

УДК 69.059

КУМПЯК ОЛЕГ ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
ogkumpyak@yandex.ru

ГАЛЯУТДИНОВ ЗАУР РАШИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
gazr@yandex.ru

ОДНОКОПЫЛОВ ГЕОРГИЙ ИВАНОВИЧ, канд. техн. наук,
ogiz@yandex.ru

ПАХМУРИН ОЛЕГ РАВИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
orpahmurin@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ НАГРУЖЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ БЕЗ ОСТАНОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Представлены результаты исследования технического состояния несущих конструкций каркаса и фундаментов под технологические агрегаты газокomppressorной станции. Для оценки технического состояния проведены визуально-инструментальные исследования несущих конструкций и виброиспытания фундаментов. По результатам обследования в фундаментах установлены дефекты и повреждения, оказывающие отрицательное влияние на их эксплуатационные характеристики. В фундаментах установлены трещины шириной раскрытия до 0,1 мм, прочность бетона фундаментов ниже проектной. Амплитудно-частотные характеристики, полученные в процессе виброиспытаний, свидетельствуют о превышении горизонтальных перемещений фундаментов относительно предельных значений, регламентируемых нормативными документами.

Ключевые слова: газокomppressorная станция; металлический каркас; железобетонные фундаменты; трещины; прочность бетона; виброиспытания; перемещения; ускорения; частота колебаний.

OLEG G. KUMPYAK, DSc, Professor,
ogkumpyak@yandex.ru

ZAUR R. GALYAUTDINOV, PhD, A/Professor,
gazr@yandex.ru

GEORGII I. ODNOKOPYLOV, PhD, A/Professor,
ogiz@yandex.ru

OLEG R. PAHMURIN, PhD, A/Professor,
orpahmurin@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

DIAGNOSTICS OF LOADED FOUNDATIONS OF GAS COMPRESSOR STATION WITHOUT PROCESS SHUTDOWN

This paper presents the research results on the technical state of bearing structures of the frame and foundations of technological units of gas compressor station. Visual and instrumen-

tal inspection and vibration tests of foundations were performed to estimate the technical state of bearing structures. The results indicate to defects and damages in foundations which have a negative impact on their performance. Crack openings 0,1 mm width are detected in foundations; the strength of concrete foundation is below the designed. Amplitude-frequency characteristics obtained during the vibration tests indicate to the excessive horizontal displacements of foundations with respect to the limit values regulated by normative documents.

Keywords: gas compressor station, metal frame, reinforced concrete foundations, cracks, concrete strength, vibration test, displacement, acceleration, vibration frequency.

Линейные газокompрессорные станции магистральных газопроводов компенсируют снижение давления в трубопроводе, поддерживая его на расчётном уровне. Основное технологическое оборудование газокompрессорных станций – компрессорные установки: центробежные нагнетатели с приводом от электродвигателя СТД-4000 (синхронный трехфазный двигатель мощностью 4000 кВт, работающий в режиме 3000 об/мин) [6]. Производственный корпус компрессорной станции расположен в одноэтажном двухпролетном промышленном здании со стальным каркасом. Сооружение размерами в плане 15×78 м разделено перегородкой на машинный и насосный залы (рис. 1).



Рис. 1. Машинный (а) и насосный (б) залы газокompрессорной станции

Компрессорные установки расположены на фундаментах призматической формы, выполненных из монолитного железобетона. Фундаменты размерами $l \times b \times h = 7,2 \times 3,2 \times 2,8$ м установлены на свайном основании.

Исследование технического состояния здания показало, что несущие конструкции металлического каркаса находятся в работоспособном состоянии [1, 2, 6–8, 12] и удовлетворяют требованиям нормативного документа [3] и проекта. Вместе с тем в фундаментах под газоперекачивающие агрегаты были выявлены горизонтальные и вертикальные трещины шириной раскрытия 0,05–0,1 мм (рис. 2).

Анализ полученных при обследовании данных свидетельствует о том, что наличие трещин в теле фундамента обусловлено низкой, по сравнению с проектной, прочностью бетона. Исследование прочности бетона фундаментов неразрушающими методами контроля показало, что бетон соответствует классу В12,5 (М150), что ниже проектной марки бетона В15 (М200).

Наличие трещин в теле фундаментов приводит к снижению их монолитности и способствует разуплотнению бетона при циклическом нагружении [4, 9, 11]. Для выявления степени влияния трещин на эксплуатационные характеристики фундаментов была проведена оценка их колебаний [13].

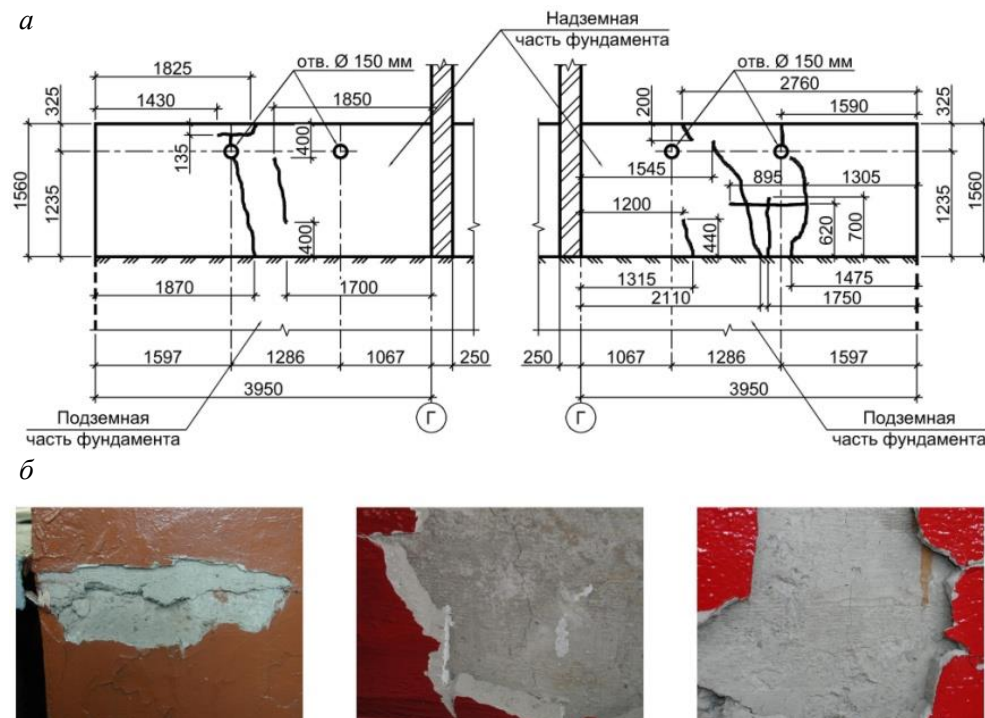


Рис. 2. Схема расположения трещин на боковой поверхности фундамента (а) и общий вид трещин (б)

Измерение горизонтальных и вертикальных ускорений и перемещений отдельных точек фундамента при циклическом динамическом воздействии осуществлялось пьезоэлектрическими акселерометрами типа 4382 (4383) с усилителями заряда 2634 и блоком питания 2805 датской фирмы «Брюль и Кьер». Показания датчиков ускорений фиксировались при помощи измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) МИС-300, обеспечивающего измерение показаний акселерометров с частотой 64 000 Гц с разрешением 16 двоичных разрядов. Определение единицы младшего разряда (ЕМР) примененных акселерометров совместно с ИВК МИС-300 выполнялось на прецизионном виброкалибраторе АТ02. Примененная при проведении виброиспытаний конфигурация ИВК МИС-300 позволила проводить измерения мгновенных значений ускорений в пределах $\pm 32,1 \text{ м/с}^2$ с диапазоном измеряемых частот до 7000 Гц. Схема подключения испытательного оборудования включает 6 акселерометров (рис. 3).

Схема расстановки акселерометров приведена на рис. 4, а. В каждой точке измерения устанавливался двумерный акселерометр, ориентированный одной осью для измерения вертикальных ускорений, а другой – горизонтальных (перпендикулярно оси расположения двигателя на фундаменте).

Крепление акселерометров на фундамент осуществлялось, согласно рекомендациям фирмы «Брюль и Кьер», при помощи воска [10]. Методика получения значений перемещений по показаниям акселерометров была выполнена также в соответствии с рекомендациями фирмы «Брюль и Кьер». Гармонические сигналы, отображающие ускорение, скорость и перемещение механических колебаний, связаны друг с другом через точно определенные математические выражения. Интегрирование этих сигналов может быть получено делением на пропорциональный коэффициент, включающий возведенную в квадрат угловую частоту, при этом постоянная интегрирования положена равной нулю, что допустимо для сигналов с синусоидальной формой волны.

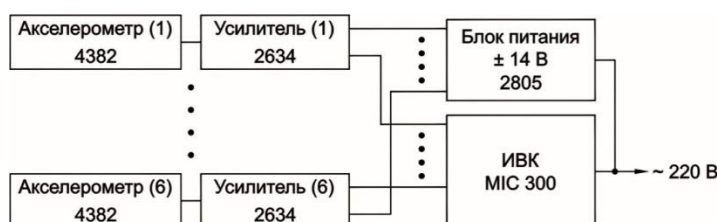


Рис. 3. Схема подключения испытательного оборудования при проведении виброиспытаний фундаментов

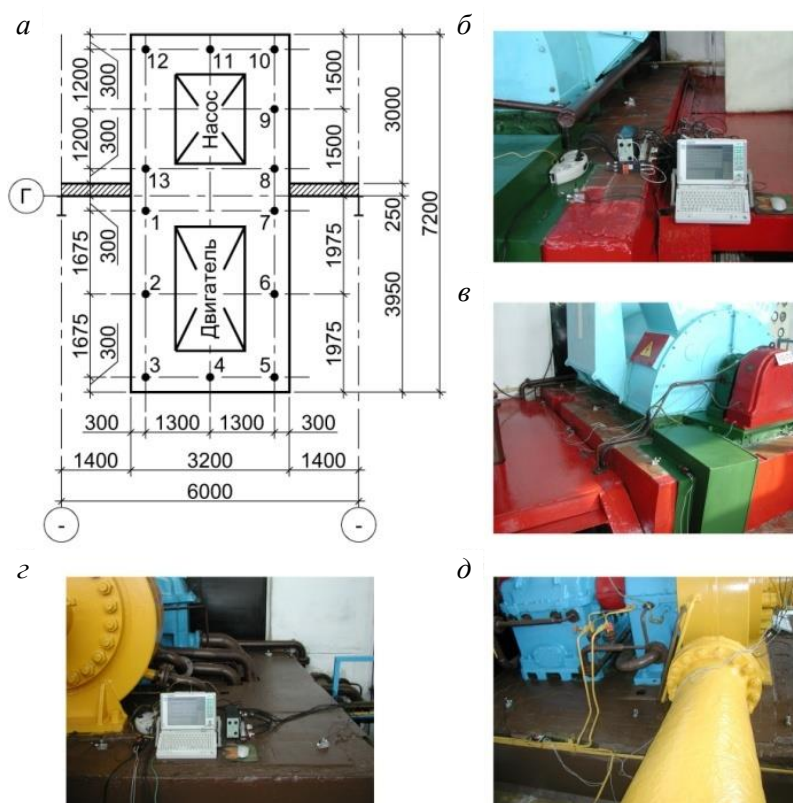


Рис. 4. Схема расположения датчиков ускорений (а), ИВК MIC-300 с акселерометрами, установленными на фундаменте в машинном (б, в) и насосном (з, д) залах

Для вычисления амплитудных значений горизонтальных (вертикальных) перемещений необходимо определить амплитудные значения горизонтальных (вертикальных) ускорений гармонических сигналов с угловыми частотами, соответствующими собственной частоте фундамента.

Для этого измеренный массив ускорений разлагается в ряд Фурье, и выделяется первая гармоническая составляющая. На основе выделенных частот вычисляются угловые частоты. На основе информации о собственных частотах колебаний фундаментов должны быть удалены гармонические составляющие с частотами, большими, чем собственная частота фундамента. Далее из преобразованных массивов определяются амплитудные значения ускорений, на основе которых рассчитываются амплитудные значения перемещений.

Для математической обработки сигналов акселерометров применена лицензионная программа обработки экспериментальных данных Winpro, входящая в комплект программного обеспечения ИВК МС-300.

На рис. 5 и 6 показаны фрагменты акселерограмм с полным и ограниченным спектром частот. На рис. 7 показан фрагмент виброграммы акселерометра 7.

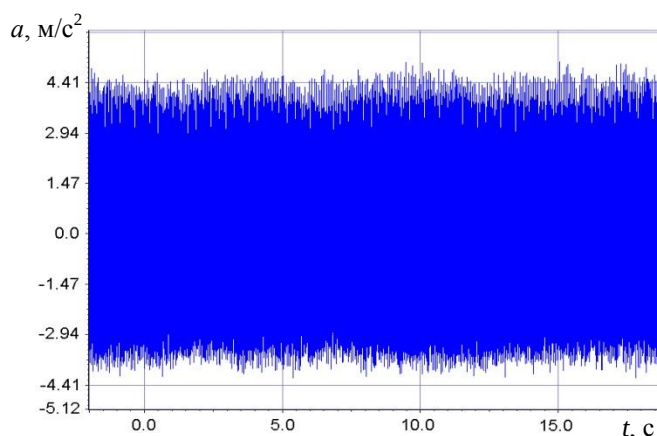


Рис. 5. Показания акселерометра 7 с неограниченным спектром частот

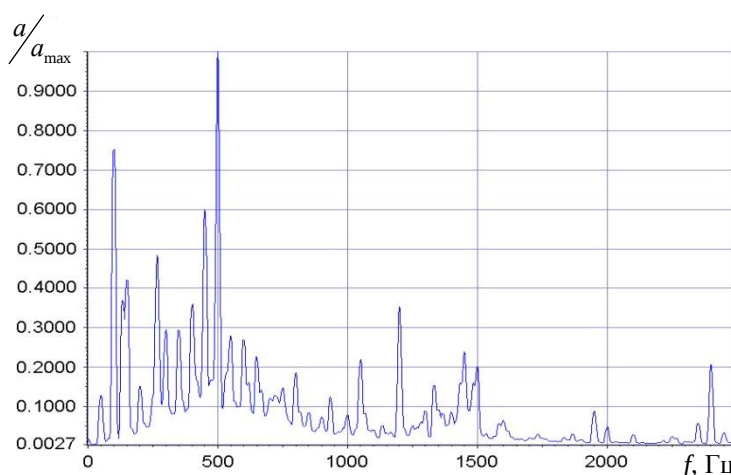


Рис. 6. Спектральный состав колебаний фундаментной плиты в диапазоне частот 0–2500 Гц

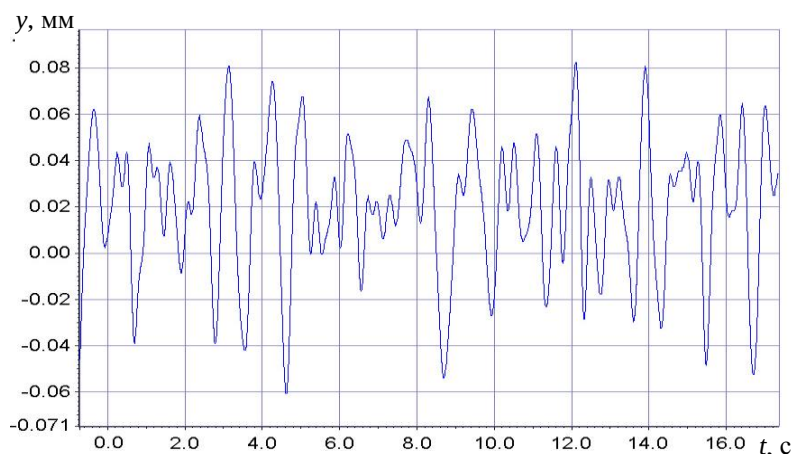


Рис. 7. Виброграмма перемещений фундаментной плиты по показаниям акселерометра 7

Специфика испытаний проявилась в повышенном уровне акустических, электромагнитных полей и выполнении мер, связанных с взрывобезопасностью проводимых работ.

Обработка опытных данных колебаний фундаментов под основное технологическое оборудование показала, что амплитуда горизонтальных колебаний тела фундаментов изменяется в пределах 0,011–0,213 мм, а амплитуда вертикальных колебаний – 0,01–0,02 мм. В соответствии с требованиями СНиП 2.02.05–87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» [5], предельно допустимая амплитуда горизонтальных колебаний составляет 0,05 мм, т. е. горизонтальные перемещения отдельных точек тела фундамента превышают предельно допустимые значения.

Таким образом, образовавшиеся вследствие низкой, по сравнению с проектной, прочностью бетона трещины привели к нарушению сплошности тела фундамента, о чем свидетельствуют чрезмерные перемещения отдельных точек фундамента в горизонтальном направлении. Для дальнейшей безопасной эксплуатации сооружения разработаны мероприятия по повышению монолитности тела фундаментов и удовлетворению требований нормативного документа [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *ГОСТ 31937–2011*. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Стандартинформ, 2014. – 54 с.
2. *СП 13-102–2003*. Свод правил. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений / Госстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 2003. – 40 с.
3. *СП 16.13330.2011*. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП-23–81* / Минрегион России – М. : ОАО «ЦПП», 2011. – 172 с.
4. *СП 63.13330.2012*. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. – М., 2012. – 162 с.
5. *СНиП 2.02.05–87*. Фундаменты машин с динамическими нагрузками / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988.
6. *Диагностика технического состояния строительных конструкций газокompрессорных станций газопровода Парабель – Кузбасс* / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Г.И. Одноко-

- пылов, О.Р. Пахмурин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – Условия доступа : <http://www.pamag.ru/prensa/repair-hp>
7. Кумпяк, О.Г. Эксплуатационная надежность железобетонного каркаса с дефектами стыков колонн / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, О.Р. Пахмурин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3. – 215 с.
 8. Кумпяк, О.Г. Восстановление эксплуатационной надежности железобетонного многоэтажного каркаса с дефектами стыков колонн / О.Г. Кумпяк, О.Р. Пахмурин, В.С. Самсонов // Будівельні конструкції : Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 74: в 2 кн. Кн. 2 / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва в Україні. – Київ : ДП НДІБК, 2011.
 9. Кумпяк, О.Г. Восстановление эксплуатационной надежности свайных фундаментов опор высоковольтных линий электропередачи эксплуатируемых в условиях Западной Сибири / О.Г. Кумпяк, О.Р. Пахмурин, В.С. Самсонов // Будівельні конструкції : Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 74: в 2 кн. Кн. 2 / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва в Україні. – Київ : ДП НДІБК, 2011.
 10. Серридж, М. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям / М. Серридж, Т.Р. Лихт. – Глюструн. Дания : К. Ларсен и сын, 1987. – 186 с.
 11. Пахмурин, О.Р. Влияние грунтов основания на работу каркаса / О.Р. Пахмурин, В.В. Татуйко // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. М.В. Темлянцева. – Новокузнецк, 2015. – С. 316–318.
 12. Пахмурин, О.Р. Вопросы оценки эксплуатационной надежности железобетонных каркасных зданий при их перепрофилировании / О.Р. Пахмурин, В.В. Щербенкова // Материалы I Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – С. 65–66.
 13. Пат. № 248535 (RU). F04B 51/00, G01M 15/12. Российская Федерация. Способ диагностики фундамента электропривода насосного агрегата / Г.И. Однокопылов, О.Г. Кумпяк, В.К. Букреев, И.Г. Однокопылов, З.Р. Галяутдинов, О.Р. Пахмурин. – № 2012115888 ; заявл. 19.04.2012 ; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.

REFERENCES

1. SNiP 31937–2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [Buildings. Inspection and monitoring rules for mechanical conditions]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 54 p. (rus)
2. SNiP 13-102–2003. Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzheniy [Rules for monitoring bearing structures of buildings]. Gosstroj Rossii. Moscow: GUP TsPP Publ., 2003. 40 p. (rus)
3. SNiP 16.13330.2011. Stal'nye konstruksii [Steel structures]. Minregion Rossii. Moscow: OAO TsPP Publ., 2011. 172 p. (rus)
4. SNiP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya [Concrete and reinforced concrete structures. Main principles]. Moscow., 2012. 162 p. (rus)
5. SNiP 2.02.05–87. Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami [Foundations of machines with live load]. Moscow: Gosstroy SSSR Publ., 1988. p. (rus)
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Odnokopylov G.I., Pakhmurin O.R. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksii gazokompressornykh stantsii gazoprovoda Parabel' – Kuzbass [Mechanical conditions of compressor station]. Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy. Available at: www.pamag.ru/prensa/repair-hp (rus)
7. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Pakhmurin O.R. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' zhelezobetonnoy karkasa s defektami stykov kolonn [Serviceability of reinforced concrete frame with joint defects of columns]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2014. No. 3. 215 p. (rus)

8. Kumpyak O.G., Pakhmurin O.R., Samsonov V.S. Vosstanovlenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti zhelezobetonного многоэтажного каркаса с дефектами стыков колонн [In-service reliability of reinforced concrete frame with defective joints of columns]. *Budivel'ni konstruksii: Mizhvidomchii naukovо-tekhnichnii zbrnik naukovykh prats' (budivnitstvo). Derzhavie pidpriemstvo «Derzhavnii naukovо-doslidnii institut budivel'nikh konstruksii» Ministerstva regional'nogo rozvitu ta budivnitstv v Ukraïni. Kiïv: DP NDIBK Publ., 2011. V. 74 in book 2. (rus)*
9. Kumpyak O.G., Pakhmurin O.R., Samsonov V.S. Vosstanovlenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti svainykh fundamentov opor vysokovol'tnykh liniï elektropredachi ekspluatiruemykh v usloviyakh Zapadnoi Sibiri [In-service reliability of high-tension line pole basements in West Siberia]. *Budivel'ni konstruksii: Mizhvidomchii naukovо-tekhnichnii zbrnik naukovykh prats' (budivnitstvo). Derzhavie pidpriemstvo «Derzhavnii naukovо-doslidnii institut budivel'nikh konstruksii» Ministerstva regional'nogo rozvitu ta budivnitstv v Ukraïni. Kiïv: DP NDIBK Publ., 2011. V. 74 in book 2. (rus)*
10. Serridge M., Llcht T.R. Spravochnik po p'ezoelektricheskim akselerometram i predusilitelyam [Accelerometers piezoelectric and vibration preamplifiers handbook]. Glostrup: K Larsen & Sen Publ., 1987. 186 p. (transl. from Dan.)
11. Pakhmurin O.R., Tatuiko V.V. Vliyanie gruntov osnovaniya na rabotu karkasa. *Proc. All-Rus. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Science and Youth: Problems, Search and Solutions'*. Novokuznetsk. 2015. Pp. 316–318 p. (rus)
12. Pakhmurin O.R., Shcherbenkova V.V. Voprosy otsenki ekspluatatsionnoi nadezhnosti zhelezobetonnykh karkasnykh zdaniï pri ikh pereprofilirovanii [In-service reliability of prefabricated buildings]. *Proc. 1st Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Tomsk: TSUAB Publ., 2014. Pp. 65–66. (rus)
13. Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Bukreev V.K., Odnokopylov I.G., Galyautdinov Z.R., Pakhmurin O.R. Sposob diagnostiki fundamenta elektroprivoda nasosnogo agregata [Diagnostics of electric drive base of unit pump]. *Pat. Rus. Fed. N 248535. 2013. (rus)*