

УДК 621.671:532.528

В.А. ЗАДОНЦЕВ¹, В.А. ДРОЗД², С.И. ДОЛГОПОЛОВ², Т.А. ГРАБОВСКАЯ²¹Институт транспортных систем и технологий НАНУ, Днепрпетровск, Украина²Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина

АВТОНОМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НАСОСА ОКИСЛИТЕЛЯ МАРШЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВТОРОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ “ЗЕНИТ” В РЕЖИМАХ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Представлены результаты автономных испытаний насоса окислителя большой производительности маршевого ЖРД II ступени ракеты-носителя “Зенит” в режимах кавитационных автоколебаний при функционировании насоса с обратными течениями на входе. Получена область существования кавитационных автоколебаний, зависимости частот и размахов автоколебаний давления и расхода на входе в насос от числа кавитации и параметра режима. Отмечены некоторые особенности результатов испытаний трех насосов большой производительности с трехзаходными шнековыми преднасосами постоянного шага.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, шнекоцентробежный насос, кавитация, кавитационные колебания, частота, размахи, область существования кавитационных автоколебаний.

Введение

Динамические испытания кавитирующих шнекоцентробежных насосов (ШЦН) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) проводятся в рамках исследования проблемы продольной устойчивости жидкостных ракет [1 – 3]. Ранее были проведены автономные испытания в режиме кавитационных автоколебаний [2, 3] преимущественно малоразмерных (в масштабах ракетной техники) насосов, которые применительно к проблеме продольной устойчивости жидкостных ракет являются модельными. Известны экспериментальные исследования двух натуральных насосов окислителя маршевых ЖРД первых ступеней ракет-носителей «Циклон» [4] и «Днепр» [5].

Целью настоящей работы является экспериментальное определение параметров кавитационных автоколебаний насоса окислителя маршевого ЖРД II ступени ракеты-носителя «Зенит», а также сравнение результатов исследований других ШЦН большой производительности с трехзаходными шнековыми преднасосами постоянного шага.

1. Объект исследования и испытательный стенд

Объектом исследования является ШЦН разработки КБ Энергомаш, схематически представленный на рис. 1. Насос имеет трехзаходный предвключенный (вставленный в колесо) осевой шнековый преднасос постоянного шага (угол установки лопасти $\beta = 10^\circ$), наружный диаметр шнека 0,1562 м,

втулочное отношение 0,487 и номинальное значение производительности для стендовых условий $\bar{Q}_{\text{ном}} = 0,098 \text{ м}^3/\text{с}$.

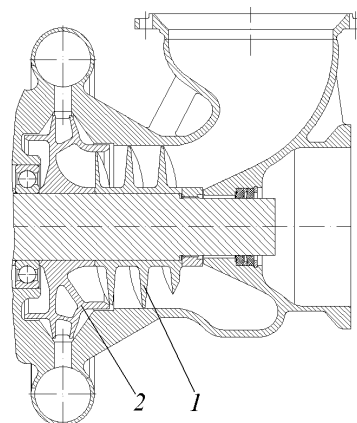


Рис. 1. Схема исследуемого насоса:
1 – шнековый преднасос; 2 – центробежное колесо

Насос выполнен с боковым кольцевым подводом жидкости, имеет коэффициент быстроходности 70,6 и густоту решетки шнекового преднасоса 2,78, работает с обратными течениями на входе в насос (параметр режима $q_{\text{ном}} \approx 0,41$, параметр режима, при котором появляются обратные течения, $q_{\text{от}} \approx 0,53$ [6]). Напорные характеристики насоса и шнека, а также кавитационные характеристики насоса представлены на рис. 2 и 3.

Здесь для удобства сравнения результатов испытаний различных насосов используются относительные параметры: коэффициент расхода

$\varphi = Q/(A \cdot u)$, коэффициент напора $\psi = p_H / (\rho w_1^2 / 2)$ и число кавитации $k = (\bar{p}_1 - \bar{p}_S) / (\rho w_1^2 / 2)$ (где A – площадь проходного сечения на входе в насос; u – окружная скорость на периферии шнека; p_H – напор насоса; $\rho w_1^2 / 2$ – скоростной напор в относительном движении; \bar{p}_1 , \bar{p}_S – давление на входе в насос и давление насыщенных паров рабочей жидкости).

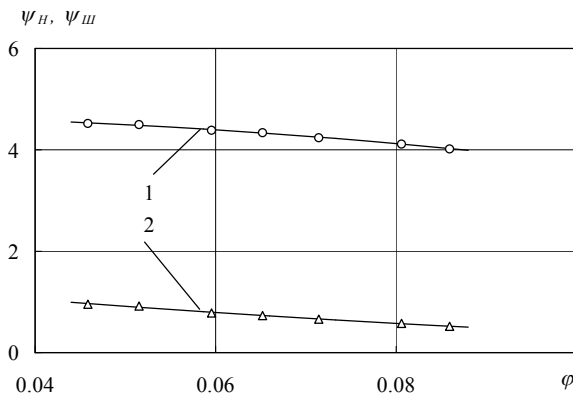


Рис. 2. Напорные характеристики ШЦН (1) и шнекового преднасоса (2)

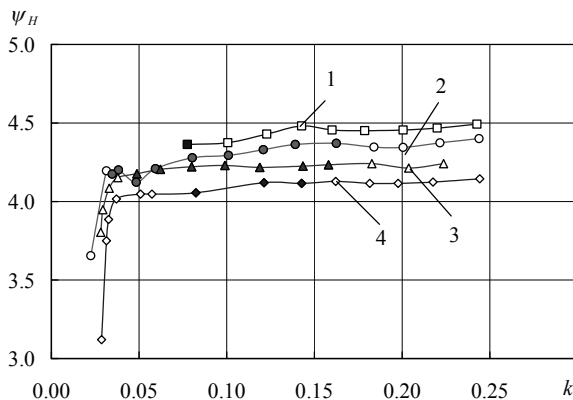


Рис. 3. Кавитационные характеристики ШЦН (светлые значки – устойчиво; темные – автоколебания):
1 – $\varphi = 0,045$ 2 – $\varphi = 0,060$;
3 – $\varphi = 0,072$; 4 – $\varphi = 0,078$

Автономные испытания исследуемого насоса проводились на гидравлическом стенде КБ “Южное” по стандартным программам определения напорных и кавитационных характеристик насоса при постоянной частоте вращения вала. Стенд выполнен по замкнутой схеме и включает антикавитационный и компенсационный баки. Антикавитационный бак предназначен для сепарации пузырей воздуха из воды, поступающей из основной питающей емкости. Компенсационный бак служит для управления давлением на входе в насос. Для создания давлений на входе в насос ниже атмосферного к компенсацион-

ному баку подсоединен вакуумный насос. На рис. 4 представлена схема питающего трубопровода испытательного стенда, который имеет сложную пространственную конфигурацию и является более податливым в продольном направлении, чем, например, прямолинейный трубопровод той же длины.

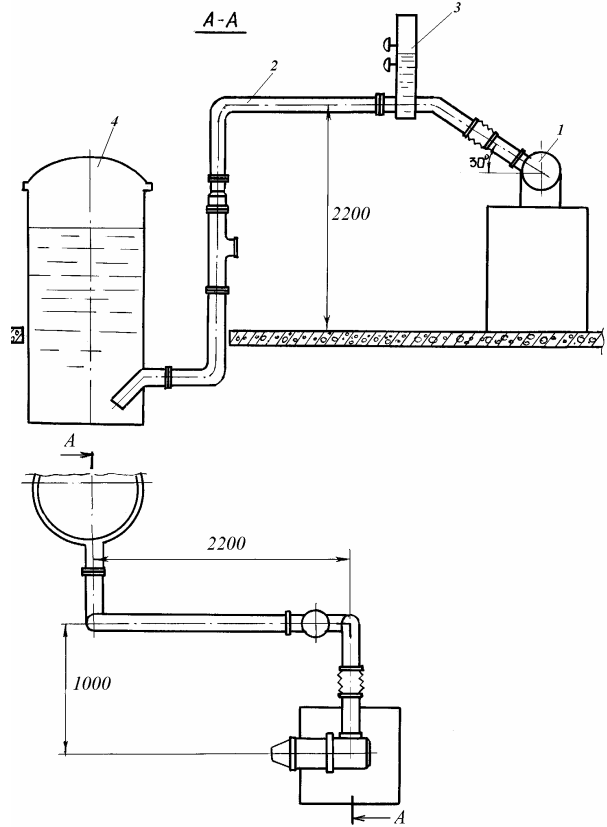


Рис. 4. Схема питающего трубопровода испытательного стенда:
1 – насос; 2 – питающий трубопровод; 3 – ресивер;
4 – компенсационный бак

Для измерения колебаний основных параметров в системе измерений стенда используются индуктивные датчики ДД-10 для измерений пульсаций давлений на входе и выходе из насоса, датчик мгновенных расходов жидкости разработки Института технической механики НАНУ и НКАУ. Погрешности применяемых средств измерения динамических параметров в диапазоне измерений составляли: 5 % – для измерения давлений и 10 % – для измерения расходов. Используемые методы расшифровки и обработки результатов испытаний названы в работе [5].

2. Результаты экспериментальных исследований

При планировании испытаний насоса в гарантированных режимах кавитационных автоколебаний с самого начала предполагалось установка проточ-

ного ресивера с газовой полостью. При установке ресивера с достаточным объемом газовой полости часть питающего трубопровода от компенсационного бака до ресивера будет “акустически” отсекается. Уменьшение коэффициентов инерционного и гидравлического сопротивлений питающего трубопровода, как показано в [2], приводит к появлению области существования кавитационных автоколебаний. При выборе места установки и параметров ресивера пользовались методикой, изложенной в [7], в соответствии с которой проточный ресивер с объемом газовой полости 31 л был установлен в питающем трубопроводе на расстоянии ≈ 1 м от входа в насос.

Динамические испытания насоса проводились в режиме кавитационных автоколебаний в диапазоне расходов от $0,63 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ до $1,09 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ и давлений на входе в насос от давления срыва до $0,6$ МПа ($k = 0,25$).

На рис. 5 представлена экспериментальная область существования кавитационных автоколебаний в плоскости параметров «относительный расход через насос $\bar{Q}/\bar{Q}_{\text{НОМ}}$ – число кавитации k ».

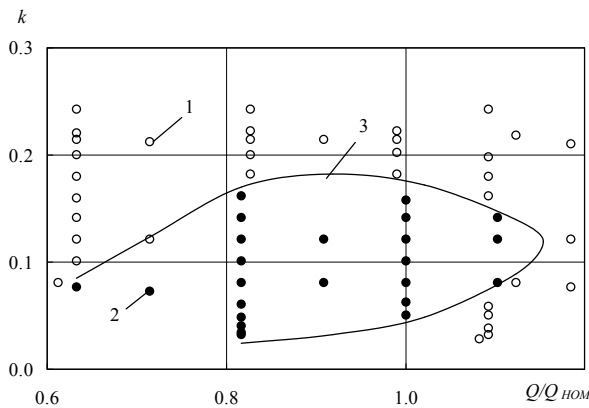


Рис. 5. Область существования кавитационных автоколебаний: 1 – устойчиво; 2 – автоколебания; 3 – огибающая области автоколебаний

Из рис. 5 следует, что полученная экспериментальная область существования кавитационных автоколебаний отличается от ранее приведенных в [2, 3], когда область существования автоколебаний расширяется с уменьшением расхода. Здесь область существования кавитационных автоколебаний сужается при уменьшении расхода через насос от $0,84 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ до $0,63 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$.

Во всей области существования кавитационные автоколебания являются одночастотными, форма колебаний давления на входе в насос близка к форме развитых кавитационных автоколебаний (см. в качестве примера рис. 6).

На рис. 7 представлены зависимости от числа кавитации k^* частот и размахов колебаний давлений и расхода для различных режимов по расходу (здесь $k^* = (\bar{p}_1 - \bar{p}_{\text{СР}}) / (\rho w_1^2 / 2)$, $\bar{p}_{\text{СР}}$ – давление срыва). На рис. 7а видно, что зависимость частот колебаний от давления на входе в насос близка к линейной, это является одним из основных отличительных признаков кавитационных колебаний [2, 3]. Зарегистрированные частоты кавитационных автоколебаний лежат в диапазоне от 8,3 до 34,5 Гц для k^* от 0,013 до 0,189 соответственно.

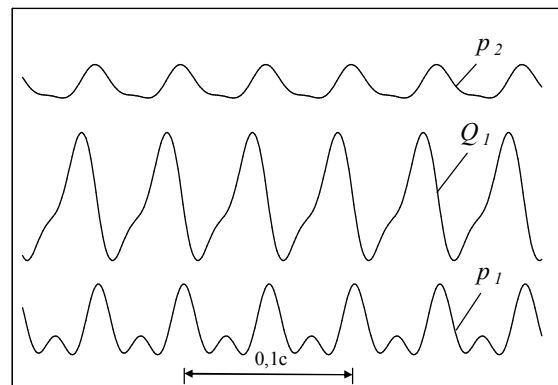


Рис. 6. Копия осциллограммы колебаний параметров при $\bar{Q}_{\text{НОМ}}$ и $k=0,080$

На рис. 7, а также помещены результаты расчетов частот кавитационных колебаний по приближенной формуле (без учета импеданса напорного трубопровода) [5]

$$f \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-B_1}{\gamma(J_1 + J_{\text{ОТ}})}}$$

где B_1 – упругость кавитационных камер;

γ – удельный вес жидкости;

J_1 – коэффициент инерционности питающего трубопровода;

$J_{\text{ОТ}}$ – коэффициент инерционности, обусловленный обратными течениями на входе в насос.

Результаты расчетов частот колебаний по формуле (1) показывают в целом удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Из рис. 7, б и 7, в видно, что размахи колебаний давления и расхода на входе в насос увеличиваются при уменьшении расхода через насос. Максимальные значения размахов колебаний давления и расхода на входе в насос соответствуют диапазонам $k^*=0,07-0,08$ и $k^*=0,04-0,06$. Следует отметить малые (по сравнению с малоразмерными насосами [2, 3]) значения размахов колебаний давления на входе в насос, которые не превышают $0,3$ МПа.

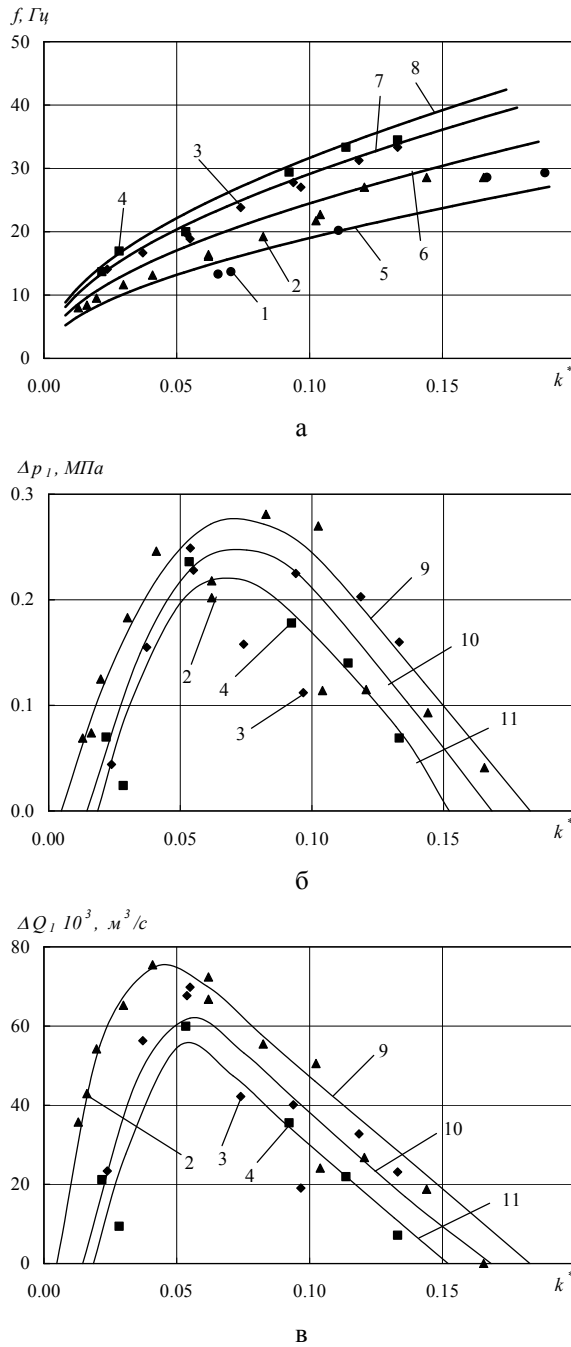


Рис. 7. Зависимости частот (а), размахов колебаний давления на входе (б) и размахов колебаний расхода на входе (в) от числа кавитации:

1, 2, 3, 4 – эксперимент при $0,63 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$, $0,84 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$, $\bar{Q}_{\text{НОМ}}$ и $1,09 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ соответственно; 5, 6, 7, 8 – расчет при $0,63 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$, $0,84 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$, $\bar{Q}_{\text{НОМ}}$ и $1,09 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ соответственно; 9, 10, 11 – осредняющие кривые при $0,84 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$, $\bar{Q}_{\text{НОМ}}$ и $1,09 \bar{Q}_{\text{НОМ}}$ соответственно

Всего было проведено 7 испытаний двух экземпляров исследуемых насосных агрегатов (суммарное время наработки каждого составило примерно 45 минут), получены экспериментальные данные, позволяющие расчетно-экспериментальными

методами [2, 3] определить коэффициенты математической модели динамики кавитирующих ШЦН.

3. Сравнение результатов испытаний насосов большой производительности

Кроме рассмотренного в данной работе насоса (насос № 3), насосами большой размерности, для которых были проведены автономные испытания в режиме кавитационных автоколебаний, являются насосы окислителя маршевых двигателей I ступени ракеты-носителя «Циклон» (насос № 1) [4] и «Днепр» (насос № 2) [5]. Все насосы имели пространственные питающие трубопроводы с сильфонными узлами на входе в насос. Номинальные расходы через насосы в стендовых условиях составили $0,098\text{--}0,118 \text{ м}^3/\text{с}$ ($q = 0,41\text{--}0,42$) при создаваемых напорах $4,3\text{--}10,5 \text{ МПа}$ ($\psi_{\text{Н}} = 3,65\text{--}4,25$). Области существования кавитационных автоколебаний всех насосов отличаются от остроугольной формы, расширяющейся при уменьшении расхода через насос. При динамических испытаниях насоса № 2 наряду с кавитационными автоколебаниями, близкими к развитым, наблюдались нерегулярные колебания и биения, возможно связанные с взаимодействием колебаний жидкости с колебаниями конструкции трубопровода. Для увеличения жесткости конструкции питающего трубопровода осуществлялось продольное поджатие сильфона с помощью нескольких стяжек, однако при кавитационных автоколебаниях происходило быстрое разрушение стяжек.

Результаты автономных испытаний ШЦН большой размерности в режимах кавитационных автоколебаний подтвердили, что характерной отличительной особенностью кавитационных автоколебаний является близкие к линейным зависимости частот кавитационных колебаний и нелинейные зависимости размахов колебаний давления и расхода на входе в насос от числа кавитации.

Заключение

Для насоса окислителя маршевого двигателя II ступени ракеты-носителя «Зенит» при автономных испытаниях в режимах кавитационных автоколебаний получены экспериментальные данные, на основании которых расчетно-экспериментальными методами [2, 3] могут быть определены зависимости коэффициентов математической модели [1 – 3], характеризующих кавитационные течения в шнекоцентробежном насосе, от числа кавитации и коэффициента режима в области с обратными течениями на входе в насос. Такие зависимости, в перспективе, могут быть использованы при решении задач динамики ЖРДУ с учетом частичной кавитации в шнекоцентробежных

насосах и, особенно при анализе продольной устойчивости систем ЖРДУ-корпус ракеты.

Литература

1. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, Н.И. Довготько, Ю.Е. Григорьев, И.К. Манько, О.В. Пилипенко // *Техническая механика*. – 2001. – № 2. – С. 11-37.

2. Пилипенко В. В. Кавитационные колебания и динамика гидросистем / В. В. Пилипенко, В.А. Задонцев, М. С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

3. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания / В.В. Пилипенко. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.

4. 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.*

5. 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.

6. Высокооборотные лопаточные насосы / Б.И. Боровский, Н.С. Ершов, Б.В. Овсянников и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.

7. Задонцев В.А. Выбор оптимальных параметров проточного ресивера как средства возбуждения низкочастотных кавитационных автоколебаний в насосной системе / В.А. Задонцев, А.Д. Николаев // *Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов: сб. науч. трудов*. – К.: Наук. думка, 1992. – С.41-48.

Поступила в редакцию 16.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр. Г.А. Стрельников, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск.

АВТОНОМНІ ВИПРОБУВАННЯ НАСОСА ОКИСЛЮВАЧА МАРШОВОГО ДВИГУНА ДРУГОГО СТУПЕНЯ РАКЕТИ-НОСІЯ “ЗЕНІТ” У РЕЖИМІ КАВІТАЦІЙНИХ АВТОКОЛИВАНЬ

В.А. Задонцев, В.А. Дрозд, С.І. Долгополов, Т.О. Грабовська

Представлено результати автономних випробувань насоса окислювача великої продуктивності маршового РРД II ступеня ракети-носія “Зеніт” у режимах кавітаційних автоколивань при функціонуванні насоса зі зворотними течіями на вході. Отримано область існування кавітаційних автоколивань, залежності частот і розмахів автоколивань тиску й витрати на вході в насос від числа кавітації й параметра режиму. Відзначено деякі особливості результатів випробувань трьох насосів великої продуктивності із трьохзаходними шнековими переднасосами постійного кроку.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, шнековідцентровий насос, кавітація, кавітаційні коливання, частота, розмах, область існування кавітаційних автоколивань.

AUTONOMOUS TESTS OF A LAUNCH VEHICLE “ZENIT” SECOND STAGE MAIN ENGINE QXIDIZER PUMP IN THE MODES OF CAVITATIONAL AUTOOSCILLATIONS

V.A. Zadontsev, V.A. Drozd, S.I. Dolgoplov, T.A. Grabovskaya

The results of special autonomous stand tests of LV “Zenit” second stage main engine oxidizer pump in the modes of cavitation autooscillations are presented. The test results correspond to the pump regimes with the pump inlet back flows. The area of existence of such autooscillations is established experimentally in the plane “a relative flow rate vs. pump inlet cavitation number”. The dependencies of the self oscillations frequency, peak-to-peak amplitudes of the pump inlet pressure and flow rate on the cavitation number and regime coefficient are obtained.

Key words: liquid rocket, centrifugal pump with inducer, cavitation, cavitation oscillations, low frequency, peak-to-peak amplitude.

Задонцев Владимир Антонович – д-р техн. наук, проф., главн. науч. сотр. института транспортных систем и технологий НАНУ, Днепрпетровск, Украина.

Дрозд Виталий Антонович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина.

Долгополов Сергей Иванович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина.

Грабовская Таисия Алексеевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина.