

**О гистерезисном характере развития автоколебаний
в гидрелинии с ограниченной искусственной газовой каверной
на выходе**

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0604048

Шкапов П. М., Благовещенский И. Г., Гартиг Е. Б.

УДК 532.5

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

spm@bmstu.rudrbl@bk.ruosen60@mail.ru**Введение**

Применение инновационных технологий с использованием вибраций оборудования и пульсаций потока является одним из приоритетных направлений развития многих производств в пищевой, химической, энергетической и в других отраслях промышленности и в коммунальном хозяйстве. Колебательные режимы течения рабочих сред используются в процессах смешения, растворения, фильтрации, экстракции, мойки продуктов, промывки внутренних и внешних поверхностей оборудования, для интенсификации теплообмена и в других случаях. Создание пульсирующих потоков достигается применением разных способов и устройств, обеспечивающих создание потока среды с заданными параметрами колебательного движения. Наиболее широкое применение для создания пульсаций в технологических процессах получили способы, основанные на регулировании проходного сечения внутреннего потока с помощью различных механических устройств дроссельного типа. Для тех же целей используют последовательное подключение рабочего участка к магистралям высокого и низкого давления, гидродинамическую кавитацию, автоколебания клапанов, форсунок, вибрации мембран и другие приемы [1].

Проведенные исследования показывают, что возбуждения пульсаций течения жидкости в трубопроводе можно добиться путем создания в трубопроводе ограниченной искусственной газовой каверны, образующейся в результате вдува газа за кавитатор, либо непосредственно со стенки трубопровода в поток жидкости, и замыкающейся на местном гидросопротивлении ниже по потоку [2-9]. Такая ограниченная искусственная каверна

является потенциально неустойчивой и может генерировать возмущения, передающиеся в поток протекающего компонента.

Схема течения с ограниченной искусственной газовой каверной приведена на рис.1, на котором обозначено: 1– подводящий трубопровод с потоком жидкости от расходного бака; 2 – магистраль подачи газа с установленной на ней критической шайбой; 3 – кавитатор; 4 – ограниченная искусственная газовая каверна; 5 – дроссельная шайба на выходе трубопровода.

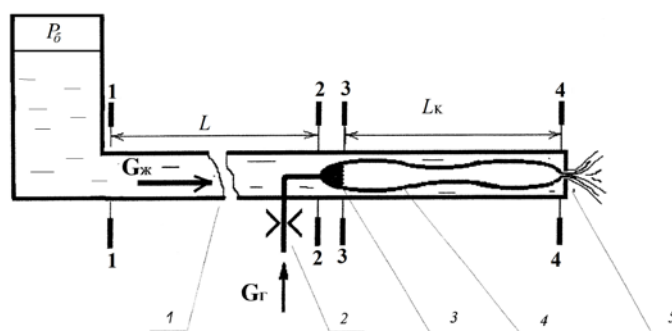


Рис. 1. Схематизация течения с ограниченной искусственной газовой каверной

На основе проведенных экспериментальных исследований с визуализацией потока и применением фото-, видео-, и кино съемки были выявлены и проанализированы особенности изменения формы каверны при колебаниях. Это позволило ввести схематизацию ограниченной искусственной газовой каверны и построить ее математическую модель в виде обыкновенного дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом, исследовать устойчивость течения в гидрوليнии. В [8] с учетом нелинейности рассматриваемой системы дано описание одного из механизмов возникновения автоколебаний в рассматриваемой системе, показана возможность перехода к релаксационным колебаниям.

Постановка задачи

На некоторых режимах испытаний были отмечены особенности, которые требуют дополнительного анализа по механизму реализации колебательных процессов в системе. Так, обработка осциллограмм с записью пульсаций давления в рассматриваемой системе показала, что в отдельных случаях, в отличие от результатов представленных ранее, при последовательном возрастании (убывании) давления в расходном баке на входе магистрали подачи жидкости происходит скачкообразное изменение частоты и амплитуды устанавливающихся в гидросистеме автоколебаний. При снижении давления наддува расходного бака с жидкостью указанный перескок частот (с высших на низшие) реализуется при меньших давлениях на входе расходной магистрали жидкости. Таким образом,

проявляется гистерезис развития колебаний в системе. Результаты обработки осциллограмм такого режима испытаний приведены на рис. 2, где показаны значения реализуемых частот и полного размаха пульсаций давления в сечении 2-2 магистрали (рис. 1) на входе ограниченной искусственной каверны в зависимости от давления наддува P_6 расходного бака на входе трубопровода в сечении 1-1 (рис. 1).

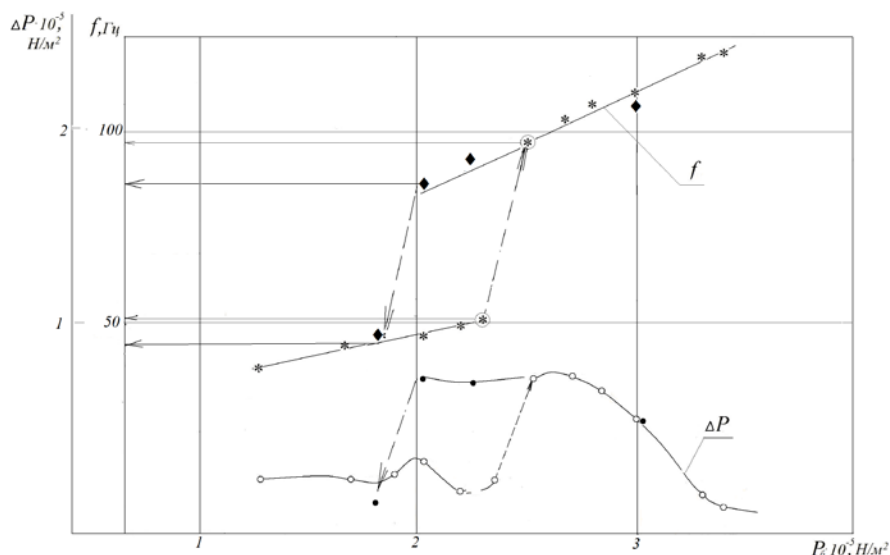


Рис. 2. Результаты обработки осциллограмм при испытаниях со скачкообразным изменением амплитуды и частоты колебаний при возрастании (убывании) давления в расходном баке на входе магистрали подачи жидкости

Этот процесс не следует отождествлять с присущей кавитационным течениям гистерезисом, проявляющемся в том, что критическое давление, при котором кавитация в целом или ее отдельные формы (пузырьковая, присоединенная и др.) прекращается, выше, чем критическое давление в начале развития кавитации [10]. В рассматриваемом случае форма и структура ограниченной искусственной каверны сохраняются одинаковыми, скачком меняется лишь частота и интенсивность колебаний.

Таким образом, актуальной становится задача выявления физического механизма реализации такого развития автоколебаний в системе.

Математическая модель

Уравнение, описывающее динамику ограниченной искусственной газовой каверны, с учетом ряда принятых в описании данных течений допущений, можно записать в виде нелинейного дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом [5-9]

$$A_3 \frac{d^3 \delta L_K}{dt^3} + A_2 \frac{d^2 \delta L_K}{dt^2} + (A_1) \frac{d \delta L_K}{dt} + A_0 \delta L_K(t - \tau) + E_1 \delta L_K^3(t - \tau) = B_0 \delta P_2. \quad (1)$$

Здесь L_k - приведенная осевая длина каверны; τ - время запаздывания, связанное с движением волны возмущения «сносового» типа по поверхности каверны от кавитатора 3 до замыкающего местного гидросопротивления 5, рис. 1; $A_3, A_2, A_1, A_0, B_0, E_1$ - постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы и расходных характеристик течения фаз [5-8], δ - символ вариации параметров.

Разложим члены, содержащие время запаздывания в ряд

$$\delta L_k(t - \tau) = \delta L_k(t) - \frac{d\delta L_k(t)}{dt} \cdot \frac{\tau}{1!} + \frac{d^2\delta L_k(t)}{dt^2} \cdot \frac{\tau^2}{2!} - \dots \quad (2)$$

Удерживая в (2) лишь два первых члена разложения, из (1), полагая массу газа в каверне постоянной, можно получить

$$\frac{d^2\delta L_k}{dt^2} + 2n_1 \frac{d\delta L_k}{dt} + k_1^2 \delta L_k + \alpha_1 \delta p_2 = \varepsilon_1 \delta L_k^2 \frac{d\delta L_k}{dt}, \quad (3)$$

где $2n_1 = \frac{A_1 - A_0\tau}{A_2}$, $k_1^2 = \frac{A_0}{A_2}$, $\alpha_1 = \frac{B_0}{A_2}$, $\varepsilon_1 = \frac{3E_1\tau}{A_2}$.

При формировании модели процесса пульсаций потока жидкости в гидролинии, пренебрегая инерционными потерями давления на входе расходной магистрали, рис. 1, что соответствует в частности наличию акустически открытого конца в сечении **1-1**, представим ее в виде системы с сосредоточенными параметрами. Движение жидкости в подводящем трубопроводе 1 длиной L , рис. 1, в таком случае описывается с учетом инерционности и потерь на трение линеаризованным уравнением вида

$$\frac{m_{np}}{F} \frac{d\delta v_2}{dt} + \xi \rho v_{20} \delta v_2 = \delta p_1 - \delta p_2, \quad (4)$$

где m_{np} - приведенная масса жидкости в трубопроводе, F - площадь поперечного сечения магистрали, $\xi = \xi_{mc} + \lambda L/d$ - приведенный квазистатический коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора на трение при движении жидкости в шероховатой трубе диаметром d и на преодоление местных сопротивлений; ρ - плотность потока; v_i, p_i - значение скорости и давления потока в i -ом сечении трубопровода; 0 - индекс, относящийся к средним (установившимся) значениям параметров.

Будем анализировать случай, когда давление на выходе из бака в трубу в сечении **1-1** постоянно, так что из (4) следует

$$\frac{m_{np}}{F} \frac{d\delta v_2}{dt} + \xi \rho v_{20} \delta v_2 = -\delta p_2. \quad (5)$$

Тогда низшие собственные частоты колебаний в системе, представленной на рис.1, достаточно хорошо определяются на основании предположения о выполнении на концах трубопровода граничных условий типа «акустически открытый конец». Известно [11], что колебания среды в трубе с такими граничными условиями в окрестности первой резонансной частоты можно представить как колебания системы с одной степенью свободы, если принять за приведенную массу в (5) массу, равную половине массы среды в трубопроводе, т.е.

$$\frac{m_{np}}{F} = \frac{1}{2} \rho L. \quad (6)$$

Податливость такой системы C^* будет определяться прежде всего податливостью сосредоточенной упругости в виде ограниченной газовой каверны длиной L_k на выходе трубопровода. В таком случае

$$\frac{1}{C^*} \frac{d\delta p_2}{dt} = \rho F \delta v_2 - \delta G_4, \quad (7)$$

где G_4 - расход жидкости в сечении 4-4, являющийся запаздывающей функцией по отношению к расходу на входе каверны в сечении 2-2: $G_4 = G_2(t - \tau)$.

Из системы уравнений (5) - (7) с учетом (2), можно получить

$$\frac{d^2 \delta p_2}{dt^2} + 2n_2 \frac{d\delta p_2}{dt} + k_2^2 \delta p_2 + \alpha_2 \delta L_k = 0, \quad (7)$$

где $n_2 = \left(\frac{\xi v_{20}}{LF} \right)$, $k_2^2 = \frac{2C^*}{L}$.

Система уравнений (3), (7) описывает динамику связанной системы генератор автоколебаний (ограниченная газовая каверна) – колебательное звено (подводящая магистраль с жидкостью). Парциальные частоты этой системы равны

$$k_1 = \sqrt{A_0 / A_2}, \quad k_2 = \sqrt{2C^* / L}.$$

Решение системы уравнений (3), (7) можно искать в виде

$$\delta L_k(t) = A \cos(\omega t), \quad \delta p_2(t) = B \cos(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

где A, B – амплитуды, ω - частота автоколебаний, φ - сдвиг фазы.

Подставляя (8) в (3) и (7) и учитывая, что рассматриваемая система уравнений должна быть справедливой в любой момент времени, можно получить

$$\begin{cases} (k_1^2 - \omega^2)A - \alpha_1 B \cos(\varphi) = 0, \\ 2n_1 A - \alpha_1 B \sin(\varphi) + \omega A^3 \varepsilon_1 / 4 = 0, \\ (k_2^2 - \omega^2)B - \alpha_2 \omega^2 A \cos(\varphi) = 0, \\ 2n_2 B + \alpha_2 \omega A \sin(\varphi) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Частотное уравнение, отвечающее системе уравнений (9) имеет вид

$$(k_1^2 - \omega^2)[(k_2^2 - \omega^2)^2 + 4n_2^2 \omega^2] + \alpha_1 \alpha_2 (k_2^2 - \omega^2) = 0. \quad (10)$$

Из полученных соотношений следует, что в зависимости от связанности между контурами и значений их парциальных частот значение частоты автоколебаний, реализуемое в конкретном случае, может зависеть от направления, в котором ведется изменение парциальных частот или параметров, влияющих на них [12].

Представленное исследование позволяет дать возможное объяснение указанному случаю развитых автоколебаний в рассматриваемой системе, связанному с экспериментально фиксируемым для отдельных режимов испытаний скачкообразным гистерезисным изменением частот пульсаций в системе с изменением расходных параметров фаз. Объяснение процесса заключается в том, что подключение к автогенератору, которым является собственно ограниченная газовая каверна, в режиме его неустойчивого движения колебательного контура, в виде расходной магистрали жидкости, эквивалентно изменению парциальной частоты генератора k_1 , причем, если парциальная частота присоединенного колебательного контура $k_2 > \omega$, то эквивалентная парциальная частота понижается, т.е. колебательный контур играет роль дополнительной податливости в контуре автогенератора. Если $k_2 < \omega$, то добавка к парциальной частоте k_1 положительна, т.е. в этом случае колебательный контур играет роль дополнительного инерционного звена, рис. 3. Таким образом, реализуемое в данном случае значение частоты колебаний ω зависит от направления, в котором ведется изменение парциальных частот системы. Это соответствует общим особенностям поведения подобных систем, известным в теории колебаний [12].

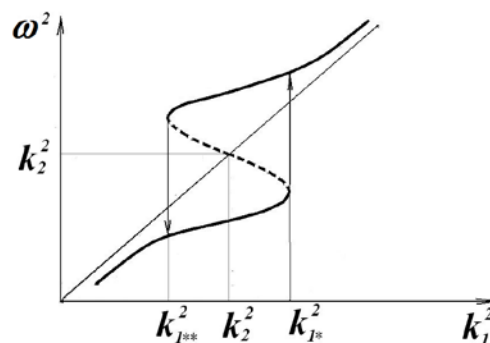


Рис. 3. Зависимость частоты автоколебаний от парциальной частоты подводящей гидролинии

Выводы

Предложенная модель процесса объясняет возможный механизм экспериментально наблюдаемых особенностей динамических процессов, связанных с гистерезисом развития автоколебаний в трубопроводе с ограниченной искусственной газовой каверной на выходе.

На последнем этапе работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ по поддержке научных исследований ведущих научных школ РФ, код НШ-4748.2012.8).

Список литературы

1. Волновая технология и техника. Научные основы, промышленные испытания и их результаты, перспективы использования / Под ред. Р.Ф. Ганиева. М.: Логос, 1993. 127 с.
2. Искусственная кавитация / И.Т. Егоров, Ю.М. Садовников, И.И. Исаев, М.А. Басин. Л.: Судостроение, 1971. 284 с.
3. 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. № 3. С. 109-114.
4. Гартиг Е.Б., Благовещенский И.Г. Прикладные задачи динамики течения жидкости в трубопроводе с ограниченной искусственной газовой каверной // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4, ч. 3. С. 705-707.
5. Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Динамика ограниченной газовой каверны // Инженерно-физический журнал. 1991. № 3. С. 578-585.
6. Kinelev V.G., Shkarov P.M. Dynamics of a bounded gas cavity in the pipe // Journal of Engineering Physics. 1992. V. 61, no. 4. P. 1218-1224. DOI: [10.1007/BF00872589](https://doi.org/10.1007/BF00872589)
7. Kinelev V.G., Shkarov P.M. Stability of liquid oscillations in a hydraulic system with a bounded gas pocket in the flow // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 1997. V. 31, no. 4. P. 301-305.
8. Шкапов П.М., Сулимов В.Д. Устойчивость и колебания трубопроводных систем с ограниченной искусственной газовой каверной в потоке // Труды VIII Всероссийской науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем» (Н. Новгород, 22 - 26 сентября 2008 г.). Том 2. Н. Новгород: Диалог культур. 2008. С. 436-439.
9. 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. № 4. С. 117-125.

10. Холл Дж., Тристер А. Кавитационный гистерезис // Тр. ASME. Сер. D. Теоретические основы инженерных расчётов (русский перевод). 1966. Т. 88, № 1. С. 159-171. [Holl J.W., Treaster A.L. Cavitation Hysteresis // Journal of Basic Engineering. 1966. Vol. 88, iss. 1. P. 199-211. DOI: 10.1115/1.3645802].
11. Гликман Б.Ф. Математическое моделирование пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.
12. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний / Под ред. В.В. Мигулина. М.: Наука, 1988. 392 с.

Hysteresis development of self-oscillations with a limited artificial gas cavity formed in a hydraulic line

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0604048

Shkapov P.M., Blagoveschenskii I.G., Гартиг Е. Б.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

spm@bmstu.rudrbl@bk.ruosen60@mail.ru

Artificial cavitation occurs in a hydraulic line as a result of gas feeding either into a separation zone behind bluff bodies, or directly from the wall jet in the liquid flow line. The resultant attached cavity is often unstable, so the system is set for a state which is characterized by oscillations of pressure and flow phases. This process is greatly enhanced with the proviso that the cavity is closed by hydraulic resistance established downstream of the gas injection site. A characteristic abrupt increase in the frequency of oscillation with a monotonic increase in the flow rate, and the same sharp decrease in frequency at lower flow rates could be identified as special features of the process in some working modes. The authors propose an explanation of the experimentally identified hysteretic nature of development of self-oscillations in the hydraulic lines with a limited artificial gas cavity at the output.

Publications with keywords: [hydrodynamics](#), [hysteresis](#), [oscillations](#), [artificial cavitation](#), [cavity bounded](#)

Publications with words: [hydrodynamics](#), [hysteresis](#), [oscillations](#), [artificial cavitation](#), [cavity bounded](#)

References

1. Ganiev R.F., ed. *Volnovaya tekhnologiya i tekhnika. Nauchnye osnovy, promyshlennye ispytaniya i ikh rezul'taty, perspektivy ispol'zovaniya* [Wave technology, and engineering. Scientific bases, industrial tests and their results, the prospects for using]. Moscow, Logos, 1993. 127 p.
2. Egorov I.T., Sadovnikov Yu.M., Isaev I.I., Basin M.A. *Iskusstvennaya kavitatsiya* [Artificial cavitation]. Leningrad, Sudostroenie, 1971. 284 p.
3. Shkapov P.M., Blagoveshchenskaya M.M. *Teoreticheskie i prikladnye voprosy dinamiki techeniy zhidkosti s ogranichennoy iskusstvennoy gazovoy kavernoy. Ch. 1* [Theoretical

and applied problems of dynamics of fluid flows with a limited artificial gas cavity. Part 1]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2012, no. 3, pp. 103-111.

4. Gartig E.B., Blagoveshchenskiy I.G. Prikladnye zadachi dinamiki techeniya zhidkosti v truboprovode s ogranichennoy iskusstvennoy gazovoy kavernooy [Applied problems of dynamics of the liquid flow in a pipeline with a limited artificial gas cavity]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachesky State University of Nizhni Novgorod], 2011, no. 4, pt. 3, pp. 705-707.

5. Kinelev V.G., Shkapov P.M. Dinamika ogranichennoy gazovoy kaverny [Dynamics of limited gas cavity]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1991, no. 3, pp. 578-585.

6. Kinelev V.G., Shkapov P.M. Dynamics of a bounded gas cavity in the pipe. *Journal of Engineering Physics*, 1992, vol. 61, no. 4, pp. 1218-1224. DOI: [10.1007/BF00872589](https://doi.org/10.1007/BF00872589)

7. 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.

8. Shkapov P.M., Sulimov V.D. Ustoychivost' i kolebaniya truboprovodnykh sistem s ogranichennoy iskusstvennoy gazovoy kavernooy v potoke [Stability and oscillations of pipeline systems with limited artificial gas cavity in the flow]. *Trudy 8 Vserossiyskoy nauch. konf. "Nelineynye kolebaniya mekhanicheskikh system"* [Proceedings of the 8th all-Russian scientific conf. "Nonlinear oscillations of mechanical systems"], Nizhni Novgorod, 22- 26 September 2008, vol. 2. Nizhni Novgorod, Dialog kul'tur, 2008, pp. 436-439.

9. Shkapov P.M., Blagoveshchenskaya M.M. Teoreticheskie i prikladnye voprosy dinamiki techeniy zhidkosti s ogranichennoy iskusstvennoy gazovoy kavernooy. Ch. 2 [Theoretical and applied problems of dynamics of fluid flows with a limited artificial gas cavity. Part 2]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2012, no. 4, pp. 117-125.

10. Holl J.W., Treaster A.L. Cavitation Hysteresis. *Journal of Basic Engineering*, 1966, vol. 88, iss. 1, pp. 199-211. DOI: 10.1115/1.3645802

11. Glikman B.F. *Matematicheskoe modelirovanie pnevmogidravlicheskih sistem* [Mathematical modelling of pneumatic and hydraulic systems]. Moscow, Nauka, 1986. 368 p.

12. Migulin V.V., Medvedev V.I., Mustel' E.R., Parygin V.N. *Osnovy teorii kolebaniy* [Fundamentals of theory of oscillations]. Moscow, Nauka, 1988. 392 p.