенности структуры рассматриваемой ограниченной искусственной газовой каверны при колебаниях в системе и на этой основе ввести ее схематизацию [3].

По результатам этих исследований была разработана математическая модель рассматриваемого течения, исследована устойчивость и получены выражения для амплитуд и частот автоколебаний в гидросистеме с ограниченной искусственной каверной [4]. Ключевым элементом в рассматриваемой системе, согласно предложенной модели, является время запаздывания  $\tau$ , характеризующее изменение расхода жидкости на входе в замыкающее искусственную газовую каверну гидросопротивление по отношению к расходу в ее начале. Это время определяется движением волны сносного типа по поверхности каверны. Было также показано, что развитые автоколебания в рассматриваемой системе при определенных условиях могут переходить в режим релаксационных (помпажных) колебаний, характеризующихся существенно негармоническим характером развития и размахом колебаний давления и расхода жидкости в гидрوليнии, сравнимых с гидроударом.

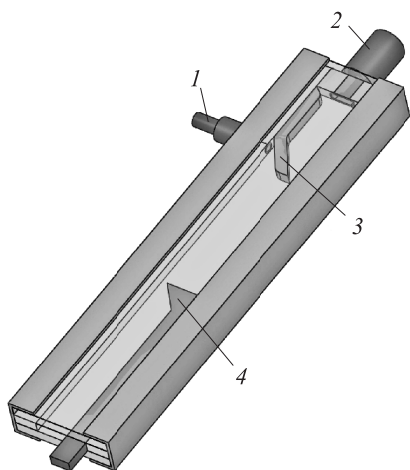
Для выявления новых особенностей рассматриваемого кавитационного течения с ограниченной искусственной газовой каверной на кафедре теоретической механики МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан научно-учебный гидродинамический стенд [10]. По сравнению с принципиальной схемой гидравлического стенда, описанного в работах [3, 5], его отличительными особенностями являются: меньшие габариты (эквивалентная площадь проходного сечения рабочего участка  $153,86 \text{ мм}^2$ ); бóльшая мобильность из-за отсутствия привязки к стационарным системам подачи жидкости и газа; возможность плавно изменять расстояние от места ддува газа до замыкающего гидросопротивления на рабочем участке в пределах от 0 до 250 мм; возможность применения универсальных систем регистрации и обработки показаний датчиков давления на новой элементной базе; применение цифровых фото- и видеокамер; простота смены рабочих участков гидростенда с возможностью регулирования их положения в пространстве. Прозрачный цилиндрический рабочий участок такого гидравлического стенда с проходным сечением диаметром 14 мм и его элементы показаны на рис. 2.

Прозрачный плоский рабочий участок с проходным сечением  $5 \times 30,8 \text{ мм}^2$  с организацией одностороннего ддува газа со стенки за кавитатор представлен на рис. 3.

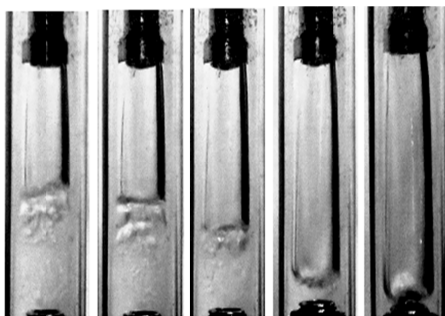
При последовательном развитии присоединенной искусственной каверны с увеличением расхода подаваемого за кавитатор газа вплоть до ее замыкания на выходном гидросопротивлении (рис. 4) происходит характерный вынос пузырьков газа, обусловленный вихреобразованием в хвостовой части каверны. В рассматриваемых случаях, как отмечалось выше, заметных пульсаций в системе не фиксировалось.



**Рис. 2.** Общий вид осесимметричного рабочего участка (*а*) и детализация (*б*) организации ввода газа и жидкости: штуцер подвода газа за кавитатор (*1*); штуцер подводящего трубопровода жидкости (*2*); кавитатор (*3*); телескопически вставляемый сливной трубопровод с дроссельной шайбой на входе (*4*)



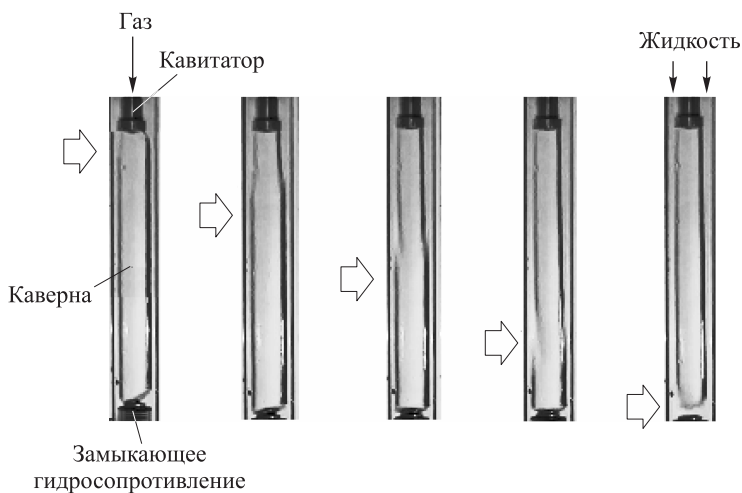
**Рис. 3.** Прозрачный плоский рабочий участок: штуцер подвода газа за кавитатор (*1*); штуцер подключения расходного трубопровода (*2*); кавитатор (*3*); телескопически вставляемое местное гидросопротивление (*4*)



**Рис. 4.** Последовательные стадии роста присоединенной искусственной каверны в трубопроводе с увеличением расхода газа до момента замыкания каверны на выходном гидросопротивлении

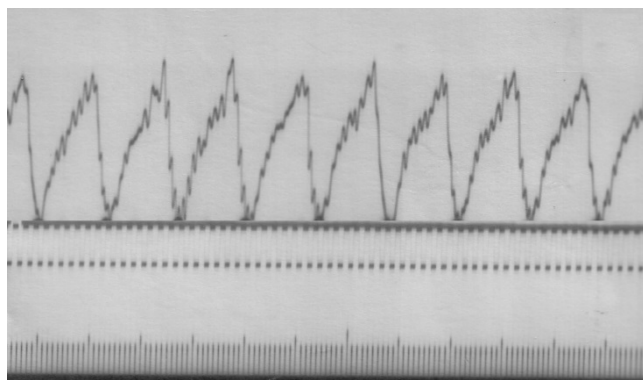
Когда каверна замыкается на выходном дросселе, в определенной области изменения режимных параметров в подводящем трубопроводе фиксировались существенные пульсации давления и расхода жидкости. В результате проведенных экспериментов были выявлены новые особенности развития пульсаций ограниченной искусственной

газовой каверны при релаксационных колебаниях. Кинограмма движения волны по поверхности каверны от кавитатора до замыкающего гидросопротивления при релаксационных колебаниях в системе показана на рис. 5. Видно, что в одной из фаз происходит полный отрыв каверны от замыкающего гидросопротивления и истечение через него капельной жидкости, а в другой — истечение газа из полости каверны через замыкающее гидросопротивление.



**Рис. 5.** Кинограмма движения волны возмущения по поверхности каверны в осесимметричном рабочем канале при релаксационных колебаниях в системе

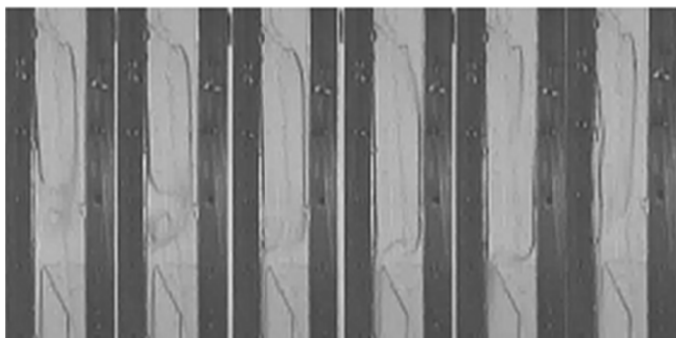
Осциллограмма с записью пульсаций давления на входе кавитатора имеет при этом характерный для релаксационных колебаний разрывный вид (рис. 6). Размах изменения давления практически соответствует случаю гидроудара в рассматриваемой системе (как при полном перекрытии расходной магистрали жидкости).



**Рис. 6.** Пример осциллограммы с записью пульсаций давления на входе кавитатора при релаксационных колебаниях

Наиболее информативными оказались результаты визуализации кавитационного течения в плоском рабочем участке. Выбранная схема (см. рис. 3) позволила изучить как поверхностные волны на границе каверны, так и увидеть структуру потока непосредственно в хвостовой части каверны перед входом в местное гидросопротивление. При этом не было привязки к обеспечению строгой симметрии потока, так как моделировали только половину продольного сечения осесимметричной каверны.

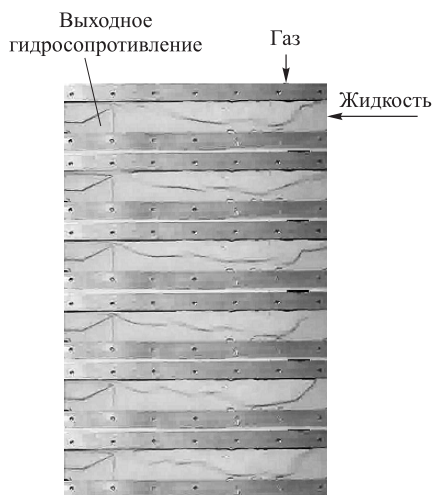
При развитых колебаниях в случае вертикального расположения плоского рабочего участка видны осевые перемещения замыкающей границы и характерные вихревые структуры в ее хвостовой части (рис. 7).



**Рис. 7.** Кинограмма изменения формы каверны в плоском вертикальном канале при релаксационных колебаниях

На рис. 8 представлена кинограмма развития волн на поверхности каверны в плоском горизонтальном канале в случае вдува газа поперечно в поток жидкости. Ясно, что периодическое перемыкание потока газа из полости каверны обусловлено именно наличием бегущей, прогрессивно нарастающей волны на поверхности каверны.

**Заключение.** Таким образом, подтверждена возможность реализации структурно разных механизмов массообмена между развитой искусственной каверной и потоком жидкости при колебаниях в системе. Приведенные данные экспериментальных исследований коррелируют с исследованиями динамики волновых структур каверны, образующей-



**Рис. 8.** Кинограмма изменения поверхности каверны в плоском горизонтальном канале при релаксационных колебаниях

ся при поперечной подаче струи жидкости в вентилируемый горизонтальный канал [11, 12]. Они также имеют важное значение в изучении фундаментальных особенностей кавитационных течений с развитыми искусственными кавернами. В целом направление представленных исследований динамики ограниченной искусственной газовой каверны ввиду их возможных практических приложений является одним из перспективных направлений научной работы кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского [13].

*Исследования проводились при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-4748.2012.8*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гартиг Е.Б., Благовещенский И.Г. Прикладные задачи динамики течения жидкости в трубопроводе с ограниченной искусственной газовой каверной. *Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*, 2011, № 4 (3), с. 705–707.
- [2] Санчугов В.И. *Технологические основы динамических испытаний и отработок гидросистем и агрегатов*. Самара, СамНЦ РАН, 2003, 96 с.
- [3] Kinelev V.G., Shkapov P.M. Dynamics of a bounded gas cavity in a pipe. *Journal of Engineering Physics*, 1992, vol. 61, no. 4, pp. 1218–1224.
- [4] Kinelev V.G., Shkapov P.M. Stability of liquid oscillations in a hydraulic system with a bounded gas pocket in the flow. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1997, vol. 31, no. 4, pp. 301–305.
- [5] Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. Ч. 1. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, no. 3, с. 109–114.
- [6] Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. Ч. 2. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, no. 4, с. 117–125.
- [7] Бэтчелор Дж. *Введение в динамику жидкости*. Москва, Мир, 1973, 792 с.
- [8] Перник А.Д. *Проблемы кавитации*. Ленинград, Судостроение, 1966, 439 с.
- [9] Карликов В.П., Резниченко Н.Т., Хомяков А.Н., Шоломович Г.И. О возможном механизме возникновения автоколебаний в развитых искусственных кавитационных течениях и затопленных газовых струях. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газов*, 1987, № 3, с. 76–83.
- [10] Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А., Кытманов И.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование динамики течений с искусственной каверной. *XXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» — ММТТ-25. Сб. тр.* Волгоград, 2012, с. 70–71.
- [11] Kozlov I.I., Prokofev V.V. Development of waves on a cavity surface with a negative cavitation number. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 361–364.
- [12] Козлов И.И., Прокофьев В.В., Пучков А.А. Исследование развития волновых структур на неустойчивой границе каверны с помощью скоростной видеокамеры. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2008, № 2, с. 137–148.



- [13] Колесников К.С., Пожалостин А.А., Шкапов П.М. Задачи динамики гидромеханических систем в трудах кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*, 2012. Спец. вып. № 8, с. 15–30.

Статья поступила в редакцию 26.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шкапов П.М., Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А. Исследование структуры течений с ограниченной искусственной газовой каверной на научно-учебном гидродинамическом стенде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1137.html>

**Шкапов Павел Михайлович** родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1977 г. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 печатных работ по динамике механических и гидромеханических систем, математическому моделированию и расчету кавитационных и двухфазных течений в трубопроводных системах, вопросам оптимизации и диагностирования динамических систем. e-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)

**Благовещенский Иван Германович** родился в 1945 г., окончил МТИПП в 1967 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 печатных работ по динамике, математическому моделированию и системному анализу процессов механической обработки твердых и сыпучих материалов. e-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)

**Гартиг Елена Борисовна** окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Старший преподаватель кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ по гидродинамике. e-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)

**Дорошенко Сергей Анатольевич** родился в 1992 г., студент кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидродинамика. e-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)