УДК 621.671: 532.528

С.И. ДОЛГОПОЛОВ

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНЕРЦИОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ОБРАТНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ НА ВХОДЕ В ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС

В статье рассматриваются обратные течения на входе в шнекоцентробежные насосы жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ), которые оказывают влияние на динамические характеристики ЖРДУ. В настоящее время для определения коэффициента инерционного сопротивления жидкости, обусловленного обратными течениями на входе в шнекоцентробежные насосы (коэффициента инерционности обратных течений), используются экспериментальные зависимости частот колебаний жидкости в линиях питания ЖРДУ от давления на входе в насосы, полученные при испытаниях с двумя существенно отличающимися длинами питающих трубопроводов. Цель данной статьи заключается в разработке нового экспериментально-расчетного способа определения коэффициента инерционности обратных течений, который основан на решении уравнения движения жидкости в питающем трубопроводе и использует экспериментальные временные зависимости давления и расхода жидкости на входе в насос. Эта цель достигается путем анализа и обобщения результатов испытаний в режиме кавитационных автоколебаний семи шнекоцентробежных насосов. Суть предложенного способа заключается в следующем. Используя экспериментальную временную зависимость давления жидкости на входе в насос, проводится серия численных решений уравнения движения жидкости в питающем трубопроводе с различными значениями коэффициента инерционности обратных течений. Искомое значение коэффициента инерционности обратных течений соответствует наилучшему согласованию экспериментальных и расчетных временных зависимостей расхода жидкости на входе в насос. Зависимость коэффициента инерционности обратных течений от коэффициента расхода, полученная с помощью предложенного в данной статье способа по результатам испытаний семи шнекоцентробежных насосов, является близкой к аналогичной зависимости, полученной ранее другим способом и по другим экспериментальным данным. Это указывает на достоверность полученных результатов.

У статті розглядаються зворотні течії на вході в шнековідцентрові насоси рідинних ракетних двигунних установок (РРДУ), які впливають на динамічні характеристики РРДУ. У цей час для визначення коефіцієнта інерційного опору рідини, обумовленого зворотними течіями на вході в шнековідцентрові насоси (коефіцієнта інерційності зворотних течій), використовуються експериментальні залежності частот коливань рідини в лініях живлення РРДУ від тиску на вході в насоси, отримані при випробуваннях із двома суттєво одмінними довжинами живильних трубопроводів. Ціль даної статті полягає в розробці нового експериментально-розрахункового способу визначення коефіцієнта інерційності зворотних течій, який заснований на вирішенні рівняння руху рідини в живильному трубопроводі й використовує експериментальні часові залежності тиску й витрати рідини на вході в насос. Ця мета досягається шляхом аналізу й узагальнення результатів випробувань у режимі кавітаційних автоколивань сімох шнековідцентрових насосів Суть запропонованого способу полягає в такому. Використовуючи експериментальну часову залежність тиску рідини на вході в насос, проводиться серія чисельних вирішень рівняння руху рідини в живильному трубопроводі з різними значеннями коефіцієнта інерційності зворотних течій. Шукане значення коефіцієнта інерційності зворотних течій відповідає найкращому узгодженню експериментальних і розрахункових часових залежностей витрати рідини на вході в насос. Залежність коефіцієнта інерційності зворотних течій від коефіцієнта витрати, отримана за допомогою запропонованого в даній статті способу за результатами випробувань сімох шнековідцентрових насосів, є близькою з аналогічною залежністю, отриманою раніше іншим способом і по інших експериментальних даних. Це вказує на достовірність отриманих результатів.

The paper deals with return flows at inlet of centrifugal inclined Archimedean screw pumps of liquid rocket propulsions (LRP) affecting the LRP dynamic characteristics. At present experimental dependencies of fluid oscillation frequencies of LRP supply lines on pump inlet pressures derived on trials with two widely disparate lengths of supply pipes but under invariant conditions of the pump operation by a flow rate and rotation speed of the pump shaft are used to determine the coefficient of a fluid inertia resistance due to return flows at inlet of centrifugal Archimedean screw pumps (response rate coefficients for return flows). The paper purpose is to develop a new alternative experimental and calculated technique of determination of the response rate coefficient for return flows, based on the solution of the fluid motion through the supply pipe with various coefficients of response rate of return flows. The unknown value of the response rate coefficient for return flows conforms to an excellent correlation between experimental and calculated time dependencies of the pump inlet flow rate. The dependency of the response rate coefficient for return flows on the flow coefficient derived by the proposed technique as a result of tests of seven centrifugal inclined Archimedean screw pumps is close to an analogue dependency derived earlier by another technique and experimental data. This clearly shows assurance of the results obtained.

Введение. При работе шнекоцентробежных насосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на режимах малых расходов на входе в насос возникают обратные течения [1, 2], распространяющиеся при значительной их интенсивности во входной патрубок и даже в питающую магистраль [3]. Они загромождают проходное сечение на входе в насос и создают дополнительное инерционное сопротивление текущей жидкости, приводят к дополнительным потерям давления в системе питания и ухудшают экономичность насоса. Обратные течения изменяют также собственные частоты колебаний и степень устойчивости линий питания ЖРД. Поэтому определение параметров, характеризующих обратные течения на входе в шнекоцентробежные насосы, необходимо для построения корректной математической модели динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов, функционирующих на режимах малых расходов с обратными течениями.

Теоретическое решение задачи пространственного обтекания вращающейся решетки лопастей насоса на режимах с обратными течениями на входе в насос в настоящее время не привело к определению зон распространения обратных течений [4]. Известны [5, 6] полуэмпирические методики определения параметров, характеризующих обратные течения на входе в шнекоцентробежные насосы, которые основаны на определении поля скоростей и давлений жидкости на входе в насос по экспериментальным данным.

В монографии [7] предложен экспериментально-расчетный способ определения коэффициента инерционного сопротивления жидкости в проточной части шнека на участке роста кавитационных каверн, использующий результаты двух и более серий испытаний насосов в режиме кавитационных автоколебаний, при которых поддерживался одинаковый режим работы насоса по входному давлению, расходу через насос и частоте вращения вала, но существенно изменялся коэффициент инерционного сопротивления питающего трубопровода J_1. Далее этот способ был применен для определения коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос [8, 9]. В работе [10] на основе этого способа была определена полуэмпирическая зависимость коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос J_{OT} от коэффициента расхода φ, полученная по экспериментальным частотам кавитационных колебаний в линиях питания трех штатных шнекоцентробежных насосов, где в качестве обобщающего параметра предложено использовать удельную кинетическую энергию невозмущённого потока жидкости.

Цель данной статьи заключается в разработке нового экспериментально-расчетного способа определения коэффициента инерционности обратных течений J_{OT}, который основан на решении уравнения движения жидкости в питающем трубопроводе и использует экспериментальные временные зависимости давления p_1 и расхода G_1 жидкости на входе в насос.

1. Объекты исследования. Объектами исследований были 7 шнекоцентробежных насосов ЖРД (см. таблицу, кроме насоса 6), существенно отличающихся размерами и производительностью, для которых производились динамические измерения давления и расхода жидкости на входе в насос. В таблице приняты следующие обозначения и сокращения: D_H – наружный диаметр шнека; $\bar{d}_{BT}$ – втулочное отношение; $\beta_{1Л}$ – угол установки лопасти шнека на периферии; $\Delta\varphi$ – диапазон изменения коэффициента расхода при кавитационных автоколебаниях (эксперимент); $(J_{OT}/J_1)_{\max}$ – относительное максимальное значение коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос (по формулам работы [10]); НГ – насос горючего; НО – насос окислителя. По результатам испытаний насосов 4.1, 4.2 и 6, выделенных в таблице, ранее была определена полуэмпирическая зависимость коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос J_{OT} от коэффициента расхода φ, полученная известным способом и представленная в работе [10].

Таблица

Насос (обозначение)	D_H, см	$\bar{d}_{BT}$	$\beta_{1Л}$, градус	$\Delta\varphi$	$\left(\frac{J_{OT}}{J_1}\right)_{\max}$	Ссылка	Применение
1.1	12	0,525	8°9′	0,17–1,01	0,41	[7, 9]	НГ РД–863
2.1	5,6	0,464	8°9′	0,10–0,93	0,23	[7, 9]	НГ РД–862
2.5	5,6	0,464	18°8′	0,30–0,70	0,04	[7, 9]	–
3	14,11	0,496	11°21′	0,44–1,13	0,08	[11]	НО РД–218
4.1	**15,62**	**0,487**	**11î**	**0,36–0,98**	**0,79**	**[12]**	**НО РД–273**
4.2	**15,62**	**0,487**	**13î40à**	**0,31–0,68**	**0,63**	**[12]**	**НО РД–263**
6	**5,04**	**0,383**	**8î26à**	**–**	**–**	**[10]**	**–**
7	15,62	0,487	10°	0,35–0,92	0,73	[13]	НО РД–120

Эти насосы нашли применение в маршевых и рулевых ЖРД первых и вторых ступеней ракет-носителей, в частности на ракетах-носителях “Циклон”, “Днепр”, “Зенит”. Некоторые параметры шнеков исследуемых насосов представлены в таблице, другие находятся в следующих диапазонах: густота решетки шнека на среднем диаметре 1,64 –3,71, число лопастей шнека 2 – 3, относительная осевая скорость на входе в шнек (коэффициент подачи) 0,083 – 0,113, коэффициент напора 4,7 – 16,0, скоростной напор на среднем диаметре 101 – 200 м, коэффициент быстроходности насоса 28,0 – 83,3, срывной кавитационный запас 2,7 – 7,5 м.

2. Способ определения инерционности обратных течений. Уравнение неустановившегося движения жидкости в питающем трубопроводе можно представить в виде [7]

$$\frac{dG_1}{dt} = \left(\bar{p}_Б - p_1 - a_1\, G_1^2\right)\frac{1}{J_1 + J_{OT}}\,, \qquad (1)$$

где $\bar{p}_Б$ – давление жидкости в питающем баке; t – время; a_1 – коэффициент гидравлического сопротивления питающего трубопровода.

Следует иметь в виду, что датчик для измерения динамического давления жидкости на входе в насос обычно располагается на некотором расстоянии от непосредственно входа в шнековый преднасос. Предполагая, что между этим датчиком и входом в шнековый преднасос нет существенных податливостей, давление непосредственно на входе в шнековый преднасос может быть определено по формуле

$$p_1 = p_1' - a_{1Д} \cdot G_1^2 - J_{1Д} \cdot \frac{dG_1}{dt}, \qquad (2)$$

где p_1' – давление жидкости в месте установки динамического датчика давления (показания датчика); $a_{1Д}$, $J_{1Д}$ – коэффициенты гидравлического и инерционного сопротивления участка питающего трубопровода между датчиком давления и непосредственным входом в шнековый преднасос.

Подставляя (2) в (1), получим дифференциальное уравнение для определения динамического расхода жидкости на входе в насос G_1

$$\frac{dG_1}{dt} = \left(\bar{p}_Б - p_1'(t) - \left(a_1 - a_{1Д}\right) \cdot G_1^2\right) \cdot \frac{1}{J_1 + J_{OT} - J_{1Д}}, \qquad (3)$$

где $p_1'(t)$ – экспериментальные показания датчика давления.

В работе [10] коэффициент инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос J_{OT} определяется формулой

$$J_{OT} = \frac{\tilde{J}_{OT}^*}{Y}, \quad \tilde{J}_{OT}^* = a_{OT}\,(1-\varphi)^2, \quad a_{OT} = 134, \qquad (4)$$

где Y – коэффициент интенсивности обратных течений $Y = \frac{1}{2}\left(\frac{D_H^2 - d_{BT}^2}{D_{TP}^2}\, n\, s\, q_{OT}\right)^2$; D_{TP} – диаметр питающего трубопровода; d_{BT} – внутренний диаметр шнека; n – частота вращения вала насоса; s – шаг шнека; q_{OT} – коэффициент режима, соответствующий появлению обратных течений на входе в насос.

Будем полагать, что искомая зависимость коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос J_{OT} от коэффициента расхода φ также может быть выражена формулой (4), где неизвестным коэффициентом является a_{OT}. Вводя экспериментальную зависимость $p_1'(t)$ в (3) и варьируя a_{OT}, получим расчетную зависимость расхода $G_{1i}^p(t, a_{OT})$. Искомое значение a_{OT} может быть определено из условия

$$\sum_{i=1}^{N}\left(G_{1i}(t) - G_{1i}^p(t, a_{OT})\right)^2 \to \min,$$

где $G_{1i}(t)$ – экспериментальная зависимость расхода.

3. Результаты определения инерционности обратных течений. Из таблицы видно, что для насосов 2.5 и 3 расчетные значения $\left(J_{OT}/J_1\right)_{\max}$ по

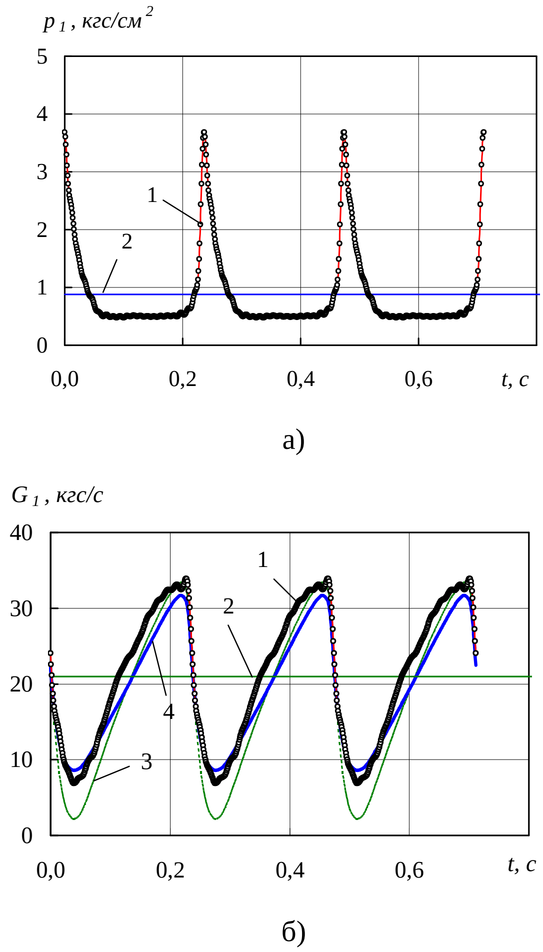

Рис. 1

формулам работы [10] не превышают 0,08. Использование данных этих насосов для определения инерционности J_{OT} предложенным в данной работе способом может привести к значительным погрешностям. Поэтому они не учитывались.

На рис. 1 в качестве иллюстрации предложенного способа определения инерционности J_{OT} представлены экспериментальные временные зависимости давления p_1 и расхода G_1 (рис. 1 а и б, кривые 1; средние значения параметров обозначены цифрой 2) для одного режима работы насоса 1.1, а также результаты расчета расхода G_1 без учета J_{OT} (рис. 1 б, кривая 3) и с учетом J_{OT} (рис. 1 б, кривая 4). Из этого рисунка видно, что J_{OT} может оказывать существенное влияние на ограничение амплитуд колебаний G_1. Поэтому требуется учет инерционности J_{OT} в нелинейных моделях динамики линий питания ЖРД. Наряду с этим следует отметить слабое влияние коэффициента гидравлического сопротивления питающего трубопровода a_1 на ограничение амплитуд колебаний G_1.

Представленный в данной работе способ, основанный на решении уравнения (3), включающего экспериментальную временную зависимость давления $p_1'(t)$, с последующим сравнением расчетной зависимости расхода $G_{1i}^{p}(t)$ с экспериментальной временной зависимостью $G_{1i}(t)$, был использован для уточнения инерционности питающего трубопровода J_1 на режимах без обратных течений. Такой подход также позволяет “восстанавливать” временные зависимости давления непосредственно на входе в насос p_1, если динамические датчики давления по каким-либо причинам не удалось разместить вблизи входа в шнековый преднасос [12, 13]. При этом удается существенно уточнить экспериментальные размахи колебаний давления на входе в насос p_1.

Значения a_{OT}, определенные описанным выше способом, являются случайной величиной. Произведем оценку согласованности полученных по экспериментальным данным статистического и предполагаемого теоретического (нормального) распределений с помощью критерия согласия χ^2. Для этого полученную выборку значений a_{OT} разместим в 8 разрядах и построим гистограмму (см. рис. 2, цифра 1). Теоретическая вероятность попадания случайной величины в произвольный разряд (кривая 2, рис. 2), как обычно принято [14], оценивается с помощью опытных статистических характеристик: математического ожидания $\hat{M}$ и дисперсии $\hat{D}$. Мера расхождения статистического и теоретического распределений в соответствии с критерием согласия составила χ^2=3,0, что не превысило критическое значение χ^2=11,1 и подтверждает гипотезу о согласованности статистического и теоретического распределений.

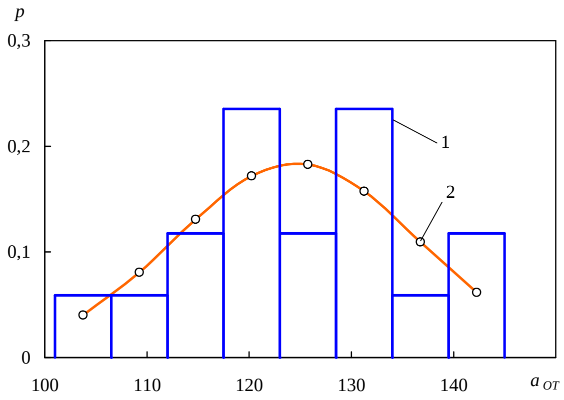

Рис. 2

Математическое ожидание $\hat{M}$ случайной величины a_{OT} составило 124,6 (при среднеквадратическом отклонении 11,8), что является близким к полученному ранее в работе [10] значению a_{OT}=134, которое, как уже отмечалось, определено другим способом и по другим экспериментальным данным.

Выводы. Разработан полуэмпирический способ определения коэффициента инерционного сопротивления обратных течений на входе в насос, основанный на решении уравнения движения жидкости в питающем трубопроводе и использующий экспериментальные временные зависимости давления и расхода на входе в насос при кавитационных колебаниях. Этим способом по результатам испытаний семи шнекоцентробежных насосов ЖРД, существенно отличающихся размерами и производительностью и нашедших применение в маршевых и рулевых ЖРД первых и вторых ступеней ракет-носителей, в том числе на ракетах-носителях “Циклон”[11], “Днепр”[12], “Зенит”[13], была определена зависимость коэффициента инерционности обратных течений J_{OT} от коэффициента расхода φ, которая показала удовлетворительное согласование с аналогичной зависимостью, полученной ранее в работе [10] (другим способом и по другим экспериментальным данным). Это согласование указывает на достоверность полученной зависимости и является перспективным для ее использования в задачах динамики насосов ЖРД, работающих на режимах с обратными течениями на входе в насос.

1. Высокооборотные лопаточные насосы / *Б. И. Боровский, Н. С. Ершов, Б. В. Овсянников, В. И. Петров, В. Ф. Чебаевский, А. С. Шапиро*. – М. : Машиностроение, 1975. – 336 с.
2. *Чебаевский В. Ф.* Кавитационные характеристики высокооборотных шнекоцентробежных насосов / *В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров*. – М. : Машиностроение, 1973. – 152 с.

3. *Tilner W.* Anfluss des Ansaugdruckes Auf die Kavitation Einer Zweistufigen Pumpe / *W. Tilner, W. Lehman* // Maschinenmarkt. – 1985. – Vol. 91, № 97. – P. 2021 – 2024.
4. *Кваша Ю. А.* Численное моделирование трехмерного вязкого течения в осевых шнековых преднасосах на режимах с обратными токами / *Ю. А. Кваша, В. Е. Момот* // Динамика гидросистем энергетических установок летательных аппаратов. – К. : Наук. думка, 1991. – С. 97 – 104.
5. *Григорьев Ю. Е.* Расчетно-экспериментальное определение объема кавитационных каверн в зоне обратных течений / *Ю. Е. Григорьев* // Динамика насосных систем. – К. : Наук. думка, 1980. – С. 47 – 60.
6. *Ершов Н. С.* Модель кавитационных автоколебаний в насосах, работающих на режимах с обратными токами / *Н. С. Ершов* // Кавитационные автоколебания и динамика гидравлических систем. – К. : Наук. думка. – 1977. – С. 16 – 25.
7. *Пилипенко В. В.* Кавитационные колебания и динамика гидросистем / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон*. – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.
8. *Григорьев Ю. Е.* Экспериментально-расчетное определение упругости кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах на режимах с обратными течениями / *Ю. Е. Григорьев, В. В. Пилипенко* // Динамика насосных систем. – К. : Наук. думка, 1980. – С. 37 – 46.
9. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания */ В. В. Пилипенко*. – К. : Наук. думка, 1989. – 316 с.
10. *Долгополов С. И.* Обобщенный экспериментально-расчетный коэффициент инерционного сопротивления жидкости, обусловленный обратными течениями на входе в шнекоцентробежный насос / *С. И. Долгополов* // Техническая механика. – 1995. – Вып. 4. – С. 99 – 103.
11. *Zadontsev V. A.* Experimental Study of LR Pump at Cavitation Autooscillations Regimes / *V. A. Zadontsev* // Proceedings of Third China-Russia-Ukraine Symposium on Astronautical Science and Technology, XI’ AN China, September 16-20. – 1994. – P. 285 – 287.
12. *Задонцев В. А.* Автономные динамические испытания шнекоцентробежного насоса ЖРД большой размерности в режиме кавитационных автоколебаний / *В. А. Задонцев, В. А. Дрозд, С. И. Долгополов, Т. А. Грабовская* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 9 (66). – С. 100 – 106.
13. *Задонцев В. А.* Автономные испытания насоса окислителя маршевого двигателя второй ступени ракеты-носителя “Зенит” в режиме кавитационных автоколебаний / *В. А. Задонцев, В. А. Дрозд, С. И. Долгополов, Т. А. Грабовская* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 10 (77). – С. 89 – 93.
14. *Бендит Дж.* Измерение и анализ случайных процессов / *Дж. Бендит, А. Пирсол*. – М. : Мир, 1974. – 464 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 13.05.14
в окончательном варианте 23.06.14