

струкцій методом virtual'nogo ob'ekta. Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovaniyah. Odessa: OGPU, 16–17.

14. Balan, S. A., Stanovskaja, T. P., Goncharova, O. E. (2000). Primenenie metoda virtual'nogo ob'ekta v mashinostroenii. Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovaniyah. Odessa: OGPU, 12–16.

15. Balan, S. A., Stanovskaja, T. P., Oparin, A. V. (2000). Metod virtual'nogo ob'ekta v upravlenii tormoznymi sistemami s vnutrennej vibrozashhitoj. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2 (11), 29–32.

16. Balan, S. A., Stanovskaja, T. P., Goncharova, O. E. (2000). Metod virtual'nogo ob'ekta v proektirovanii. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 1 (10), 32–35.

17. Savel'eva, O. S., Purich, D. A., Stanovskij, A. A. (2011). K ocenke nadezhnosti seti datchikov s rezervirovaniem. Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovaniyah. Odessa: ONPU, 65–68.

18. Loskutov, A. Ju., Mihajlov, A. S. (2007). Osnovy teorii slozhnyh sistem. Moscow – Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i stohasticheskaja dinamika», 612.

19. Zhilin, D. M. (2004). Teoriya sistem. Moscow: URSS, 183.

20. Balan, S. A., Maksimov, V. G., Stanovskaja, T. P. (1999). Avtomatizirovannaja sistema upravlenija tormozheniem avtotransportnyh sredstv. Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2 (8), 95–97.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Становський О. Л.  
Дата надходження рукопису 19.04.2016*

**Становський Андрій Олександрович**, кафедра комп'ютерних інтелектуальних систем і мереж, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: redline@normaplus.ua

**Торопенко Алла Володимирівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: alla.androsyk@gmail.com

**Налева Галина Василівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра вищої математики, Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029  
E-mail: naleva\_gv@mail.ru

**Панова Тетяна Миколаївна**, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: a-ost@te.net.ua

**Кошулян Сергій Вікторович**, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: koshulyan@gmail.com

**Хуссайн Валід Шер**, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: walidsher@hotmail.com

УДК 66.021

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69075

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ГАЗСОДЕРЖАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЛОЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТАРЕЛОК ПРОВАЛЬНОГО ТИПА

© Г. В. Тараненко

*Проведены измерения локального газосодержания на тарелке провального типа для режима однородного барботажного слоя и режима подвижного газожидкостного слоя кондуктометрическим способом. Определены фрактальные размерности графиков зависимости локального газосодержания от высоты установки датчика от плато тарелки. Установлено наличие аттрактора гидравлического сопротивления тарелки для режима подвижного газожидкостного слоя*

**Ключевые слова:** датчик, газосодержание, сопротивление, локальный, измерение, режим, параметры, фрактал, аттрактор, бифуркация

*Measurements of local gas content on the dual-flow plate for the regime of uniform bubble bed and regime of movable gas-liquid layer by conductometric method were conducted. The fractal dimension of the plots of the local gas content of the height sensor was determined. Presence the attractor of the hydraulic resistance of plate for the regime of the movable gas-liquid layer was determined*

**Keywords:** sensor, gas content, resistance, local, measuring, regime, parameters, fractal, attractor, bifurcation

**1. Введение**

Массообменные тарелки провального типа без переливных устройств достаточно широко распространены в химической промышленности. К преимуществам этих тарелок относятся высокая производительность и достаточная эффективность работы, простота конструкции, низкая стоимость изготовления, монтажа и эксплуатации. Кроме этого, тарелки провального типа могут работать длительное время с загрязненными потоками жидкости и газа без забивки отверстий. Для этого используются тарелки с большим диаметром отверстий [1–3].

В содовом производстве [1] были использованы дырчатые тарелки провального типа с отверстиями диаметром  $d_0=0,09-0,14$  м и свободным сечением  $f=0,2-0,4$ . Диаметр колонны составлял  $D_k=3,0$  м. В коксовом производстве [2] использовались тарелки провального типа со свободным сечением  $f=0,3$  и диаметром отверстий  $d_0=0,07$  м. Диаметр колонны составлял  $D_k=5,0$  м. В работе [3] рассматривалось использование крупнодырчатых тарелок провального типа в пенных аппаратах для очистки газа от пыли. Отмечается, если для барботажного аппарата типичные отверстия в тарелках диаметром  $d_0=0,001-0,008$  м при свободном сечении  $f=0,02-0,10$ , то для пенного промышленного аппарата с тарелками провального типа, диаметр отверстий составляет  $d_0=0,05-0,1$  м, а свободное сечение достигает  $f=0,7$ . Из приведенного выше можно сделать вывод, что тарелки провального типа с успехом применяются в аппаратах большой единичной мощности. Наблюдается тенденция использования тарелок провального типа большого свободного сечения с отверстиями большого диаметра. Главным недостатком тарелок провального типа является необходимость точного регулирования заданных расходов взаимодействующих фаз и узкий диапазон эффективной работы тарелок.

Это предъявляет повышенные требования к гидравлическому расчету таких тарелок. Поэтому, совершенствование методики расчета тарелок провального типа является актуальной задачей.

**2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Расчету тарелок провального типа посвящены работы [4, 5].

В работе [4] рассматривается гидродинамика тарелок провального типа, линейная скорость газа (пара) и интервал устойчивой работы тарелок провального типа.

На рис. 1. представлена характерная зависимость гидравлического сопротивления орошаемых тарелок провального типа от скорости газа в сечении колонны при постоянных расходах жидкости.

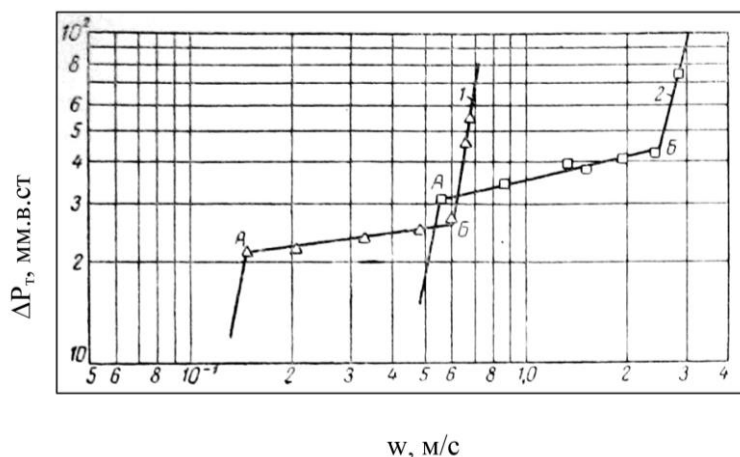


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления тарелок провального типа,  $\Delta P_T$ , от скорости газа в сечении колонны,  $w$ : 1 – система: вода – воздух;  $L=10800$  кг/м<sup>2</sup>·час,  $D_k=0,24$  м,  $f=0,15$ ; 2 – система: миш'яково-содовый раствор – коксовый газ;  $L=18000$  кг/м<sup>2</sup>·час,  $D_k=0,075$  м,  $f=0,3$

Из рис. 1 видно, что при изменении скорости газа на тарелках провального типа можно выявить несколько гидродинамических режимов работы тарелок, которые характеризуются критическими точками А и Б.

В работе [6] были проведены гидравлические исследования работы тарелок провального типа в широком диапазоне изменения свободного сечения тарелок от  $f=0,16$  до  $0,36$  на колоннах разного диаметра  $D=0,057, 0,15, 0,4$  и  $2,0$  м. Диаметр отверстий тарелок в колонне  $D=0,057$  м составлял  $d_0=0,005$  м. В остальных колоннах –  $d_0=0,012$  м. Нагрузки по жидкости изменялись в пределах  $L=4-150 \frac{м^3}{м^2 \cdot час}$ , скорость газа в сечении колонны достигала  $w=4$  м/с.

Было установлено три гидродинамических режима работы тарелок провального типа:

- режим однородного барботажного слоя;
- режим подвижного газожидкостного слоя;
- режим разрушения газожидкостного слоя.

Режим равномерного барботажа характеризуется однородной по всем направлениям структурой ячеистой пены, горизонтальной свободной поверхностью барботажного слоя, высота которой не изменяется во времени для одних и тех же скоростей газовой и жидкой фаз. Это говорит о том, что в барботажном слое силы тяжести превышают силы инерции жидкости.

При высоте барботажного слоя  $H_n=0,08-0,1$  м наступает режим подвижного газожидкостного слоя, который характеризуется отсутствием структурированной ячеистой пены, криволинейной свободной поверхностью слоя. Локальные высоты свободной поверхности газожидкостного слоя изменяются во времени, имеют амплитуду и частоту для одних и тех же скоростей газовой и жидкой фазы. Таким образом, режим подвижного газожидкостного слоя наступает в точке бифуркации барботажного слоя.

Режим разрушения газожидкостного слоя характеризуется разрушением газожидкостного слоя.

В работе делаются следующие выводы:

- максимальная эффективность тарелок провального типа достигается при режиме подвижного газожидкостного слоя;

– режим подвижного газожидкостного слоя начинается при высоте слоя  $H_n=0,08-0,1$  м для всех исследованных тарелок провального типа и нагрузок по газу и жидкости;

– начало максимальной эффективной работы тарелок провального типа необходимо считать тогда, когда наступает режим подвижного газожидкостного слоя.

Для создания методики гидравлического расчета тарелок провального типа необходимо более детально изучить особенности режимов работы, которые возникают на тарелках. Гидравлический расчет включает такие параметры, как гидравлическое сопротивление тарелок,  $\Delta p$ , диапазон эффективной работы, высоту светлой жидкости на тарелке, высоту газожидкостного слоя, а также его газосодержание.

Среднее газосодержание,  $\phi_{cp}$ , рассчитывается, работа [7], по формуле:

$$\phi_{cp} = 1 - \frac{h_0}{H_n}, \quad (1)$$

где  $h_0$  – высота светлой жидкости на тарелке, м;  $H_n$  – высота газожидкостного слоя, м.

Особенности гидродинамических режимов тарелок провального типа наиболее полно можно изучить, если провести измерения локальных значений газосодержания газожидкостного слоя,  $\phi$ , на тарелках. Методика измерения локальных значения газосодержания газожидкостного слоя кондуктометрическим способом опубликована в работе [8].

### 3. Цель исследования

Исследование локальных значений газосодержания в газожидкостном слое на тарелке провального типа кондуктометрическим способом. Необходимо установить особенности различных режимов работы тарелок провального типа.

### 4. Оборудование и методы исследований

Измерение локальных значений газосодержания проводили по методике, описанной в работе [8].

Датчик для измерения локального газосодержания показан на рис. 2.

Локальные значения газосодержания измеряли на тарелке провального типа, установленной в колонне с диаметром  $D_k=0,24$  м. Свободное сечение

тарелки составляло  $f=0,1025$ , диаметр отверстий  $d_0=0,004$  м, толщина тарелки –  $\delta=0,004$  м.

Измерения проводили для режима однородного барботажного слоя и режима подвижного газожидкостного слоя.

### 5. Результаты исследования

На рис. 3 показан график зависимости локального газосодержания от высоты установки датчика от плато тарелки при скорости газа в сечении колонны,  $w=0,289$  м/с и плотности орошения,  $L=8,64 \frac{M^3}{M^2 \text{ час}}$ .

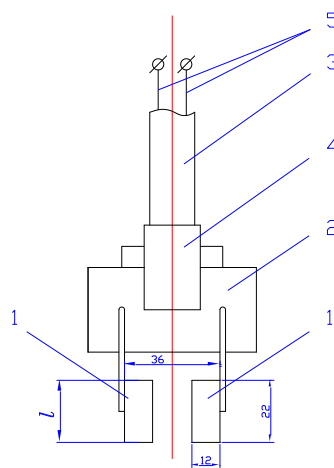


Рис. 2. Датчик измерения локальных значений газосодержания: 1 – пластины; 2 – планка; 3 – штанга; 4 – муфта; 5 – электропровод

На рис. 4 показан график зависимости локального газосодержания от высоты установки датчика от плато тарелки при скорости газа в сечении колонны,  $w=0,491$  м/с, и плотности орошения жидкости,

$$L=8,64 \frac{M^3}{M^2 \text{ час}}$$

Из рис. 3, 4 видно, что характер изменения кривых на обоих графиках значительно отличается один от другого. Подобные кривые можно охарактеризовать фрактальными размерностями  $D$  [9]. Были определены фрактальные размерности Минковского обеих кривых по методике, понятной из работы [9].

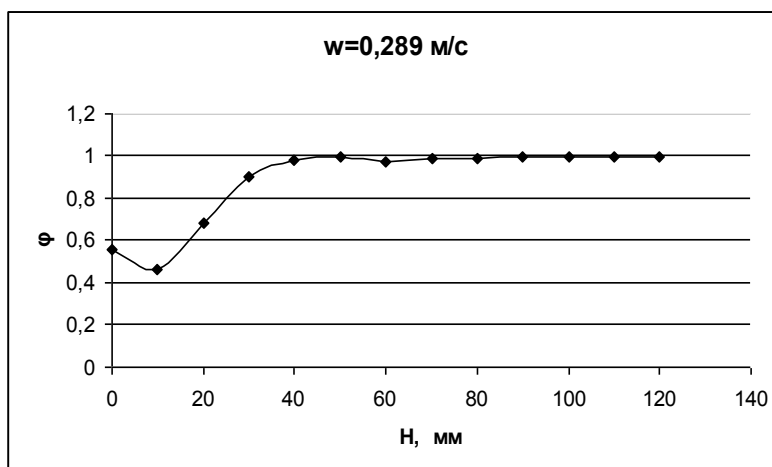
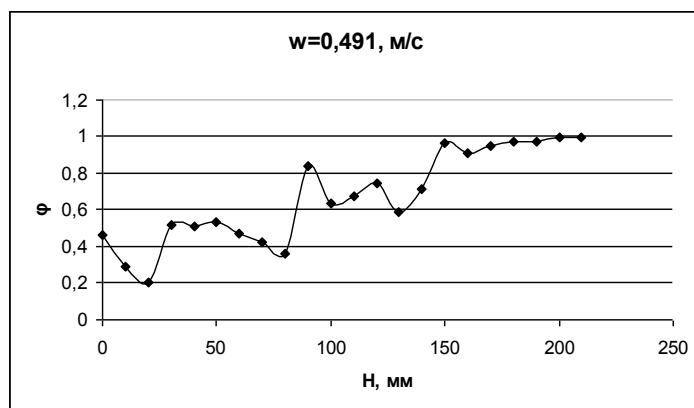


Рис. 3. Зависимость локальных значений газосодержания,  $\phi$ , от высоты установки датчика,  $H$

Рис. 4. Зависимость локальных значений газосодержания  $\phi$  от высоты установки датчика, Н

Фрактальная размерность для кривой (рис. 3) оказалась равной  $D=1$ , т. е. эта кривая, спрямляемая, и не является фракталом.

Фрактальная размерность для кривой (рис. 4) оказалась равной  $D=1,14$ , т. е. эта кривая является фракталом.

В работе [9] фракталы связываются с турбулентностью. Утверждается, что полностью развитая турбулентность имеет фрактал с размерностью  $D>2$ . Можно сделать вывод, что в режиме барботажного слоя, турбулентность полностью отсутствует, а в режиме подвижного газожидкостного слоя проявляется его турбулентность и, следовательно, пульсационное изменение параметров газожидкостного слоя [10] таких, как высота столба светлой жидкости, высота газожидкостного слоя, его газосодержание.

В случае возникновения пульсаций в динамических системах, какой является газожидкостной слой на тарелках провального типа, в них возникают аттракторы [6]. Аттракторы, в свою очередь, связаны с фракталами [9].

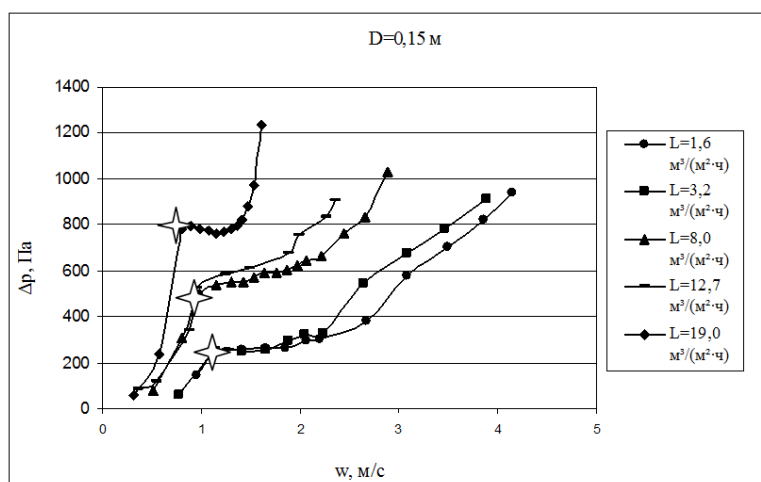
Если рассматривать такой параметр, как высота светлой жидкости, то он связан с одной стороны с газосодержанием, уравнение (1), с другой стороны с гидравлическим сопротивлением тарелок провального типа [7, 11].

Гидравлическое сопротивление тарелки складывается из гидравлического сопротивления сухой тарелки, гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке и гидравлического сопротивления обусловленного силами поверхностного натяжения. Высота светлой жидкости связана с гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на массообменной тарелке.

В работе [6] приведен график зависимости гидравлического сопротивления тарелок провального типа от скорости газа в сечении колонны для различных плотностей орошения жидкости (рис. 5).

Из графиков видно, что для различных плотностей орошения, гидравлическое сопротивление практически не зависит от скорости газа в сечении колонны в режиме подвижного газожидкостного слоя. Оно зависит только от плотности орошения. Это можно объяснить наличием аттрактора гидравлического сопротивления (или вернее столба светлой жидкости) тарелки провального типа при данной плотности орошения в режиме подвижного газожидкостного слоя.

Подобную зависимость гидравлического сопротивления тарелок провального типа от скорости газа в сечении колонны видно из графиков (рис. 1) для режима работы тарелок провального типа между точками А и В.

Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления тарелки провального типа,  $\Delta p$ , от скорости газа в сечении колонны,  $w$ , при свободном сечении тарелки № 10 [6] –  $f=0,16$ ; ☆ – точка бифуркации

**6. Выводы**

1. Проведено измерение локального газосодержания на тарелке провального типа в зависимости от высоты установки датчика от плато тарелки.

2. Рассчитаны фрактальные размерности кривых графиков локального газосодержания для режима однородного барботажного слоя и режима подвижного газожидкостного слоя.

3. Установлено, что фрактальная размерность для кривой, локального газосодержания для режима подвижного газожидкостного слоя оказалась равной  $D=1,14$ , т. е. эта кривая является фракталом.

4. Установлено, что режим подвижного газожидкостного слоя является турбулентным и имеет аттрактор гидравлического сопротивления тарелки провального типа.

5. Для различных плотностей орошения жидкости, гидравлическое сопротивление тарелок провального типа, практически не зависит от скорости газа в сечении колонны в режиме подвижного газожидкостного слоя. Оно зависит только от плотности орошения.

**Литература**

1. Зайцев, И. Д. Производство соды [Текст] / И. Д. Зайцев, Г. А. Ткач, Н. Д. Строев. – М.: Химия, 1986. – 312 с.

2. Кузнецов, В. Я. Опыт использования тарельчатого абсорбера для улавливания бензолных углеводородов из коксового газа [Текст] / В. Я. Кузнецов, И. М. Шестаюк, Л. Н. Большакова и др. // Кокс и Химия. – 2005. – № 2. – С. 22–23.

3. Мухленов, И. П. Взаимодействие газов с жидкостями в пенном режиме [Текст] / И. П. Мухленов, Г. А. Ткач, И. Д. Зайцев и др. // Хим. пром. – 1983. – № 3. – С. 38–41.

4. Касаткин, А. Г. К расчету колонн с провальными тарелками [Текст] / А. Г. Касаткин, Ю. И. Дытнерский, С. У. Умаров // Хим. пром. – 1958. – № 3. – С. 38–45.

5. Тарат, Э. Я. О гидравлическом сопротивлении «провальных» решеток при пенном режиме [Текст] / Э. Я. Тарат, А. Ю. Вальберг // Журн. приклад. химии. – 1970. – Т. 43, № 8. – С. 1706–1711.

6. Тараненко, Г. В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий [Текст]: монография / Г. В. Тараненко. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. – 174 с.

7. Рамм, В. М. Абсорбция газов [Текст] / В. М. Рамм. – 2-ое изд., перер. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

8. Тараненко, Г. В. Определение локального газосодержания газожидкостного слоя кондуктометрическим

методом [Текст] / Г. В. Тараненко // ScienceRise. – 2016. – Т. 3, № 2 (20). – С. 67–70. doi: 10.15587/2313-8416.2016.64111

9. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

10. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидрориводы [Текст]: учебник / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

11. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]: учебник / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., дораб. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

**References**

1. Zaytcev, I. D., Tkach, G. A., Stroe N. D. (1986). Proizvodstvo sody [Production of soda]. Moscow: Chemistry, 312.

2. Kuznetcov, V. Ja, Shebastyuk, L. N., Bolshakova, L. N. et. al (2005). Opyt ispolzovaniya tarelchatogo absorbera dlia ulavlivaniya benzolnyh uglevodorodov iz koksovogo gaza [Experience in the use of the absorber plate to capture benzene hydrocarbons from the coke oven gas]. Coke and Chemicals, 2, 22–23.

3. Muhlenov, I. P., Tkach, I. D., Zaytcev, I. D. et. al (1983). Vzaimodeystviye gazov s jidkostijami v pennom rejime [The interaction of gases with liquids in the foam regime]. Chemical industry, 3, 38–41.

4. Kasatkin, A. G., Dytneriskij, Ju. I., Umarov, S. U. (1958). K raschetu kolonn s proval'nymi tarelkami (1958) [Calculation of columns with dual-flow plates]. Chemical industry, 3, 38–45.

5. Tarat, E. Ja., Val'berg, A. Ju. (1970). O gidravlichskom soprotivlenii "proval'nyh" reshetok pri pennom rejime [About the hydraulic resistance of "failures" grates in the foam regime]. Journal of Applied Chemistry, 43 (8), 1706–1711.

6. Taranenko, G. V. (2013). Gidravlichskie i massoobmennye harakteristiki tarelkok proval'nogo tipa s pazlichnym diametrom otversty [Hydraulic and mass transfer characteristics of the dual-flow plates with different diameter holes]. Lygansk: VNU. V. Dahl, 174.

7. Ramm, V. M. (1976). Absorbtsia gazov [Absorption of gases]. Moscow: Chemistry, 656.

8. Taranenko, G. V. (2016). Determination of local gas content of gas-liquid layer by conductometric method. ScienceRise, 3/2 (20), 67–70. doi: 10.15587/2313-8416.2016.64111

9. Mandel'brot, B. (2002). Fraktal'naya leometriya prirody [Fractal Geometry of Nature]. Moscow: Institute of Computer Science, 656.

10. Bashta, T. M. (1982). Gidravlika, gidromashiny i gidropriyvody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow: Engineering, 423.

11. Kasatkin, A. G. (1973). Osnovnye protsesy i apparaty chimicheskoy tehnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 752.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Архипов О. Г.  
Дата надходження рукопису 19.04.2016.*

**Тараненко Геннадий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиноведения и оборудования промышленных предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, пр. Центральный, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400  
E-mail: gtaranenko@ukr.net