

УДК 532.528:532.542

Ю.А. ЖУЛАЙ¹, И.К. МАНЬКО²¹ *Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Украина*² *Институт технической механики НАН Украины, Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Представлены результаты экспериментального исследования кавитационного течения закрученного потока жидкости в криволинейном и с пространственной ориентацией трубопроводах при малых значениях параметра закрутки. Показано, что как в криволинейном, так и в пространственном трубопроводах по их оси получена развитая суперкавитационная полость. На основании анализа экспериментальных данных с использованием визуального метода определена основная статическая характеристика кавитационной полости в таких трубопроводах – зависимость относительной среднеинтегральной по длине трубопровода площади суперкавитационной полости от числа кавитации. Проведено сопоставление основной статической характеристики суперкаверны в прямолинейном и криволинейном трубопроводах.

Ключевые слова: закрученный поток жидкости, суперкавитационная полость, пространственный трубопровод, параметр закрутки, число кавитации, статическая характеристика.

Введение

Кавитационные полости больших объемов, получаемые в трубопроводах по оси закрученного потока жидкости, используются для решения ряда технических задач. Так, в работах [1 – 3] приведены результаты экспериментального и теоретического исследования возможности стабилизации системы питания ЖРД «шнекоцентробежный насос – трубопроводы» по отношению к кавитационным автоколебаниям. Элементом, обеспечивающим такую стабилизацию, является суперкавитационная полость, специально организованная в байпасном демпфирующем трубопроводе (БДТ), который соединяет выход из насоса с его входом. Это позволило значительно расширить область устойчивой работы насоса.

Также известна возможность использования БДТ для обеспечения динамической устойчивости тяжелых ракет-носителей на жидком топливе по отношению к продольным колебаниям на активном участке полета. Требуемое снижение собственной частоты колебаний компонента топлива в питающем трубопроводе достигается за счет радиальной податливости суперкавитационной полости.

1. Формулирование проблемы

В работах [4 – 6] приведены результаты исследований кавитационного течения закрученного потока жидкости по оси прямолинейного трубопрово-

да при малых значениях параметра закрутки. Под параметром закрутки потока подразумеваем, как в работе [7], величину Q/GR_t , т.е. отношения расхода жидкости к произведению циркуляции $\Gamma = 2\pi UR_t$ (U – окружная скорость на стенке трубы) на радиус трубы R_t . Методика экспериментального исследования суперкавитационного течения в прямолинейном трубопроводе при вращательно-поступательном движении жидкости в гидравлической системе с кавитатором, создающим закрутку потока в диапазоне малых значений параметра $Q/GR_t = 0,03–0,10$, изложена в работе [8].

В работе [4] рассматривается физическая картина кавитационного течения (в зависимости от числа кавитации K) и характер изменения радиуса суперкавитационной полости по длине трубопровода с закрученным потоком жидкости. Приводятся некоторые результаты проведенных экспериментальных исследований по определению влияния геометрических и конструктивных параметров кавитатора-завихрителя на изменение объема образуемой кавитационной каверны V_k и давления в ней P_k от режима кавитационного течения в трубе.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование кавитационного течения закрученного потока жидкости в трубопроводе БДТ, ось которого соответствующим образом сориентирована на плоскости или в пространстве. В практическом плане это дает дополнительное преимущество при компоновке БДТ в двигательном отсеке ЖРД.

2. Результаты исследования

В качестве объектов исследования использовались криволинейный и пространственный трубопроводы БДТ.

Конструкция криволинейного трубопровода БДТ с внутренним диаметром 0,15 м и длиной 0,84 м была изогнута по длине окружности радиусом 0,230 м, как это показано на рис. 1.

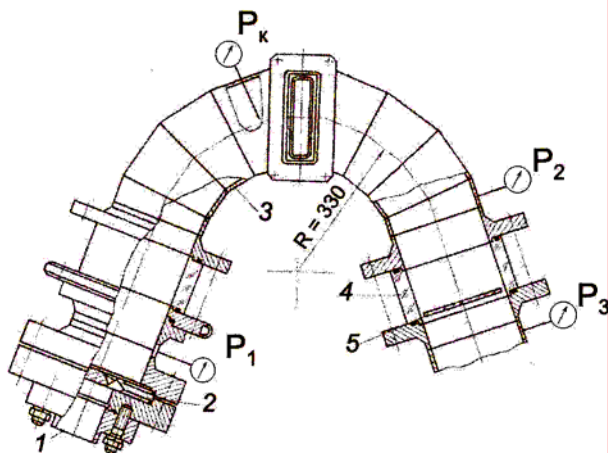


Рис. 1. Конструктивная схема криволинейного БДТ:

- 1 – входной патрубок; 2 – кавитатор-завихритель;
- 3 – трубопровод СКД; 4 – прозрачная вставка;
- 5 – диск-замыкатель

На входе в трубопровод было установлено устройство для закрутки потока (кавитатор-завихритель), а на выходе – диск-замыкатель кавитационной полости диаметром $d_d = 0,142$ м.

Испытания проводились при постоянном давлении на входе $P_0 = 10$ МПа. Рабочая жидкость – вода. Режим кавитационного течения устанавливался с помощью входного и выходного дросселей. В процессе испытаний образцовыми манометрами МО кл.04 проводились измерения статических давлений в напорном трубопроводе P_0 и на стенке трубопровода СКД P_1 за кавитатором-завихрителем и перед диском-замыкателем кавитационной полости P_2 . Моновакуумметром измерялось давление в кавитационной полости. Секундный объемный расход жидкости через систему измерялся с помощью турбинного датчика ТДР-21. Визуально наблюдаемые процессы кавитационного течения жидкости в трубопроводе за кавитатором-завихрителем для различных значений чисел кавитации K регистрировались фотоаппаратом «Практика ТЛ».

Число кавитации K , как критерий подобия кавитационного течения, определялось как отношение разности давлений на стенке участка трубопровода

и в каверне $P_2 - P_k$ к скоростному напору $\rho \frac{v_k^2}{2}$:

$$K = \frac{P_2 - P_k}{\rho \frac{v_k^2}{2}},$$

где v_k – скорость жидкости в канале кавитатора-завихрителя, ρ – плотность жидкости. Скоростной

напор без учета потерь $\rho \frac{v^2}{2} = P_0 - P_k$.

Последующее дешифрование фотограмм по методике, изложенной в работе [8], позволило определить основную статическую характеристику кавитационной полости в трубопроводе по оси закрученного потока жидкости – зависимость относительной средней площади суперкаверны $\bar{F}_k = \frac{F_{k,ср}}{F_T}$ (где F_T – площадь сечения трубопровода) от числа кавитации K .

На рис. 2 приведена основная статическая характеристика $\bar{F}_k = f(K)$ суперкаверны в криволинейном трубопроводе (светлые точки), полученная при его испытании. Расход жидкости при этом составил $Q = 10,2 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Здесь же представлены результаты испытания в прямолинейном трубопроводе (темные точки) с теми же геометрическими параметрами. Расположения экспериментальных точек этих зависимостей позволяют судить о близком к линейному характеру их поведения. В диапазоне изменения числа кавитации $K = 0,005 - 0,015$ отличие основной статической характеристики суперкаверны для прямолинейного и криволинейного трубопроводов БДТ находится в диапазоне погрешности определения $F_{k,ср}$. Дальнейшее уменьшение числа кавитации приводит к уменьшению средней относительной площади суперкаверны в криволинейном трубопроводе по сравнению с прямолинейным.

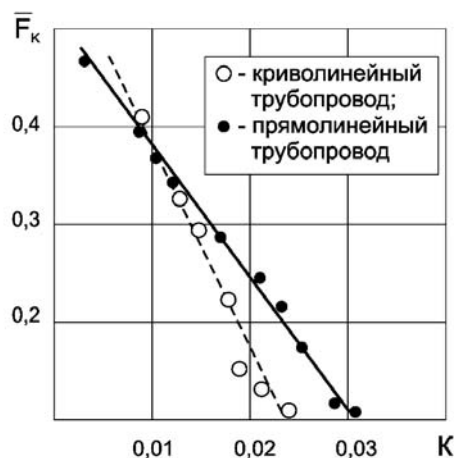


Рис. 2. Экспериментальная зависимость относительной средней площади суперкаверны $\bar{F}_k$ от числа кавитации K

Можно сделать вывод, что при числах кавитации $K < 0,02$ в криволинейном трубопроводе получается развитая суперкаверна, что подтверждается визуальными наблюдениями, приведенными на рис. 3.

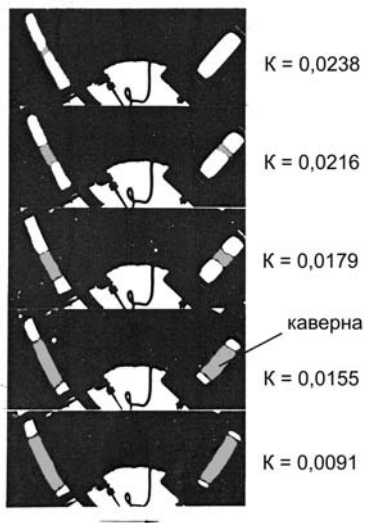


Рис. 3. Фотограмма кавитационного течения жидкости в криволинейном трубопроводе:
 $P_0 = 10$ МПа, $Q = 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Аналогичным образом проводились испытания пространственного трубопровода. Его конструкция предусматривала возможность изменения длины от 0,745 до 2,470 м с шагом 0,575 м и имела прозрачные вставки для фотосъемки кавитационного течения (рис. 4).

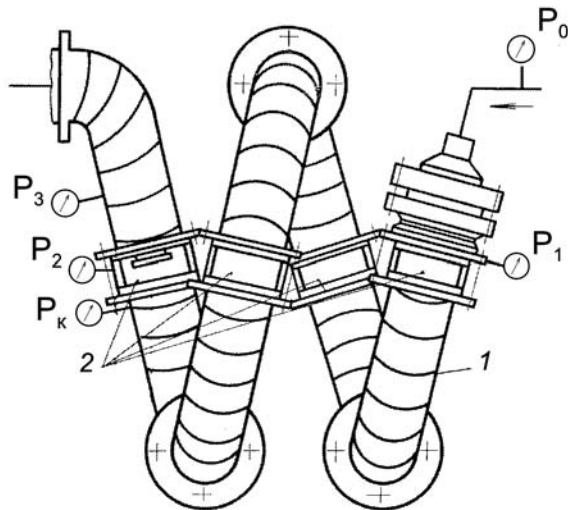


Рис. 4. Трубопровод с пространственной ориентацией:
1 – трубопровод; 2 – прозрачные вставки

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости относительной средней площади каверны $\bar{F}_K$ от числа кавитации K . Результаты эксперимента показали, что диапазон существования кавитацион-

ной полости по числу кавитации K практически не зависит от длины трубопровода пространственного БДТ. Число кавитации K , соответствующее разрушению каверны, составляет $\approx 0,1$. С уменьшением длины трубопровода увеличивается тангенс угла наклона зависимости $\bar{F}_K = f(K)$, т.е., другими словами, при фиксированных значениях K меньшей длине демпфера соответствуют большие значения $\bar{F}_K$.

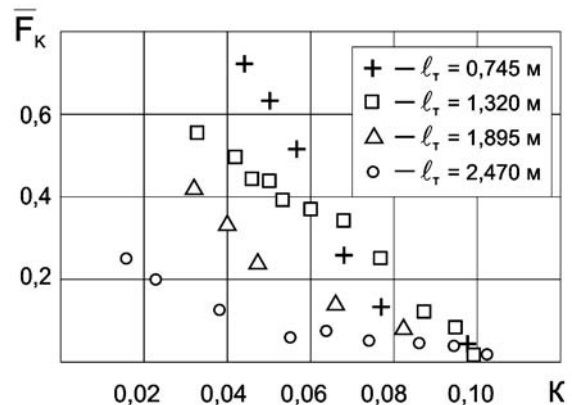


Рис. 5. Экспериментальная зависимость относительной средней площади суперкаверны $\bar{F}_K$ от числа кавитации K

Следует отметить, что диапазон существования кавитационной полости по оси закрученного потока жидкости по числу кавитации $K = 0 \div 0,1$ в пространственном трубопроводе примерно в 5 раз превышает этот же показатель для криволинейного трубопровода. Это объясняется тем, что при одном и том же давлении питания расход через кавитатор-завихритель пространственного трубопровода примерно в пять раз превышает расход через криволинейный трубопровод, поскольку проходное сечение его кавитатора-завихрителя $\approx$ в 5 раз меньше.

Следовательно, и параметр закрутки потока Q/GR_t , при прочих равных условиях, возрастет $\approx$ в 5 раз.

Заключение

Экспериментально подтверждена работоспособность БДТ криволинейной и пространственной ориентации его трубопровода, что значительно облегчает компоновку демпфера на изделии.

Литература

1. Жулай Ю.А. Экспериментальное исследование влияния байпасного демпфирующего трубопровода на устойчивость насосной системы питания / Ю.А. Жулай, Л.Г. Запольский // Проблемы высоко-

температурной техники: сб. науч. тр. Днепр. нац. ун-та. – Днепропетровск, 2004. – С. 36-41.

2. Жулай Ю.А. Исследование устойчивости насосной системы питания, включающей байпасный трубопровод с суперкаверной / Ю.А. Жулай, О.В. Пилипенко, Л.Г. Запольский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10 (26). – С. 177-182.

3. Пилипенко О.В. Расширение границы области устойчивости насосной системы питания с помощью установки байпасного демпфирующего трубопровода с суперкаверной / О.В. Пилипенко, Л.Г. Запольский, Ю.А. Жулай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 6 (22). – С. 55-62.

4. Пилипенко В.В. Некоторые результаты экспериментального исследования кавитационного течения закрученного потока жидкости / В.В. Пилипенко, Ю.А. Жулай, И.К. Манько // *Гидрогазодинамика энергетических установок: сб. науч. тр.* – К.: Наукова думка, 1982. – С. 101-105.

5. Пилипенко О.В. Определение площади кавитационной полости при вращательно-поступательном движении вязкой жидкости / О.В. Пилипенко // *Гидрогазодинамика технических систем: сб. науч. тр.* – К.: Наукова думка, 1985. – С. 56-64.

6. Пилипенко О.В. Неустановившееся течение закрученного потока жидкости в трубопроводе с образованием кавитационной полости / О.В. Пилипенко // *Космическая наука и техника: республ. межвед. сб. научн. тр.* – 1987. – Вып. 2. – С. 49-54.

7. Hashimoto H. Swirling Flow Accompanied by Cavity in Circular Tube / H. Hashimoto // *Reports of institute of high speed mechanics Tohoku university, 1967/1968, N19.* – P. 241-257.

8. Определение размеров суперкавитационной каверны во вращающемся потоке жидкости с применением фотосъемки / И.К. Манько, Ю.А. Жулай, Н.А. Коновалов, Н.И. Лахно // *Математические модели рабочих процессов в гидроневмосистемах: сб. научн. тр.* – К.: Наукова думка, 1981. – С. 12-14.

Поступила в редакцию 27.10.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой А.А. Приходько, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОЇ ТЕЧІЇ ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ

Ю.А. Жулай, І.К. Манько

Представлено результати експериментального дослідження кавітаційної течії закрученого потоку рідини в криволінійному та із просторовою орієнтацією трубопроводах при малих значеннях параметра закрутки. Показано, що як у криволінійному, так і в просторовому трубопроводах по їхній осі отримана розвинена суперкавітаційна порожнина. На підставі аналізу експериментальних даних з використанням візуального методу визначена основна статична характеристика кавітаційної порожнини в таких трубопроводах – залежність відносної середньінтегральної по довжині трубопроводу площі суперкавітаційної порожнини від числа кавітації. Проведено зіставлення основної статичної характеристики суперкаверни в прямолінійному й криволінійному трубопроводах.

Ключові слова: закручений потік рідини, суперкавітаційна порожнина, просторовий трубопровід, параметр закручення, число кавітації, статична характеристика.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF A CAVITATION IN A SWIRLING FLOW IN A SPATIAL PIPELINE

J.A. Zhulaj, I.K. Manko

The outputs of experimental research of cavitation in swirling fluid flow in curvilinear pipeline and pipeline with spatial orientation at small values of swirling flow are presented. It is shown that in both pipelines - curvilinear and spatial - a developed supercavity pocket on their axes is obtained. Based on the analysis of the experimental data using visual method, the main static characteristic of cavity pocket in these pipelines – the dependence of relative square of supercavity pocket, averaged on pipeline length, on cavitation number – is determined. The comparison of main static characteristic of supercavity in straight and curvilinear pipelines is made.

Key words: swirling flow, supercavitation cavity, three dimensional pipe, twisting parameter, cavitation number, static characteristic.

Жулай Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: burylov@westa-inter.com.

Манько Иван Карпович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института технической механики Национальной академии наук Украины, Днепропетровск, Украина.