

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 вентилях, 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.

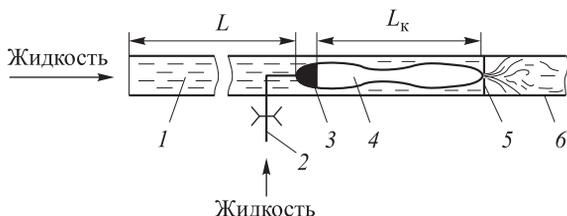


Рис. 1. Схема течения с ограниченной искусственной газовой каверной: подводящий трубопровод с потоком жидкости длиной L (1); магистраль подачи газа с установленной на ней критической шайбой (2); кавитатор (3); ограниченная искусственная газовая каверна на участке длиной L_k (4); дроссельная шайба на 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 τ , 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.

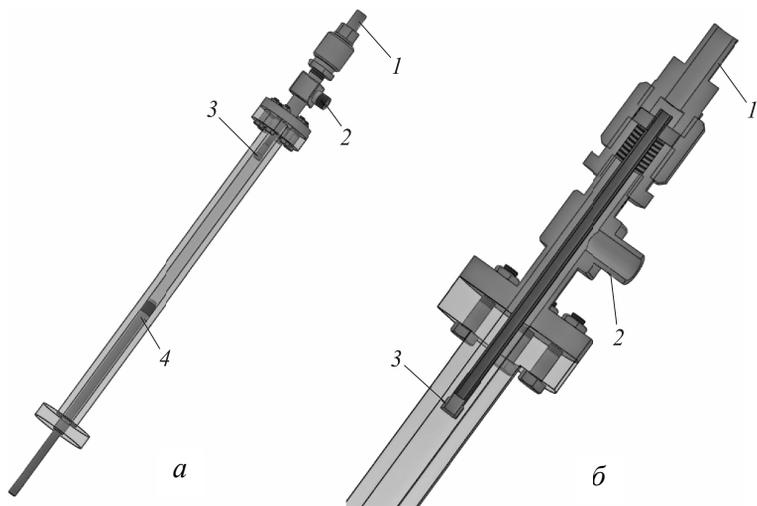


Рис. 2. Общий вид осесимметричного рабочего участка (а) и детализация (б) организации ввода газа и жидкости: штуцер подвода газа за кавитатор (1); штуцер подводящего трубопровода жидкости (2); кавитатор (3); телескопически вставляемый сливной трубопровод с дроссельной шайбой на входе (4)

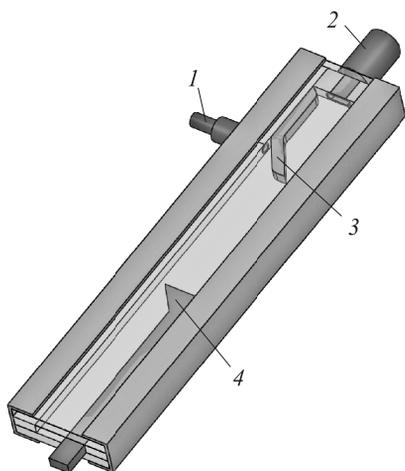


Рис. 3. Прозрачный плоский рабочий участок: штуцер подвода газа за кавитатор (1); штуцер подключения расходного трубопровода (2); кавитатор (3); телескопически вставляемое местное гидросопротивление (4)

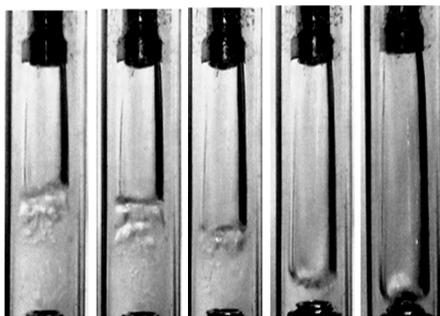


Рис. 4. Последовательные стадии роста присоединенной искусственной каверны в трубопроводе с увеличением расхода газа до момента замыкания каверны на выходном гидросопротивлении

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.

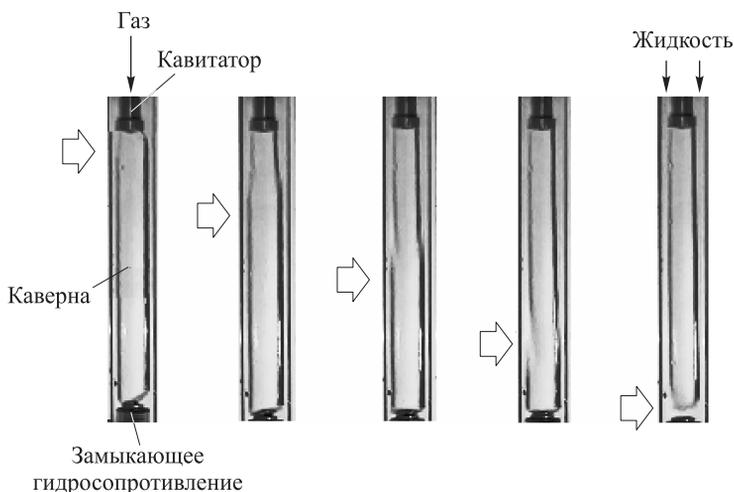


Рис. 5. Кинограмма движения волны возмущения по поверхности каверны в осесимметричном рабочем канале при релаксационных колебаниях в системе

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).

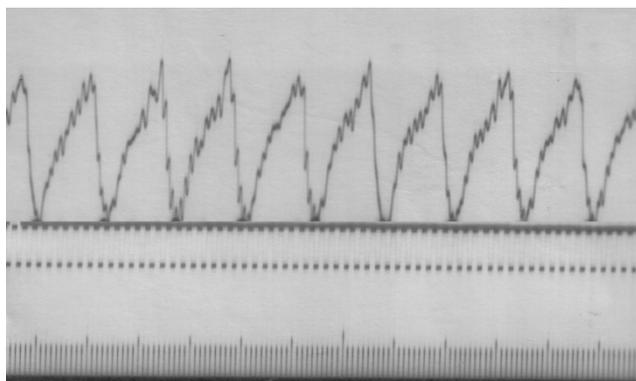


Рис. 6. Пример осциллограммы с записью пульсаций давления на входе кавитатора при релаксационных колебаниях

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).

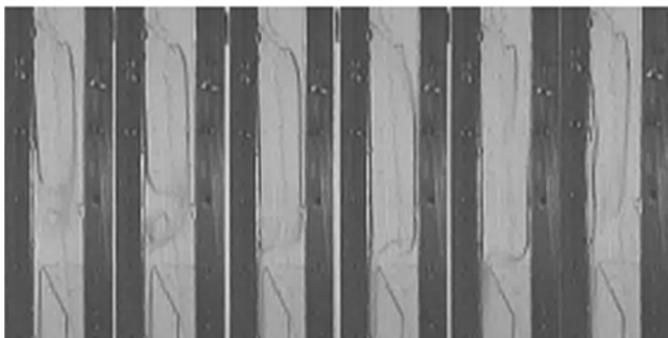


Рис. 7. Кинограмма изменения формы каверны в плоском вертикальном канале при релаксационных колебаниях

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-

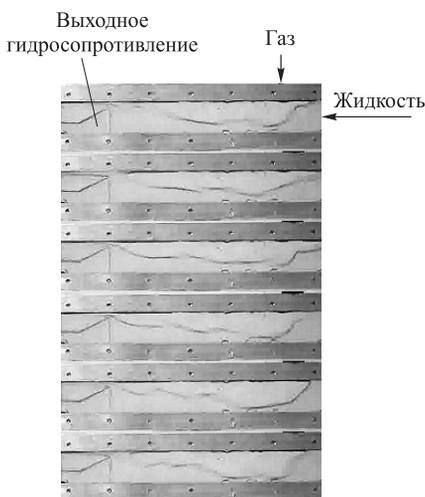


Рис. 8. Кинограмма изменения поверхности каверны в плоском горизонтальном канале при релаксационных колебаниях

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

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

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

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