

Светодиодное освещение искусственного небосвода / А. С. Мельник, В. А. Егорченков, А. О. Косов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 76 – 81. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2222-0631.

LED Illumination of an Artificial Sky / O. S. Melnyk, V. O. Yegorchenkov, A. O. Kosov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 76 – 81. Bibliog.: 5 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Мельник Олександр Степанович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, м. Київ; тел.: (067) 213-03-08; e-mail: melnyk.ols@gmail.com.

**Мельник Александр Степанович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный авиационный университет, г. Киев; тел.: (067) 213-03-08; e-mail: melnyk.ols@gmail.com.

**Melnyk Oleksandr Stepanovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, National Aviation University, Kyiv; tel.: (067) 213-03-08; e-mail: melnyk.ols@gmail.com.

**Егорченков Володимир Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ; тел.: (050) 224-55-12; e-mail: egval@ukr.net.

**Егорченков Владимир Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев; тел.: (050) 224-55-12; e-mail: egval@ukr.net.

**Yegorchenkov Volodymyr Olexiyovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kiev National University of Construction and Architecture, Kyiv; tel.: (050) 224-55-12; e-mail: egval@ukr.net.

**Косов Антон Олегович** – студент, Національний авіаційний університет, м. Київ; тел.: (097) 693-45-39; e-mail: KosovAnton@i.ua.

**Косов Антон Олегович** – студент, Кафедра електроніки, Национальный авиационный университет, г. Киев; тел.: ((097) 693-45-39; e-mail: KosovAnton@i.ua.

**Kosov Anton Olegovich** – student, National Aviation University, Kyiv; tel.: (097) 693-45-39; e-mail: KosovAnton@i.ua.

УДК 621.165

**М. М. НЕЧУЙВИТЕР**

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ ПАРОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Проведено аналіз відмов живильних насосів, а також дослідження щодо підвищення надійності роботи живильного насоса енергоблоків теплових електростанцій при експлуатації живильно-деаераційної установки на ковзному тиску пари, що гріє. Визначено критерій стійкості роботи живильного насоса, а також умови забезпечення ефективності експлуатації живильних насосів шляхом контролю і управління зміною динамічного запасу на кавітацію живильного насоса в режимах змінних навантажень енергоблоку. Проведено оцінку показників надійності енергоблоку.

**Ключові слова:** енергоблок, живильний насос, живильно-деаераційна установка, динамічний запас на кавітацію, показники надійності, коефіцієнт оперативної готовності.

Проведены анализ отказов питательных насосов, а также исследования по повышению надежности работы питательного насоса энергоблоков тепловых электростанций при эксплуатации питательно-деаэрационной установки на скользящем давлении греющего пара. Определены критерий устойчивости работы питательного насоса, а также условия обеспечения эффективности эксплуатации питательных насосов путем контроля и управления изменением динамического запаса на кавитацию этих насосов в режимах переменных нагрузок энергоблока. Проведена оценка показателей надежности энергоблока.

**Ключевые слова:** энергоблок, питательный насос, питательно-деаэрационная установка, динамический запас на кавитацию, показатели надежности, коэффициент оперативной готовности.

In the paper the feed pump failure conditions are analyzed and the means of improving the reliability of the feed pump of a thermal power plant power unit using feed deaerator with sliding pressure of heating steam are studied. The criteria of the feed pump operation stability as well as the conditions of providing the feed pump effective operation by monitoring and managing the changes of the pump cavitation dynamical stock under the variable loads of the power unit are determined. The indexes of the power unit reliability are evaluated.

**Key words:** power unit, feed pump, feed deaerator, cavitation dynamical stock, indexes of reliability, operational availability function.

**Введение.** Повышение экономичности, маневренности, надежности энергоблоков электростанций при эксплуатации их в режимах переменных нагрузок – одна из проблем современной энергетики Украины. В этой связи оптимизация режимных параметров элементов тепловых схем паротурбинных установок, в том числе питательных деаэрационных установок типа деаэратор – всасывающий трубопровод – питательный насос, позволяет предложить энергосберегающие режимы их эксплуатации, а именно работу деаэратора на скользящем давлении.

© М. М. Нечуйвiter, 2017

Надежность работы питательных насосов тепловых и атомных электростанций зависит от множества их комплексных параметров: термодинамических, конструктивных, режимных. Последние определяют широкий спектр причин отказов питательных насосов и их влияние на показатели надежности ТЭС и АЭС.

Согласно [1] отказы питательных насосов обусловлены конструктивными, термодинамическими, режимными параметрами. Сюда относятся: увеличенные зазоры в уплотнениях рабочих колес; попадание посторонних предметов в рабочее колесо; задевание ротора за статор; задиры в проточной части; расцентровка агрегата; разрушение подшипника; заклинивание насоса, смещение рабочих колес относительно осей отводов; увеличенные дроссельные щели в гидропятах или уплотнениях рабочих колес; «запаривание» насоса; повышенная вибрация насоса; кавитация в насосе; неплотности стыка крышки нагнетания или стыков секций; износ сальниковой набивки или рубашки вала.

Ниже приведен комплекс термодинамических и режимных параметров, которые обуславливают причины отказов питательных насосов с электроприводом и с турбоприводом.

*Для насосов с электроприводом.* Термодинамическими параметрами процесса являются: расход питательной воды (подача насоса); температура масла в системе смазки; давление воды на входе в насос; давление воды на выходе из насоса; потребляемая мощность электродвигателя; температура воды на входе в насос; температура воды на выходе из насоса; расход воды через линию осевой разгрузки (протечка воды через гидропята); давление воды после гидропята. Режимные параметры: напор; осевой сдвиг ротора; вибрация; нагрев воды в насосе; температура подшипников; потребляемая мощность электродвигателя; коэффициент полезного действия (КПД).

*Для насосов с турбоприводом.* Термодинамическими параметрами процесса являются: расход пара на турбопривод; давление пара перед стопорным клапаном турбопривода; температура пара перед стопорным клапаном турбопривода; давление отработавшего пара после турбопривода; температура отработавшего пара турбопривода; расход питательной воды (подача насоса); температура масла в системе смазки; давление воды на входе в насос; давление воды на выходе из насоса; температура воды на входе в насос; температура воды на выходе из насоса; расход воды через линию осевой разгрузки (протечка воды через гидропята); давление воды после гидропята. Режимные параметры: напор; осевой сдвиг ротора; вибрация насоса; вибрация турбопривода; нагрев воды в насосе; температура подшипников; КПД насоса; частота вращения.

Отклонение вышеупомянутых параметров от условий работоспособности на основе требований правил технической эксплуатации (ПТЭ) и инструкций на оборудование является причиной отказов питательных насосов.

Технические решения по совершенствованию тепловых схем паротурбинных установок с целью повышения их экономичности, в частности, эксплуатация питательно-деаэрационных установок на скользящем давлении греющей среды, требуют обеспечения надежности работы питательных насосов в режимах переменных нагрузок энергоблока на основе критерия устойчивой работы питательного насоса при работе деаэратора на скользящем давлении, а также, в этой связи оценки показателей надежности энергоблока.

Имеющиеся исследования [2 – 5] по эксплуатации питательных деаэрационных узлов в режимах переменных нагрузок энергетического блока отражают решения определенного круга вопросов, в частности: исследований режимов работы; оптимизации режимных, термодинамических, конструктивных параметров и расчетно-экспериментальных исследований квазистационарных (с медленным изменением основных параметров) режимов эксплуатации питательных деаэрационных установок (ПДУ) на переменных нагрузках энергоблока; роботы ПДУ на скользящем давлении в деаэраторе; расчетных исследований по определению допустимой скорости изменения давления в деаэраторе, по выбору оптимального места включения деаэратора в тепловой схеме паротурбинной установки, по предупреждению вскипания рабочего тела – питательной воды – во всасывающем трубопроводе питательного насоса, по определению оптимального давления в деаэраторе.

Известны технические решения, обеспечивающие повышение экономичности и надежности эксплуатации существующих, а также вновь проектируемых ПДУ: способ регулирования режима работы деаэратора путем подачи пара в бак-аккумулятор в режимах набора нагрузки энергоблока [6], что повышает экономичность энергоблока; питательно-деаэрационная установка, которая позволяет предупредить срыв насоса при снижении давления в деаэраторе подачей охлажденного конденсата во всасывающий трубопровод питательного насоса [7], что повышает надежность работы энергоблока, и предоставляет возможность в новых проектных разработках снизить высоту установки деаэратора; устройство для защиты от срыва питательного насоса подачей охлажденного конденсата со стороны всасывания питательного насоса [8], что способствует повышению устойчивости работы питательного насоса в бездеаэрационных схемах паротурбинных установок. В монографии [9] обобщены теоретико-практические исследования и оптимизация переменных, переходных режимов работы элементов тепловых схем турбоустановок.

Вышеназванные технические решения не в полной мере отвечают современным требованиям, предъявляемым к надежности работы ПДУ на скользящем давлении греющего пара, в частности питательного насоса.

Продолжением одного из направлений этих исследований является обеспечение устойчивой работы в деаэрационных схемах регенерации на переменных и переходных режимах [10, 11].

**Постановка задачи.** Целью исследования является обеспечение надежной работы питательных насосов в режимах переменных нагрузок энергоблока на основе критерия устойчивой работы питательного насоса путем

управления запасом на кавитацию питательного насоса в режимах резко переменных нагрузок энергоблока при работе деаэратора на скользящем давлении, а также, в этой же связи, оценка показателей надежности энергоблока.

Действительное изменение динамического запаса на кавитацию питательного насоса определяется зависимостью

$$\Delta h_d = \Delta h_r - \Delta h = (p - p_s) - \Delta h, \quad (1)$$

где  $p$  – давление питательной воды (среды), движущейся во всасывающем трубопроводе,  $p = p_d - \Delta p + p_{ст}$ ;  $p_s$  – давление насыщения питательной воды (среды) при температуре  $t$ ;  $\Delta h$  – минимальный запас на кавитацию питательного насоса;  $\Delta h_r$  – гидродинамический запас на кавитацию,  $\Delta h_r = p - p_s$ .

Минимальный запас на кавитацию питательного насоса  $\Delta h$  учитывает режимные особенности работы питательного насоса – его характеристику, которая представляется уравнением

$$\Delta h = 10A \left( \frac{n\sqrt{Q}}{c_{кр}} \right)^{4/3}, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент запаса, изменяется в диапазоне значений 1,0 – 1,6;  $c_{кр}$  – критический кавитационный запас быстроходности;  $n$  – число оборотов насоса;  $Q$  – расход питательной воды (среды).

Гидродинамический запас на кавитацию  $\Delta h_r$  при переменных нагрузках турбоустановки и работе деаэратора на скользящем давлении греющего пара описывается зависимостью

$$\Delta h_r = h + \frac{1}{\gamma} (p_d - \Delta p - p_s), \quad (3)$$

где  $h$  – высота столба воды всасывающего трубопровода питательного насоса;  $\gamma$  – удельный вес питательной воды (среды);  $p_d$  – соответственно давление в деаэраторе;  $\Delta p$  – гидравлические потери во всасывающем трубопроводе питательного насоса;  $p_s$  – давление насыщения питательной воды (среды) при температуре  $t$ .

Действительное изменение динамического запаса на кавитацию питательного насоса с учетом уравнений (2, 3) и преобразований имеет следующий вид:

$$\Delta h_d = p_d - \Delta p + p_{ст} - p_s - 10A \left( \frac{n\sqrt{Q}}{c_{кр}} \right)^{4/3}, \quad (4)$$

где  $p_{ст}$  – это давление столба воды, находящегося во всасывающем трубопроводе питательного насоса.

В табл. 1 представлены варианты исследования изменения динамического кавитационного запаса питательного насоса ПДУ в режимах переменных нагрузок энергоблока для турбоустановки К-300-240,

Таблица 1 – Вариантные исследования изменения динамического кавитационного запаса питательного насоса ПДУ в режимах переменных нагрузок энергоблока для турбоустановки К-300-240

№ п/п	Нагрузка, $N_{ном}$	Турбопитательный насос ПТ-1150-340-15				Бустерный насос ПД: 650-160				$t$ , °C	$p_d$ , ата	$p$ , ата	$\Delta h_r$ , ата	$\Delta h_d$ , ата
		$n$ , об/мин	$c_{кр}$	$Q_{пн}$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta h$ , ата	$n$ , об/мин	$c_{кр}$	$Q_{бн}$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta h_{бн}$ , ата					
1	1,00	5000	3500	16,00	9,30	2980	6500	8,00	1,280	162,5	6,73	8,20	1,50	0,22
2	0,75	3800	3500	12,00	5,33	2980	6500	6,00	1,041	153,0	5,21	6,86	1,65	0,65
3	0,55	2750	3500	8,76	2,83	2980	6500	4,38	0,830	141,2	3,82	5,55	1,73	0,86

Анализ расчетных исследований, проведенных для различных сочетаний параметров, позволяет констатировать существование следующих закономерностей.

Во-первых, при снижении номинальной нагрузки  $N_{ном}$  энергетического блока действительное изменение динамического запаса на кавитацию питательного насоса, который определяется разницей запаса на кавитацию из всасывающей стороны питательного насоса и минимальным кавитационным запасом питательного насоса, то есть  $\Delta h_r - \Delta h$ , увеличивается. Здесь необходимо констатировать, что на динамических режимах стабильность работы ПДУ зависит от скоростей изменения давления греющей пары в деаэраторе и давления рабочей среды во всасывающем трубопроводе питательного насоса, а также от изменения разницы давления пара в деаэраторе и давления насыщения пара,  $p_d - p_s$ , что может привести к кавитационному срыву питательного насоса.

Во-вторых, при повышении номинальной нагрузки  $N_{\text{ном}}$  энергетического блока действительное изменение динамического запаса на кавитацию питательного насоса уменьшается до определенного значения, который отвечает нагрузке  $N_{\text{ном}}$ .

Наиболее опасным для стабильной работы питательного насоса оказывается момент, когда достигается равенство изменений кавитационной характеристики питательного насоса со всасывающей стороны и кавитационной характеристики насоса. В этом случае изменение динамического кавитационного запаса питательного насоса равняется нулю, что при импульсных колебаниях давления приведет к кавитационному срыву. Надежность работы питательного насоса в вышеупомянутых условиях работы ПДУ обеспечивается превышением запаса на кавитацию со всасывающей стороны над минимальным кавитационным запасом питательного насоса, то есть условием  $\Delta h_t \geq \Delta h$ .

Для контроля и управления динамическим кавитационным запасом питательного насоса при работе деаэратора на скользящем давлении применяется устройство для измерения динамического запаса на кавитацию питательного насоса [10]. Это устройство при работе деаэрационно-питательной установки на скользящем давлении в режимах переменных нагрузок энергоблока позволяет предупредить срыв питательного насоса энергоблока, повысить надежность работы этого насоса путем контроля и поддержанием необходимого минимально-допустимого запаса на кавитацию, питательного насоса, за счет учета динамического изменения запаса на кавитацию со стороны всасывания питательной воды (среды) питательным насосом и его кавитационной характеристики и работы энергоблока.

**Оценка показателей надежности энергоблока.** При работе питательно-деаэрационной установки на скользящем давлении греющего пара путем управления запасом на кавитацию питательного насоса в режимах резко переменных нагрузок энергоблока проводилась в [12] с помощью математического аппарата теории надежности.

В табл. 2 представлены расчетные показатели надежности питательного насоса при работе питательно-деаэрационной установки на скользящем давлении греющей среды для турбоустановки К-300-240

Таблица 2 – Расчетные показатели надежности питательного насоса при работе ПДУ на скользящем давлении греющей среды для турбоустановки К-300-240

№ пп	Показатели	Исходный вариант	Сравниваемый вариант
1	$T_0$ – время наработки на отказ	6500	8760
2	Интенсивность отказов ( $\lambda = 1/T_0$ ) – вероятность отказа объекта в единицу времени	$1,538 \cdot 10^{-4}$	$1,141 \cdot 10^{-4}$
3	Интенсивность восстановления ( $\mu = 1/T_b$ ) – вероятность восстановления в единицу времени, где $T_b$ – время восстановления	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
4	$T_b$ – время восстановления	52,6	52,6
5	Среднее время безотказной работы системы из $n$ – элементов: $T = (\sum \lambda_i)^{-1}$	6502	8764
6	Среднее время восстановления: $T_b = \sum (\lambda_i / \mu_i) / \sum \lambda_i$	52,6	52,6
7	Вероятность безотказной работы системы на промежутке времени $\tau = 500$ часов: $p(t) = e^{-\lambda \tau}$	0,9262	0,9441
8	Коэффициент готовности (по критерию устойчивости работы питательного насоса) $k = [1 + (\lambda / \mu)]^{-1}$	0,9919	0,9940
9	Коэффициент оперативной готовности (характеризует способность системы, находящейся в резерве, начать работу в течение времени $\tau$ ): $k_{ог} = k_{г} \times p(t)$	0,9242	0,9385

Увеличение времени наработки на отказ, обусловленного управлением динамического запаса на кавитацию питательного насоса в режимах переменных нагрузок энергоблока, позволяет увеличить коэффициент оперативной готовности на 1.43 %.

**Выводы.** Определен критерий обеспечения устойчивой работы питательного насоса в диапазоне допустимых границ изменения динамического запаса на кавитацию питательного насоса. Эффективность эксплуатации питательных насосов деаэрационных установок обеспечивается управлением изменения динамического кавитационного запаса питательного насоса. Увеличение времени наработки на отказ, обусловленного управлением динамического запаса на кавитацию питательного насоса в режимах переменных нагрузок энергоблока, позволяет увеличить коэффициент оперативной готовности до 1,43 %.

## Список литературы

1. Мурманский Б. Е. Разработка, апробация и реализация методов повышения надежности и совершенствования системы ремонтов паротурбинных установок в условиях эксплуатации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.12 / Мурманский Борис Ефимович. – Екатеринбург, 2015. – 457 с.
2. Шелепов И. Г., Аркадьев Б. А., Иоффе В. Ю., Нечуйвитель М. М. К определению скорости изменения давления в деаэраторах при переменных режимах работы турбины // Энергетическое машиностроение : Сб. науч. трудов. – Харьков : Вища школа, 1980. – Вып. 29. – С. 85 – 90.
3. Шелепов И. Г., Нечуйвитель М. М., Аркадьев Б. А. К выбору места включения деаэраторов паротурбинных установок // Математические модели процессов и конструкций энергетических и транспортных турбинных установок в системах их автоматизированного проектирования : Сб. науч. трудов. – Харьков : ИПМАШ АН УССР, 1985. – Ч. I. – С. 182 – 183.
4. Аркадьев Б. А., Шелепов И. Г., Нечуйвитель М. М. Предотвращение вскипания в питательном насосе, при сбросе нагрузки турбины // Теплоэнергетика. – 1985. – № 2. – С. 40 – 43.
5. Нечуйвитель М. М. К вопросу методики выбора оптимального давления в деаэраторах паротурбинных установок // Математическое моделирование процессов и конструкции энергетических и транспортных турбинных установок в системах их автоматизированного проектирования : Сб. науч. трудов. – Харьков : ИПМАШ АН УССР, 1988. – Ч. II. – С. 111.
6. Нечуйвитель М. М., Шелепов И. Г., Аркадьев Б. А., Иоффе В. Ю. Пат. 4277113/24-06, СССР. Способ регулирования режима термического деаэратора. – 1990.
7. Аркадьев Б. А., Нечуйвитель М. М., Иоффе В. Ю. Пат. 4252188/24-06, СССР. Деаэрационно-питательная установка. – 1989.
8. Аркадьев Б. А., Нечуйвитель М. М. Пат. 4867870/29, СССР. Устройство для защиты от срыва питательного насоса тепловых электростанций. – 1993.
9. Нечуйвитель М. М., Аркадьев Б. А., Шелепов И. Г. Дослідження і оптимізація змінних і перехідних режимів роботи елементів теплових схем турбоустановок : моногр. – Харків : УПА, 2006. – 98 с.
10. Нечуйвитель М. М., Шелепов И. Г. Пат. 84356, Україна. Пристрій для вимірювання динамічного кавітаційного запасу живильного нагнітача. – 2013.
11. Нечуйвитель М. М., Шелепов И. Г. Підвищення надійності експлуатації живильних насосів деаераційних установок паротурбинних блоків електростанцій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 15. – С. 151 – 155.
12. Гладышев Г. П., Аминов Р. З., Гуревич В. З. Надёжность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС : учеб. Пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов / Под ред. Андрущенко А. И. – Москва : Высшая школа, 1991. – 303 с.

## References (transliterated)

1. Murmanskii Ye. E. *Razrabotka, aprobatsiya i realizatsiya metodov povysheniya nadyezhnosti i sovershenstvovaniya systemy remontov paroturbinnnykh ustanovok v usloviyakh ekspluatatsii : dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.04.12* [Development, approbation and implementation of methods to improve reliability and improve the system of repairs of steam turbine units under operating conditions: dis. ... Dr. Techn. Sciences : 05.04.12]. Ekaterinburg, 2015. 457 p.
2. Shelepov I. G., Arkad'ev B. A., Ioffe V. Yu., Nechuiviter M. M. K opredeleniyu skorosti izmeneniya davleniya v deayeratorakh pri peremennykh rezhimakh raboty turbiny [On determining the rate of change of pressure in deaerators under variable operating conditions of a turbine]. *Yenergeticheskoe mashinostroenie : Sb. nauch. trudov.* [Energetic Engineering: Coll. Sci. Works]. Kharkov, Vysshya shkola Publ., 1980, vol. 29, pp. 85–90.
3. Shelepov I. G., Nechuiviter M. M., Arkad'ev B. A. K vyboru mesta vklucheniya deayeratorov paroturbinnnykh ustanovok [On the choice of the installation site for steam turbine deaerators]. *Matematicheskie modeli protsessov i konstruktsiy yenergeticheskikh i transportnykh turbinnnykh ustanovok v sistemakh ikh avtomatizirovannogo proektirovaniya : Sb. nauch. trudov* [Mathematical modeling of processes and design of power and transport turbine installations in their computer-aided design systems: Coll. Sci. Works]. Kharkov, IPMASH AN USSR Publ., 1985, vol. I, pp. 182–183.
4. Arkad'ev B. A., Shelepov I. G., Nechuiviter M. M. Predotvrashhenie vskipaniya v pitatel'nom nasose, pri sbrose nagruzki turbiny [Preventing the effervescence in the nutrient pump when discharging the load of the turbine]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering]. 1985, no. 2, pp. 40–43.
5. Nechuiviter M. M. K voprosu metodiki vybora optimal'nogo davleniya v deayeratorakh paroturbinnnykh ustanovok [On the question of the technique of choosing the optimal pressure in deaerators of steam turbine plants]. *Matematicheskie modeli protsessov i konstruktsiy yenergeticheskikh i transportnykh turbinnnykh ustanovok v sistemakh ikh avtomatizirovannogo proektirovaniya : Sb. nauch. trudov* [Mathematical modeling of processes and design of power and transport turbine installations in their computer-aided design systems: Coll. Sci. Works]. Kharkov, IPMASH AN USSR Publ., 1988, vol. II, pp. 111.
6. Nechuiviter M. M., Shelepov I. G., Arkad'ev B. A., Ioffe V. Yu. *Sposob regulirovaniya rezhima termicheskogo deayeratora* [Method for regulating the thermal deaerator mode]. Patent USSR, no. 4277113 / 24-06, 1990.
7. Arkad'ev B. A., Nechuiviter M. M., Ioffe V. Yu. *Deayeratsionno-pitel'naya ustanovka* [Deaeration-feed installation]. Patent USSR, no. 4252188 / 24-06, 1989.
8. Arkad'ev B. A., Nechuiviter M. M. *Ustroystvo dlya zashchity ot sryva pitatel'nogo nasosa teplovykh yelektrostantsiy* [Device for protection against failure of the feed pump of thermal power plants]. Patent USSR, no. 4867870/29, 1993.
9. Nechuiviter M. M., Arkad'ev B. A., Shelepov I. G. *Doslidzhennya i optyimizatsiya zminnykh i perekhidnykh rezhymiv roboty yelementiv teplovykh skhem turbostanovok : monografiya* [Research and optimization of variable and transient modes of the units of thermal circuits of turbostallations: monography]. Kharkiv, UIPA Publ., 2006. 98 p.
10. Nechuiviter M. M., Shelepov I. G. *Prystriy dlya vymiryuvannya dynamichnogo kavitatsiyonogo zapasu zhyvyl'nogo nagnitacha* [A device for measuring dynamical cavitation stock of feeding supercharger]. Patent UA, no. 84356, 2013.
11. Nechuiviter M. M., Shelepov I. G. Pidvyshhennya nadiynosti yekspluatatsiyi zhyvyl'nykh nasosiv deayeratsiyonnykh ustanovok paroturbinnnykh blokiv yelektrostantsiy [Improving reliability of feed pumps of deaeration installations of steam units of power plants]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya : Yenergetychni ta teplotekhnichni protsesy ta ustatkuvannya* [Bulletin of NTU «KhPI» Series: Power and thermal processes and equipment]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2014, no. 15, pp. 151–155.
12. Gladyshev G. P., Aminov R. Z., Gurevich V. Z. *Nadyezhnost' teployenergeticheskogo oborudovaniya TYES i AYES : ucheb. posobie dlya teployenergeticheskikh i yenergomashinostroitel'nykh vuzov* [Reliability of heat and power equipment of TPPs and nuclear power plants: textbook for heat and power engineering and machine-building universities]. Ed. Andryushhenko A. I. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 303 p.

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Підвищення надійності експлуатації живильних насосів паротурбінних установок теплових та атомних електростанцій / М. М. Нечуйвітер** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 81 – 86. Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2222-0631.

**Повышение надёжности эксплуатации питательных насосов паротурбинных установок тепловых и атомных электростанций / М. М. Нечуйвітер** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 81 – 86. Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2222-0631.

**Improving exploitation reliability of feed pumps of steam turbine installations of thermal and nuclear power plants / М. М. Nechuiviter** // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 81 – 86. Bibliogr.: 12 titles. – ISSN 2222-0631.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Нечуйвітер Марія Михайлівна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків; тел.: (057) 733-78-03; e-mail: nmmaria1947@gmail.com.

**Нечуйвітер Мария Михайловна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков; тел.: (057) 733-78-03; e-mail: nmmaria1947@gmail.com.

**Nechuiviter Maria Michailivna** – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkov; tel.: (057) 733-78-03; e-mail: nmmaria1947@gmail.com.

УДК 519.6

**В. П. ОЛЬШАНСЬКИЙ, С. В. ОЛЬШАНСЬКИЙ****КОЛИВАННЯ КУБІЧНО НЕЛІНІЙНОГО ОСЦИЛЯТОРА, СПРИЧИНЕНІ ІМПУЛЬСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Розглянуто рух нелінійного осцилятора з кубічною характеристикою пружності, спричинений миттєво прикладеною сталою силою або прямокутним силовим імпульсом скінченної тривалості. Побудовано два варіанти аналітичного розв'язку нелінійного диференціального рівняння другого порядку. У першому варіанті переміщення осцилятора у часі виражено через еліптичний косинус, а в другому для розрахунку переміщення задіяно Атеб-синус. З метою спрощення розрахунків, запропоновано компактні апроксимації, які з похибкою до одного відсотка виражають Атеб-синус через елементарні функції. Встановлено, що коефіцієнт динамічності системи при дії миттєво прикладеної сили дорівнює  $\sqrt[3]{4} < 2$ . У випадку навантаження осцилятора прямокутним імпульсом коефіцієнт динамічності залежить від тривалості дії імпульса і теж залишається меншим двох. Знайдено тривалість імпульса, коли буде максимальна амплітуда вільних коливань, спричинених імпульсом. Вона залежить не лише від власних параметрів осцилятора, а й від величини прикладеної сили, чого немає в лінійних системах. Наведено приклади розрахунків та відповідні графіки.

**Ключові слова:** осцилятор, кубічна характеристика пружності, дія силового імпульса, аналітичний розв'язок, еліптичний косинус, Атеб-синус.

Рассмотрено движение нелинейного осциллятора с кубической характеристикой упругости, вызванные мгновенно приложенной постоянной силой или прямоугольным силовым импульсом конечной протяженности. Построено два варианта аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка. В первом варианте перемещения осциллятора во времени выражено через эллиптический косинус, а во втором для расчета перемещения задействовано Атеб-синус. С целью упрощения расчетов, предложено компактные аппроксимации, которые с погрешностью менее одного процента выражают Атеб-синус через элементарные функции. Установлено, что коэффициент динамичности системы при действии мгновенно приложенной силы равен  $\sqrt[3]{4} < 2$ . В случае нагружения осциллятора прямоугольным импульсом, коэффициент динамичности зависит от продолжительности действия нагрузки и также остается меньшим двух. Найдена продолжительность импульса, когда будет максимальной амплитуда свободных колебаний, вызванных импульсом. Она зависит не только от собственных параметров осциллятора, но и от величины приложенной силы, чего нет в линейных системах. Приведено примеры расчетов и соответствующие графики.

**Ключевые слова:** осциллятор, кубическая характеристика упругости, действие силового импульса, аналитическое решение, эллиптический косинус, Атеб-синус.

The motion of a nonlinear oscillator with a cubic elasticity characteristic caused by an instantaneously applied constant force or a rectangular force pulse of finite length is considered. Two variants of the analytical solution of a second-order nonlinear differential equation are constructed. In the first variant, the oscillator movement in time is expressed through an elliptical cosine, and in the second one, the Атеб-sine is used to calculate the displacement. In order to simplify the calculations, we introduce compact approximations which, with an error of less than one percent, express the Атеб-sine through elementary functions. It is established that the coefficient of dynamism of the system under the action of the instantaneously applied force is  $\sqrt[3]{4} < 2$ . In the case of an oscillator loaded with a rectangular pulse, the coefficient of dynamism depends on the duration of the load and also remains smaller than two. The pulse duration causing the maximum amplitude of free oscillations is found. It depends not only on the proper parameters of the oscillator, but also on the magnitude of the applied force, which is not the case with the linear systems. Examples of calculations and corresponding graphs are given.

**Key words:** oscillator, cubic characteristic of elasticity, action of force pulse, analytical solution, elliptic cosine, Атеб-sine.