

МЕТОД КОНТРОЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ ВИБРОЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

Сегодня основными методами контроля тепломассообменных газожидкостных процессов являются общепринятые измерения давления, скорости, уровня жидкости до или после аппарата, которые не дают информации о интенсивности процесса турбулизации или возникающих пульсаций. Кроме того, измеряемые величины не могут характеризовать возникающие пульсации, которые характеризует процесс тепломассообмена. Поэтому разработка универсального метода контроля возникающих эффектов в зоне контакта фаз является перспективным аспектом решения актуальной научной задачи контроля интенсификации тепломассообменных процессов в газожидкостных аппаратах.

При контактировании газа и жидкости ввиду одновременного появления колебаний давления, вызванных различными причинами и имеющих различные амплитудно-частотные характеристики, образуется сложная колебательная система со многими степенями свободы. Элементы структуры газожидкостной системы можно представить как несвязанные между собой резонаторы с различными собственными частотами колебаний. Основной задачей контроля интенсификации процессов в газожидкостных системах виброчастотным методом является измерение амплитудно-частотных характеристик колебаний.

В работе исследовали частоту колебаний пульсирующего в жидкости пузырька с целью оценки влияния волнового поля. Были определены кинематические и силовые характеристики волнового поля пузырька, пузырек выступал в роли сферического излучателя. Газовый пузырек был представлен в жидкости как колебательная система с сосредоточенными параметрами. Получено выражение для определения резонансной частоты такой системы.

Была разработана структурная схема автоматической системы контроля для реализации предложенного метода контроля эффективности тепломассообменного газожидкостного процесса путем измерения амплитудно-частотных характеристик среды внутри аппарата в сочетании с контролем основных параметров процесса. Апробация предложенной схемы прошла успешно.

Ключевые слова: виброчастотный метод, интенсификация процесса, тепломассообмен, частота, пузырек, пульсация.

O.Yu. OLIYNYK

State Higher Educational Institution «Ukrainian State Chemical Technology University»

CONTROL OF INTENSIFICATION OF THERMAL-ASSOCIATED GAS-LIQUID PROCESSES BY A VIBROCHASTIC METHOD

The main methods for controlling heat and mass exchange gas-liquid processes are generally accepted measurements of pressure, velocity, liquid level before or after the apparatus, which do not provide information on the intensity of the turbulence process or the resulting pulsations. In addition, the measured quantities can not characterize the arising pulsations that characterize the heat and mass transfer process. Therefore, the development of a universal method for controlling the arising effects in the phase contact zone is a promising aspect of the solution of the current scientific task of controlling the intensification of heat and mass exchange processes in gas-liquid vehicles.

When gas and liquid are contacted due to the simultaneous occurrence of pressure fluctuations caused by different causes and having different amplitude-frequency characteristics, a complex oscillatory system with many degrees of freedom is formed. Elements of the structure of the gas-liquid system can be represented as unconnected resonators with different natural frequencies of oscillations. The main task of controlling the intensification of processes in gas-liquid systems by a vibro-frequency method is to measure the amplitude-frequency characteristics of the oscillations.

The frequency of vibrations of a bubble pulsating in a liquid was investigated in order to evaluate the influence of the wave field. The kinematic and force characteristics of the bubble wave field were determined, the bubble acted as a spherical radiator. The gas bubble was represented in the liquid as an oscillating system with lumped parameters. An expression is obtained for determining the resonance frequency of such a system.

A block diagram of the automatic control system was developed to implement the proposed method for monitoring the efficiency of the heat-mass-internal gas-liquid process by measuring the amplitude-frequency characteristics of the medium inside the apparatus in combination with monitoring the main process parameters. Approbation of the proposed scheme was successful.

Key words: vibration frequency method, process intensification, heat and mass transfer, frequency, bubble, pulsation..

Введение

Скорость тепломассообменных процессов определяется интенсивностью переноса вещества и энергии. Известно, что наложение колебаний извне в некоторых областях частот, соответствующих собственной частоте колебаний элементов структуры, приводит к интенсификации процесса переноса [1]. Одним из наиболее часто применяемых способов интенсификации таких технологических процессов является турбулизация контактирующих фаз на поверхности их раздела [2]. В настоящее время предложены и исследованы разнообразные методы интенсификации тепломассообмена. Для этой цели широко используются турбулизаторы потока на поверхности, закрутка потока завихрителями, установленными на входе в аппараты, подмешивание к потоку жидкости газовых пузырей, вращение или вибрация поверхности тепломассообмена, воздействие на поток электростатических, магнитных полей [3].

Одновременно с этим, несмотря, на актуальность проблемы интенсификации тепломассообмена в газожидкостных аппаратах, в литературе практически не рассмотрен вопрос контроля процессов турбулизации. В турбулентном потоке элементарные струи изменяют скорость и направление, в связи с чем в каждой точке объема происходит пульсация скорости [4]. Существует много подходов к оценке и контролю интенсивности массообменных процессов внутри аппаратов. Большинство известных методов сводится к контролю косвенных параметров процесса: измерению расхода и температуры на входе и выходе аппарата, скорости потоков жидкости и газа [5]. По данным [6] для контроля тепломассообменного процесса нагрева жидкости измеряли давление пара перед рабочим участком аппарата, скорость потока. Затем расчетным путем определяли эффективность работы.

Главным недостатком описанных методов контроля тепломассообменных процессов является то, что общепринятые измерения давления, скорости, уровня жидкости до или после аппарата не дают информации о интенсивности процесса турбулизации. Размещение датчиков в аппарате не всегда невозможно из-за эрозионного действия на измерительные преобразователи [7]. Кроме того, измеряемые величины не могут характеризовать возникающие пульсации, которые характеризует процесс тепломассообмена.

Вместе с тем, максимальный эффект от воздействия турбулизации и собственных колебаний среды возникает при достижении эффекта резонанса [8]. Однако на сегодняшний день данные о методах контроля резонансных частот в газо-жидкостных аппаратах отсутствуют. Нет достаточно универсальной методики и оборудования, хотя известно большое количество вибращастотных датчиков, которые успешно применяются в частных случаях [9].

Таким образом, разработка универсального метода контроля возникающих эффектов в зоне контакта фаз является перспективным аспектом решения актуальной научной задачи контроля интенсификации тепломассообменных процессов в газожидкостных аппаратах.

Анализ последних публикаций и постановка проблемы

Энергия газовых струй в газожидкостном слое преобразуется в кинетическую энергию пульсаций и потенциальную энергию поверхностного натяжения, которые, в свою очередь, могут переходить друг в друга.

Амплитудно-частотные характеристики колебаний в газожидкостном слое определяются многими факторами: конструкцией распределителей газа, частотой отрыва пузырей и их размером, скоростью контактирующих фаз и их физико-химическими свойствами, давлением, температурой и др. Максимальный эффект интенсивности воздействия на тепломассообменный процесс реализуется при совпадении частот налагаемых из вне и собственных колебаний среды или элементов структуры слоя, т.е. когда наступает резонанс [10].

Известно, что локальные гидродинамические параметры газожидкостного слоя изменяются по его высоте случайным образом, причем средняя частота пульсаций газосодержания, скорости газовой фазы, статистического давления и т. п. лежит в пределах $1-15 \text{ с}^{-1}$. Изучению вопроса о влиянии пульсаций контактирующих фаз на эффективность процессов тепломассообмена в газожидкостном слое посвящено значительное количество исследований [11]. Однако в настоящее время практически отсутствуют сведения о методах контроля возникающих пульсаций или эффектов турбулентности в газожидкостных промышленных массообменных аппаратах или реакторах. Затруднения в практической реализации методов контроля могут быть связаны с возникающими сложностями при получении соотношения для оптимальной формы продольных и поперечных колебаний резонатора, при которой достигается максимальная чувствительность к контролируемому параметру, соотношения сигнал/шум, характеристики измерительного преобразователя частоты колебаний резонатора [8].

Таким образом, при контактировании газа и жидкости ввиду одновременного появления колебаний давления, вызванных различными причинами и имеющих различные амплитудно-частотные характеристики, образуется сложная колебательная система со многими степенями свободы. Элементы структуры газожидкостной системы можно представить как несвязанные между собой резонаторы с различными собственными частотами колебаний. Тогда основная задача контроля интенсификации процессов в газожидкостных системах вибращастотным методом сводится амплитудно-частотных характеристик колебаний.

Цель и задачи исследования

Цель данной работы: разработать метод контроля интенсификации тепломассообменных газожидкостных процессов вибращастотным методом. Для достижения поставленной цели в задаче необходимо решить следующие задачи:

обосновать возможность использования амплитудно-частотные характеристики контактирующих фаз для контроля интенсификации тепломассообменных газожидкостных процессов вибращастотным методом;

разработать структурную схему автоматической системы контроля и управления аппаратом с тепломассообменным газожидкостным процессом.

Контроль колебаний контактирующих фаз в тепломассообменных газожидкостных процессах

Газожидкостной слой в аппарате представляет собой совокупность пузырьков, ячеек, струй, вихрей различных размеров. При этом на интенсивность тепломассообменного процесса могут влиять параметры пульсации газовой фазы, размер пузырьков, частота их собственных колебаний, количество поглощенной энергии и, количество жидкости внутри пузырьков, оказывающее существенное влияние на скорость распределения звука и частоту собственных колебаний.

При контакте газа и жидкости возникают амплитудно-частотные колебания контактирующих фаз, которые связаны со скоростью газового потока, нестабильностью межфазной поверхности, волнообразованием газожидкостного слоя. Это способствует возникновению межфазовой турбулентности и турбулентной пульсации поверхности раздела контактирующих фаз. В результате энергия газового потока в газожидкостном слое трансформируется в кинетическую энергию пульсаций и потенциальную энергию поверхностного натяжения. При этом они взаимно переходят друг в друга [12].

Максимальный эффект процесса происходит при совпадении налагаемых частот и собственных колебаний элементов структуры газожидкостного слоя, т.е. с возникновением резонанса.

В работе исследовали частоту колебаний пульсирующего в жидкости пузырька с целью оценки влияния волнового поля. Для этого определяли кинематические и силовые характеристики волнового поля пузырька, при этом пузырек выступал в роли сферического излучателя. Если представить пузырек в виде пульсирующей сферы, все точки которой колеблются по следующему закону [10]:

$$V_n(\tau) = \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = V_0(i\omega\tau), \quad (1)$$

где $V_n(\tau)$ – скорость колебания точек по нормали к поверхности сферы, Φ – потенциал скорости, $\omega=2\pi f$ – циклическая частота.

Воспользовавшись известными [13] связями потенциалами скорости Φ с уравнением гидродинамики линейного приближения, можно получить радиальную составляющую скорости частиц жидкости:

$$V = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{1}{r^2} [A(1+ikr)e^{i(\omega\tau-kr)} + B(1-ikr)e^{i(\omega\tau+kr)}], \quad (2)$$

и волнового давления:

$$P = i\omega\rho\Phi,$$

$$P = \frac{i\omega\rho}{r} [A \exp(-ikr) + B \exp(ikr)] e^{i\omega\tau}, \quad (3)$$

где $k=\omega/c$ – волновое число.

Коэффициенты А и В в уравнении (2) определяли по следующим соображениям. Из условий излучения $\Phi_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0$ следует, что В=0. С учетом (1) при $r=a$ получим выражение для А:

$$A = V_0 a^2 / (1 + ika). \quad (4)$$

Подставляя выражения (4) и (3) для А и В в (2), определим, что для волнового поля пульсирующей сферы:

$$\Phi = \frac{1}{r} \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \quad (5)$$

$$V = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \frac{1 + ikr}{r^2} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \quad (6)$$

$$P = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \rho \frac{i\omega}{r} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \quad (7)$$

при:

$$r_1 = r - a. \quad (8)$$

Имея кинематические и силовые характеристики волнового поля, определим активную и реактивную составляющие механического импеданса колебательной системы пузырек газа - жидкость с учетом присоединенной к пузырьку массы жидкости [14]. Исходя из [14], присоединенная к пульсирующей сфере масса жидкости будет равна:

$$M = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\rho c 4\pi a^2}{\omega} \frac{ka}{1 + k + a^2} = \frac{4\pi a^3 \rho}{1 + k^2 a^2} = \frac{3M_0}{1 + k^2 a^2}, \quad (9)$$

где M_0 – масса жидкости в объеме шара радиуса a .

Для низких частот $K \rightarrow 0$ и $M \rightarrow 3M_0 = 4\pi a^3 \rho_{ж}$; т. е. получаем известное [15] утверждение о том, что масса жидкости, присоединенная к пульсирующему пузырьку газа, численно равна утроенной массе

жидкости, вытесненной этим пузырьком.

Представив газовый пузырек в жидкости как колебательную систему с сосредоточенными параметрами, резонансную частоту такой системы можно определить по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(m + m_s)C_s}}, \quad (10)$$

где m_s – эквивалентная масса; C_s – эквивалентная упругость; M – присоединенная масса. Поскольку $m_s \ll M$, то в качестве основного инерционного элемента выступает присоединенная масса. Определив эквивалентную упругость системы пузырек – жидкость как отношение изменения радиуса к общей сжимающей силе, получим:

$$\omega_0 = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3\rho_s C_s^2}{\rho_{ж}}}, \quad (11)$$

Переходя от круговой частоты к линейной, с учетом: $\chi_s = \rho_s C_s^2$, получим зависимость:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\chi}{\rho_{ж}}} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\rho_s C_s^2}{\rho_{ж}}}, \quad (12)$$

Следовательно, эффект интенсификации процессов может быть оценен путем измерения частоты колебаний среды.

Разработанная структурная схема (рис.1) реализует предложенный метод контроля эффективности тепломассообменного газожидкостного процесса путем измерения амплитудно-частотных характеристик среды внутри аппарата в сочетании с контролем основных параметров процесса.

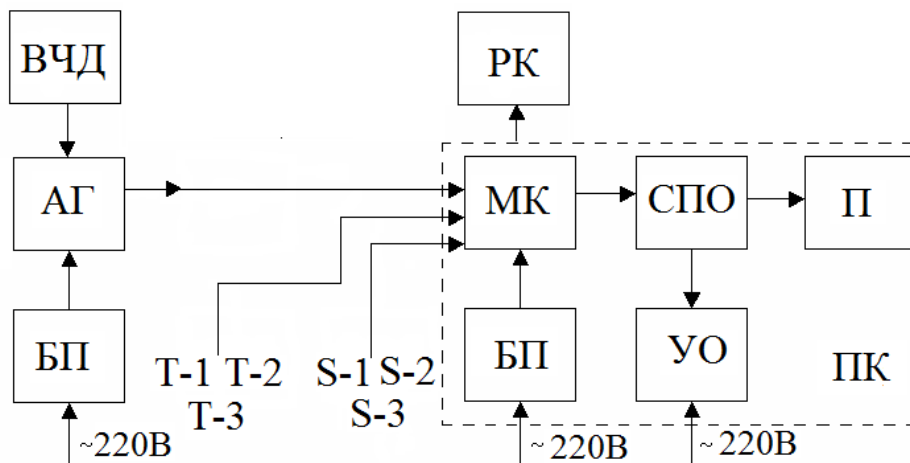


Рис.1 Структурная схема разработанной автоматической системы контроля и управления аппаратом с тепломассообменным газожидкостным процессом, где ВЧД – вибро-частотный датчик; АГ – автогенератор; БП – блок питания; МК – микроконтроллер; СПО – специализированное программное обеспечение, П – память; УО – устройство отображения информации; Т-1, Т-2, Т-3, S-1, S-2, S-3 – датчики температуры; РК – регулирующий клапан.

Предлагается оснастить аппарат блоком управления (МК), обеспечивающим возможность ряда пользовательских настроек, например, как контроль максимальной температуры на выходе аппарата, или определение средней эффективности работы аппарата.

Для измерения частоты сигнала вибродатчика и коррекции дополнительных погрешностей резонаторных и температурных преобразователей было разработано специализированное программное обеспечение в среде Lab-VIEW. Программное обеспечение представляет собой частотомер, выполненный на базе аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера, фильтрация сигналов осуществляется программно с использованием программной среды Python [16].

Выводы

В работе предложен метод контроля интенсификации тепломассообменных газожидкостных процессов вибродатчиком. Описанный метод позволяет использования амплитудно-частотные характеристики контактирующих фаз для контроля интенсификации тепломассообменных газожидкостных процессов вибродатчиком. Главным достоинством метода является отсутствие необходимости обработки большого массива результатов измерений косвенных характеристик процесса и получение расчетным путем расчетного значения эффективности процесса.

Предложенная структурная схема автоматической системы контроля и управления тепломассобменным газожидкостным процессом была реализована при автоматизации кавитационного теплогенератора. Апробация предложенного метода контроля интенсификации тепломассообменного процесса выполнена при автоматизации процесса кавитации в тепловой схеме для децентрализованного теплоснабжения в условиях ООО «Укравиа» (г. Павлоград, Украина) [17].

Литература

1. Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, –2012. – 195 с.
2. Кузма-Китча, Ю. А. Методы интенсификации теплообмена. – М.: Изд-во МЭИ. – 2001. – 112 с.
3. Ибрагимов У. Х., Шамуратова С. М., Рахмонов Б. А. Интенсификация теплообмена в каналах, Молодой ученый. – 2016. – №8. – С. 225– 229.
4. Rudolf P. D, Kubina J., Kozák B., Maršálek E., Maršálková F. Pochylý Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries [Text] / P. Rudolf, // EPJ Web of Conferences. – 2017. Vol.143:02098. doi 10.1051/epjconf/201714302098
5. Shuji Hattori, Takuya Hirose, Kenichi Sugiyama Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads, Wear. –2010.– P.507-514.
6. Živný M., Martin M., Unger J., Zima P., Müller M.. Design of experimental setup for investigation of cavitation bubble collapse close to a solid wall [Text] / // EPJ Web of Conferences. –2012. Vol.25:02017 doi10.1051/epjconf/20122502017
7. Mardiana A., Riffat S.B. Review on Physical and Performance Parameters of Heat, Recovery Systems for Building Applications. Renew. a. Sust. Energy Rev.–2013. Vol. 28. –P.174–190
8. Oliynyk O., Taranenko Yu., Shvachka A., Chorna O. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator , Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol.85. – P. 56-60. doi.org/10.15587/1729–4061.2017.93335
9. Han Yan, Wen-Ming Zhang, Hui-Ming Jiang, Kai-Ming Hu Pull-In Effect of Suspended Microchannel Resonator Sensor Subjected to Electrostatic Actuation, Sensors. – 2017. – Vol. 17(1), – P. 114; doi: 10.3390/s17010114
10. Никольский В. Е. Интенсификация тепломассообменных процессов в аппаратах погружного горения колебаниями контактирующих фаз, ScienceRise. – 2015. – Т. 7. – №. 2 (12).
11. Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, –2012. – 195 с.
12. Прокофьев В. В. О возникновении автоколебаний в струйной завесе, разделяющей области с различным давлением, Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 1062–1064.
13. Савченко Ю. Н., Савченко Г. Ю. Пристеночная кавитация на вертикальной стенке, Прикладна гідромеханіка. –2006. –Т. 8, N 4. –С. 53 – 59
14. Song X., Li G., Yuan J., Tian Z., Shen R., Yuan G., Z. Huang Mechanisms and field test of solution mining by self-resonating cavitating water jets, Petroleum Science.–2010, –V. 7, –Is. 3, – P385–389.
15. Шкапов П. М. Создание пульсирующих потоков жидкости на основе автоколебаний ограниченной искусственной газовой каверны, Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 9. – С. 55–58.
16. Олійник О.Ю., Тараненко. Модель Фур'є-фільтрації вихідних аналогових сигналів частотних датчиків, Технологія приборостроєння.– 2017. –Т.№2.– С.21-24.
17. Nikolsky V., Oliynyk O., Lipeev O., Ved V. Examining a cavitation heat generation and the control method over the efficiency of its operation, Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol.4. N.8(88).– P.22-28.

References

1. Dul'nev G. N. Teoriya teplo- i massoobmena. - SPb: NIU ITMO, -2012. - 195 s.
2. Kuzma-Kitcha, YU. A. Metody intensifikatsii teploobmena.- M.: Izd-vo MEI.- 2001. - 112 s.
3. Ibragimov U. KH., Shamuratova S. M., Rakhmonov B. A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh, Molodoy uchenyy. - 2016. - №8. -S. 225-229.
4. Rudolf P. D, Kubina J., Kozák B., Maršálek E., Maršálková F. Pochylý Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries [Text] / P. Rudolf, // EPJ Web of Conferences.– 2017. Vol.143:02098. doi 10.1051/epjconf/201714302098
5. Shuji Hattori, Takuya Hirose, Kenichi Sugiyama Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads, Wear. –2010.– P.507-514.
6. Živný M., Martin M., Unger J., Zima P., Müller M.. Design of experimental setup for investigation of cavitation bubble collapse close to a solid wall [Text] / // EPJ Web of Conferences. –2012. Vol.25:02017 doi10.1051/epjconf/20122502017

7. Mardiana A., Riffat S.B. Review on Physical and Performance Parameters of Heat, Recovery Systems for Building Applications. *Renew. a. Sust. Energy Rev.* –2013. Vol. 28. –P.174–190
8. Oliynyk O., Taranenko Yu., Shvachka A., Chorna O. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator, *Eastern-European journal of enterprise technologies.* – 2017. – Vol.85. – P. 56-60. doi.org/10.15587/1729–4061.2017.93335
9. Han Yan, Wen-Ming Zhang, Hui-Ming Jiang, Kai-Ming Hu Pull-In Effect of Suspended Microchannel Resonator Sensor Subjected to Electrostatic Actuation, *Sensors.* – 2017. – Vol. 17(1), – P. 114; doi: 10.3390/s17010114
10. Nikol'skiy V. Ye. Intensifikatsiya teplomassoobmennyykh protsessov v apparatakh pogruzhnogo gorennya kolebaniyami kontaktiruyushchikh faz, *ScienceRise.* – 2015. – T. 7. – №. 2 (12).
11. Dul'nev G. N. Teoriya teplo- i massoobmena.– SPb: NIU ITMO, –2012. – 195 s.
12. Prokof'yev V. V. O vznikenii avtokolebaniy v struynoy zavese, razdelyayushchey oblasti s razlichnym davleniyem, *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo.* – 2011. – № 4 (3). – S. 1062–1064
13. Savchenko YU. N., Savchenko G. YU. Pristenoch'naya kavitatsiya na vertikal'noy stenke, *Prikladna gidromekhanika.* –2006. –T. 8, N 4. –S. 53 – 59
14. Song X., , Li G., Yuan J., Tian Z., , Shen R., Yuan G., Z. Huang Mechanisms and field test of solution mining by self-resonating cavitating water jets, *Petroleum Science.*–2010, –V. 7, –Is. 3,– P385–389.
15. Shkapov P. M. Sozdaniye pul'siruyushchikh potokov zhidkosti na osnove avtokolebaniy ogranichennoy iskusstvennoy gazovoy kaverny, *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya.* – 2010. – № 9. – S. 55–58.
16. Oliynyk O.YU, Taranenko. Model' Fur'ê–fil'tratsii vikhidnykh analogovykh signaliv chastotnykh datchikov, *Tekhnologiya priborostroyeniya.*– 2017. –T.№2.– S.21-24.
17. Nikolsky V., Oliynyk O., Lipee O., Ved V. Examining a cavitation heat generation and the control method over the efficiency of its operation, *Eastern-European journal of enterprise technologies.* – 2017. – Vol.4. N.8(88).– P.22-28.

Рецензія/Peer review : 15.1.2018 р.

Надрукована/Printed :7.4.2018 р.
Рецензент :