

УДК 621.65.052:681.527.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА**

**А. А. Сердюк**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: serduk@link.pl.ua

Выполнен анализ работ, посвященных исследованию кавитационных процессов в насосных комплексах. Показано, что существующие работы по исследованию кавитационных процессов оставили незатронутыми вопросы их влияния на механические и энергетические характеристики электромеханической системы насосного комплекса. Приведено описание физической модели насосного комплекса, одной из научно-исследовательских возможностей которой является исследование кавитационных процессов в гидротранспортных системах. Получены экспериментальные кривые изменения технологических, механических и энергетических характеристик насосного комплекса при наличии и отсутствии кавитационных процессов в трубопроводе, анализ которых показал влияние кавитационных колебаний на механические и энергетические характеристики электромеханической системы. Получена погрешность при определении значения относительной критической частоты вращения рабочего колеса насоса, которое соответствует бескавитационной работе насосного комплекса, полученного по теоретическим расчетам и экспериментальным кривым.

**Ключевые слова:** кавитационные процессы, насосный комплекс, электропривод.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСУ**

**О. О. Сердюк**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: serduk@link.pl.ua

Виконано аналіз робіт, присвячених дослідженню кавітаційних процесів у насосних комплексах. Показано, що існуючі дослідження кавітаційних процесів залишили нерозглянутими питання їх впливу на механічні та енергетичні характеристики електромеханічної системи насосного комплексу. Наведено опис фізичної моделі насосного комплексу, однією з науково-дослідних можливостей якої є дослідження кавітаційних процесів у гідротранспортних системах. Отримано експериментальні криві зміни технологічних, механічних і енергетичних характеристик насосного комплексу при наявності та відсутності кавітаційних процесів у трубопроводі, аналіз яких показав вплив кавітаційних коливань на механічні та енергетичні характеристики електромеханічної системи. Отримано похибку при визначенні значення відносної критичної частоти обертання робочого колеса насоса, що відповідає безкавітаційній роботі насосного комплексу, яке отримане за теоретичними розрахунками та експериментальними кривими.

**Ключові слова:** кавітаційні процеси, насосний комплекс, електропривод.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Насосные комплексы (НК) промышленного и коммунального водоснабжения – энергоемкие системы, в процессе функционирования которых необходимо осуществлять управление электроприводом насосных агрегатов (НА) в соответствии с текущим водопотреблением. При регулировании параметров НК, сопровождающемся снижением давления в потоке жидкости, в трубопроводной системе создаются условия для развития кавитационных процессов. Последние, в свою очередь, характеризуются периодическим образованием и схлопыванием полостей, заполненных паром или газом (кавитационных каверн) [1–9]. Кавитационные процессы имеют место в рабочих колесах и всасывающих патрубках насосов, в местах сужения и поворота коммуникационной сети, в сифонных трубопроводах. Развитие таких процессов при работе НК приводит к колебаниям давления и расхода в гидросистеме, росту непроизводительных потерь мощности на транспортирование рабочего продукта. Анализ показал, что частота кавитационных процессов лежит в пределах 0,1–100 Гц, амплитуда пульсаций может в 2–2,5 раза превышать действующие значения давления и расхода, потери мощности, обусловленные ка-

витацией, достигают 30 % установленной мощности электропривода (ЭП) насоса. Кавитация сопровождается повышенной вибрацией оборудования, эрозийным разрушением материала, изменением эксплуатационных характеристик насосного и трубопроводного оборудования [1–9].

В работах [1–4] выполнен анализ влияния кавитационных процессов в рабочем колесе насоса на энергетические и технологические параметры турбомеханизма или гидравлической системы, предложены рекомендации по обеспечению бескавитационной работы насоса. При этом авторами [1–3, 5] отмечено, что развитие кавитационных каверн на лопастях рабочего колеса или во всасывающем патрубке насоса приводит к резкому снижению значений напора и коэффициента полезного действия турбомеханизма. Влияние кавитационных процессов на величину потерь напора на местных сопротивлениях оценивают по критическому значению числа кавитации, полученного экспериментальным путем для разной температуры жидкости [8, 9]. Последнее дает возможность определить предельно допустимую скорость течения жидкости в трубопроводе для обеспечения бескавитационного режима работы.

Одним из эффективных путей управления кавитацией в НК является снижение частоты вращения ЭП насоса. В [1, 5–7] показано, что с уменьшением частоты вращения происходит пропорциональное снижение амплитуды и частоты кавитационных колебаний в гидросистеме.

Сказанное обуславливает актуальность вопросов анализа характеристик НК, оснащенного частотно-регулируемым ЭП НА, что позволяет контролировать появление областей с пониженным давлением с целью обеспечения кавитационной защиты гидравлического оборудования.

Целью работы является анализ влияния кавитационных процессов в гидродинамической системе на технологические, механические и энергетические характеристики насосного комплекса с регулируемым электроприводом.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

##### *Краткое описание физической модели НК*

Экспериментальное исследование характеристик НК при развитии и отсутствии кавитационных процессов выполнено на компьютеризированном лабораторном стенде насосной установки, разработанном на кафедре «Системы автоматического управления и электропривода» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского [10]. Общий вид экспериментального НК приведен на рис. 1.



Рисунок 1 – Общий вид физической модели НК

Функциональная схема (рис. 2) экспериментальной установки включает:

- два центробежных насоса  $N_1$  и  $N_2$ , оснащенных регулируемым ЭП, выполненным на базе системы преобразователь частоты–асинхронный двигатель (ПЧ–АД);

- систему разветвленного трубопровода из полипропиленового материала диаметром 50 мм, содержащую горизонтальные и вертикальные участки с установленной запорно-регулирующей ( $Z_1$ – $Z_{30}$ ) и защитной (ОК) арматурой, приемные резервуары ( $P_1$ ,  $P_2$ ), кавитационные трубки Вентури ( $K_1$ ,  $K_2$ ) разного поперечного сечения;

- устройство активного регулирования параметров НК, выполненное на базе гидротурбины Т, соединенной на одном валу с электрическим генератором АГ, который оснащен преобразователем частоты ПЧ<sub>3</sub>, позволяющим выполнять рекуперацию энергии;

- регулируемый дисковый затвор  $Z_6$  с электроприводом (ЭПз) для изменения параметров НУ путем требуемого открытия/закрытия рабочего органа;

- устройства для регулирования частоты вращения электродвигателей насосов ( $АД_1$ ,  $АД_2$ ) и дискового затвора (ЭПз) на базе преобразователей частоты (ПЧ<sub>1</sub>, ПЧ<sub>2</sub>);

- систему контрольно-измерительной аппаратуры (датчики тока ДТ<sub>1</sub>–ДТ<sub>8</sub>, напряжения ДН<sub>1</sub>–ДН<sub>13</sub>, частоты вращения ТГ<sub>1</sub>–ТГ<sub>3</sub>, давления ДД<sub>1</sub>–ДД<sub>4</sub> и расхода  $Q_1$ ,  $Q_2$ ; ваттметры  $W_1$ – $W_2$ );

- устройство сопряжения контрольно-измерительной и исполнительной аппаратуры с ЭВМ на базе аналогово-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей.

Физическая модель насосной установки (НУ) охватывает целый комплекс научно-исследовательских и научно-прикладных задач, одной из которых является исследование влияния кавитационных процессов на энергетические характеристики НК. С этой целью трубопроводная сеть лабораторного стенда НУ оснащена трубками Вентури разного поперечного сечения с прозрачными частями в области сужения. При этом одна из трубок расположена в вертикальной части трубопровода, другая – в горизонтальной (рис. 2).

При проведении экспериментальных исследований использовался центробежный двухступенчатый насос Willo МН1, оснащенный трехфазным АД с потребляемой мощностью 830 Вт. Изменение частоты вращения ЭП турбомеханизма осуществлялось средствами установленного в силовой цепи АД низковольтного трехфазного ПЧ Lenze 8200 SMD 302L4TXA мощностью 3 кВт. Основные характеристики насоса и трубопровода приведены в табл. 1.

Для оценки влияния кавитационных процессов на характеристики электромеханической системы использован блок датчиков, включающий: четыре датчика тока и шесть датчиков напряжения, работающих на эффекте Холла.

Контроль и индикация давления на выходе насоса и в трубопроводе осуществлялась датчиками давления фирм ОВЕН и Jumo с возможностью индикации текущей температуры транспортируемой жидкости. Для измерения расхода жидкости в лабораторном комплексе использовался двухканальный ультразвуковой счетчик Эргомера 125.

Связь датчиков, осуществляющих измерение технологических, механических и энергетических параметров НК с персональным компьютером, выполнена посредством аналогово-цифрового преобразователя LCard E440–14. Схема подключения датчиков с преобразователем приведена на рис. 3, где приняты следующие сокращения: Н – центробежный насос; АД – асинхронный двигатель; ПЧ – преобразователь частоты;  $Z_1$ – $Z_3$  – запорно-регулирующая арматура; ДТ<sub>1</sub>–ДТ<sub>4</sub>, ДН<sub>1</sub>–ДН<sub>6</sub> – датчики тока и напряжения, соответственно; ДС – датчик скорости; ДД<sub>1</sub>–ДД<sub>3</sub>, ДР<sub>1</sub>, ДР<sub>4</sub> – датчики давления и расхода, соответственно; ПК – персональный компьютер; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.

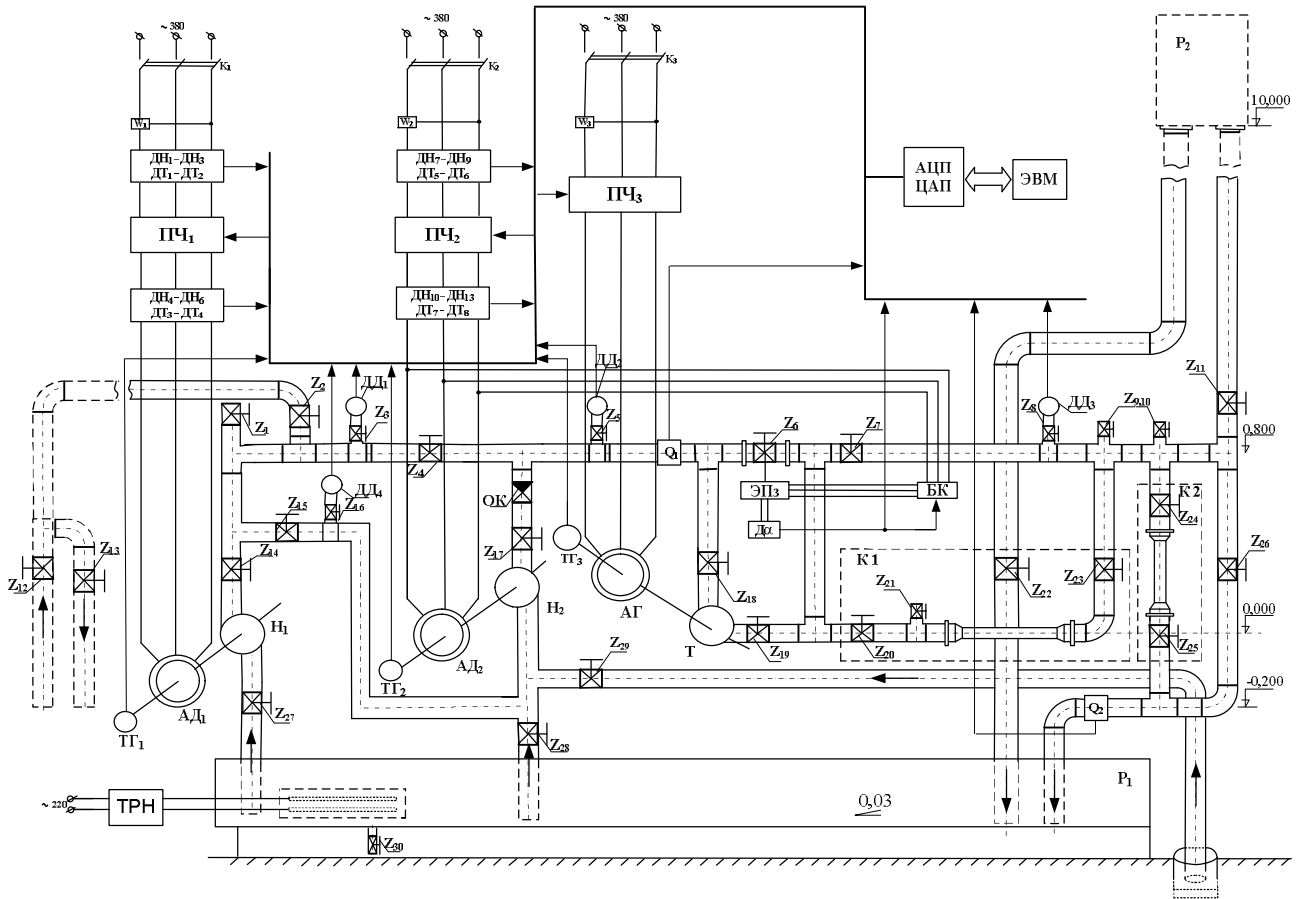


Рисунок 2 – Функціональна схема лабораторного стенда НК

Таблиця 1 – Параметри лабораторного стенда НУ

Параметры насоса Willo MHI 402			
Напор $H_N$ , м	Расход $Q_N$ , м <sup>3</sup> /ч	Мощность $N_N$ , Вт	Гидравлическое сопротивление $R_N$ , с <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>
18	5	550	4087562
Параметры участков трубопровода			
Гидравлическое сопротивление, с <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>	Противодавление $H_{st}$ , м	Критическое число кавитации $\chi_{kr}$	
$R_{s1} = 3,93 \cdot 10^5$	0	50	
$R_{s2} = 3,01 \cdot 10^6$	1	135	
$R_{s3} = 1,41 \cdot 10^5$	0	5	

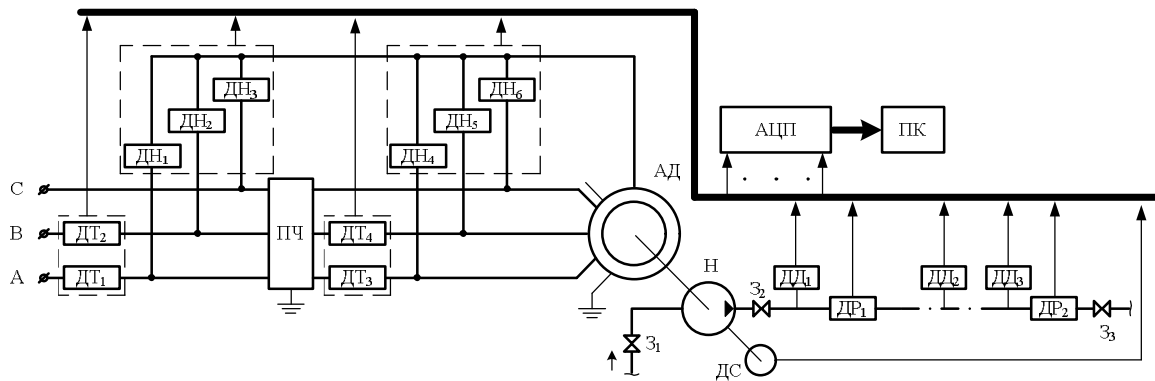


Рисунок 3 – Схема подключения датчиков в лабораторном стенде НК

Для управления характеристиками модуля использовалось специальное программное обеспечение LGraf, с помощью которого осуществлялось отображение и протоколирование измеряемых параметров.

*Определение характеристик насосного комплекса при развитии кавитационных процессов в трубопроводе*

Исследование динамических процессов на лабораторном стенде НК выполнено для одинаковых нагрузочных режимов работы ЭП насоса при отсутствии и наличии кавитационных процессов в трубопроводе, обусловленных прохождением потока жидкости через трубки Вентури.

На рис. 4 приведены кривые  $p_1(t)$  и  $p_{1_k}(t)$ , отражающие изменение давления на выходе насоса при отсутствии и наличии кавитационных процессов в трубопроводе, соответственно. Их анализ позволил выделить участки периодического нарастания и снижения технологического параметра, обусловленные кавитационными процессами в трубопроводе (рис. 4,б). Получено, что размах колебаний давления в кавитационном режиме составили  $\Delta p_{1_k} = 4$  кПа и  $f_{kav} = 1/T_k = 1,25$  Гц соответственно.

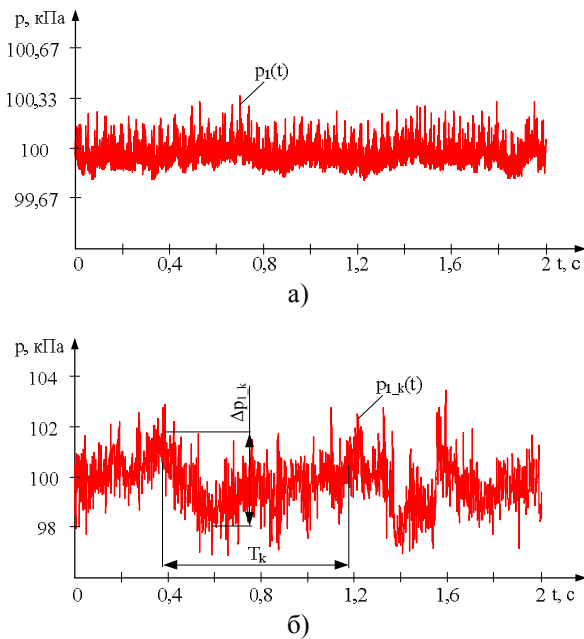


Рисунок 4 – Кривые изменения давления  $p_1(t)$ ,  $p_{1_k}(t)$  на выходе насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

На рис. 5 приведены кривые  $Q_1(t)$ ,  $Q_{1_k}(t)$ ,  $Q_2(t)$  изменения расхода на выходе насоса и в трубопроводе, соответственно. Следует отметить, что кавитационный режим работы НК наглядно демонстрируется кривой  $Q_{1_k}(t)$  (рис. 5,б), отражающей изменение расхода жидкости на выходе насоса. Кривая изменения расхода в трубопроводе при развитии кавитационных процессов не отображена,

поскольку наличие более 30 % воздуха (кавитационных каверн) в потоке жидкости, проходящем через измерительную трубку ультразвукового расходомера, приводит к его неработоспособности. С учетом сказанного, на рис. 6 приведены кривые гидравлической мощности  $N_n(t)$ ,  $N_{n_k}(t)$  на выходе насоса (рис. 6). Их анализ показал, что кавитационные автоколебания в кривых  $p_{1_k}(t)$  и  $Q_{1_k}(t)$  приводят к колебательному характеру изменения гидравлической мощности  $N_{n_k}(t)$ .

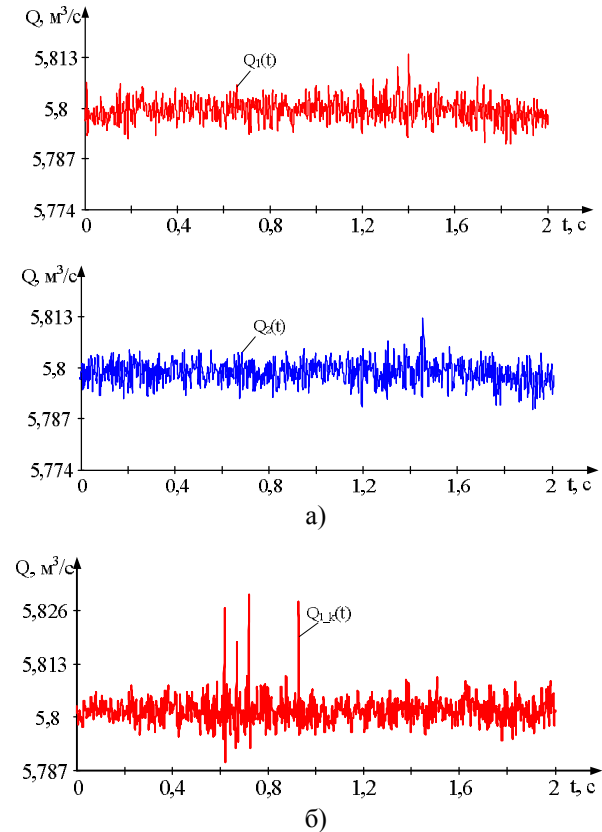


Рисунок 5 – Кривые изменения расхода на выходе насоса  $Q_1(t)$ ,  $Q_{1_k}(t)$  и в трубопроводе  $Q_2(t)$  при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

Размах колебаний гидравлической мощности  $\Delta N_n$  (рис. 6,б), обусловленных наличием кавитационных процессов, в условиях лабораторной установки НК при частоте  $f_{s_1} = 50$  Гц питающего НА напряжения составил 1,1 % от номинальной мощности насоса. Очевидно, что в реальных насосных установках, которые характеризуются сложной конфигурацией трубопровода, значительным объемом транспортируемой жидкости, потери мощности, обусловленные наличием кавитационных процессов, могут достигать больших значений.

На рис. 7 приведены кривые  $\omega(t)$ ,  $\omega_k(t)$ , отражающие изменение угловой частоты вращения ЭП насоса. Их анализ позволил отметить наличие колебаний угловой частоты вращения ЭП насоса в кавитаци-

онном режиме работы НК с размахом  $\Delta\omega_k = 8 \dots 10 \text{ c}^{-1}$ . Такие же колебания наблюдаются и в кривых изменения момента  $M_{d\_k}(t)$  на валу ЭП насоса (рис. 8). Наличие в механических характеристиках переменной составляющей приводит к соответствующей вибрации электрогидравлического оборудования.

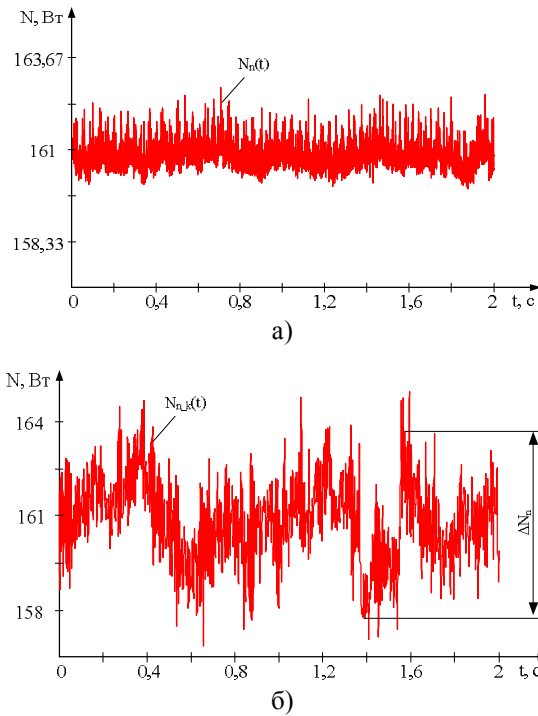


Рисунок 6 – Кривые изменения гидравлической мощности  $N_n(t)$ ,  $N_{n\_k}(t)$  на выходе насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

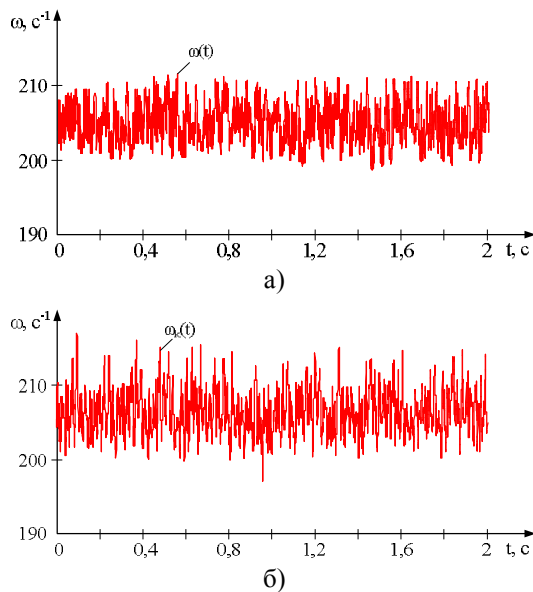


Рисунок 7 – Кривые изменения угловой частоты вращения  $\omega(t)$ ,  $\omega_k(t)$  ЭП насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

В связи с большой инерционностью кавитационных процессов в сравнении с электромагнитными процессами, протекающими в ЭП насоса, дальнейший анализ характеристик электрогидравлического комплекса (рис. 9–12) выполнен для момента схлопывания кавитационной каверны.

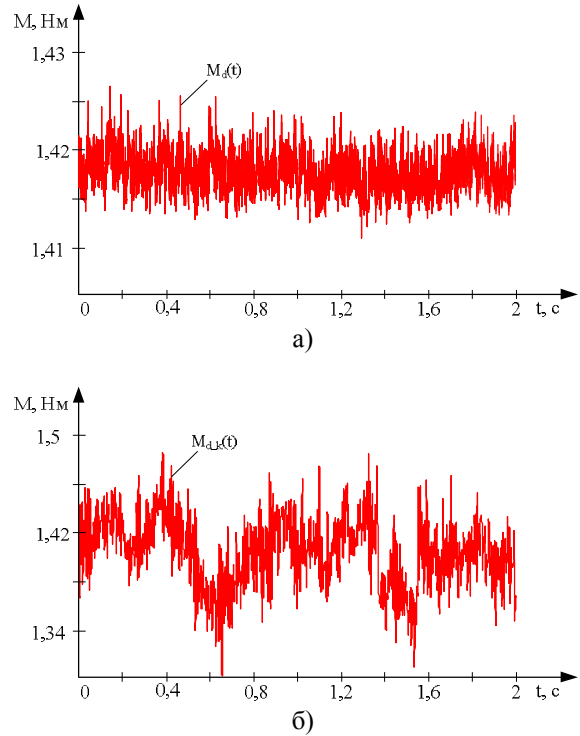


Рисунок 8 – Кривые изменения момента  $M_d(t)$ ,  $M_{d\_k}(t)$  на валу электродвигателя насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

Так, сравнительный анализ кривых (рис. 11), отражающих изменение тока в обмотке статора ЭП насоса при отсутствии  $i_a(t)$  и развитии  $i_{a\_k}(t)$  кавитационных процессов в трубопроводе, позволил выделить незначительные изломы в кривой тока  $i_{a\_k}(t)$ , обусловленные разрушением кавитационной каверны.

Для известных фазных сигналов тока и напряжения получены кривые  $N_d(t)$ ,  $N_{d\_k}(t)$  (рис. 12), отражающие изменение мгновенной электрической мощности, подводимой к статору электродвигателя насоса, Вт:

$$N_d(t) = N_{d\_a}(t) + N_{d\_b}(t) + N_{d\_c}(t) = i_a(t)u_a(t) + i_b(t)u_b(t) + i_c(t)u_c(t),$$

где  $N_{d\_a}(t)$ ,  $N_{d\_b}(t)$ ,  $N_{d\_c}(t)$  – мгновенная мощность в фазах а, b, с, соответственно, Вт;  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  – мгновенный ток, протекающий в фазах а, b, с, соответственно, А;  $u_a(t)$ ,  $u_b(t)$ ,  $u_c(t)$  – мгновенное напряжение в соответствующих фазах электродвигателя, В.

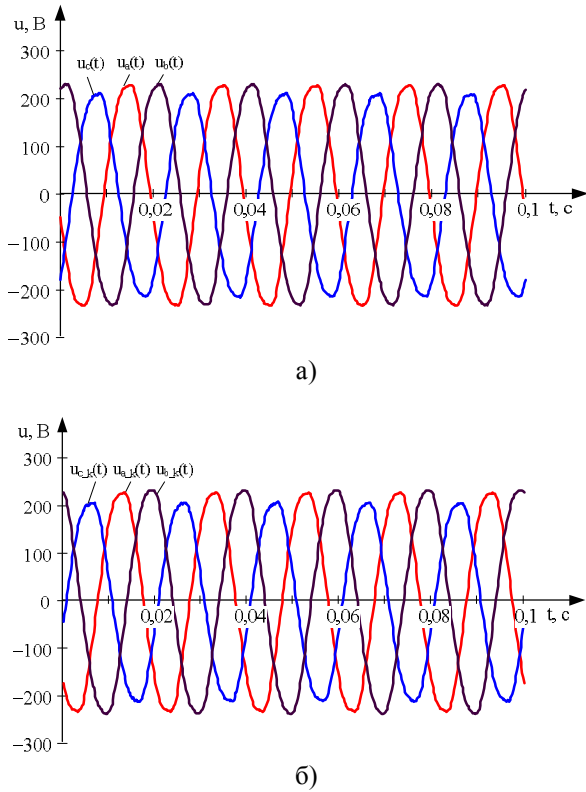


Рисунок 9 – Кривые изменения напряжения  $u_a(t)$ ,  $u_b(t)$ ,  $u_c(t)$ ,  $u_{a_k}(t)$ ,  $u_{b_k}(t)$ ,  $u_{c_k}(t)$ , приложенного к обмоткам статора асинхронного электродвигателя насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

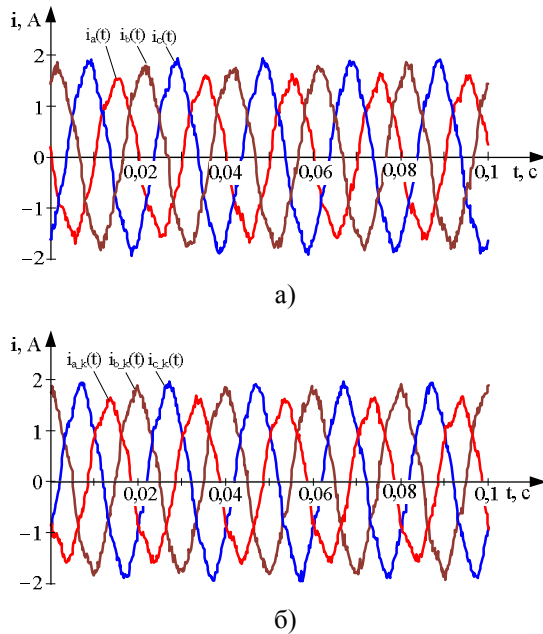


Рисунок 10 – Кривые изменения тока  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ ,  $i_{a_k}(t)$ ,  $i_{b_k}(t)$ ,  $i_{c_k}(t)$  в обмотках статора электродвигателя насоса при отсутствии (а) и наличии (б) кавитационных процессов в трубопроводе

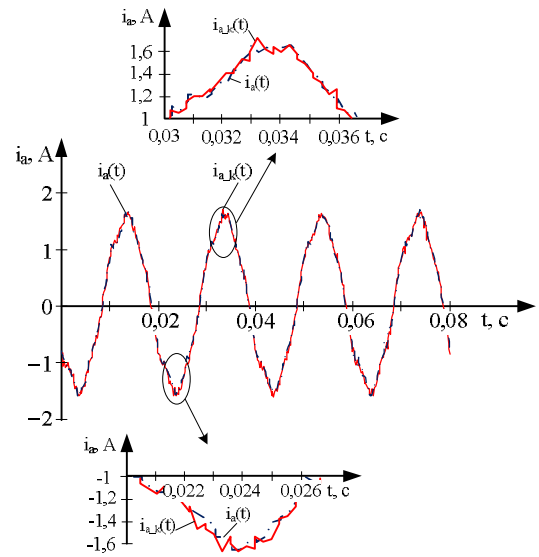


Рисунок 11 – Совмещенные кривые изменения тока в обмотке статора электродвигателя насоса при отсутствии  $i_a(t)$  и наличии  $i_{a_k}(t)$  кавитационных процессов в трубопроводе

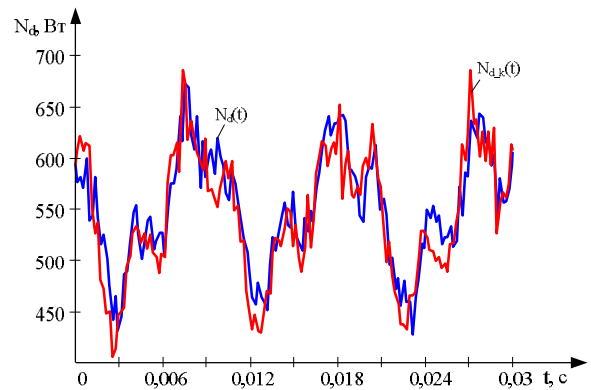


Рисунок 12 – Кривые мгновенной мощности  $N_d(t)$ ,  $N_{d_k}(t)$ , подводимой к статору ЭП насоса при отсутствии и наличии кавитационных процессов в трубопроводе

*Снижение кавитационных процессов в НК изменением скоростного режима*

Известно, что кавитационную защиту НК можно обеспечить средствами регулируемого ЭП НА. При этом относительная критическая частота вращения насоса, обеспечивающая бескавитационный режим движения жидкости в НК, определяется в соответствии с выражением [11]

$$v_{kr\_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n H_{st} + \left(\sum_{i=1}^n R_s + R_b\right) \frac{H_{kr\_i} - H_{st\_i}}{R_{s\_i}}}{H_0}}$$

где  $H_{kr\_i} = \frac{\rho_i \chi_{kr\_i} H_{st\_i} - 2S_i^2 R_{s\_i} p_{para\_i}}{\rho_i \chi_{kr\_i} - 2S_i^2 R_{s\_i} \rho_i g}$  – значение

критического напора на *i*-ом участке трубопровода, соответствующее началу развития кавитационных процессов, м;  $\chi_{kr\_i}$  – критическое значение числа кавитации *i*-го участка трубопровода;  $H_{st\_i}$ ,  $R_{s\_i}$  – статический напор и гидравлическое сопротивление *i*-го участка трубопровода, соответственно, м,  $c^2/m^5$ ;  $S_i$  – площадь поперечного сечения *i*-го участка трубопровода,  $m^2$ ;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $R_b$  – гидравлическое сопротивление насоса,  $c^2/m^5$ ;  $H_0$  – напор, развиваемый насосом при нулевой подаче, м;  $\sum_{i=1}^n H_{st}$ ,  $\sum_{i=1}^n R_s$  – суммарный статический напор и гидравлическое сопротивление в НК, соответственно, м,  $c^2/m^5$ ;  $p_{para\_i}$ ,  $\rho_i$  – давление насыщенных паров и плотность транспортируемой жидкости, соответственно, Па,  $кг/м^3$ .

Для рассматриваемого НК получено, что  $v_{kr} = \omega_{kr} / \omega_n = 0,671$ , где  $\omega_{kr}$ ,  $\omega_n$  – критическая и номинальная частота вращения ЭП насоса.

Экспериментальные и расчетные параметры НК при анализе влияния частоты вращения ЭП насоса на кавитационные процессы в трубопроводе приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения параметров НК

Наименование параметра	Экспериментальные значения			
	1	2	3	4
Частота питающего напряжения $f_s$ , Гц	50	45	40	36,4
Давление на выходе насоса $p_1$ , кПа / коэффициент гармоник $k_{gar}$	100/8,4	76	55,7	43/5,2

Сравнительный анализ кривых (рис. 4,б–11,б, рис. 13–18), полученных при прохождении потока жидкости через трубку Вентури, показал отсутствие кавитационных колебаний в технологических, механических и энергетических параметрах НК при угловой частоте вращения  $\omega_{kr} = \omega_{36}$  ЭП насоса, соответствующей частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц. Снижение кавитации наглядно подтверждается уменьшением коэффициента высших гармоник в сигнале давления  $p_{1\_k}(t)$  (табл. 2), определяемого в соответствии с выражением

$$k_{gar} = \sqrt{\sum_{m=2}^M p_{j\_m}^2} / p_{j\_1},$$

где  $p_{j\_1}$ ,  $p_{j\_m}$  – амплитудное значение первой и

*m*-ой гармоники сигнала давления, соответственно; *m* – номер гармоники; *M* – количество гармоник; *j* – индекс, характеризующий точку измерения давления в НК.

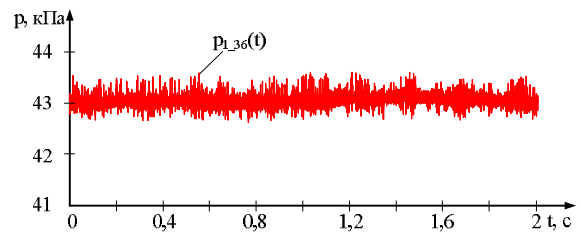
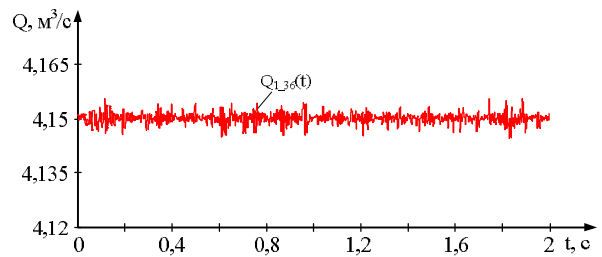
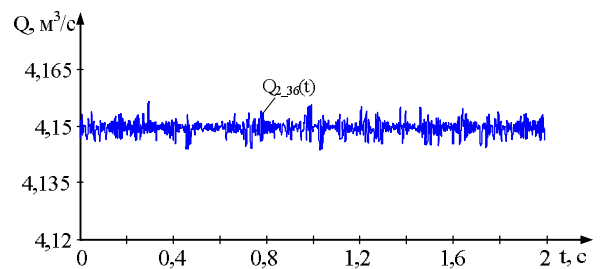


Рисунок 13 – Кривая изменения давления  $p_{1\_36}(t)$  на выходе насоса при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц



а)



б)

Рисунок 14 – Кривая изменения расхода на выходе насоса  $Q_{1\_36}(t)$  (а) и в трубопроводе  $Q_{2\_36}(t)$  (б) при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц

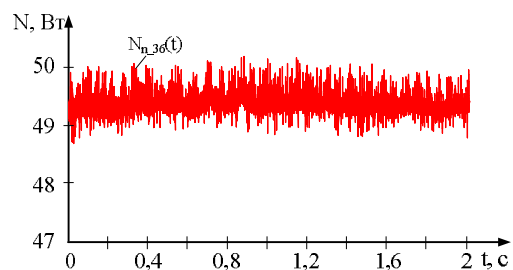


Рисунок 15 – Кривая изменения гидравлической мощности  $N_{n\_36}(t)$  на выходе насоса при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц

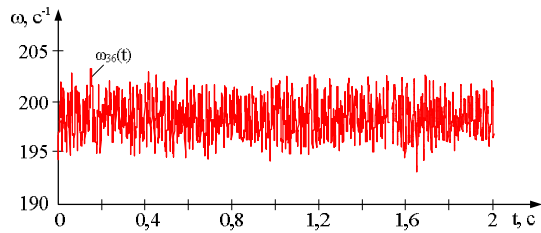


Рисунок 16 – Кривая изменения угловой частоты вращения  $\omega_{36}(t)$  ЭП насоса при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц

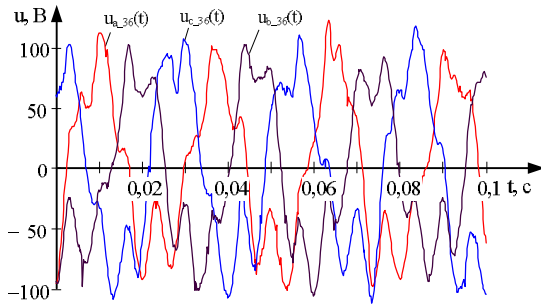


Рисунок 17 – Кривые изменения напряжения  $u_{a_{36}}(t)$ ,  $u_{b_{36}}(t)$ ,  $u_{c_{36}}(t)$ , приложенного к обмоткам статора асинхронного электродвигателя насоса, при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц

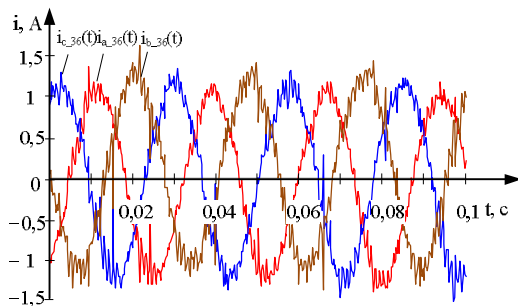


Рисунок 18 – Кривые изменения тока  $i_{a_{36}}(t)$ ,  $i_{b_{36}}(t)$ ,  $i_{c_{36}}(t)$  в обмотках статора ЭП насоса при частоте питающего НА напряжения 36,4 Гц

Погрешность результатов при определении значения относительной критической частоты вращения насоса по теоретическим расчетам и в результате эксперимента составила 2,23 %, что, очевидно, обусловлено собственными колебаниями давления в гидросистеме, размах и частота которых зависят от конструктивных особенностей центробежного насоса.

Для случая, когда поддержание бескавитационного режима работы НК средствами частотно-регулируемого ЭП насоса является невозможным, поскольку выходные параметры насоса не обеспечивают кривой водопотребления, актуален поиск альтернативных методов повышения управляемости НУ с кавитационными процессами.

**ВЫВОДЫ.** Подтверждено на физической лабораторной модели насосного комплекса наличие кавитационных процессов в системе при прохождении потока жидкости через трубку Вентури, установленную в трубопроводной сети. Анализ динамических процессов в насосной установке показал, что колебания давления на выходе насоса характеризуются частотой 1,2 Гц и амплитудой 4 кПа.

Показано влияние кавитационных процессов не только на технологические параметры насосной установки, а и на механические и энергетические характеристики электромеханической системы насосного комплекса, анализ которых показал наличие низкочастотной переменной составляющей, приводящей к снижению эффективности работы электромеханической системы.

Доказана возможность построения систем кавитационной защиты оборудования насосных комплексов на базе средств частотно-регулируемого электропривода насоса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.
2. Cavitation swirl at the entrance of centrifugal pump / A. Predin, B. Gregorc, I. Biluš // Journal of Energy Technology. – 2009. – Vol. 2, Iss. 3. – PP. 67–82.
3. Biluš I., Predin A. Experimental analysis of thermo-dynamical surge at water pump inlet // Journal of energy technology. – 2010. – Vol. 3, Iss. 3. – PP. 67–74.
4. Experimental and numerical analysis of the impact of particles on the development of cavitation flow around a hydrofoil / B. Gregorc, M. Hriberšek, A. Predin // Journal of energy technology. – 2010. – Vol. 4. – PP. 47–64.
5. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1997. – 352 с.
6. Акуличев В.А. Экспериментальное исследование элементарной кавитационной области // Акустический журнал. – 1968. – Т. 14, № 3. – С. 337–343.
7. Козелков В.П., Ефимочкин А.Ф. Экспериментальное исследование кавитационных автоколебаний в гидротранспортной системе // Материалы совещания академии наук Украинской ССР “Кавитационные автоколебания в насосных системах”. – 1976. – Т. 1. – С. 71–80.
8. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
9. Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
10. Пат. 58707 Україна, МПК' F04D 27/00. Тренажер гідротранспортної установки / Т.В. Коренькова, Д.Й. Родькін, О.О. Сердюк, В.Н. Шоколов; заявник та власник Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – № u201010703; заявл. 06.09.10; опубл. 26.04.11.



Бюл. № 8. – 7 с.

11. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Характеристики физической модели насосного комплекса с учетом кавитационных процессов // *Електромеханічні і*

енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 57–62.

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF INFLUENCE CAVITATIONAL PROCESSES ON CHARACTERISTICS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF PUMPING COMPLEX**

**A. Serdjuk**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: serduk@link.pl.ua

The analysis of works devoted to the study of cavitation in the pump complexes. It is shown that existing work on the investigation of the cavitation processes have left untouched the impact of such processes on the mechanical and energy characteristics of Electromechanical systems pumping of the complex. The description of the physical model of the pump complex, one of the research capabilities of which is the study of cavitation processes in hydrotransport systems. The obtained experimental curves of changes of technology, mechanical and energy characteristics of the pump unit in the presence and absence of cavitation processes in the pipeline, the analysis of which showed the influence of cavitation oscillations in mechanical and energy characteristics of Electromechanical systems. The resulting error in the determination of relative values of critical frequency of rotation of the impeller pump that matches cavitation free work pumping complex obtained by theoretical calculations and experimental curves.

**Key words:** cavitation processes, pump complex, electric drive.

REFERENCES

1. Karelin, V.Ya. (1975), *Kavitacionnye javleniya v centrobezhnyh i osevyh nasosah* [The cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)

2. Predin, A., Gregorc, B. and Biluš, I. (2009), “Cavitation swirl at the entrance of centrifugal pump”, *Journal of Energy Technology*, Vol. 2, no. 3, pp. 67–82.

3. Biluš, I. and Predin, A. (2010), “Experimental analysis of thermo-dynamical surge at water pump inlet”, *Journal of energy technology*, Vol. 3, no. 3, pp. 67–74.

4. Gregorc, B., Hriberšek, M. and Predin, A. (2010), “Experimental and numerical analysis of the impact of particles on the development of cavitation flow around a hydrofoil”, *Journal of energy technology*, Vol. 4, pp. 47–64.

5. Pilipenko, V.V., Zadontsev, V.A. and Natanzon, M.S. (1997), *Kavitacionnye avtokolebaniya i dinamika gidrosistem* [Cavitation self-oscillations and the dynamics of hydraulic systems], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)

6. Akulichev, V.A. (1968), “Experimental study of elementary cavitation”, *Akusticheskiy zhurnal*, Vol. 14, no. 3, pp. 337–343. (in Russian)

7. Kozelkov, V.P. and Efimochkin, A.F. (1976), “Experimental investigation of the cavitation self-oscillations in hydrotransport system”, *Kavitatsionnye avtokolebaniya v nasosnyh sistemah, Materialy soveshchaniya akademii nauk Ukrainsskoy SSR*, Vol. 1, pp. 71–80. (in Russian)

8. Altshul, A.D., Zhivotovskiy, L.S. and Ivanov, L.P. (1987), *Gidravlika i aerodinamika* [Hydraulics and aerodynamics], Stroyizdat, Moscow. (in Russian)

9. Arzumanov, Z.S. (1978), *Kavitatsiya v mestnyh gidravlicheskih soprotivleniyah* [Cavitation in local hydraulic resistance], Energiya, Moscow. (in Russian)

10. Patent 58707 Ukraine, MPK' F04D 27/00. *Training apparatus of hydrotransport installation* / Korenkova, T.V., Rodkin, D.J., Serdjuk, O.O. and Shokolov, V.N.; applicant and owner Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – № u201010703; declared 06.09.10; published 26.04.11, Newsletter № 8. – 7 p. (in Ukrainian)

11. Serdjuk, A.A. and Korenkova, T.V. (2012), “Characteristics of the physical model of the pump complex, taking into account cavitation processes”, *Elektromehanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 4, no. 20, pp. 57–62. (in Russian)

Стаття надійшла 11.03.2014.