

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2019.3.07

УДК 66.069.833-2

Д.А. Иванцов, А.Г. Хлуденев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССА МОНОЭТАНОЛАМИНОВОЙ ОЧИСТКИ ЖИРНОГО ГАЗА В ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМНЕФТЕОРГСИНТЕЗ» С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТОВ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

Рассмотрены особенности технологической схемы блока сероочистки жирного газа установок каталитического крекинга и АВТ. Выявлены недостатки существующей схемы, обусловленные сложностью и низкой интенсивностью применяемого оборудования, а также его чувствительностью к изменению нагрузок по газу и жидкости. Предложен вариант аппаратного оформления процесса моноэтанолоаминовой очистки газа с применением высокоинтенсивных и надежных в эксплуатации аппаратов с подвижной кольцевой насадкой. В связи с ограниченной информацией о работе аппаратов с применением кольцевых насадок в работе предпринято экспериментальное исследование некоторых гидродинамических характеристик аппарата с подвижной насадкой из полимерных колец: гидравлического сопротивления слоя, скорости развитого псевдооживления и коэффициента расширения слоя. Приведена схема лабораторной установки для исследования гидродинамики АПН. Работа выполнялась с применением как традиционного однофакторного эксперимента, так и с использованием метода математического планирования эксперимента. В качестве факторов, оказывающих определяющее влияние на работу АПН, рассматривались скорость газа, плотность орошения, свободное сечение опорно-распределительной решетки, а также статическая высота слоя насадки. Установлено наличие трех гидродинамических режимов работы АПН: начальное, промежуточное и развитое псевдооживление. В результате статистической обработки результатов эксперимента получены критериальные уравнения для расчета скорости развитого псевдооживления и коэффициента расширения слоя.

Показана возможность значительной интенсификации процесса и упрощения технологической схемы.

Ключевые слова: аппаратное оформление, подвижная насадка, развитое псевдооживление, гидравлическое сопротивление, моноэтанолоаминовая очистка.

D.A. Ivantsov, A.G. Hludenev

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

**IMPROVEMENT OF THE HARDWARE DESIGN PROCESS
MONOETHANOLAMINE CLEANING OF RAW GAS
IN "LUKOIL-PERMNEFTEORGSIINTEZ"
WITH THE USE OF APPARATUS WITH A MOVING NOZZLE**

The features of the technological scheme of the block of greasy gas desulphurization of catalytic cracking and AUTH plants are considered. The shortcomings of the existing scheme due to the complexity and low intensity of the equipment used, as well as its sensitivity to changes in gas and liquid loads are revealed. A variant of hardware design of the process of monoethanolamine gas purification with the use of high-intensity and reliable in operation devices with a movable annular nozzle is proposed. In connection with the limited information on the operation of devices with the use of annular nozzles, an experimental study of some hydrodynamic characteristics of the device with a movable nozzle made of polymer rings is undertaken: the hydraulic resistance of the layer, the rate of developed fluidization and the coefficient of expansion of the layer. The scheme of the laboratory setup for the study of hydrodynamics of Academy of pedagogical Sciences. The work was carried out using both the traditional one-factor experiment and the method of mathematical planning of the experiment. Gas velocity, irrigation density, free cross-section of the support-distribution grid, as well as the static height of the nozzle layer were considered as factors influencing the operation of the APN. The presence of three hydrodynamic modes of APN operation is established: initial, intermediate and developed fluidization. As a result of statistical processing of the results of the experiment, criterion equations for calculating the rate of developed fluidization and the coefficient of expansion of the layer are obtained.

The possibility of significant intensification of the process and simplification of the technological scheme is shown.

Keywords: hardware design, mobile nozzle, developed fluidization, hydraulic resistance, monoethanolamine purification.

Процесс хемосорбции сероводорода раствором моноэтаноламина (МЭА) из жирного газа, поступающего с установок каталитического крекинга КК-1 и АВТ, осуществляется в двух последовательно установленных по ходу газа абсорберах К-1 и А-1 (рис. 1).

Абсорбер К-1 имеет отбойную тарелку и шесть тарелок желобчатого типа. Отбойная тарелка служит сепаратором для отделения из газа конденсата.

Абсорбер А-1 состоит из трех слоев насадки (кольца Рашига) высотой 2 м каждый.

Раствор МЭА (абсорбент) подается в А-1 по трем вводам на каждый слой насадок, а в К-1 – по одному вводу на верхнюю тарелку. Диаметр обоих абсорберов – 2000 мм.

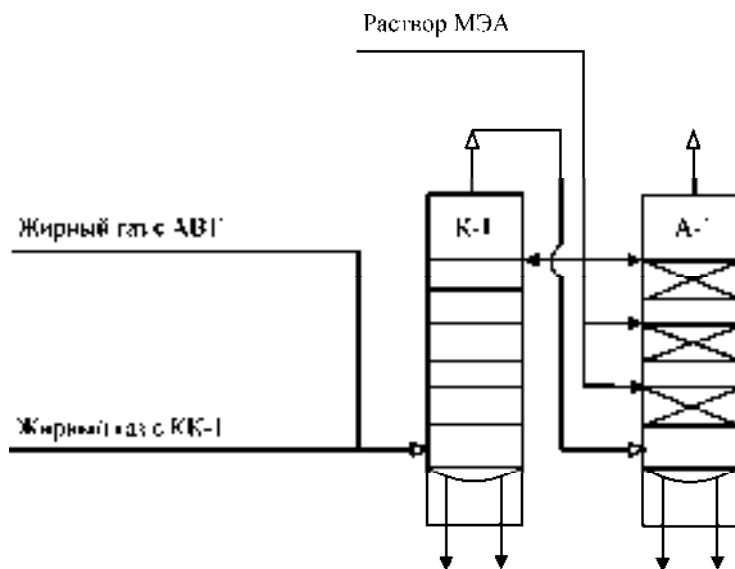


Рис. 1. Технологическая схема очистки жирного газа от H_2S установок КК-1 и АВТ раствором МЭА

Недостатками существующей схемы являются сложность аппаратного оформления процесса, низкая интенсивность и, как следствие, громоздкость и высокая металлоемкость оборудования, а также его высокая чувствительность к изменению нагрузок по газу и жидкости.

Указанных недостатков лишены аппараты с подвижной насадкой (АПН).

АПН работают при значительно более высоких значениях скоростей газа и плотностей орошения по сравнению с обычными насадочными и тарельчатыми колоннами и имеют высокие коэффициенты массообмена [1–8]. Аппараты такого типа отличаются надежностью, компактностью и малой чувствительностью к изменению нагрузок по газу и жидкости.

В качестве насадочных тел обычно используют полые или сплошные шары из различных пластмасс или пористой резины. Используют также насадочные тела иной формы, например кольца. Наиболее предпочтительно использование кольцевой насадки ввиду простоты ее изготовления и доступности для широкого применения.

Следует отметить, что в настоящее время литература не изобилует информацией о работе АПН с применением кольцевых насадок [9–12]. Поэтому нами было предпринято экспериментальное изу-

чение некоторых гидродинамических характеристик АПН с кольцевой насадкой применительно к процессу моноэтаноламиновой очистки жирного газа от сероводорода.

Схема установки для исследования гидродинамики аппарата с подвижной кольцевой насадкой представлена на рис. 2.

В состав установки входят следующие аппараты и приборы:

- колонна из органического стекла с насадкой;
- прибор для измерения расхода воздуха – коллектор в комплекте с микроманометром ММН-7;
- прибор для измерения расхода воды – ротаметр РС-5.

Диаметр колонны – 200 мм. В качестве насадки использовались полиэтиленовые кольца $40 \times 20 \times 2,5$ мм.

Воздух просасывается через колонну вакуум-насосом, его расход регулируется вентилем на вакуум-линии и определяется по показаниям микроманометра 2, который замеряет разрежение в коллекторе. Расход воды измеряется ротаметром 3 и регулируется вентилем 4. Высота слоя насадки фиксируется визуально по имеющейся на колонне миллиметровой шкале 6. Замеры гидравлического сопротивления аппарата производятся по дифманометру 7.

Было выполнено несколько серий опытов по изучению зависимости гидравлического сопротивления АПН от скорости газа $\Delta P = f(W)$, определению скорости развитого псевдооживления $W_{р.п.}$, а также коэффициента расширения слоя R . Свободное сечение опорно-распределительной решетки варьировалось в опытах в интервале $f = 0,3 \dots 0,4$, статическая высота слоя $H_{ст} = 0,1 \dots 0,2$ м. Результаты опытов представлены на рис. 3 и 4.

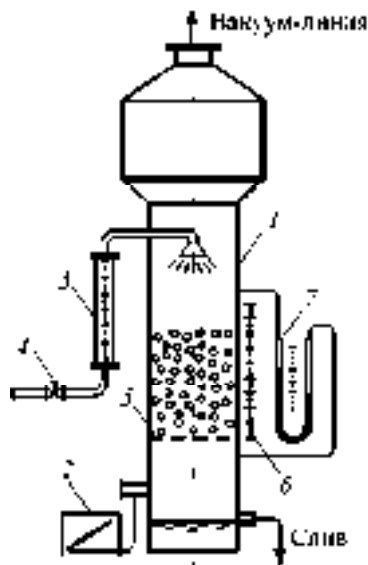


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – колонна с насадкой из полиэтиленовых колец; 2 – микроманометр; 3 – ротаметр РС-5; 4 – вентиль; 5 – газораспределительная решетка; 6 – миллиметровая шкала; 7 – U-образный дифманометр

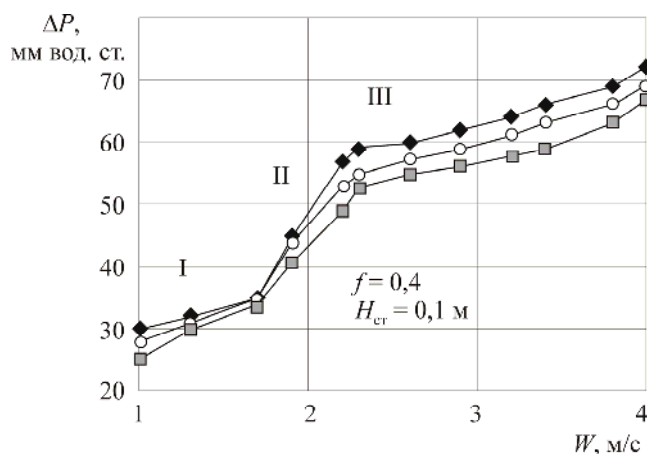


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления слоя от скорости газа при различных плотностях орошения: ◆ – $L = 20$ м/ч; ○ – $L = 25$ м/ч; ■ – $L = 30$ м/ч

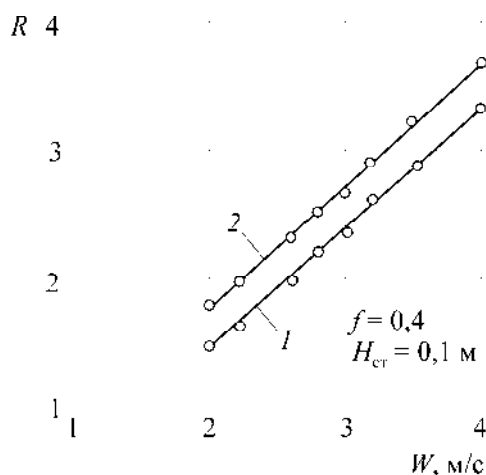


Рис. 4. Зависимость коэффициента расширения слоя от скорости газа при различных плотностях орошения: 1 – $U = 20$ м/ч; 2 – $U = 30$ м/ч

Анализ зависимости гидравлического сопротивления АПН от скорости газа в полном сечении аппарата и визуальные наблюдения указывают на существование нескольких гидродинамических режимов работы аппарата (см. рис. 3). Так, в аппарате наблюдается начальное (I), промежуточное (II) и развитое (полное) псевдооживление (III).

В режиме развитого псевдооживления пристеночный слой насадки разрушается, она полностью переходит в псевдооживленное состояние, а газовый поток практически равномерно распределяется по всему

сечению аппарата. При этом наблюдается хорошее перемешивание жидкости и пузырьков газа в объеме подвижного слоя. Некоторое увеличение сопротивления слоя в этом режиме обусловлено ростом количества удерживаемой им жидкости со скоростью газового потока. Жидкость в аппарате присутствует в основном в виде газожидкостной структуры, близкой к пенной.

На рис. 4 представлена линейная зависимость коэффициента расширения слоя R от скорости газа. Коэффициент расширения слоя определялся как отношение динамической высоты слоя $H_{\text{дин}}$ (высота слоя в псевдоожигенном состоянии) к статической высоте слоя $H_{\text{ст}}$ (высота неподвижного слоя).

В результате обработки экспериментальных данных предложено уравнение для определения скорости развитого псевдоожигения орошаемой кольцевой насадки:

$$\text{Re}_{\text{гр.п}} = 0,237 \cdot 10^4 \cdot \ln \left[33,4 \cdot \text{Re}_{\text{ж}}^{0,01} \cdot f^{0,91} \cdot \left(\frac{H_{\text{ст}}}{d_3} \right)^{0,17} \right], \quad (1)$$

где $\text{Re}_{\text{гр.п}}$ – критерий Рейнольдса для орошаемой насадки в точке перехода к режиму развитого псевдоожигения,

$$\text{Re}_{\text{гр.п}} = \frac{W_{\text{р.п}} \cdot d_a}{\nu_{\text{г}}}, \quad (2)$$

$W_{\text{р.п}}$ – скорость развитого псевдоожигения, м/с,

d_a – стандартный диаметр аппарата, равный 0,2 м,

$H_{\text{ст}}$ – статическая высота слоя, м,

$\nu_{\text{г}}$ – кинематическая вязкость газа, м²/с;

f – свободное сечение опорно-распределительной решетки, м²/м²;

$\text{Re}_{\text{ж}}$ – критерий Рейнольдса для жидкости,

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{L \cdot d_3}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (3)$$

где L – плотность орошения, м³/(м²·с),

$\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с,

d_3 – эквивалентный диаметр насадки.

Определение коэффициента расширения трехфазного псевдоожигенного слоя осуществлялось с использованием метода математического планирования экспериментов [13–15]. Статистическая обра-

ботка результатов эксперимента позволила получить следующее критериальное уравнение для расчета коэффициента расширения:

$$R = 0,139 \cdot \exp(1,2 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r) \cdot Re_{ж}^{0,3}, \quad (4)$$

где Re_r – критерий Рейнольдса для газа,

$$Re_r = \frac{W \cdot d_{\text{э}}}{\nu_r}, \quad (5)$$

W – скорость газа в полном сечении аппарата, м/с.

Последующие технологические расчеты АПН применительно к процессу хемосорбции сероводорода раствором МЭА, выполненные с применением результатов эксперимента, показали возможность замены двух существующих в производстве абсорберов диаметром 2 м одним АПН диаметром 0,9–1,0 м (рис. 5).

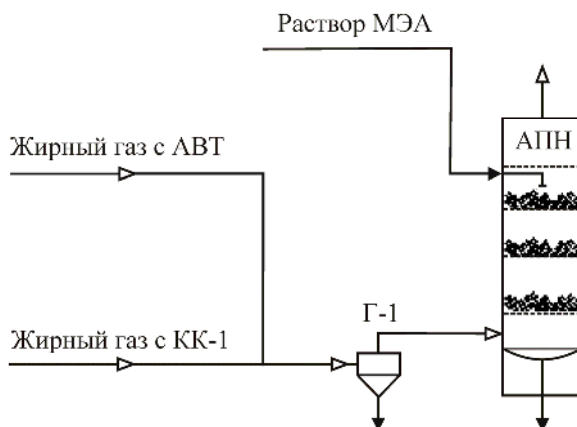


Рис. 5. Схема очистки жирного газа от H_2S установок КК-1 и АВТ с применением АПН

Г-1 – выносной центробежный каплеуловитель (замена отбойной тарелки абсорбера К-1 в предлагаемом аппаратном оформлении).

Вышеуказанные преимущества АПН представляются особенно важными при реконструкции существующих систем очистки в условиях отсутствия дополнительных производственных площадей.

Список литературы

1. Заминая А.А., Рамм В.М. Абсорберы с псевдооживленной насадкой. – М.: Химия, 1976. – 187 с.

2. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями / под ред. Э.Я. Тарата. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. – 240 с.
3. Гельперин Н.И. Исследование работы абсорбционного аппарата с псевдооживленным слоем орошаемой шаровой насадки // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1966. – № 1. – С. 22–26.
4. Аппарат с «зажатыми» кипящими слоями: а.с. 144830 СССР / Живайкин Л.Я., Бляхер И.Г. – 730101/23; заявл. 11.05.1961; опубл. 01.01.1962, Бюл. № 4. – 2 с.
5. Полая шаровая насадка: а.с. 264343 СССР / Гельперин Н.И., Аэров М.Э., Аксельрод Л.С., Быстрова Т.А., Саевский В.В. – 1088904/23–26; заявл. 02.07.1966; опубл. 03.03.1970, Бюл. № 9. – 2 с.
6. Бляхер И.Г., Живайкин Л.Я., Юровская Н.А. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с подвижной насадкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1967. – № 2. – С. 18–22.
7. Гельперин Н.И., Кругляков Б.С. Гидравлические характеристики колонны с псевдооживленной орошаемой шаровой насадкой // Химическая промышленность. – 1977. – № 11. – С. 66–68.
8. Балабеков О.С., Тарат Э.Я., Романков П.Г. Гидравлический расчет аппаратов с орошаемой взвешенной шаровой насадкой // Журнал прикладной химии. – 1971. – Т. 44, № 5. – С. 1061–1068.
9. Подвижная насадка абсорбера: а.с. 212988 СССР / Левш И.П., Крайнев Н.И. – № 1092737/23–26; заявл. 20.07.1966, опубл. 12.03.1968, Бюл. № 10. – 2 с.
10. Левш И.П., Ниязов М.И., Хаитмухамедов К.И. Исследование гидродинамики псевдооживленного слоя орошаемой насадки из полимерных колец // Сб. науч. тр. Ташкент. политехн. ин-т. – 1972. – Вып. 90. – С. 183–186.
11. Крайнев Н.И. Исследование гидродинамики и массообмена в аппарате с псевдооживленным слоем кольцевой насадки: дис. ... канд. техн. наук / Ташкент. политехн. ин-та. – Ташкент, 1968. – 130 с.
12. Козак Ф.В. Исследование гидродинамики и массообмена в аппарате с псевдооживленным слоем насадки: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Одес. политехн. ин-т. – Одесса, 1972. – 24 с.
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
14. Мошев Е.Р. Моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 98 с.
15. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1968. – 155 с.

References

1. Zaminyan A.A., Ramm V.M. Absorbers with pseudofluidized bed [Absorbers with a fluidized bed]. Moscow, Khimia, 1976, 187 p.

2. Intensivnyye kolonnyye apparaty dlya obrabotki gazov zhidkostyami [Intensive column apparatus for treating gases with liquids]. Ed. E.Y. Tarata Saint Petersburg, State University named after AS Pushkin, 1976, 240 s.

3. Gelperin N.I. Issledovaniye raboty absorbtionnogo apparata s psevdoozhizhennym sloyem oroshayemoy sharovoy nasadki. [Investigation of the operation of an absorption apparatus with a fluidized bed of an irrigated ball nozzle]. *Khimicheskoye i neftyanoye mashinostroyeniye*, 1966, no. 1, pp. 22–26.

4. Zhivaykin L.Ya., Blyakher I.G. Apparat s «zazhatymi» kipyashchimi sloyami [The apparatus with “clamped” boiling layers]. A.S № 144830 (SSSR), 1962, Bull. fig. Number 4.

5. Gelperin N.I., Aerov M.E., Axelrod L.S., Bystrova T.A., Saevsky V.V. Polaya sharovaya nasadka [Hollow ball nozzle]. A.S. 264343 (SSSR), 1970, Bull. fig. Number 9.

6. Blyacher I.G., Zhivaikin L.Ya., Yurovskaya N.A. Issledovaniye gidrodinamiki i massobmena v apparatakh s podvizhnoy nasadkoy [The study of hydrodynamics and mass transfer in devices with a movable nozzle]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*, 1967, no. 2, pp. 18–22.

7. Gelperin N.I., Kruglyakov B.S. Gidravlicheskiye kharakteristiki kolonny s psevdoozhizhennoy oroshayemoy sharovoy nasadkoy [Hydraulic characteristics of a column with a fluidized irrigated ball nozzle]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 1977, no. 11, pp. 66–68.

8. Balabekov O.S., Tarat E.Ya., Romankov P.G. Gidravlicheskiy raschet apparatov s oroshayemoy vzveshennoy sharovoy nasadkoy. [Hydraulic calculation of devices with irrigated suspended ball nozzle]. *Journal of Applied Chemistry*, 1971, vol. 44, no. 5, pp. 1061–1068.

9. Levsh I.P., Krainev N.I. Podvizhnaya nasadka absorbera. [Movable absorber nozzle]. A.S. 212988 (USSR). Bull. fig. Number 10.

10. Levsh I.P., Niyazov M.I., Khaitmukhamedov K.I. Issledovaniye gidrodinamiki psevdoozhizhennogo sloya oroshayemoy nasadki iz polimernykh kolets. [The study of fluid dynamics of the fluidized bed of the irrigated nozzle from polymer rings]. *Sat. scientific Proceedings. Sb. nauchn. trudov*. Tashkent. Polytechnic institute, 1972, iss. 90, pp. 183–186.

11. Krainev N.I. Issledovaniye gidrodinamiki i massobmena v apparate s psevdoozhizhennym sloyem kol'tsevoy nasadki [The study of hydrodynamics and mass transfer in the apparatus with a fluidized bed of a ring nozzle]. Ph. D. thesis. Tashkent. Polytechnic institute, 1968, 130 p.

12. Kozak F.V. Issledovaniye gidrodinamiki i massobmena v apparate s psevdoozhizhennym sloyem nasadki [The study of hydrodynamics and mass transfer in a fluidized-bed apparatus]. Abstract of Ph. D. thesis. Odessa, Polytechnic. Institute, 1972, 24 p.

13. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka, 1976, 280 p.

14. Moshev E.R. Modelirovaniye khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Simulation of chemical and technological processes]. Perm, Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006, 98 p.

15. Adler Yu.P. Vvedeniye v planirovaniye eksperimenta [Introduction to experiment planning]. Moscow, Metallurgy, 1968, 155 p.

Получено 24.06.2019

Об авторах

Иванцов Денис Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры, оборудования и автоматизации химических производств Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ivancov.ongp14@mail.ru).

Хлуденев Александр Григорьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации химических производств Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: hludenev46@yandex.ru).

About the authors

Denis A. Ivantsov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department "Equipment and Automation of Chemical Production", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ivancov.ongp14@mail.ru).

Alexander G. Hludenev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Equipment and Automation of Chemical Production", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: hludenev46@yandex.ru).