



УДК 66.074.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МАССООБМЕННЫХ ТАРЕЛОК КОЛОННЫХ АППАРАТОВ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

### INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS OF MASS EXCHANGE PLATES OF COLUMN APPARATUSES FOR NATURAL GAS PURIFICATION PLANTS

**Рахмонов Тойир Зойирович**

доктор технических наук, доцент,  
главный специалист по механике,  
отдел проектирования технологических объектов  
и систем сбора,  
ООО «Лукойл-Узбекистан Оперейтинг Компани»  
trahmonov@lukoil-international.com

**Rahmonov Toyir Zoyirovich**

Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Chief mechanical specialist,  
Process Facilities and Gathering  
System Design Section,  
LUKOIL Uzbekistan Operating Company LLC  
trahmonov@lukoil-international.com

**Аннотация.** В статье по результатам экспериментальных и промышленных исследований ситчатой тарелки с двумя зонами контакта со свободным сечением 20 % приводятся новые данные по газонаполнению барбатажного слоя, гидравлическому сопротивлению и каплеуносу в широком диапазоне изменения нагрузок по газу и жидкости; определена область устойчивой и эффективной работы исследованной конструкции массообменной тарелки, получены эмпирические уравнения для расчета оптимальных гидродинамических параметров и выполнено сравнение экспериментальных и расчетных данных, свидетельствующие адекватности полученных уравнений.

**Annotation.** In the article by results of pilot and industrial studies of a mesh plate with two zones of contact with the free section of 20 % new data on gas-filling of a bubbling layer, hydraulic resistance and a thaw ablation in the wide range of change of loadings on gas and liquid are obtained; the area of steady and effective work of the studied design of a mass-exchanged plate is defined, the empirical equations for calculation of optimum hydrodynamic parameters are received and the comparison of experimental and settlement data testifying adequacy of the received equations is executed.

**Ключевые слова:** природный газ, массообменные тарелка колонных аппаратов, очистка природного газа от CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, абсорбер, десорбер, эффективность очистки, подготовка природного газа.

**Keywords:** natural gas, mass exchange plates of column apparatuses, natural gas cleaning from CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, absorber, desorber, purification efficiency, natural gas preparation.

Начиная со второй половины XX века, природный газ становится наиболее эффективным экологически чистым природным топливом, а нефтегазодобывающие и перерабатывающие отрасли промышленности являются базовыми. От них практически зависит экономический потенциал страны. В основных направлениях энергетической стратегии Узбекистана до 2020 года предусматривается развитие этой базы, что обеспечит ввод новых производственных мощностей и модернизацию существующих предприятий.

При разработке оборудования для объектов в конструкциях технологических блоков должны учитываться новейшие прогрессивные технические решения, обеспечивающие высокую технологическую, экономическую, эргономическую и экологическую эффективность создаваемых технологических комплексов [1].

Технологические установки и аппараты, предназначенные для подготовки газа и извлечения конденсата на газоконденсатных месторождениях должны быть спроектированы с учетом влияния снижения пластового давления на их работу. В первую очередь имеются в виду изменения состава и количества сырья, снижение в составе конденсата тяжелых фракций, когда конденсат используется для производства какого-либо продукта: абсорбента, моторных топлив и т.д. При отсутствии таких данных в проект установок через определенный период вносятся соответствующие изменения.

Требования к качеству природного газа преследуют несколько целей, включая защиту от коррозии, исключение выпадения жидкой фазы в трубопроводах и влияние на характеристики горения.

Требования, связанные с предотвращением коррозии, ограничивают концентрации CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, меркаптанов и общей серы. В соответствии с требованиями нормативно-технической документов Узбекистана, в товарном газе, подаваемом в магистральные газопроводы, содержание сероводорода не должно превышать 7 мг/нм<sup>3</sup>, содержание двуокиси углерода не регламентируется. Поэтому при очистке газа от сероводорода двуокись углерода может удаляться не полностью и поступать в магистральный газопровод в таком количестве, чтобы низшая теплота сгорания транспортируемого газа составляла не менее 32,5 МДж/ст.м<sup>3</sup>. При селективном извлечении мощность установок очистки газа, определяемая по количеству поглотителя, во много раз меньше мощности установок с применением неселективных процессов.



В дисперсном газожидкостном потоке капли жидкости взвешены в газовой среде и является несущим [2]. В зависимости от размера капель и скорости потока степень увлечения частиц различна. Параметры движения капель жидкости в потоке газа, к которым принадлежат относительная скорость их, путь, проходимый в газовом потоке, определяют основной фактор процесса – эффективность сепарации.

Разработанная нами математическая модель и алгоритм расчета траектории капель в свободном сечении сепаратора с осевым завихрителем позволяют определять путь передвижения и время пребывания капель различного размера, что дает возможность целенаправленно проектировать конструктивные элементы, качественно предотвращающие унос капель из сепарационных зон.

Отмечено [2], что в турбулизированных системах газ в жидкости высокой интенсивности создается на тарелках массообменных аппаратов. Поверхность контакта фаз газожидкостной системы определяется размерами фазовых ячеек и газосодержанием. Объем барботажного слоя  $V_c$ , м<sup>3</sup> определяется выражением:

$$V_c = HF_c, \tag{1}$$

где  $H$  – высота слоя, м;  $F_c$  – площадь сечения слоя, м<sup>2</sup>.

Количество взвешенных в потоке капель, при работе аппарата в интенсивных режимах, определяется технологическими показателями процесса – скоростью газа и плотностью орошения. Количество жидкости, находящееся в аппарате, в том случае, если нет ее накопления в аппарате за счет разности скоростей газа и жидкости, определяется из выражения:

$$G_x = V_{ап} \rho_g B, \tag{2}$$

где  $V_{ап}$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $B$  – удельное орошение, кг ж./кг газ.

Количество жидкости, проходящее через аппарат в единицу времени,  $q_{ж}$ , кг/с при плотности орошения  $L$ , м/с, определяется как

$$q_{ж} = L \cdot F_c \cdot \rho_{ж}, \tag{3}$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

Количество газа  $q_g$ , кг/с при скорости  $U_{ср}$ , м/с выражается следующим образом:

$$q_g = U_{ср} F_c \rho_g. \tag{4}$$

Удельное орошение определяется выражением:

$$B = \frac{q_{ж}}{q_g} = \frac{L \rho_{ж}}{U_{ср} \rho_g}. \tag{5}$$

Общий объем жидкости в аппарате составляет

$$V_{ж} = \frac{G_x}{\rho_{ж}} = \frac{L F_c H}{U_{ср}}. \tag{6}$$

С учетом коэффициента скольжения  $i = \frac{W_K}{U_{ср}}$ , получим:

$$V_{ж} = \frac{L F_c H}{i U_{ср}}. \tag{7}$$

Используя выражение (6), выразим газосодержание через технологические параметры процесса:

$$\varphi = \frac{V_c - V_{ж}}{V_c} = 1 - \frac{V_{ж}}{V_c} = 1 - \frac{L}{i U_{ср}}. \tag{8}$$

В том случае, если часть жидкости, поступающей в газожидкостный слой, находится в состоянии барботажа, количество капель в системе определяется с учетом показателя относительного брызгоуноса  $e$  определяется по выражению

$$n_K = \frac{L e F_c H}{A i U_{ср} d_K^3}, \tag{9}$$

где  $A$  – коэффициент формы капель;  $d_K$  – диаметр капель жидкости, м.



В результате теоретических исследований определена взаимосвязь между количеством фазовых ячеек и газосодержанием двухфазного слоя в интенсивных барботажных режимах, создающихся на тарелках колонных аппаратов и систем с газовой дисперсной фазой.

Для оценки способности оборудования нести нагрузку по газу предложено [2] использовать *F*-фактор скорости, являющийся произведением фактической скорости газа в расчете на полное сечение колонны (*U*, м/с) на корень квадратный из фактической плотности газа ( $\rho_g$ , кг/м<sup>3</sup>) в колонном аппарате:

$$F = U\sqrt{\rho_g} . \tag{10}$$

Использование *F*-фактора скорости для оценки интенсивности работы контактных устройств газожидкостных разделителей (сепаратора и дегазатора) и массообменных колонных аппаратов (абсорбера и десорбера) позволяет применять результаты лабораторных исследований в промышленности [3].

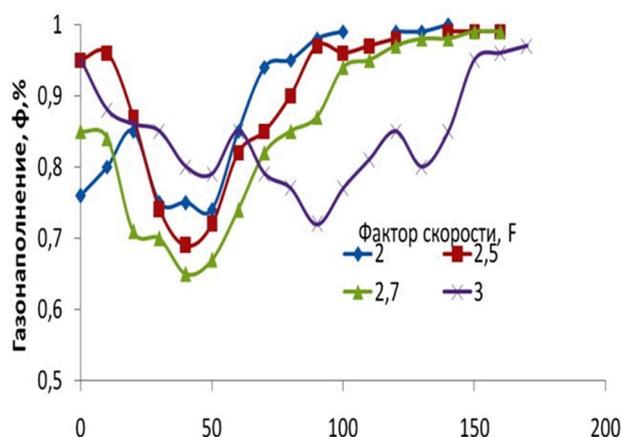
Нами приведены результаты лабораторных исследований гидродинамических параметров ситчатой тарелки с двумя зонами контакта фаз со свободным сечением 20 % с отверстиями на полотне тарелки  $d_{ome} = 9,4$  мм применительно к массообменным аппаратам – абсорберу и десорберу установки сероочистки природного газа [4]. Предлагаемая массообменная тарелка отличается большим диапазоном рабочих нагрузок по газу и жидкости, малым гидравлическим сопротивлением и более высокими показателями по массообменным характеристикам. Эти тарелки могут работать при значениях *F*-фактора 2 ÷ 3. Отметим, что эксплуатирующиеся на газоперерабатывающих заводах тарелки работают при значении  $F \leq 1$ .

Конструктивно тарелка представляет собой ситчатое полотно с центральным переливным устройством. При работе раствор амина движется сверху вниз и происходит барботаж в отверстиях под действием кинетической энергии газа. При переливе раствора создается «жидкостной занавес», что позволяет дополнительно контактировать жидкости с газом. Внутри переливного стакана установлен пеногаситель, изготовленный из уголков. Пеногаситель служит для отвода газа и тем самым способствует увеличению пропускной способности переливных устройств.

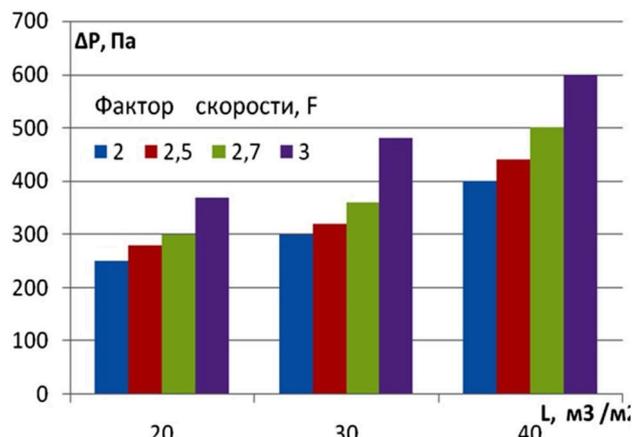
Опыты были проведены при скоростях газа в свободном сечении колонны от 0,8 до 2,5 м/с, что соответствует *F*-фактору 1,0 ÷ 2,9. Диапазон плотностей орошения меняли от 20 до 75 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, что соответствует нагрузке на длину порога от 5,1 до 19,1 м<sup>3</sup>/м·ч.

При исследованиях определены газонаполнения по высоте барботажного слоя, брызгоунос и гидравлическое сопротивление тарелок в диапазоне рабочих нагрузок по газу и жидкости и диапазон устойчивой работы тарелки.

На рисунке 1, в качестве примера иллюстрируются закономерности изменения газонаполнения при различных значениях *F*-фактора скорости. По графикам виден рост газонаполнения при низких значениях плотности орошения, когда кинетическая энергия газа преобладает над потенциальной энергией жидкости и находится в пределах 0,7 ÷ 0,8. Полученные зависимости газонаполнения от рабочих параметров показывают, что рабочий режим тарелки со свободным сечением 20 % достигает до  $F = 2,84$ .



**Рисунок 1** – Зависимость газонаполнения от высоты газожидкостного слоя при плотности орошения  $L = 30$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч



**Рисунок 2** – Зависимость гидравлического сопротивления от фактора скорости газа

На каждом режиме проводились измерения перепада давления с U-образным дифференциальным манометром водяного заполнения. Из рисунка 2 видно, что с увеличением объемного расхода жидкости на единицу массообменной тарелки, т.е. плотности орошения, наблюдается заметный

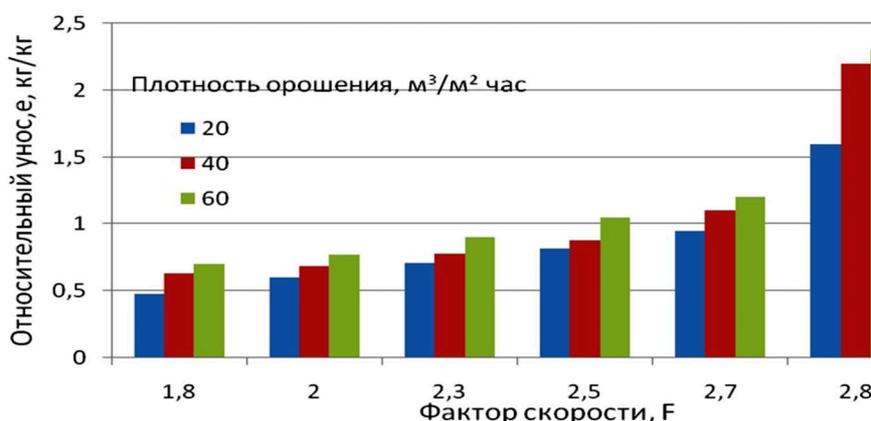


рост гидравлического сопротивления. При этом установлено, что увеличение скорости газа не приводит к резкому росту исследуемого параметра.

Для экспериментального определения уноса при работе в системе «воздух-вода» была использована колонна диаметром 300 мм, снабженная двумя ситчатыми тарелками с двумя зонами контакта, свободное сечение которых изменяли в диапазоне  $F_{ce} = 10 \div 20 \%$ . Толщина тарелок составляла 6 мм, диаметр отверстия – 9,4 мм, расстояние между тарелками – 500 мм.

Для улавливания капель, уносящихся через верхнюю часть колонны, использовали циклон, установленный на линии выхода воздуха. Унос выражали через отношение количества унесенной жидкости к количеству подаваемой, т.е. относительный унос, в кг/кг.

На рисунке 3 приведена зависимость относительного уноса капель с тарелки со свободным сечением 20 % от  $F$ -фактора скорости при различных плотностях орошения. С увеличением плотности орошения относительный унос и предельные скорости газа уменьшаются вследствие роста слоя жидкости на тарелке и более быстрого захлебывания аппарата. В условиях проведенных опытов предельные скорости газа составляли  $2,4 \div 2,6$  м/с ( $F = 2,7 \div 2,9$ ).



**Рисунок 3** – Зависимость удельного уноса  $e_{уд}$  от фактора скорости  $F_{ф}$  при различных значениях плотности орошения ( $F_{ce} = 20 \%$ )

В результате обработки экспериментальных данных нами получена зависимость, позволяющая определять относительный унос жидкости в зависимости от технологических параметров процесса и свободного сечения тарелки:

$$e = 0,75 \cdot 10^{-3} U^{1,8} L^{-1,3} F_{cu}^{-2,5} \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для  $H_m = 500 \div 600$  мм,  $F_{ce} = 10 \div 20 \%$ ,  $L = 20 \div 75$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч,  $U = 0,8 \div 2,5$  м/с.

Для оценки возможности эффективного функционирования колонны при различных нагрузках по газу и жидкости обычно используют область ее устойчивой работы, которая зависит главным образом от типа и конструкции контактного устройства.

Диапазон устойчивой работы тарелок определяется сочетанием нагрузок по газу и жидкости. На рисунке 4 показана область устойчивой работы исследованной нами тарелки, соответственно, полученная путем обобщения значительного объема экспериментальных данных. График построен в координатах « $F$ -фактор скорости –  $L$  – плотности орошения».

Максимально допустимый  $F$ -фактор скорости газа в колонне (линия BC) определяется величиной уноса жидкости. Линия AD определяет минимально допустимые скорости газа, соответствующие 10 % провалу жидкости. Справа область устойчивой работы ограничена линией CD, которая соответствует максимальным нагрузкам по жидкости, соответствующим 85 % режима захлебывания. Линия AB определяет минимальные нагрузки по жидкости, при которых на тарелке обеспечивается устойчивый барботажный слой. Нагрузки по газу и жидкости, соответствующие координатам любой точки внутри области, обеспечивают устойчивое функционирование аппарата.

Из графика видно, что рабочий диапазон тарелки со свободным сечением 20 % по нагрузке: минимальная рабочая скорость газа 1,2 м/с ( $F_{min} = 1,36$ ) – максимальная рабочая скорость газа 2,5 м/с ( $F_{max} = 2,84$ ). Следовательно, диапазон изменения нагрузки по газу, при котором сохраняется работоспособность тарелки, равен  $F_{max} / F_{min} = 2,1$ . Нагрузка по жидкости достигает плотности орошения 75 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, что соответствует нагрузке на длину порога 19,2 м<sup>3</sup>/м·ч.

Таким образом, в результате исследования определены оптимальные гидродинамические показатели и выявлена область устойчивой работы тарелки для проведения абсорбционных и десорбционных процессов с высокой интенсивностью протекания массообменных процессов в малогабаритных технологических аппаратах.

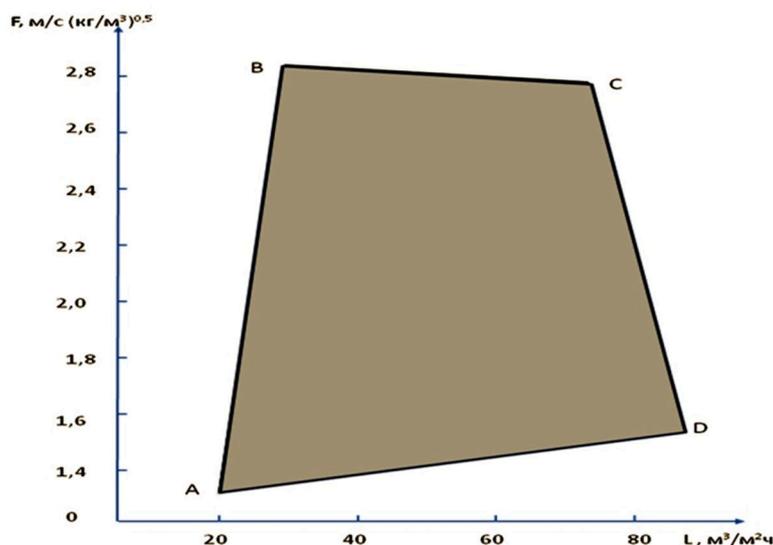


Рисунок 4 – Область устойчивой работы ситчатой тарелки с двумя зонами контакта со свободным сечением 20 %

Нами приведены исследование абсорбера сероочистной установки в промышленных условиях [5, 6], представляющий собой вертикальный тарельчатый колонный аппарат с модифицированными ситчатыми тарелками с двумя зонами контакта. В абсорбере сорбция осуществляется путем контакта газа с жидкостью в пленке и в барботажном слое. В верхней части абсорбера устанавливается каплеотделитель, состоящий из цилиндрических центробежных элементов с завихрителем.

Исследование скорости абсорбции  $H_2S$  и  $CO_2$  из природного газа водным раствором метилдиэтанолamina (МДЭА) проводили на 12-сероочистном блоке четвертого цеха Мубарекского ГПЗ (Узбекистан).

Эксперименты производили в промышленных условиях на абсорбере диаметром 2600 мм. В качестве массообменного устройства принята конструкция модифицированной ситчатой тарелки с двумя зонами контакта в количестве 18 шт. На каждой тарелке установлено 5 переливных устройств диаметром 400 мм; высота порога перелива принята 50 мм. Общая длина порогов перелива  $l = 6,28$  м. Максимальная расчетная нагрузка на перелив  $q = 63,1$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч. В переливах установлены пеногасящие устройства, увеличивающие пропускную способность тарелки при вспенивании жидкости.

При испытании модернизированного абсорбера фактор скорости варьировали в диапазоне  $F = 1 \div 2,4$ . Установлено, что с повышением фактора скорости  $F$  при постоянном значении удельного орошения коэффициент селективности извлечения сероводорода  $K_C$  растет, при  $F = 0,7$  содержание  $H_2S$  в очищенном газе составляет 14 мг/м<sup>3</sup>, при  $F = 2,4$  содержание  $H_2S$  составило 4,7 мг/м<sup>3</sup> газа. Это явление, на наш взгляд, объясняется тем, что при высоких скоростях увеличивается поверхность массообмена и время обновления поверхности контакта фаз и, как результат повышение эффективности селективной очистки.

Испытанный абсорбер по проекту имел производительность по газу 47 тыс. м<sup>3</sup>/ч. В результате замены массообменной тарелки, производительность абсорбера по газу достигает 65 тыс. м<sup>3</sup>/ч, и это позволила дополнительно переработать серосодержащий природный газ в объеме 144000 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Таким образом показано, что модифицированный абсорбер с тарелками нового типа позволяет увеличить производительность аппарата в 1,4 раза относительно проектного уровня; эффект достигается за счет интенсификации процесса абсорбции при сохранении высоких показателей качества (не более 7 мг/м<sup>3</sup>  $H_2S$  в очищенном газе) очистки природного газа.

В результате использования разработанных высокоинтенсивных контактных элементов и аппаратов в промышленных условиях в УДП «Мубарекский ГПЗ» и в УДП Газлинефтегаздобыча» достигнуто увеличение единичной мощности эксплуатируемых аппаратов, уменьшение габаритных размеров и металлоемкости проектируемого оборудования установок подготовки и очистки природного газа.

#### Литература:

1. Салимов З.С., Рахмонов Т.З., Розиев Б.Р. Высокоэффективные аппараты для комплексной очистки природного газа. – Ташкент : ООО «Munis design group», 2015. – 194 с.
2. Рахмонов Т.З. Создание высокоэффективных аппаратов для комплексной очистки природного газа : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Т. : ТашХТИ, 2015. – С. 75.
3. Рахмонов Т.З. Исследование факторов влияющих на эффектность очистки природного газа // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2005. – № 2. – С. 110–113.



4. Рахмонов Т.З. Исследование гидродинамики массообменной тарелки абсорбера сероочистки // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014. – № 1. – С. 28–32.
5. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for purification of natural gas // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – India, Delhi, 2015. – № 4. – P. 472–476.
6. Рахмонов Т.З., Хурмаматов А.М. Исследование абсорбера сероочистной установки в промышленных условиях // Химическая промышленность. – СПб. : ТЕНЗА, 2012. – № 8. – С. 412–415.

#### References:

1. Salimov Z.S., Rakhmonov T.Z., Roziyev B.R. Highly effective devices for complex purification of natural gas. – Tashkent : LLC Munis design group, 2015. – 194 p.
2. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for complex purification of natural gas : Avtoref. yew. ... Dr. Sci. Tech. – T. : TashHTI, 2015. – P. 75.
3. Rakhmonov T.Z. A research of factors of TashGTU influencing showiness of purification of natural gas // Messenger. – Tashkent, 2005. – № 2. – С. 110–113.
4. Rakhmonov T.Z. Research of hydrodynamics of a mass-exchanged plate of an absorber of desulphurization // Chemical technology. Control and management. – Tashkent, 2014. – № 1. – P. 28–32.
5. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for purification of natural gas // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – India, Delhi, 2015. – № 4. – P. 472–476.
6. Rakhmonov T.Z., Hurmamatov of A.M. Issledovaniye of an absorber of seroochistny installation in industrial conditions // Chemical industry. – SPb. : TENZA, 2012. – № 8. – P. 412–415.