

УДК 532.528

**Экспериментальное исследование волновой структуры горизонтального
кавитационного течения с развитой искусственной каверной на научно-учебном
гидродинамическом стенде**

С.А. Дорошенко

Студент, кафедра «Ракетные и импульсные системы»

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

Научный руководитель: П.М. Шкапов, д.т.н., зав. кафедрой «Теоретическая механика»

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

Научный консультант: И.Г. Благовещенский, д.т.н., профессор кафедры «Теоретическая

механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана

spm@bmstu.ru

Колебательные режимы течения рабочих сред широко используются в технологических процессах для смешения, растворения, фильтрации, экстракции, промывки внутренних и внешних поверхностей оборудования, для гидродинамической очистки проточных и непроточных агрегатов гидравлических систем, для интенсификации теплообмена и в других случаях. Широкое применение они находят при создании средств и технологий ускоренных эквивалентных динамических и ресурсных испытаний агрегатов, гидравлических и топливных систем летательных аппаратов. Перспективным способом создания пульсирующих потоков является возбуждение автоколебаний газовой каверны, образующейся в зоне отрыва за кавитатором или при непосредственном струйном вдуве газа в магистраль и замыкающейся на местном гидросопротивлении ниже по потоку. Такая ограниченная искусственная каверна является потенциально неустойчивой и может генерировать возмущения, передающиеся в поток протекающего компонента. Таким

образом, течение жидкости с развитой формой присоединенной каверны является актуальным предметом исследования именно ввиду важных прикладных задач, связанных с созданием пульсационных режимов течения в гидросистемах [1].

Важную роль в массообмене каверны с потоком жидкости имеет вихревой или порционный механизм уноса газа из каверны. Первый реализуется при спиралевидном сворачивании струй в хвостовой части каверны и имеет, как правило, квазистатический характер. Второй может быть обусловлен механизмом с обратной струйкой, когда из хвостовой части выносятся газовая фаза в виде отдельных порций пузырьков, либо неустойчивостью и волнообразованием на поверхности каверны, приводящих к периодическому отрыву и сносу вниз по потоку значительной части каверны. Во внутренних течениях в магистральных гидросистемах в последнем случае происходит частичное или полное перекрытие сечения трубопровода жидкостной пробкой, что обуславливает повышение давления в каверне и уменьшение расхода жидкости на ее входе. Пульсации становятся при этом 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 в подводящем трубопроводе вплоть до изменения её направления на входе кавитатора [1-3].

В работе приводятся результаты экспериментального исследования течений с развитой искусственной каверной на научно-учебном гидродинамическом стенде, созданном для изучения такого вида течений [2].

Важную роль в механизме автоколебаний в рассматриваемой системе играют волны на границе раздела фаз между жидкостью и газом на поверхности искусственной каверны. Для выяснения основных закономерностей, присущих данному процессу, рассмотрим вначале простейший механизм развития поверхностных волн на примере плоского движения фаз неограниченной протяженности, схематическая картина такого течения представлена на рис.1. Здесь координата x направлена вдоль невозмущенной поверхности контакта фаз, координата y - по нормали к ней, плотность верхней фазы - ρ_1 , нижней - ρ_2 , их скорости - v_1, v_2 . Ускорение a имеет положительное направление по нормали к поверхности первой фазы [4].

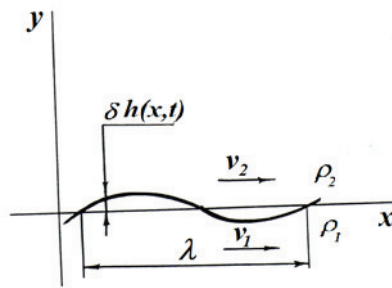


Рис. 1. Схема формирования волн на границе раздела фаз

Любое возмущающее воздействие, вызвавшее искривление поверхности раздела фаз, обуславливает возникновение сил, стремящихся вернуть границу контакта фаз к исходному недеформированному состоянию [4]. Во-первых – это силы поверхностного натяжения, препятствующие увеличению площади поверхности контакта фаз; во-вторых – это силы, которые связаны с ускоренным движением фаз на границе раздела, которые также стремятся придать поверхности первоначальное плоское состояние (но только если вектор ускорения $\vec{a}$ направлен в сторону более тяжелой фазы). Дополнительное воздействие оказывает относительная скорость слоев. Качественно влияние ее проявляется в снижении давления над выпуклостями деформируемой поверхности и повышению над впадинами, что отвечает уравнению Бернулли. Под влиянием указанных силовых факторов частицы фаз в зоне, примыкающей к поверхности их контакта, пройдут равновесное положение, снова попадут под воздействием восстанавливающих сил и т.д. Если соприкасающиеся фазы невязкие, то возникают незатухающие волновые колебания свободной границы контакта фаз.

Деформация поверхности в общем случае списывается уравнением [4]

$$\delta h = \delta h_0 \exp[ik(v_\phi t - x)], \quad (1)$$

где δh - отклонение координаты граничной поверхности от равновесного уровня; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; λ - длина волны возмущения; v_ϕ - фазовая скорость распространения возмущений; δh_0 - амплитудное значение начального возмущения.

Малые изменения давления и скорости в каждой из контактирующих фаз имеют при этом вид бегущих волн

$$\begin{cases} \delta v_i = \delta v_i(y) \exp[ik(v_\phi t - x)] \\ \delta P_i = \delta P_i(y) \exp[ik(v_\phi t - x)] \end{cases} \quad (2)$$

Фазовая скорость распространения волновых возмущений в (1), (2) определяется по выражению

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{k} = \frac{\rho_2 u}{\rho_1 + \rho_2} + \sqrt{v_a^2 + v_r^2 - \frac{\rho_1 \rho_2 u^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2}}, \quad (3)$$

здесь ω - частота; u - скорость второй фазы относительно первой; v_a, v_r - фазовые скорости чисто гравитационной и капиллярной волн, определяемые по соотношениям

$$v_a = \sqrt{\frac{a(\rho_1 - \rho_2)}{r(\rho_1 + \rho_2)}}, \quad (4)$$

$$v_r = \sqrt{\frac{\tau r}{(\rho_1 + \rho_2)}}. \quad (5)$$

Заметим, что в выражении для параметра a в (4) наряду с ускорением свободного падения g (или его составляющей) необходимо учитывать и слагаемое, связанное с ускорением движения слоев поверхности контакта фаз [4]

$$a = g_n + a_h,$$

(6)

где g_n - проекция вектора ускорения свободного падения на нормаль к поверхности контакта фаз

$$a_h = \frac{d^2 h}{dt^2}. \quad (7)$$

При отсутствии относительной скорости слоев ($u = 0$), а также в случае, когда $\rho_2 \ll \rho_1$, то есть подвижная фаза – легкая,

$$v_{\phi} = \sqrt{v_a^2 + v_r^2}. \quad (8)$$

В случае $\rho_2 \gg \rho_1$,

$$v_{\phi} = u \pm \sqrt{v_a^2 + v_r^2}. \quad (9)$$

Если к тому же $u \gg \sqrt{v_a^2 + v_r^2}$, то

$$v_{\phi} \approx u, \quad (10)$$

т.е. фазовая скорость волны возмущения при этом фактически равна скорости тяжелой фазы.

Развитие малых возмущений поверхностных волн может носить неустойчивый, нарастающий характер. В приведенных выше зависимостях это находит отражение в том, что фазовая скорость волны возмущений становится чисто мнимой или комплексной величиной. В зависимости от преобладающего типа действующих сил выделяют характерные виды неустойчивых движений.

Так, при $\rho_1 < \rho_2$, $u = 0$ и если вектор ускорения $\bar{a}$, определяемый по (6), направлен от тяжелой фазы к легкой, неустойчивость носит название неустойчивости Рэлея-Тейлора. В этом случае в (8)

$$v_a^2 + v_\tau^2 < 0.$$

Наступление гидродинамической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца возможно лишь с определенного критического значения относительной скорости движения фаз [4]

$$u > u_{кр}$$

здесь

$$u_{кр} = \sqrt{\frac{(v_a^2 + v_\tau^2)(\rho_1 + \rho_2)^2}{\rho_1 \rho_2}}.$$

По приведенным выше зависимостям можно определять фазовую скорость распространения возмущений на участке с расслоенным течением фаз и, кроме того, оценивать устойчивость потока при разных способах его формирования. В работе [5] исследовалась волновая картина на поверхности искусственной каверны при суперкавитационном обтекании тела в свободном потоке, а в работе [5] проанализировано развитие возмущений на поверхности струи жидкости втекающей поперечно потоку в плоский открытый вентилируемый канал.

На созданной научно-учебном стенде [2] экспериментально исследовалась волновая структура потока, возникающего при поперечном вдуве газа в плоский канал с протекающей жидкостью. Воздух подавался через отверстие в верхней горизонтальной стенке канала. Кинограмма развития волновой структуры на границе раздела фаз на рабочем участке в случае свободного слива жидкости из плоского канала показана на рис. 2.

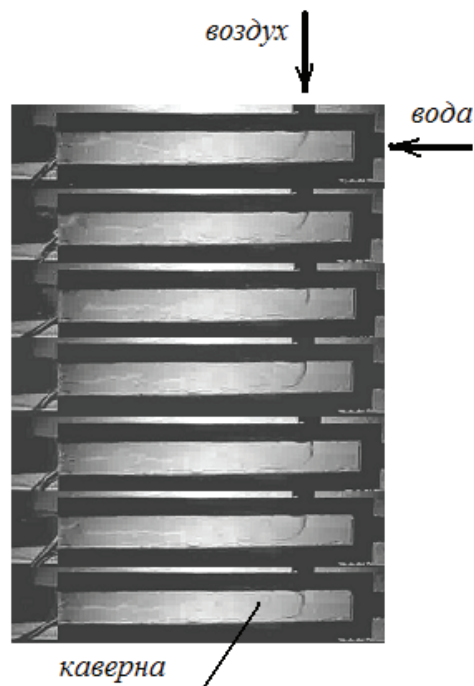


Рис. 2. Кинограмма развития поверхностной волны на границе каверны в случае свободного слива жидкости из плоского канала

Видно прогрессивное периодическое нарастание волн к выходу из канала. Эти результаты коррелируют с данными [5], где исследовался обращенный случай поперечной подачи струи жидкости в вентилируемый плоский канал.

Далее исследовался случай развития поверхностных волн на границе раздела фаз при наличии на выходе канала местного гидросопротивления. Как показано на рис. 3, в целом волновая картина на границе повторяется, как в предыдущем случае. Однако, возникающие автоколебания ограниченной искусственной каверны более интенсивны и имеют выраженный релаксационный характер [1-3].

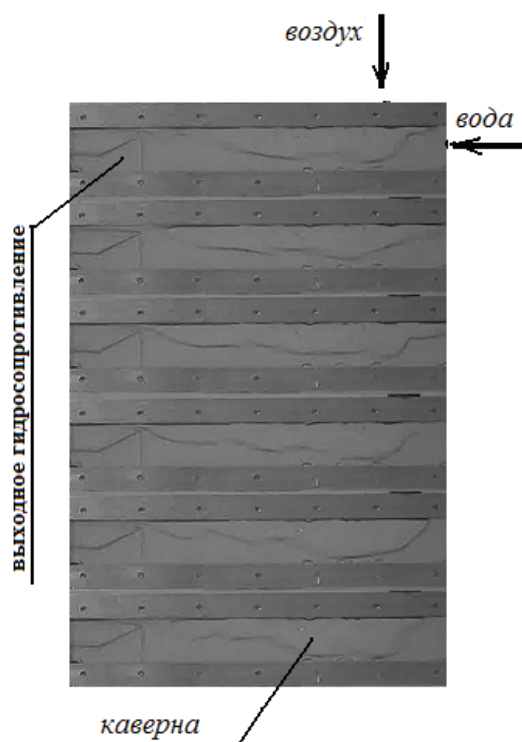


Рис. 3. Кинограмма развития волновых возмущений на поверхности ограниченной искусственной газовой каверны

Приведенные данные экспериментальных исследований подтверждают результаты исследований, представленных в [1-3,5,6], и имеют собственное важное значение в изучении фундаментальных особенностей кавитационных течений с развитыми искусственными кавернами.

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

Список литературы

1. Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. Часть 1. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”. - 2012, № 3. – С. 109-114; Часть 2. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”. - 2012, № 4. – С. 103-111.
2. Дорошенко С.А., Кытманов И.В. Экспериментальное исследование кавитационных течений с развитой искусственной каверной на научно-учебном гидродинамическом стенде / Науч. рук. П.М. Шкапов, В.Д. Сулимов // Студенческий научный вестник: сборник докладов научно-технической конференции «Студенческая научная весна – 2012», посвященной 165-летию Н.Е. Жуковского 02-29 апреля 2012. – Т.ХІІ, часть 4, 2012. – С. 93-96.
3. Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А., Кытманов И.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование динамики течений с искусственной каверной // Труды XXV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25» 28-30 мая 2012, Волгоград. – Т. 8. – С. 70-72.
4. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.
5. Карликов В.П. и др. О возможном механизме возникновения автоколебаний в развитых искусственных кавитационных течениях и затопленных газовых струях // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1987, №3. – С. 76-83.
6. 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.