

Хлораторы эжекционного типа

О.П. Петросян, А.Б. Кожевников, Н.А. Орлова,
С.С. Парамонов, Б.И. Мясников, А.О. Петросян

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассмотрена работа одного из основных узлов хлоратора эжекционного (вакуумного) типа — водоструйного насоса (эжектора). Обоснован выбор параметров эжектора, характеризующих его производительность. Решена задача определения хлорпоглощения в зависимости от параметров эжектора и характеристик водного раствора, позволяющая обеспечить точность дозирования газообразного хлора и исключить возможность передозировки.

Ключевые слова: эжектор, хлорпоглощаемость, вакуумный регулятор, струйный насос, хлоратор, камера смешения, диффузор

Расчет геометрических параметров эжектора. Эжектор (струйный аппарат, эжекционный насос) представляет собой устройство, которое позволяет подсасывать и поднимать на определенную высоту газ или жидкость за счет кинетической энергии подаваемого к нему потока жидкости. Поток рабочей жидкости под давлением напора поступает из сопла в камеру смешения и далее в диффузор и нагнетательную линию.

Силой поверхностного трения рабочий поток увлекает за собой частицы среды, в которой протекает. В рабочей (приемной) камере создается разрежение, куда поступает (эжектируемый) газ или жидкость.

Принцип действия водоструйных аппаратов основан на непосредственной передаче кинетической энергии рабочего потока, обладающего большим запасом энергии, другому потоку, обладающему меньшим запасом энергии [1]. Отношение расхода эжектируемого газа Q к расходу рабочей среды Q_B называется коэффициентом α подмешивания или эжекции:

$$\alpha = \frac{Q}{Q_B}.$$

Значение α может изменяться в довольно широком диапазоне: 0,5...2,0. Наиболее устойчивая работа водоструйного насоса наблюдается при $\alpha = 1$.

Отношение полной геометрической высоты подъема H эжектируемого потока жидкости к напору h рабочего потока называется коэффициентом напора β :

$$\beta = \frac{H}{h}.$$

При этом значение коэффициента β может изменяться в диапазоне 0,15...0,35.

Коэффициент полезного действия насоса равен отношению полезной мощности $HQ_{\text{в}}\gamma$ к затраченной мощности $hQ_{\text{в}}\gamma$, т. е.

$$\eta = \frac{HQ_{\text{в}}\gamma}{hQ_{\text{в}}\gamma} = \frac{HQ}{hQ_{\text{в}}} = \beta\alpha.$$

Следовательно, эффективность работы водоструйного насоса зависит в основном от коэффициентов напора и эжекции.

Водоструйные насосы имеют сравнительно низкий КПД (25...30 %). Поскольку КПД насоса ограничен, то, следовательно, изменив (увеличив) коэффициент эжекции, мы сможем создать меньший напор (давление) смешанного потока и наоборот.

Коэффициент эжекции зависит главным образом от основного геометрического параметра m эжекторного аппарата, который определяется отношением площади сечения F_2 камеры смешения к площади сечения F_1 выхода насадки:

$$m = \frac{F_2}{F_1}.$$

Этот параметр и ряд других геометрических величин определяют его основные рабочие параметры [2]. С увеличением параметра m возрастает и коэффициент эжекции α , но создаваемый эжектором напор (давление за эжектором) будет уменьшаться. Лабораторными исследованиями и производственными испытаниями эжекторов (водоструйных насосов) установлено, что наиболее эффективно они работают, когда геометрический параметр $m = 2,5...4,0$.

Расчет среднего хлорсодержания потока в эжекторе. Прежде чем сформулировать исходную задачу, конкретизируем параметры, характеризующие внутренний массообмен с учетом специфики эжекции хлора в воду.

В диффузоре эжектора и далее в трубопроводе происходит растворение хлоргаза в потоке воды, т. е. имеет место массообмен, распределенный в пространстве водяного потока как по продольной x , так и по поперечной r пространственной координате, динамика которого определяется временем τ .

Обозначим через $U(r, x)$ распределенное хлорсодержание потока воды, а через $W(x)$ — среднее хлорсодержание того же потока воды. Теоретический расчет изменения скорости хлоргаза при его

транспортировании по трубопроводу вызывает серьезные трудности. Поэтому на основе анализа кинетики процесса принята следующая аппроксимация:

$$V(x) = V_0 - V_1(1 - e^{-\sigma x}), \quad (1)$$

где V_0 — скорость хлоргаза в установившемся движении при $x = 0$; $V_1 = V_m - V_0$; V_m — скорость хлоргаза; σ — коэффициент возрастания скорости (величины V_1 , V_m , σ уточняют экспериментально).

В соответствии с (1) имеем

$$x = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\left(1 - \frac{V_1}{V_m} \right) e^{\sigma V_m \tau} + \frac{V_1}{V_m} \right]. \quad (2)$$

Коэффициент газоотдачи α_m , существенно влияющий на процесс, зависит от температуры потока воды $T_B(x)$, исходного содержания в нем хлоргаза $W(x)$ и разности скоростей хлоргаза и потока воды $\Delta V = V_B - V$. Ввиду того, что ΔV значительно изменяется в данном процессе, нецелесообразно принимать α_m постоянным, так как в реальных условиях этот коэффициент существенно изменяется, убывая по закону, близкому к экспоненциальному. Поэтому принято следующее приближение:

$$\alpha_m(x) = a_0 + b_0 e^{-\lambda x}, \quad (3)$$

где a_0 — значение $\alpha_m(x)$ при $x \rightarrow \infty$ ($\tau \rightarrow \infty$); $a_0 + b_0$ — значение $\alpha_m(x)$ при $x = 0$ ($\tau = 0$); λ — коэффициент, характеризующий убывание $\alpha_m(x)$ (коэффициенты a_0 , b_0 и λ уточняют экспериментально).

Введя безразмерную переменную $R = r/R_0$, где R_0 — максимальное значение r , сформулируем исходную задачу в цилиндрической системе координат.

Необходимо определить

$$W(x) = 2 \int_0^1 R U(R, x) dR, \quad (4)$$

где $U(R, x)$ — решение дифференциального уравнения [3]

$$(V_m - V_1 e^{-\sigma x}) \frac{\partial U}{\partial x} = b_m \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) \quad (5)$$

при $x \in [0, l]$, $R \in [0, 1]$ и начальных и краевых условиях

$$\begin{aligned} U(R, 0) &= W^*; \\ \frac{\partial U}{\partial R} &= 0 \Big|_{R=0}; \\ \frac{\partial U}{\partial R} + (g + he^{-\lambda x})(U - vW_c) &= 0 \Big|_{R=1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $b_m = a_m / R_0^2$; $W^* = W(0)$; $g = a_0 R_0 / \lambda_m$; $h = b_0 R_0 / \lambda_m$; v — коэффициент хлорпоглощения, характеризующий способность водного потока сорбировать хлор; W_c — хлорсодержание среды.

Решение сформулированной задачи и рассмотренных ниже аналогичных краевых задач при отсутствии их точного решения будем определять приближенно методом спектральной оптимизации, т. е. в виде быстроходящегося ряда [3]. Так, в данном случае приближенное выражение для $U(R, x)$, которое обозначим $\tilde{U}(R, x)$, будет иметь вид

$$\tilde{U}(R, x) = \sum_{i=1}^n D_i f_i(R, x), \quad (7)$$

где $f_i(R, x)$ — последовательность линейно независимых функций, способ построения которых изложен [3]; D_i — коэффициенты разложения.

Усредняя исходное дифференциальное уравнение (5) в соответствии с формулой (4) при краевых условиях (6) и допуская, что

$$\frac{\partial U}{\partial R} \Big|_{R=1} = (g + he^{-\lambda x}) [vW_c - W(x)], \quad (8)$$

получаем следующее дифференциальное уравнение относительно искомой функции [3]:

$$(V_m - V_1 e^{-\alpha x}) \frac{\partial W}{\partial x} + (1 + v\varepsilon)(c' + c'' e^{-\lambda x})W = v\varepsilon G^* (c' + c'' e^{-\lambda x}) \quad (9)$$

при начальном условии

$$W(0) = W^*,$$

где $\varepsilon = 1/g$; $c' = ag$; $c'' = ah$; $a = 2a_m / R_0^2$; $G^* = W^* + qW_c^*$; $q = Q_B / Q$; Q_B, Q — расход воды и хлора через эжектор соответственно.

Введя функцию

$$\theta(x) = \frac{W(x) - W^*}{v\varepsilon G^* - (1 + v\varepsilon)W^*}, \quad (10)$$

запишем дифференциальное уравнение для обобщенной характеристики среднего влагосодержания материала

$$(V_m - V_1 e^{-\sigma x}) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (1 + v\varepsilon)(c' + c'' e^{-\lambda x}) \theta = c' + c'' e^{-\lambda x} \quad (11)$$

с начальным условием $\theta(0) = 0$, точное решение которого выражается следующей зависимостью:

$$F_1(x) = (-1)^{m+1} \frac{e^{\xi x} + B}{(e^{\xi x} - B) \prod_{k=1}^{n_0-1} \Phi_k(x)}. \quad (12)$$

Здесь

$$\theta(x) = c e^{c'(1+v\varepsilon)x} (V_m - V_1 e^{-\sigma x})^{-\frac{c'(1+v\varepsilon)}{n_0}} [F_1(x)]^D F_2(x) + \frac{1}{1+v\varepsilon};$$

$$c = -(V_m - V_1)^{-\frac{c'(1+v\varepsilon)}{2n_0}} \left\{ (1 + v\varepsilon) [F_1(0)]^D F_2(0) \right\}^{-1};$$

$$D = \frac{Ac''(1+v\varepsilon)}{2n_0}; \quad A = \frac{1}{\xi} \left[\frac{V_m}{V_1} \right]^{a_2/a_1};$$

$$F_2(x) = \exp \left[2D \sum_{k=1}^{n_0-1} \sin \left(\frac{km\pi}{n_0} \right) \operatorname{arctg} \frac{e^{\xi x} - B \cos \left(\frac{k\pi}{n_0} \right)}{B \sin \left(\frac{k\pi}{n_0} \right)} \right];$$

$$\Phi_k(x) = 1 - \frac{2}{B} e^{\xi x} \cos \left(\frac{k\pi}{n_0} \right) + \frac{1}{B^2} e^{\xi^2 x}, \quad k = 1, \dots, n_0 - 1;$$

$$B = \left[\frac{V_1}{V_m} \right]^{1/a_1};$$

$$n_0 = a_1/2; \quad m = a_1 - a_2; \quad a_1 = \sigma/\xi; \quad a_2 = \lambda/\xi.$$

Масштабный множитель ξ выбираем из условия, чтобы при известных σ и λ значения a_1 и a_2 являлись целыми числами.

Таким образом, среднее хлорсодержание водяного потока определяется соотношением

$$W(x) = W^* + \left[v\varepsilon G^* - (1 + v\varepsilon)W^* \right] \theta(x). \quad (13)$$

К числу недостатков такого расчета следует отнести громоздкость выражения (12), что затрудняет его анализ и применение, например, для получения передаточной функции системы и ее частотных характеристик.

Эти недостатки можно устранить, если расчет среднего хлорсодержания $\theta_c(\tau)$ выполнить по методике, изложенной в работе [3]. При этом для обобщенной динамической характеристики как функции времени получено простое приближенное выражение в виде экспоненциального ряда, и среднее хлорсодержание водяного потока $W(\tau)$ можно вычислить по формуле

$$W(\tau) = W^* + \left[v\varepsilon G^* - (1 + v\varepsilon)W^* \right] \left[\theta_c(\tau) + \frac{1}{1 + v\varepsilon} \right]. \quad (14)$$

Такое решение удобно при ограниченном изменении исходных параметров, входящих в правую часть уравнения, так как в противном случае может оказаться необходимым повторный расчет $\theta_c(\tau)$ с построением оптимального базиса для обеспечения требуемой точности приближения в заданном диапазоне изменения этих параметров, возможно, с увеличением значения n в формуле [7]. В этом смысле точное решение дифференциального уравнения (11) является более предпочтительным, хотя оно также приближенно отражает реальный процесс, если учесть принятое в ходе преобразований исходной краевой задачи допущение (8). По этой причине определенное значение может иметь и приближенное решение дифференциального уравнения (5) спектральным методом наименьших квадратов [4].

Каждый из рассмотренных вариантов расчета среднего хлорсодержания потока имеет свои достоинства и недостатки. Выбор одного из них для решения конкретной технической или исследовательской задачи зависит от требований к искомому результату.

Расчет распределенного хлорсодержания потока в эжекторе. Определение изменения распределения хлора в потоке хлорируемой воды связано с непосредственным решением краевой задачи (5), (6). Найти ее точное решение не представляется возможным, а если учесть, что коэффициент газоотдачи α_m является функцией скорости движения хлоргаза по диффузору эжектора и трубопроводу, которая

существенно изменяется, то станет ясно, что получение приближенного решения этих задач затруднительно. Предварительный анализ показывает, что наименее трудоемким является решение краевой задачи (5), (6) методом моментов с оптимизацией базисных элементов [4].

Сформулируем исходную задачу. Необходимо определить функцию $U(R, \tau)$, являющуюся решением дифференциального уравнения

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{a_m}{R_0^2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) \quad (15)$$

при начальном условии

$$U(R, 0) = W^* \quad (16)$$

и граничных условиях

$$\frac{\partial U}{\partial R} = 0 \Big|_{R=0}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} + (g + h \sum_{j=1}^m C_j e^{-\lambda_j \tau})(U - vW_c) \Big|_{R=1}. \quad (18)$$

Здесь, согласно формуле (3), коэффициент

$$\alpha_m(\tau) = a_0 + b_0 \sum_{j=1}^m C_j e^{-\lambda_j \tau},$$

где $\{C_j\}$, $\{\lambda_j\}$ — коэффициенты и параметры, определяемые при решении задачи аппроксимации функции

$$e^{-\lambda x(\tau)} = \left[\left(1 - \frac{V_1}{V_m}\right) e^{\sigma V_m \tau} + \frac{V_1}{V_m} \right]^{-\lambda/\sigma} \quad (19)$$

рядом $\sum_{j=1}^m C_j e^{-\lambda_j \tau}$. В выражении (19) учтено, что связь пространственной координаты x и временем τ через скорость движения V определяется формулой (2).

Решение поставленной задачи имеет вид

$$U(R, \tau) = W^* + [v\epsilon G^* - (1 + v\epsilon)W^*] \left[\frac{1}{1 + v\epsilon} + \theta(R, \tau) \right], \quad (20)$$

где $\theta(R, \tau)$ — обобщенная динамическая характеристика распределенного хлорсодержания материала, приближенное выражение для

которой как функции времени при фиксированном значении $R \in [0,1]$ строится в классе экспоненциальных базисов [4].

Итак, выражение (20) позволяет определять изменение хлорсодержания потока во времени τ при фиксированном $R \in [0,1]$, т. е. в некотором сечении водяного потока в трубопроводе. Такие вычисления необходимы для оценки допустимого режима хлорирования, при котором сохраняется способность хлора растворяться в воде. Дело в том, что исходное содержание хлора в потоке воды W_c , температура, водородный показатель рН и окислительно-восстановительный потенциал (Redox) воды в трубопроводе влияют на растворимость хлора в воде. Если не учитывать эти факторы, то возможно перенасыщение потока воды хлором, т. е. часть введенного в воду хлора не сможет в ней раствориться, а значит, при ее выходе из трубопровода в резервуар с открытой поверхностью будет происходить испарение нерастворенного хлора в воздух. Поэтому необходимо выбрать такой режим хлорирования, при котором хлорсодержание $U(R, \tau)$ в процессе хлорирования было таково, что

$$2 \int_0^1 RU(R, \tau) dR \leq W_{\max} \quad (21)$$

в любом сечении трубопровода.

Возможен и иной вариант определения распределенного хлорсодержания на основе применения к исходному дифференциальному уравнению двумерного интегрального преобразования, например, с ядром

$$H(s_1, s_2, R, \tau) = \text{ch}(s_1 R) e^{-s_2 \tau} \quad (22)$$

и исключения «лишних» граничных функций [4]. Это позволило бы иметь приближенное выражение для $U(R, \tau)$ как функции не только времени τ , но и пространственной координаты R . Однако такой подход дает приближение в классе заведомо более сложных базисов и поиск оптимального базиса будет более трудоемким, так как увеличится размерность подпространства поиска.

Расчет коэффициента хлорпоглощения. Для определения массообменных характеристик процесса эжекции должно быть известно значение коэффициента хлорпоглощения ν , который входит в граничное условие краевой задачи (5), (6). Рассмотрим возможности его вычисления.

Из краевой задачи (5), (6) и физики процесса следует, что при $x \rightarrow \infty$ $W(x) \rightarrow \nu W_c(x)$. Если обозначить $W(\infty) = W_k$ и $W_c(\infty) = W_{ck}$, то коэффициент хлорпоглощения в состоянии равновесия ν_p будет определяться соотношением

$$v_p = \frac{W_k}{W_{ck}}, \quad (23)$$

причем в нашем случае $W_{ck} = W_c^*$.

Коэффициент v , входящий в указанные граничные условия, зависит от содержания растворенного хлора в исходной воде W_c , температуры потока воды $T_n(x)$, значений pH и Redox воды, т. е.

$$v = v(W_c, T_n, \text{pH}, \text{Redox}). \quad (24)$$

Для исключения передозировки эжектируемого в воду хлора должно выполняться условие

$$2 \int_0^1 RU(R, X) dR = W(X) \leq vW_c \quad (25)$$

в любом сечении X трубопровода после эжектора.

В нашем случае W_c является постоянной величиной ($W_c = W_c^*$) и, если пренебречь изменением температуры потока воды в трубопроводе, то параметры pH и Redox воды следует также рассматривать постоянными, равными их значениям на входе в диффузор эжектора, т. е. $\text{pH} = \text{pH}^*$, $\text{Redox} = \text{Redox}^*$.

Тогда коэффициент $v = v_p$ и может быть вычислен по диаграммам, которые определяют значения идеального равновесного хлорсодержания W_p^0 , а с учетом начального наличия в воде хлора

$$W_p = W_p^0 - W_c^*,$$

причем

$$W_p = vW_c,$$

а значит,

$$v = \frac{W_p}{W_c}.$$

Таким образом, задача определения хлоропоглощения в зависимости от параметров эжектора и характеристик водного раствора решена.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кожевников А.Б., Петросян О.П. Проблемы конструкций хлораторов эжекционного типа. *ЖКХ*, 2002, № 6.
- [2] Кожевников А.Б., Петросян О.П. *Эжектор для дозирования газообразного хлора в воду*. Москва, Роспатент. Рег. № 2367508, приоритет 09.01.2008.
- [3] Кожевников А.Б., Петросян О.П. *Эжекция и сушка материалов в режиме пневмотранспорта*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

- [4] Кожевников А.Б., Петросян О.П. Спектральная адаптация метода наименьших квадратов к динамике объектов водоподготовки с распределенными параметрами. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, 2010, № 10.

Статья поступила в редакцию 05.05.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петросян О.П., Кожевников А.Б., Орлова Н.А., Парамонов С.С., Мясников Б.И., Петросян А.О. Хлораторы эжекционного типа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1260.html>

Петросян Ованес Петрович родился в 1950 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1978 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов. e-mail: petrosyan-kravt@mail.ru

Кожевников Александр Борисович родился в 1942 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов. e-mail: kravt@kaluga.ru

Орлова Наталья Андреевна родилась в 1947 г., окончила МГУ им. М.В. Ломоносова в 1972 г. Ассистент кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов. e-mail: kravt@kaluga.ru

Парамонов Сергей Сергеевич родился в 1991 г., студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедры «Технология сварки». Область научных интересов: автоматизация технологических процессов. e-mail: paramonov231992@mail.ru

Мясников Борис Иванович родился в 1938 г., окончил ЛЭТИ им. В.И. Ульянова в 1962 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов. e-mail: kravt@mail.ru

Петросян Анастасия Ованесовна родилась в 1993 г. Студентка кафедры «Промышленная экология и химия» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: petrosyan-kravt@mail.ru

Chlorinators of the ejection type

© O.P. Petrosyan, A.B. Kozhevnikov, N.A. Orlova, S.S. Paramonov,
B.I. Myasnikov, A.O. Petrosyan

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University Kaluga, 248000, Russia

The article describes the work of one of the basic units of the chlorinator of ejection (vacuum) type — water pump (ejector). We justify the choice of the ejector parameters that characterize its performance. The problem of determining the chlorine absorption is solved; we showed that it depended on the parameters of the ejector and on the characteristics of an aqueous solution that allows you to ensure the accuracy of dosing of chlorine gas and eliminate the possibility of an overdose.

Keywords: ejector, chlorine absorption, vacuum regulator, jet pump, chlorinator, mixing chamber, diffuser.

REFERENCES

- [1] Kozhevnikov A.B., Petrosyan O.P. *ZhKKh — Housing and Communal Services*, 2002, no. 6.
- [2] Kozhevnikov A.B., Petrosyan O.P. *Ezhektor dlya dozirovaniya gazoobraznogo khloro v vodu* [Ejector for dispensing gaseous chlorine in water]. Moscow, Rospatent, reg. no. 2367508, priority 09.01.2008.
- [3] Kozhevnikov A.B., Petrosyan O.P. *Ezhektiya i sushka materialov v rezhime pnevmotransporta* [Ejection and drying of materials in pneumatic transport mode]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 132 p.
- [4] Kozhevnikov A.B., Petrosyan O.P. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. — Water Cleaning. Water Treatment. Water Supply*, 2010, no. 10.

Petrosyan O.P. (b. 1950) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1978. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: petrosyan-kravt@mail.ru

Kozhevnikov A.B., (b. 1942) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1970. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: kravt@kaluga.ru

Orlova N.A. (b. 1947) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1972. Assistant lecturer of the Physics Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: kravt@kaluga.ru

Paramonov S.S. (b. 1991) is a student at Welding Practices Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: paramonov231992@mail.ru

Myasnikov B.I. (b. 1938) graduated from Leningrad Electrotechnical Institute (LETI) named after V.I. Ulyanov in 1962. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: kravt@mail.ru

Petrosyan A.O. (b. 1993) is a student at the Industrial Ecology and Chemistry Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include automation of technological processes. e-mail: petrosyan-kravt@mail.ru