



УДК 539.3/.6:621.783:624.072.21

Б.М. Абдеев, Е.Б. Шестакова, А.В. Вавилов  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

К РАСЧЕТУ МНОГОПРОЛЕТНЫХ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ БАЛОК  
С ЖЕСТКОПОДВИЖНЫМИ КОНЦАМИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ТРЕХ МОМЕНТОВ

Важнейшим типом статически неопределеных систем, с практической точки зрения, является многопролетная балка, проходящая, не прерываясь, над рядом промежуточных опор  $n$ , с которыми она связана шарнирно (рис. 1).

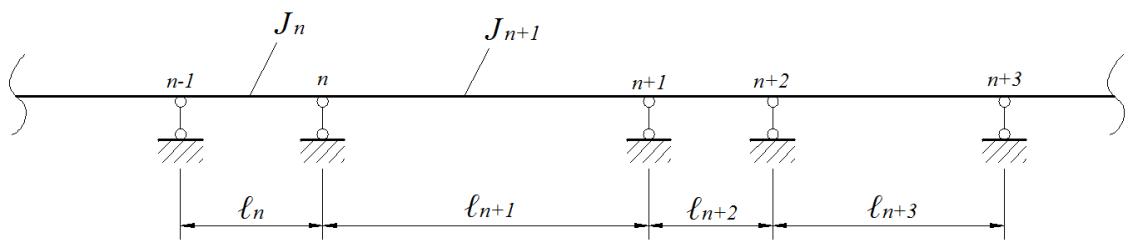


Рисунок 1

Неразрезные прямолинейные брусья, обладающие простой структурой, широко применяются в железобетонных, деревянных и металлических балочных сооружениях в качестве несущего элемента или их основной части [1,2]. Стержневая модель, изображенная на рис. 1, часто встречается при проектировании зданий, трубопроводов [3], мостов и различных специальных конструкций.

Расчет неразрезной балки из однородного изотропного материала с модулем упругости  $E=const$ , имеющей несмещающиеся опоры и постоянные главные осевые моменты инерции  $J_n, J_{n+1}, \dots$  поперечных сечений в пределах каждого участка длиной  $\ell_n, \ell_{n+1}, \dots$  (рис. 1), осуществляется по универсальному классическому уравнению следующего вида [2]:

$$\ell'_n M_{n-1} + 2(\ell'_n + \ell'_{n+1})M_n + \ell'_{n+1}M_{n+1} = -6\left(\frac{J^O}{J_n} \cdot B_n^\phi + \frac{J^O}{J_{n+1}} A_{n+1}^\phi\right), \quad (1)$$

где  $J^O = const$  - произвольный момент инерции, численная величина которого не имеет значения;

$\ell'_n, \ell'_{n+1}$  - приведенные пролеты:

$$\ell'_n = \frac{J^O}{J_n} \ell_n, \quad \ell'_{n+1} = \frac{J^O}{J_{n+1}} \ell_{n+1}; \quad (2)$$

$M_{n-1}, M_n, M_{n+1}$  - неизвестные опорные моменты в основной статически определимой системе, представляющей собой совокупность однопролетных шарнирно опертых

балок (рис. 2);

$B_n^\phi$ ,  $A_{n+1}^\phi$  – соответственно правая «фиктивная» опорная реакция на участке длиной  $\ell_n$  и левая ( $A_{n+1}^\phi$ ) – для пролета  $\ell_{n+1}$ .

Методика определения  $B_n^\phi$  и  $A_n^\phi$  хорошо изложена во многих справочно-нормативных и учебных источниках [1, 2, 4, 5]. Для трех типичных нагрузок формулы произведений  $6 \cdot A^\phi$  и  $6 \cdot B^\phi$  приведены в таблице на основании справочных данных [2, 6].

В частном случае

$$J_n = J_{n+1} = \dots = J = J^o = const \quad (3)$$

соотношение (1) принимает более простой вид:

$$\ell_n M_{n-1} + 2(\ell_n + \ell_{n+1})M_n + \ell_{n+1}M_{n+1} = -6(B_n^\phi + A_{n+1}^\phi). \quad (4)$$

Уравнения (1) или (4) устанавливают зависимость между тремя моментами  $M_{n-1}$ ,  $M_n$ ,  $M_{n+1}$  для двух смежных пролетов  $\ell_n$  и  $\ell_{n+1}$  неразрезной балки. Число таких уравнений равно количеству промежуточных шарнирных опорных устройств.

Значения изгибающих моментов  $M = M(x)$  и поперечных сил  $Q = Q(x)$ , возникающих в произвольном сечении с абсциссой  $x$  участка  $\ell_n$  балочного стержня (рис. 1 и 2), аппроксимируются формулами [2, 5]:

$$M = M(x) = M^o + M_{n+1} + \frac{M_n - M_{n-1}}{\ell_n} x; \quad (5)$$

$$Q = Q(x) = Q^o + \frac{M_n - M_{n-1}}{\ell_n}, \quad 0 \leq x \leq \ell_n, \quad (6)$$

где  $M^o = M^o(x)$ ,  $Q^o = Q^o(x)$  – моментная и силовая функции от заданной активной нагрузки в простой балке пролетом  $\ell_n$ .

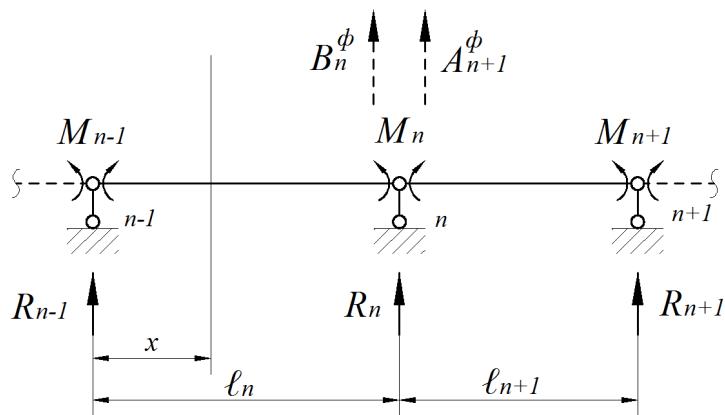
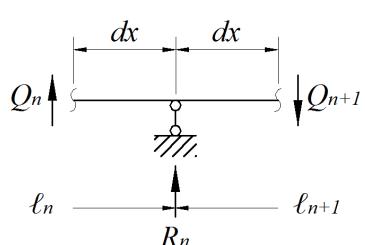


Рисунок 2

Расчетная схема балки	$6A^\phi$	$6B^\phi$
	$P\ell^2 \cdot UV(I+V)$	$P\ell^2 \cdot UV(I+U)$
	$\frac{q\ell^3}{4}$	$\frac{q\ell^3}{4}$
	$-m\ell(I-3V^2)$	$m\ell(I-3U^2)$

Опорную реакцию  $R_n$  представляем аналитическим выражением (рис. 3) [2]

$$R_n = Q_{n+1} - Q_n, \quad (7)$$



в котором через  $Q_{n+1}$  и  $Q_n$  обозначены поперечные силы в сечениях заданной системы (рис. 1), расположенных на бесконечно малых расстояниях  $dx$  справа и слева от точки  $n$  (см. схему рис. 3).

Известный алгоритм решения системы алгебраических уравнений (1) разработан для трех вариантов граничных условий (рис. 4) [2].

Рисунок 3

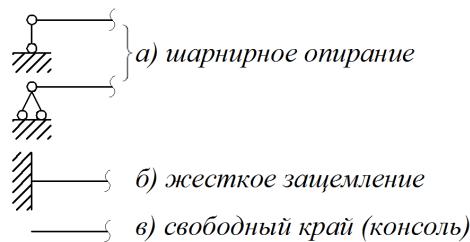


Рисунок 4

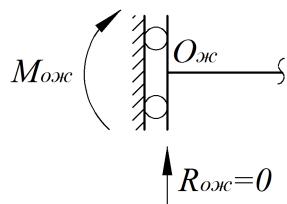


Рисунок 5

В данной статье предлагается новая модификация теории расчета внутренних усилий  $M$  и  $Q$  неразрезной балки с использованием зависимости (1), имеющей на любом конце жесткоподвижное закрепление при нулевой реактивной силе  $R_{ожс} = 0$  и неизвестном опорном моменте  $M_{ожс}$  (рис. 5).

Для решения поставленной задачи вводим в расчетную модель рисунка 6: 1) удвоенный размер  $2\ell_1 = L_1$  крайнего пролета при условии соблюдения «зеркальной» симметрии по отношению к сечению  $O_{жс}$  всех внешних нагрузок основной статически определимой системы; 2) шарнирную опору « $O$ » на левом конце участка  $L_1$  (рис. 6 – пунктирная линия).

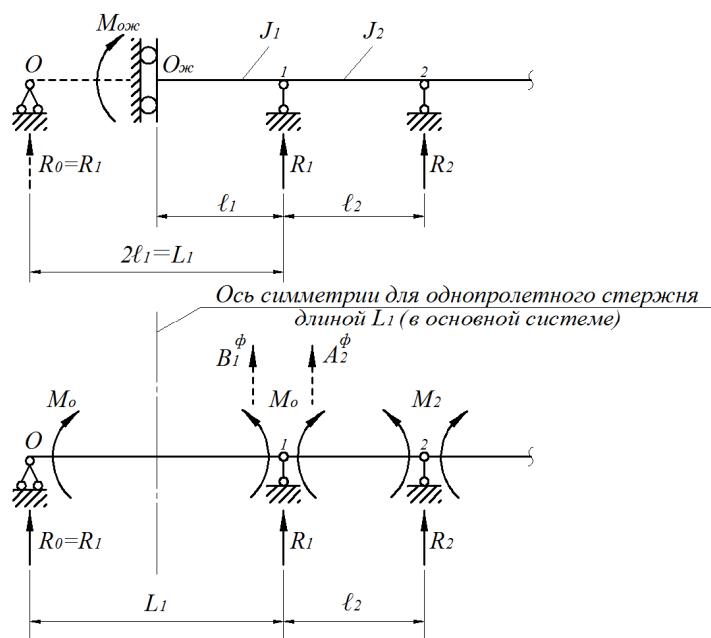


Рисунок 6

Такая замена не меняет физико-механический смысл и содержание общей формулы (1), когда  $n=2,3,\dots$ , а для  $n=1$  целесообразно записать специальное дополнительное

уравнение, включающее опорные моменты  $M_o = M_1$  и  $M_2$ , учитывая указанный выше осесимметричный характер напряженно-деформированного состояния простой балки пролетом  $L_1$ :

$$L'_1 M_0 + 2(L'_1 + \ell'_2)M_0 + \ell'_2 M_2 = -6\left(\frac{J^0}{J_1} \cdot B_1^\phi + \frac{J^0}{J_2} A_2^\phi\right), \quad (8)$$

где, согласно зависимостям (2),

$$L'_1 = \frac{J^0}{J_1} L_1 = 2 \frac{J^0}{J_1} \ell_1, \quad (9)$$

При этом основная система, представленная на рисунке 6, полностью адекватна заданной статически неопределенной конструкции. Очевидно, что аналогичная процедура видоизменения расчетной схемы возможна и на правом конце балочного стержня.

*Пример расчета.* Построить эпюры  $M$  и  $Q$  для неразрезной трехпролетной балки постоянной жесткости  $EJ_1 = EJ_2 = EJ_3 = EJ = const$  при  $q = const$ ,  $\ell_1 = 1 \text{ м}$ ,  $\ell_2 = 4 \text{ м}$ ,  $\ell_3 = 2 \text{ м}$  (рис. 7) и найти абсолютные максимумы  $M_{\max}$ ,  $Q_{\max}$ .

Два уравнения трех моментов (4) имеют вид, принимая во внимание выражения (8) – (9), условия поставленной задачи и данные таблицы:

$$\begin{cases} L_1 M_0 + 2(L_1 + \ell_2)M_0 + M_3 \ell_2 = -\frac{qL_1^3}{4} - \frac{q\ell_2^3}{4}, \\ \ell_2 M_0 + 2(\ell_2 + L_3)M_3 + M_3 L_3 = -\frac{q\ell_2^3}{4} - \frac{qL_3^3}{4} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \ell_2 M_0 + 2(\ell_2 + L_3)M_3 + M_3 L_3 = -\frac{q\ell_2^3}{4} - \frac{qL_3^3}{4} \end{cases} \quad (11)$$

или, после замены буквенных обозначений  $\ell_1$ ,  $\ell_2$ ,  $\ell_3$ ,  $L_1 = 2\ell_1$ ,  $L_3 = 2\ell_3$  заданными числовыми значениями, получаем систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 7M_0 + 2M_3 = -9q \\ M_0 + 5M_3 = -8q \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} M_0 + 5M_3 = -8q \end{cases} \quad (13)$$

из решения которой определяем (рис. 7):

$$M_0 = M_1 = -0,88 \text{ м}^2 \cdot q; \quad M_3 = M_2 = -1,424 \text{ м}^2 \cdot q. \quad (14)$$

Аналитические зависимости для  $M^0$  и  $Q^0$  в простых шарнирно опертых балках длиной, соответственно,  $L_2$ ,  $\ell_2$  и  $L_3$  от равномерно распределенного давления  $q$  (рис. 7):

$$\begin{cases} M_{L1}^0 = \frac{qL_1}{2}x - \frac{qx^2}{2} = 0,5q(2-x) \cdot x, \\ Q_{L1}^0 = \frac{dM_{L1}^0}{dx} = q(1-x), \quad \ell_1 = 1 \text{ м} \leq x \leq L_1 = 2 \text{ м}, \end{cases} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\ell_2}^0 &= \frac{q\ell_2}{2}x - \frac{qx^2}{2} = 0,5q(4-x) \cdot x, \\ Q_{\ell_2}^0 &= \frac{dM_{\ell_2}^0}{dx} = q(2-x), \quad 0 \leq x \leq \ell_2 = 4 \text{ м}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{L_3}^0 &= \frac{qL_3}{2}x - \frac{qx^2}{2} = 0,5q(4-x) \cdot x, \\ Q_{L_3}^0 &= \frac{dM_{L_3}^0}{dx} = q(2-x), \quad 0 \leq x \leq \ell_3 = 2 \text{ м}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Результирующие функции  $M$  и  $Q$  для участков  $\ell_1$ ,  $\ell_2$ ,  $\ell_3$  рассматриваемой статически неопределенной системы в соответствии с (5)-(6) и (14)-(17):

$$\left. \begin{aligned} M_{\ell_1} &= M_{L_1}^0 + M_0 + \frac{M_0 - M_0}{L_1}x = q[0,5(2-x) \cdot x - 0,88], \\ Q_{\ell_1} &= \frac{dM_{\ell_1}}{dx} = q(1-x), \quad 1 \text{ м} \leq x \leq 2 \text{ м}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\ell_2} &= M_{\ell_2}^0 + M_0 + \frac{M_3 - M_0}{\ell_2}x = q[0,5(4-x) \cdot x - 0,136x - 0,88], \\ Q_{\ell_2} &= \frac{dM_{\ell_2}}{dx} = q(1,864 - x), \quad 0 \leq x \leq 4 \text{ м}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\ell_3} &= M_{L_3}^0 + M_3 + \frac{M_3 - M_3}{L_3}x = q[0,5(4-x) \cdot x - 1,424], \\ Q_{\ell_3} &= \frac{dM_{\ell_3}}{dx} = q(2-x), \quad 0 \leq x \leq 2 \text{ м}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Эпюры  $M$  и  $Q$ , построенные по функциональным зависимостям (18)-(20), проиллюстрированы рисунком 7, из которого следует, что в опасном сечении балки:

$$M_{\max} = |M_2| = 1,424 \text{ м}^2 \cdot q, \quad Q_{\max} = 2,136 \text{ м} \cdot q; \quad (21)$$

а на ее жесткоподвижных краях:

$$M_{o\infty} = -0,38 \text{ м}^2 \cdot q, \quad M_{3\infty} = 0,576 \text{ м}^2 \cdot q. \quad (22)$$

Проектируя все внешние нагрузки на вертикальную ось  $Y$ , будем иметь, после вычисления, руководствуясь выражением (7), опорных реакций  $R_1 = 2,864 \text{ м} \cdot q$  и  $R_2 = 4,136 \text{ м} \cdot q$  (рис. 7):

$$\Sigma Y = R_1 + R_2 - q(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3) = 2,864q + 4,136q - 7q = 0, \quad (23)$$

и эта проверка подтверждает правильность определения внутренних усилий  $M_{\ell_1}$ ,  $M_{\ell_2}$ ,  $M_{\ell_3}$ ,  $Q_{\ell_1}$ ,  $Q_{\ell_2}$ ,  $Q_{\ell_3}$ .

Полученные результаты можно непосредственно использовать, например, для оценки прочности, жесткости и устойчивости прямолинейных воздушных переходов магистральных нефте- и газопроводов (рис. 8) [3] при условии отсутствия опор в местах

выхода трубы из земли, осадка которой на расчетной схеме неразрезной балки приближенно учитывается моделью рис. 5, не предусматривающей ее связь с физико-механическими характеристиками грунта.

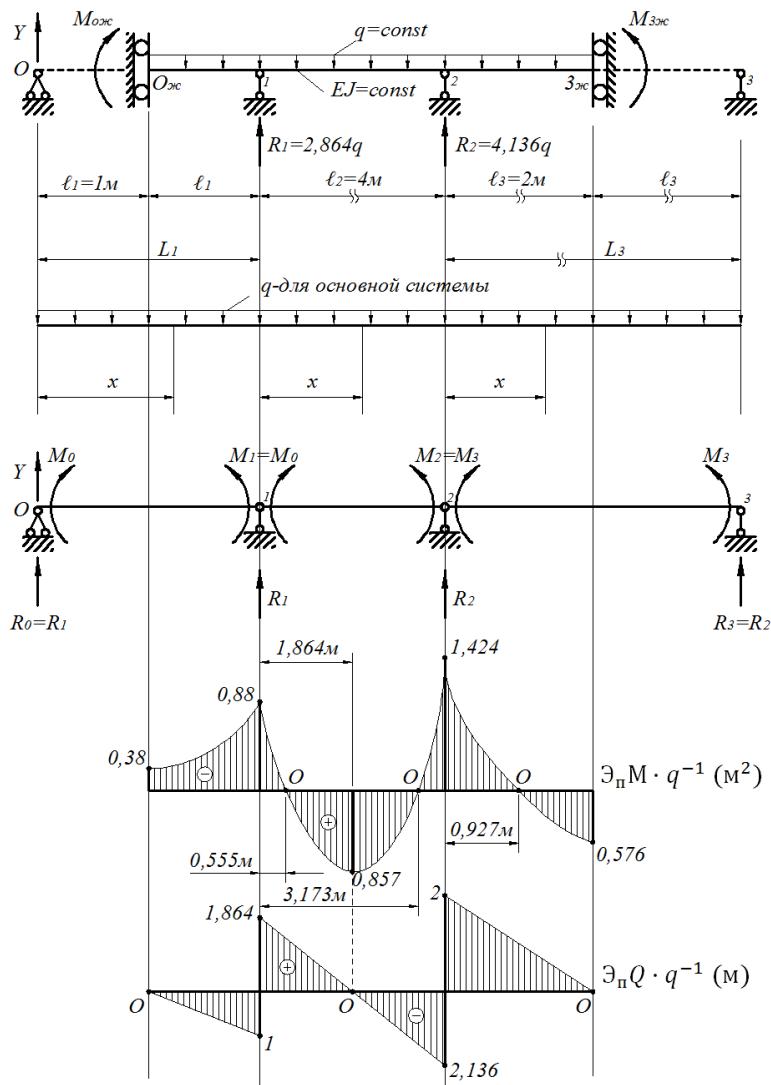


Рисунок 7

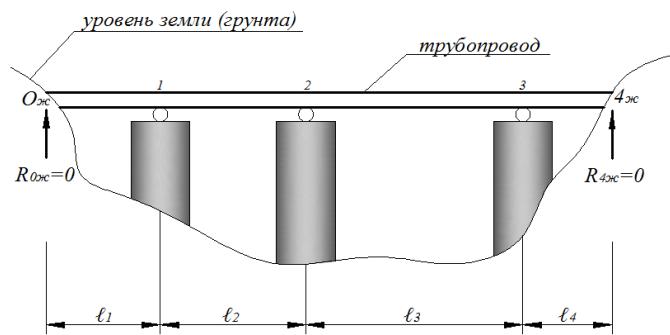


Рисунок 8

Эта идеализирующая предпосылка значительно упрощает теорию расчета подобных статически неопределеных конструкций и идет в запас их несущей способности, поскольку грунтовое основание в местах « $0_{\infty}$ » и « $4_{\infty}$ » контакта с трубопроводом не препятствует, вследствие  $R_{0\infty} = R_{4\infty} = 0$  (рис. 8), его поперечному изгибу.

## Список литературы

1. Тимошенко С.П. Механика материалов / Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука // С.П. Тимошенко, Дж. Гере; Под ред. Э.И. Григорюка. - М.: Мир, 1976. - 671 с.
2. Рабинович И.М. Основы строительной механики стержневых систем. - М.: Госстройиздат, 1960. - 550с.
3. Айнбinder А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбinder, А.Г. Камерштейн. - М.: Недра, 1982. - 341 с.
4. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. - Киев: Наукова думка, 1975. - 704 с.
5. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шapiro. - М.: Высшая школа, 1969. - 734 с.
6. Дыховичный Ю.А. Краткий справочник по проектированию жилых и гражданских зданий / Ю.А. Дыховичный, М.С. Каменкович. - М.: Госстройиздат, 1963. - 508 с.

Получено 15.07.09

УДК 519.87:62.5

**Н.В. Аринова, Г.К. Шадрин**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ  
ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СИЛИКАТНОЙ СМЕСИ**

Математическая модель составляется для решения задач автоматической стабилизации приготовления силикатной смеси.

Рассмотрим процесс перемешивания в двухвальном смесителе. На загрузочную воронку смесителя поступают исходные компоненты: песок, вяжущее и конденсат. Эти компоненты перемешиваются и одновременно перемещаются лопатками смесителя к разгрузочному концу. Рассмотрим динамические свойства смесителя по каналам: «подача  $F_P, F_B, F_K \rightarrow$  суммарный расход силикатной смеси на выходе смесителя  $F_{\Sigma}$ » и «подача

$F_P, F_B, F_K \rightarrow$  влажность смеси на выходе смесителя  $M_c$ . Смеситель представляет собой систему с распределенными параметрами, причем перемешивание происходит как в продольном, так и в поперечном направлениях. Аналитический расчет динамических характеристик смесителя представляет значительные трудности. Поэтому эти характеристики определены на действующем смесителе завода «Силикат» г. Семей.

Экспериментально была снята кривая разгона по каналу «подача  $F_K \rightarrow$  влажность смеси на выходе смесителя  $M_c$ » (табл. 1). При этом ступенчато изменялась подача конденсата в смеситель и отбирались пробы готовой смеси на выходе смесителя через каждую секунду. Кривая разгона имеет вид на рис. 1.

Таблица 1

Экспериментальная кривая разгона смесителя по каналу  
подачи конденсата в приращениях

$\Delta M_c(t) \%, t, \text{с}$
0 0
... ...
42 0
0,055 43
0,066 44
0,198 45
0,396 46
0,616 47
0,704 48
0,924 49
1,1 50
1,166 51
1,386 52
1,65 53
1,672 54
1,848 55
1,892 56
2,002 57
2,002 58
2,004 59
2,004 60
2,068 61
2,156 62
2,134 63
2,156 64
2,178 65
2,178 66

$\Delta M_c(t) = M_c(t) - M_{c \text{ ном}}$  - приращение выходной величины как функция времени (на рис. 1);

$M_c(t)$  – текущее значение кривой разгона во времени;

$M_{c \text{ ном}} = 4,96 \%$  – номинальное значение выходной величины (установившееся значение кривой разгона до нанесения целенаправленного возмущения);

$M_{c \text{ уст}} = 7,16 \%$  – установившееся значение выходной величины после нанесения возмущения;

$$\Delta M_{c \text{ уст}} = M_{c \text{ уст}} - M_{c \text{ ном}} = 2,2 \text{ %}.$$

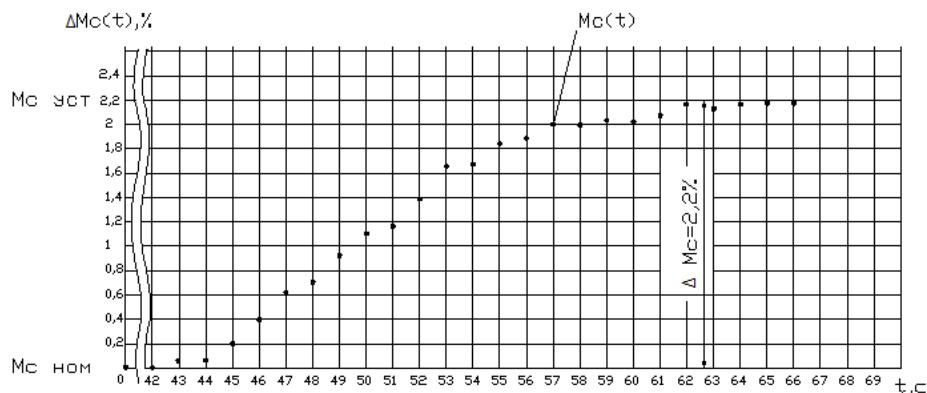


Рисунок 1 – Экспериментальная кривая разгона смесителя по каналу расхода конденсата в приращениях

По рис. 1 находим транспортное запаздывание  $\tau_{cm} = 43\text{с}$ .

Как видно из кривой разгона, имеется значительное транспортное запаздывание  $\tau_{cm} = 43$  с и плавный подъем выходной переменной (влажности) до установившегося значения. Это объясняется тем, что в смесителе перемешивается некоторый слой материала в окрестности поперечного сечения смесителя и в то же время это сечение лопатками передвигается вместе с материалом от загрузки к выпуску. При ступенчатом изменении расхода одного из компонентов это изменение появится на выходе спустя время, равное времени движения материала в смесителе. В процессе движения происходит активное перемешивание материала в поперечном сечении смесителя и некоторое перемешивание в продольном направлении. Таким образом, за счет перемешивания слоя входная ступенчатость сгладится. Примем, что процесс сглаживания, фильтрации описывается апериодическим звеном второго порядка.

Передаточная функция смесителя в общем виде по  $i$ -му каналу

$$W_{cmi}(s) = \frac{K_{cmi}}{(a_{cm}s^2 + a'_{cm}s + 1)} e^{-\tau_{cm}s}, \quad (1)$$

где  $\tau_{cm}$  – время движения материала в смесителе;

$i$  – номер канала;

$K_{cmi}$  - коэффициент передачи смесителя по  $i$ -му каналу;

$a_{cm}$ ,  $a'_{cm}$  - коэффициенты, зависящие от скорости движения материала.

Кривая разгона смесителя по каналу «подача  $F_K \rightarrow$  влажность смеси на выходе смесителя  $M_c$ » в безразмерной форме получена при использовании масштабов по времени  $M_t=1\text{с}$  и по влажности смеси  $M_m = 2,2\%$  (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальная кривая разгона смесителя по каналу  
подачи конденсата в безразмерной форме

$\Theta$	0	...	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
$\Delta y$	0	...	0	0,025	0,03	0,09	0,18	0,28	0,32	0,42	0,5	0,53	0,63	0,75	0,76	0,84	0,86	0,91	0,91	0,92	0,92	0,94	0,98	0,97	0,98	0,99	0,99

По данным табл. 2 построен график кривой разгона в безразмерной форме (рис. 2).

Определим передаточную функцию смесителя (1) способом, предложенным М.П. Симою (методом площадей).

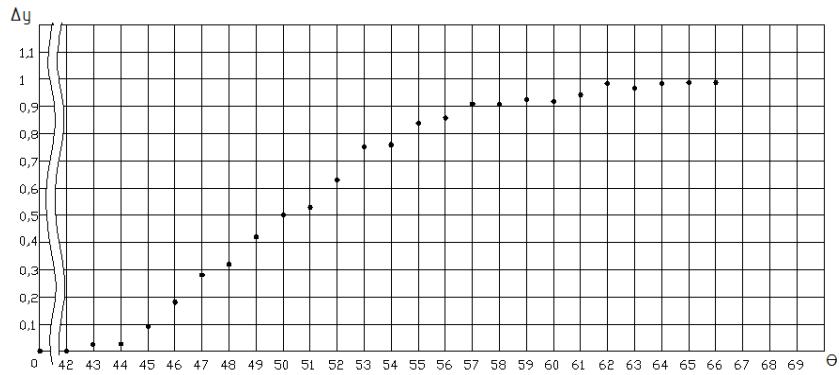


Рисунок 2 – Экспериментальная кривая разгона смесителя по каналу расхода конденсата в безразмерной форме

Коэффициенты  $a_{cm}$ ,  $\dot{a}_{cm}$  определяются по следующим формулам:

$$\dot{a}_{cm} = F_1 = \Delta t \cdot \left\{ \sum_{t=0}^n [1 - \Delta y(\Delta t \cdot i)] - 0,5 \cdot [1 - \Delta y(0)] \right\};$$

$$a_{cm} = F_2 = F_1 \cdot \Delta t \cdot \left\{ \sum_{t=0}^n [1 - \Delta y(\Delta t \cdot i)] \cdot \left[ 1 - \frac{i \cdot \Delta t}{F_1} \right] - 0,5 \cdot [1 - \Delta y(0)] \right\},$$

где  $n = 25$  – количество интервалов разбиения кривой разгона без учета транспортного запаздывания;

$\Delta t$  - интервал разбиения, численно равен масштабу по времени  $M_t=1\text{с}$ ;

$\Delta y$  - значение безразмерной кривой разгона в  $i$ -й момент времени (табл. 2).

Таким образом:

$$\dot{a}_{cm} = F_1 = 9,025 \text{ с} \quad \text{и} \quad a_{cm} = F_2 = 28,25 \text{ с}^2.$$

Определим коэффициент передачи смесителя по каналу «подача  $F_K \rightarrow$  влажность смеси на выходе смесителя  $M_c$ ». Для этого рассмотрим структуру смесителя как динамического объекта управления (рис. 3).

На рисунке 3 суммирование производится перед динамическим звеном, т.к. в реальном смесителе загрузка производится в одну точку на входе смесителя. Средняя влажность на выходе  $M_c$  в установившемся режиме вычисляется по формуле:

$$M_c = \frac{F_{вода}}{F_\Sigma} 100\% = \left( \frac{F_K}{F_\Sigma} + M_{II} \frac{F_{II}}{100\% \cdot F_\Sigma} - M_B \frac{F_B}{100\% \cdot F_\Sigma} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $F_{вода}$  - суммарный расход влаги на изменение влажности смеси в установившемся режиме, т/час;

$F_\Sigma = F_K + F_{II} + F_B$  - суммарный расход на выходе смесителя, т/час;

$M_{II}$  - влажность песка, %;

$M_B$  - влага, потребляемая вяжущим на химически связанные воды, %.

Иначе формула (2) выглядит следующим образом:

$$M_c = \frac{1}{F_K + F_{\Pi} + F_B} \cdot (F_K + M_{\Pi} \cdot \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \cdot \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%. \quad (3)$$

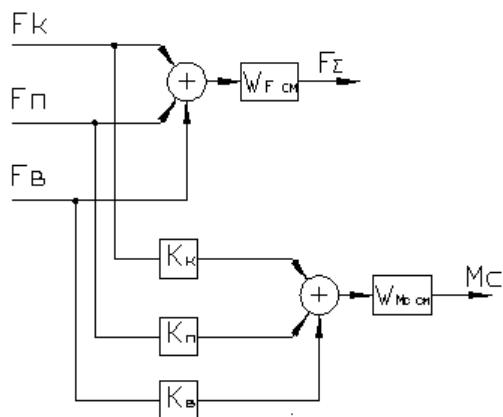


Рисунок 3 – Структура смесителя как динамического объекта управления:  $F_{\Sigma} = F_k + F_n + F_v$  - суммарный поток смеси на выходе смесителя;  $M_c$  – суммарная влажность на выходе смесителя;  $K_k, K_{\Pi}, K_B$  - коэффициенты передачи безинерционных звеньев, полученные в результате линеаризации по каналам: «расход конденсата – средняя влажность на выходе смесителя», «расход песка – средняя влажность на выходе смесителя», «расход вяжущего – средняя влажность на выходе смесителя»

Расчет номинальных значений расходов ведется в зависимости от производительности смесителя СМС-95 и технологии приготовления смеси. Производительность смесителя составляет  $95 \text{ м}^3/\text{час}$ . При ориентировочной плотности смеси на выходе смесителя  $\rho_{cm} = 1,29 \text{ т}/\text{м}^3$  производительность смесителя составляет  $122,57 \text{ т}/\text{час}$ .

Номинальный режим приготовления силикатной смеси перед подачей в силосы при такой производительности смесителя:

- расход вяжущего  $F_B = 24,9 \text{ т}/\text{час}$ ;
- расход конденсата  $F_K = 7,4 \text{ т}/\text{час}$ ;
- расход песка  $F_{\Pi} = 90,27 \text{ т}/\text{час}$ ;
- расход влаги, поступающей с песком,  $F_{M_{\Pi}} = 3,61 \text{ т}/\text{час}$ ;
- расход общей влаги, поступающей в процесс смещивания  $F_{M_{\text{общ}}} = 11,01 \text{ т}/\text{час}$ ;
- расход влаги, потребляемой на химическую активность вяжущего,  $F_{M_{\text{вяж}}} = 6,07 \text{ т}/\text{час}$ .

Из выражения (3) видно, что зависимость  $M_c = f(F_K, F_{\Pi}, F_B)$  - нелинейная со слабо выраженной нелинейностью. Для расчета системы управления выполняем ее линеаризацию.

В результате получена зависимость

$$\Delta M_c = K_k \Delta F_K + K_{\Pi} \Delta F_{\Pi} + K_B \Delta F_B,$$

где  $\Delta F_i$  - приращения соответствующих переменных относительно своего номинального значения;

$\Delta M_c = M_c - M_{c\text{ nom}}$  - приращение влажности смеси на выходе смесителя относительно своего номинального значения.

Приращения вычисляем по формулам

$$\Delta F_K = F_K(t) - F_{K\text{ nom}} ; \Delta F_{\Pi} = F_{\Pi}(t) - F_{\Pi\text{ nom}} ; \Delta F_B = F_B(t) - F_{B\text{ nom}} ,$$

где  $F_K(t), F_{\Pi}(t), F_B(t)$  - текущие значения расходов;

$F_{K\text{ nom}}, F_{\Pi\text{ nom}}, F_{B\text{ nom}}$  - номинальные расходы, определяемые технологией.

Коэффициенты могут быть найдены как частные производные

$$K_K = \frac{\partial M_C}{\partial F_K} ; K_{\Pi} = \frac{\partial M_C}{\partial F_{\Pi}} ; K_B = \frac{\partial M_C}{\partial F_B} . \quad (4)$$

Найдем коэффициенты передачи по каналам расхода конденсата, песка и вяжущего по формулам (4), используя их номинальные значения.

$$\begin{aligned} K_K &= \frac{\partial M_C}{\partial F_K} = \frac{\partial \left( \frac{1}{F_K + F_{\Pi} + F_B} \cdot (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\% \right)}{\partial F_K} = \\ &= \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot ((F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%)'}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} - \\ &- \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\ &= \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot 100\% - (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\ &= \frac{(7,4 + 90,27 + 24,9) \cdot 100\% - (7,4 + \frac{4 \cdot 90,27}{100\%} - \frac{24,4 \cdot 24,9}{100\%})}{(7,4 + 90,27 + 24,9)^2} = 0,783 \left[ \frac{\%}{\text{т/час}} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\Pi} &= \frac{\partial M_C}{\partial F_{\Pi}} = \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot ((F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%)'}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} - \\
 &- \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B)' \cdot (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\
 &= \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot M_{\Pi} - (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\
 &= \frac{(7,4 + 90,27 + 24,9) \cdot 4\% - 100\% \cdot (7,4 + \frac{4\% \cdot 90,27}{100\%} - \frac{24,4\% \cdot 24,9}{100\%})}{(7,4 + 90,27 + 24,9)^2} = -0,0002 \left[ \frac{\%}{\text{т/час}} \right]; \\
 K_B &= \frac{\partial M_C}{\partial F_B} = \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot ((F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%)'}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} - \\
 &- \frac{(F_K + F_{\Pi} + F_B)' \cdot (F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\%}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\
 &= \frac{(F_K + M_{\Pi} \frac{F_{\Pi}}{100\%} - M_B \frac{F_B}{100\%}) \cdot 100\% - (F_K + F_{\Pi} + F_B) \cdot M_B}{(F_K + F_{\Pi} + F_B)^2} = \\
 &= \frac{-100\% \cdot (7,4 + \frac{4\% \cdot 90,27}{100\%} - \frac{24,4\% \cdot 24,9}{100\%}) - (7,4 + 90,27 + 24,9) \cdot 24,4\%}{(7,4 + 90,27 + 24,9)^2} = -0,232 \left[ \frac{\%}{\text{т/час}} \right]
 \end{aligned}$$

Передаточная функция смесителя по i-му каналу записывается согласно выражению (1):

- по первому каналу «расход конденсата F<sub>к</sub> – влажность смеси M<sub>с</sub> на выходе смесителя»

$$W_{cm1}(s) = \frac{0,783}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)} e^{-43s};$$

- по второму каналу «расход песка F<sub>п</sub> – влажность смеси M<sub>с</sub> на выходе смесителя»

$$W_{cm2}(s) = \frac{-0,0002}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)} e^{-43s};$$

- по третьему каналу «расход вяжущего F<sub>в</sub> – влажность смеси M<sub>с</sub> на выходе смесителя»

$$W_{cm3}(s) = \frac{-0,232}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)} e^{-43s}.$$

Участок смешивания кроме динамического звена смесителя 1 содержит звено 2 – разгрузочный бункер, звено 3 – ленточный конвейер, звено 4 – влагомер.

Разгрузочный бункер является усилительным звеном с коэффициентом передачи

$K_2''' = 1 \left[ \frac{\text{т/час}}{\text{т/час}} \right]$ . Передаточная функция разгрузочного бункера

$$W_2'''(s) = K_2'''.$$

Транспортер является звеном запаздывания с передаточной функцией

$$W_3'''(s) = e^{-\tau_3''' s}, \quad (5)$$

где  $\tau_3''' = \frac{L_3}{v_3}$  - постоянная времени запаздывания транспортера, определяется длиной участка транспортера  $L_3$  до места установки влагомера и его скоростью перемещения сыпучей смеси  $v_3$ .

По опытным данным принимаем  $L_3 = 2\text{м}$ ,  $v_3 = 1\text{м/с}$  и находим  $\tau_3''' = \frac{L_3}{v_3} = \frac{2}{1} = 2 \text{ м/с}$ .

Тогда передаточная функция (5) принимает вид

$$W_3'''(s) = e^{-2s}.$$

Влагомер принимаем апериодическим звеном 1-го порядка. Его передаточная функция

$$W_4'''(s) = \frac{K_4'''}{T_4''' s + 1}. \quad (6)$$

Коэффициент передачи влагомера  $K_4'''(s) = 1 \left[ \frac{\%}{\%} \right]$ .

Постоянная времени  $T_4'''$  определяется значением постоянной времени фильтра 1-го порядка, являющегося усредняющим элементом электрической схемы влагомера.  $T_4''' = 2 \div 3\text{s}$ , принимаем  $T_4''' = 2\text{s}$ . Тогда передаточная функция (6) влагомера принимает вид

$$W_4'''(s) = \frac{1}{2s + 1}.$$

Передаточные функции процесса смешивания по  $i$ -му каналу с учетом всех четырех звеньев

$$W_{cmi}'(s) = W_{cmi}(s) \cdot W_2'''(s) \cdot W_3'''(s) \cdot W_4'''(s) \text{ или}$$

$$W_{cmi}'(s) = \frac{K_{cmi}}{(a_{cm}s^2 + a_{cm}s + 1)} e^{-\tau_{cm}s} \cdot K_2''' \cdot e^{-\tau_3''' s} \cdot \frac{K_4'''}{T_4''' s + 1}. \quad (7)$$

В итоге, используя (7), записываем передаточные функции процесса смешивания с учетом всех звеньев по трем каналам:

- по первому каналу «расход конденсата Fк – влажность смеси Mc»

$$W_{cm1}'(s) = \frac{0,783 \cdot e^{-43s} \cdot e^{-2s}}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)(2s + 1)};$$

- по второму каналу «расход песка Fп – влажность смеси Mc»

$$W_{cm2}'(s) = \frac{-0,0002 \cdot e^{-43s} \cdot e^{-2s}}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)(2s + 1)};$$

- по третьему каналу «расход вяжущего Fв – влажность смеси Mc»

$$W_{cm3}'(s) = \frac{-0,232 \cdot e^{-43s} \cdot e^{-2s}}{(28,25s^2 + 9,025s + 1)(2s + 1)}.$$

Получено 15.08.09

УДК 519.87:621.6.04

**Н.В. Аринова, Г.К. Шадрин**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА  
С ВАРЬИРУЮЩИМСЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМ СОСТАВОМ**

Экспериментальное снятие характеристик поведения сыпучих материалов в широком спектре частот предусматривает изучение большого числа конкретных образцов сыпучих материалов [1]. В этом случае все образцы охватывают всевозможные комбинации характеристик во всем диапазоне изменения их электрофизических свойств. Проведение таких исследований связано с большой затратой труда, времени, применения специальной аппаратуры. Поэтому актуальным является создание математических моделей, позволяющих исследовать поведение разнообразных по компонентному и гранулометрическому составу сыпучих веществ при воздействии на них переменным электрическим полем с изменяющейся частотой.

Многообразие форм частиц сыпучего материала определяет сложную структуру смеси, поэтому задача нахождения параметров сыпучего материала аналитическим методом может быть решена лишь при значительных упрощениях – идеализациях. Хаотическая структура заменяется упорядоченной, ей адекватной структурой.

Идеализируя структуру сыпучего материала, можно получить данные, дающие общее представление об электропроводности и диэлектрической проницаемости в зависимости от различных факторов, учитывающих физико-механические характеристики сыпучего материала.

Упрощенная структура сыпучего материала представлена на рис. 1.

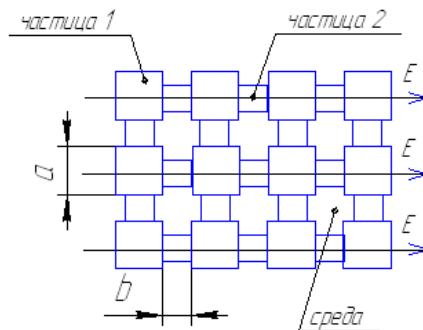


Рисунок 1 – Способ укладки частиц сыпучего вещества

Идеализация структуры сыпучего материала определяется следующей системой допу-

щений:

- сыпучий материал является гетерогенным двухкомпонентным;
- частицы 1 и 2 соответственно первого и второго компонентов кубической формы с размерами ребер  $a$  и  $b$ , причем  $a \geq b$  и  $a = k \cdot b$ ;
- распределение влаги по частице равномерное;
- расположение частиц относительно друг друга и вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  показано на рис. 1;
- сыпучее вещество в момент нахождения его электрических параметров охарактеризуется как капиллярно-пористое тело. Между частицами существует некое поровое пространство, заполненное средой со своими электрофизическими свойствами, причем пористость структуры сыпучего материала определяется соотношением геометрических размеров частиц [2];
- поверхности частиц в направлении вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  эквипотенциальны;
- линии тока в частицах параллельны в направлении вектора  $\vec{E}$  и распределяются в частицах равномерно.

На основании принятых допущений разработана математическая модель поведения сыпучего материала в электрическом поле.

Задачей математической модели является определение полной электропроводности конечного объема сыпучего материала, под которой понимают интегральное значение этого параметра. Для получения аналитических выражений можно воспользоваться параметрами отдельных частиц. Эти параметры действительны только для одной отдельно взятой частицы. Условно их можно назвать дифференциальными параметрами, таким, как удельное сопротивление, удельная проводимость, диэлектрическая проницаемость, микротвердость, плотность, теплоемкость и др.

Для получения дифференциальных параметров сыпучего материала выделен участок объема сыпучего материала, состоящий из двух частиц и зон их контактирования. Участок является системой двух частиц (рис. 2). Частица 2 входит в эту систему полностью (целиком в виде куба с ребром  $b$ ). Частица 1 разделена на две одинаковые половины со сторонами  $\frac{a}{2}$  в направлении вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Такое представление системы двух частиц позволяет учитывать проводимость частиц и контактных площадок между частицами. Изменение размеров  $a$  и  $b$  соответствует изменению гранулометрического состава сыпучего материала.

Система частиц разбита на отдельные зоны, для которых легко определить активную и реактивную составляющие проводимости простыми методами.

Зоны 1 и 2 (рис. 2) характеризуются проводимостями частиц 1 и 2, соответственно. Зона 3 является зоной контакта двух частиц. Две половины частицы 1 рассматриваем как полную первую зону.

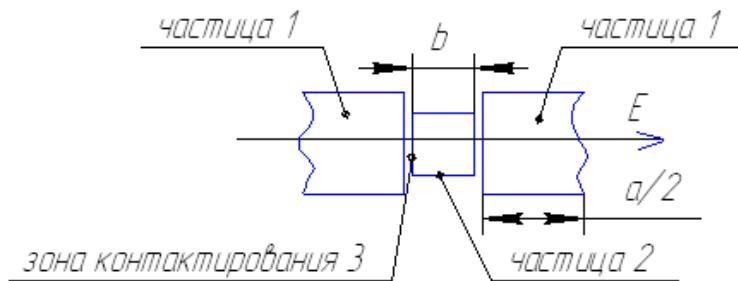


Рисунок 2 – К расчету полной проводимости системы из двух частиц

Система двух частиц рассматривается как последовательное их соединение в направлении вектора  $\vec{E}$ . Каждый участок соединения представлен в виде активного сопротивления ( $R$ ), емкости ( $C$ ) на нулевой и бесконечной частоте для учета различных видов поляризации сыпучего материала. Для быстро и медленно протекающих процессов поляризации принимаются параллельная и последовательная схемы замещения (рис. 3).

Для схемы замещения (рис. 3) приняты следующие обозначения [2]:

$R_{11}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{31}$  и  $R_{41}$  – соответственно активное сопротивление зон 1, 2, зоны контактирования 3 и среды на постоянном токе;

$C_{11}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{31}$  и  $C_{11}'$  – соответственно дополнительные емкости между собственными поверхностями зоны 1, зоны 2, площадки контактирования 3 и между поверхностями разных частиц 1 за вычетом емкости площадок контактирования 3 на постоянном токе в направлении  $\vec{E}$ ;

$L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  – соответственно индуктивность зоны 1 и зоны 2 каждой частицы и индуктивность зоны контактирования 3;

$R_{12}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{32}$  и  $R_{42}$  – соответственно добавочные активные сопротивления зон 1 и 2, площадки контактирования и среды на бесконечной частоте;

$C_{12}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{12}'$ ,  $C_{32}$  – соответственно емкости между поверхностями в направлении  $\vec{E}$  частицы 1, частицы 2, зон разных частиц 1 за вычетом площадки контактирования 3 и площадки контактирования 3 на бесконечной частоте.

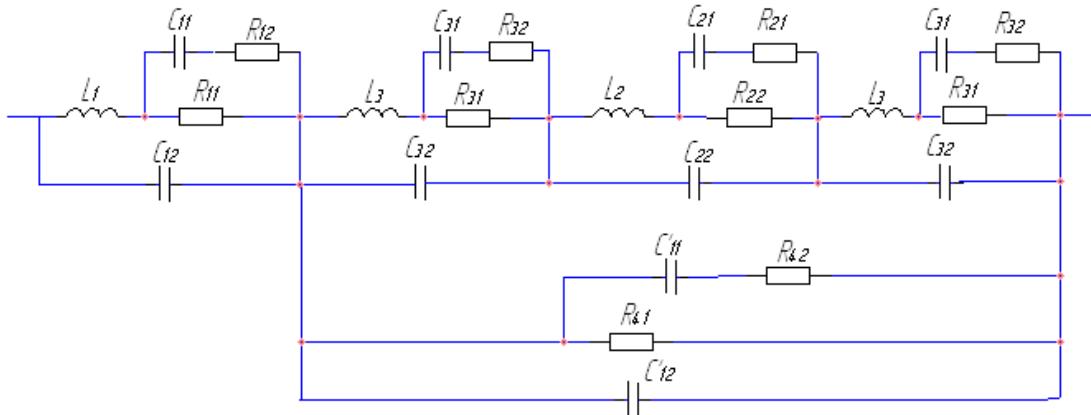


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения системы двух частиц

При расчете электрических параметров использованы соотношения:

$$\frac{R_{11}}{R_{12}} = \frac{\rho_{M10} - \rho_{M1\infty}}{\rho_{M1\infty}}, \quad \frac{R_{21}}{R_{22}} = \frac{\rho_{M20} - \rho_{M2\infty}}{\rho_{M2\infty}}, \quad \frac{R_{31}}{R_{32}} = \frac{\rho_{M30} - \rho_{M3\infty}}{\rho_{M3\infty}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{M0}$  – удельное сопротивление материала частицы и зоны контактирования на постоянном токе;  $\rho_{M\infty}$  – удельное сопротивление материала частицы и зоны контактирования на бесконечной частоте;

$$\frac{R_{41}}{R_{42}} = \frac{\rho_{cp0} - \rho_{cp\infty}}{\rho_{cp\infty}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{cp0}$  – удельное сопротивление среды на постоянном токе;  $\rho_{cp\infty}$  – удельное сопротивление среды на бесконечной частоте;

$$\frac{C_{11}}{C_{12}} = \frac{\epsilon_{M1\infty}}{\epsilon_{M10} - \epsilon_{M1\infty}}, \quad \frac{C_{12}}{C_{22}} = \frac{\epsilon_{M2\infty}}{\epsilon_{M20} - \epsilon_{M2\infty}}, \quad \frac{C_{31}}{C_{32}} = \frac{\epsilon_{M3\infty}}{\epsilon_{M0} - \epsilon_{M3\infty}}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{M0}$  – диэлектрическая проницаемость материала частицы и зоны контактирования на постоянном токе;  $\epsilon_{M\infty}$  – диэлектрическая проницаемость материала частицы и зоны контактирования на бесконечной частоте;

$$\frac{C_{41}}{C_{42}} = \frac{\epsilon_{cp\infty}}{\epsilon_{cp0} - \epsilon_{cp\infty}}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_{cp0}$  – диэлектрическая проницаемость среды на постоянном токе;  $\epsilon_{cp\infty}$  – диэлектрическая проницаемость среды на бесконечной частоте;

$$\frac{C'_{11}}{C'_{12}} = \frac{\epsilon_{cp\infty}}{\epsilon_{Mcp} - \epsilon_{cp\infty}}. \quad (5)$$

Для расчета величин с одинаковыми первыми индексами использованы величины:

$$\epsilon_{M1\infty} \text{ для } C_{12}, \quad \epsilon_{M10} - \epsilon_{M1\infty} \text{ для } C_{11}, \quad \rho_{M10} \text{ для } R_{11}, \quad \frac{\rho_{M10}\rho_{M1\infty}}{\rho_{M10} - \rho_{M1\infty}} \text{ для } R_{12}, \quad (6)$$

$$\epsilon_{M2\infty} \text{ для } C_{22}, \quad \epsilon_{M20} - \epsilon_{M2\infty} \text{ для } C_{21}, \quad \rho_{M20} \text{ для } R_{21}, \quad \frac{\rho_{M20}\rho_{M2\infty}}{\rho_{M20} - \rho_{M2\infty}} \text{ для } R_{22}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Mcp\infty} \text{ для } C_{32}, \varepsilon_{Mcp0} - \varepsilon_{Mcp\infty} \text{ для } C_{31}, \rho_{M30} \text{ для } R_{31}, \frac{\rho_{M30}\rho_{M3\infty}}{\rho_{M30} - \rho_{M3\infty}} \text{ для } R_{32}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Mcp\infty} \text{ для } C'_1, \varepsilon_{Mcp0} - \varepsilon_{Mcp\infty} \text{ для } C'_2, \rho_{Mcp0} \text{ для } R_{41}, \frac{\rho_{Mcp0}\rho_{Mcp\infty}}{\rho_{Mcp0} - \rho_{Mcp\infty}} \text{ для } R_{42}. \quad (9)$$

Для схемы (рис. 3) определяются значения элементов (R,C) с учетом геометрических размеров и электрофизических параметров компонентов. При расчете схемы замещения вторые индексы опускаются.

$$R_1 = \frac{\rho_{M1} \cdot a^2}{S_1} = \frac{\rho_{M1}}{a}, \quad (10)$$

где  $a$  – ребро куба частицы 1;  $S_1$  – площадь поперечного сечения частицы 1 в направлении  $\vec{E}$ .

$$R_2 = \frac{\rho_{M2} \cdot b}{S_2} = \frac{\rho_{M2}}{b}, \quad (11)$$

где  $b$  – ребро куба частицы 2;  $S_2$  – площадь поперечного сечения частицы 2 в направлении  $\vec{E}$ .

Если  $\frac{a}{b} = k$  и  $a > b$ , то

$$R_2 = \frac{\rho_{M2} \cdot k}{a}, \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{M1} \cdot \rho_{M1}}{R_1} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{M1} \cdot a, \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{M2} \cdot \rho_{M2}}{R_2} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{M2} \cdot a}{k}, \quad (14)$$

$$C'_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot (S_1 - S_2)}{b} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot a \cdot (k^2 - 1)}{k}, \quad (15)$$

$$R_4 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot \rho_{cp}}{C'_1} = \frac{k \cdot \rho_{cp}}{a \cdot (k^2 - 1)}, \quad (16)$$

$$C_3 = 8 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot r \cdot n, \quad (17)$$

где  $n$  – число площадок контактирования;

$$R_3 = \frac{\rho_{M3} \cdot n}{8r}. \quad (18)$$

В диапазоне частот от 0 до  $25 \cdot 10^9 \text{ Гц}$  можно практически не учитывать влияние индуктивности частиц.

С учетом вышеизложенного эквивалентная схема системы двух частиц приобретает вид (рис. 4), где для элементов схемы вместо  $\rho_M$  и  $\varepsilon_M$  в выражениях (10) – (18) подставлены  $\rho_{M0}$  и  $(\varepsilon_{M0} - \varepsilon_{M\infty})$  при втором индексе 1 и  $\frac{\rho_{M0} \cdot \rho_{M\infty}}{\rho_{M0} - \rho_{M\infty}}$  и  $\varepsilon_{M\infty}$  при втором индексе 2.

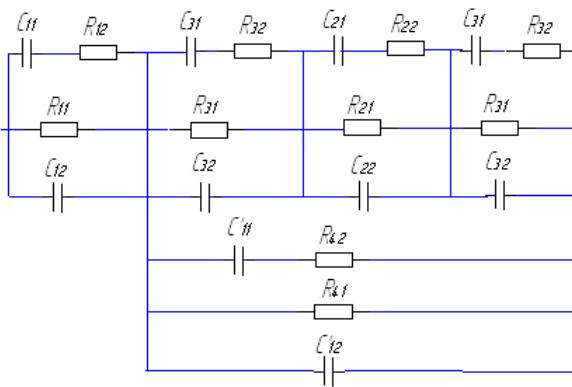


Рисунок 4 - Схема замещения системы двух частиц без учета влияния индуктивностей

Схема (рис. 4) упрощается при помощи формул пересчета активных и реактивных соотивлений последовательного соединения R и C. Преобразования выполняют последовательно для каждого участка схемы замещения.

Например, для схемы замещения частицы 1 последовательность преобразований представлена на рис. 5, где

$$R_{12\Theta} = R_{12} \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C_{11} R_{12})^2} \right], \quad (19)$$

$$C_{11\Theta} = \frac{C_{11}}{1 + (\omega C_{11} R_{12})^2}, \quad (20)$$

$$R_{1\Theta} = \frac{R_{12\Theta} R_{11}}{R_{12\Theta} + R_{11}} = \frac{R_{11} R_{12} \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C_{11} R_{12})^2} \right]}{R_{11} R_{12} \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C_{11} R_{12})^2} \right]}, \quad (21)$$

$$C_{1\Theta} = C_{11\Theta} + C_{12} = \frac{C_{11}}{1 + (\omega C_{11} R_{12})^2} + C_{12}. \quad (22)$$

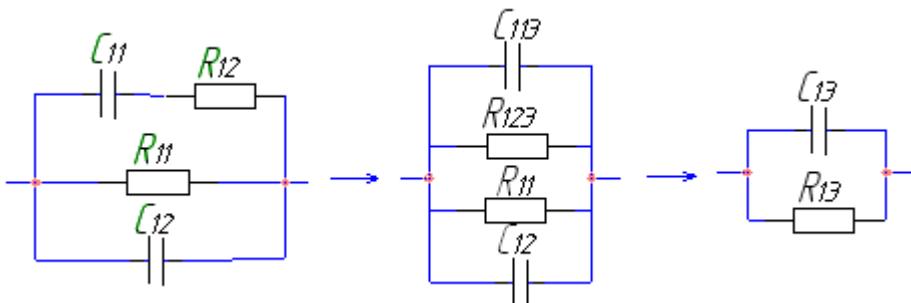


Рисунок 5 - Последовательность преобразования схемы замещения частицы 1

С учетом приведенных преобразований схема (рис. 4) приобретает вид, представленный на рис. 6.

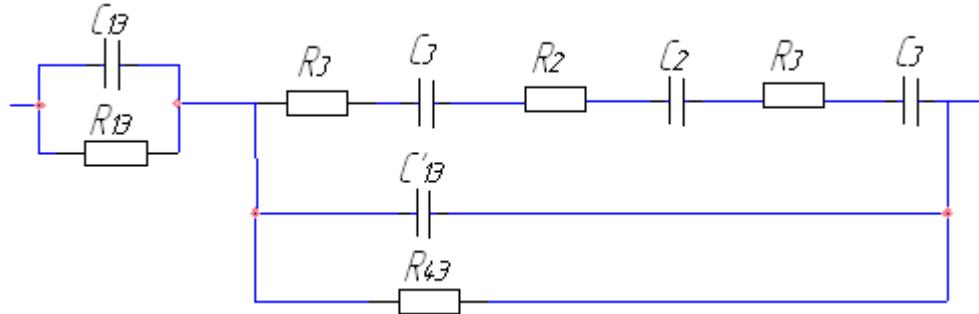


Рисунок 6 – Схема замещения системы двух частиц с учетом промежуточных преобразований

Дальнейшее преобразование схемы представлено на рис. 7, где

$$R'_3 = 2R_3 + R_2, \quad (23)$$

$$C'_3 = \frac{2C_2 \cdot C_3}{2C_2 + C_3}, \quad (24)$$

$$R''_3 = R'_3 \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C'_3 R'_3)^2} \right], \quad (25)$$

$$C''_3 = \frac{C'_3}{1 + (\omega C'_3 R'_3)^2}, \quad (26)$$

$$C_3 = \frac{C'_3}{1 + (\omega C'_3 R'_3)^2} + C_{13}, \quad (27)$$

$$R_3 = \frac{R_{43} \cdot R'_3 \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C'_3 R'_3)^2} \right]}{R_{43} + R'_3 \left[ 1 + \frac{1}{(\omega C'_3 R'_3)^2} \right]}, \quad (28)$$

$$C = \frac{R_{13}^2 C_{13} + C_3 R_3^2 + (\omega R_{13} R_3)^2 \cdot C_{13} C_3 (C_{13} + C_3)}{(R_{13} + R_3)^2 + [\omega R_{13} R_3 (C_{13} + C_3)]^2}, \quad (29)$$

$$R = \frac{(R_{13} + R_3)^2 + [\omega R_{13} R_3 (C_{13} + C_3)]^2}{R_{13} + R_3 + \omega^2 R_{13} R_3 (R_{13} C_{13}^2 + R_3 C_3^2)}. \quad (30)$$

Ранее для упрощения вычислений нами была принята кубическая укладка сыпучего материала (рис. 1). Для такого способа укладки частиц проводимость по любой из осей x, y, z равна сумме проводимостей отдельных цепочек, параллельных соответствующей оси, а сопротивление каждой из цепочек равно сумме сопротивлений отдельных частиц [2]. При коллинеарности вектора напряженности Е одной из осей координат компоненты полной проводимости кубического объема сыпучего материала с числом частиц на сто-

руну  $n$  равны компонентам проводимости по соответствующей оси:

$$C_M = nC ; \quad \gamma_M = \frac{n}{R} ,$$

где  $C$  – емкость системы из двух частиц;

$R$  – сопротивление системы из двух частиц.

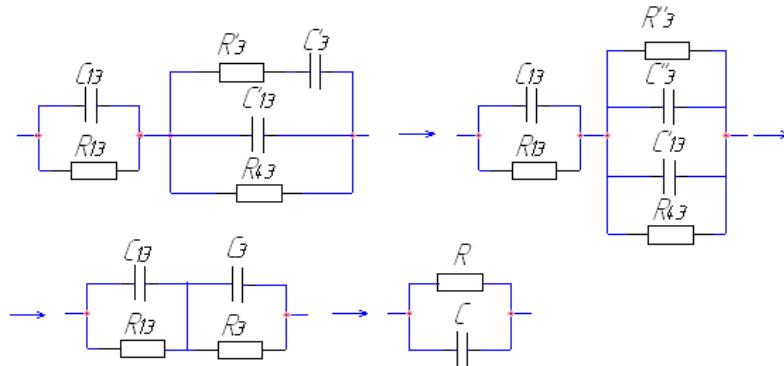


Рисунок 7 – Последовательность дальнейшего преобразования эквивалентной схемы замещения системы двух частиц

Подставляя значения  $C$  и  $R$  (29), (30) получаем:

$$C_M = \frac{n \cdot (R_{13}^2 C_{13} + C_{13} R_{13}^2 + (\omega R_{13} R_{13})^2 \cdot C_{13} C_{13} (C_{13} + C_{13}))}{(R_{13} + R_{13})^2 + [\omega R_{13} R_{13} (C_{13} + C_{13})]^2} ;$$

$$\gamma_M = \frac{n \cdot (R_{13} + R_{13} + \omega^2 R_{13} R_{13} (R_{13} C_{13}^2 + R_{13} C_{13}^2))}{(R_{13} + R_{13})^2 + [\omega R_{13} R_{13} (C_{13} + C_{13})]^2} .$$

Очевидно также, что при кубической укладке величина полной проводимости объема сыпучего материала не зависит от направления электрического поля. Из математической модели поведения сыпучего вещества можно выявить зависимость тангенса диэлектрических потерь конечного объема сыпучего материала от изменения частоты прикладываемого электрического поля, в котором находится этот объем вещества.

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{1}{\omega R_M C_M} .$$

На основании разработанной математической модели выявляются общие закономерности изменения электрофизических параметров сыпучего материала в широком спектре частот. Аналитические характеристики сыпучего материала, полученные на основании уравнений математической модели, позволяют выбирать оптимальные рабочие частоты измерительных приборов, разрабатывать математическое описание поведения датчиков в электрическом поле первичных преобразователей сигнала.

#### Список литературы

1. Берлиннер М.А. Измерения влажности. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1973. – 400 с.
2. Дубров Н.С. и др. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов / Н.С. Дубров, Е.С. Кричевский, Б.И. Невзлин. – М.: Машиностроение, 1980. – 144 с.

Получено 10.08.09

УДК 628.51:621.311.22

**Н.В. Горьков, В.В. Запасный**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**М.Н. Стрельцова**

АО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ»

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ В СНГ И ДАЛЬНЕМ ЗАРУБЕЖЬЕ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ  
ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЗОЛЫ ТЭЦ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ  
КОТЛОАГРЕГАТА ЦКТИ 75-39 Ф ст. № 8 АО «AES УСТЬ-КАМЕНОГОРСКАЯ ТЭЦ»**

В связи с возросшими требованиями к чистоте воздушного бассейна и соблюдению норм предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в атмосфере требуется достижение высокой степени очистки дымовых газов. Основной задачей на ближайший период для научных и проектных организаций, занимающихся экологическими проблемами энергетики, является разработка проектов по минимизации загрязняющих выбросов от энергетического оборудования в атмосферу.

С ростом единичных мощностей блоков теплоэнергетических станций и теплоэнергетических систем, удельных и суммарных уровней теплоэнергопотребления, в Казахстане возникла задача ограничения загрязняющих выбросов в воздушный и водный бассейны, а также более полного использования их естественной рассеивающей способности.

По действующим нормативам концентрация золы в очищенных газах для новых энергоблоков должна быть в пределах 50...150 мг/м<sup>3</sup>(н.у.), что соответствует эффективности золоулавливания 99,6...99,9 %. В основном применяемые в СНГ установки скрубберов Вентури обеспечивают не более 99,2 %, при интенсивном орошении (что обуславливает увеличение расхода воды в 3-4 раза).

Для достижения нормативных требований были изучены применяемые в СНГ и дальнем зарубежье способы очистки дымовых газов с целью выбора наилучшего варианта для АО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ».

В практике пылеулавливания применяют следующее оборудование:

1. Сухие золоуловители: гравитационные, инерционные, центробежные – они имеют низкий коэффициент золоулавливания 70 – 95 %, и невозможно улавливание взвешенных твердых частиц с высокой слипаемостью из-за забивания ими аппарата.

2. Электрофильтры различных типов – резкое снижение надёжности работы после выработки ресурса, при отключении некоторого количества электрополей степень очистки снижается до 90 – 93 % (при проектной не ниже 99,0 %). Большое влияние на работу установки оказывают электрофизические свойства золы, большая стоимость реконструкции и модернизации, необходимость усиленного контроля за работой, ненадёжная работа некоторых узлов уменьшает время между ремонтами и вызывает удорожание самих ремонтов.

3. Матерчатые (рукавные) фильтры – сложность эксплуатации при возникновении точки росы в аппарате, в зависимости от типа регенерации рукавов необходимость периодического прекращения подачи загрязнённого газа, относительно не высокие температуры эксплуатации, для более тонкой очистки требуется более дорогостоящий материал,

необходимость предочистки, большие габариты по сравнению с другими фильтрами.

4. Золоуловители мокрого типа: скруббера Вентури, пенные аппараты, форсуночные скруббера, ротоклоны, скруббера с плавающей насадкой. Для увеличения степени золоочистки в скрубберах применяют интенсивный режим орошения, что увеличивает расход воды в 3-4 раза при степени золоочистки не более 99,2 %. Повышенный расход воды обуславливает низкую температуру газов после аппарата и требует их подогрев. Большой проблемой является необходимость утилизации орошающей воды, существенное значение имеет содержание в золе оксида кальция CaO (вызывает цементацию оборудования и трубопроводов) [1].

Особо следует отметить применение золоулавливающих установок типа эмульгаторов.

Пластиковый батарейный эмульгатор I поколения НПО «Южмаш» содержит параллельно установленные трубы насадки, выполненные из стеклопластика, композитных материалов, объединенные в одном корпусе, имеющем общий подвод и отвод соответственно загрязненного и очищенного газов. В нижней части труб размещены лопастные завихрители, а выше над ними – инициаторы эмульгирования в виде кольцевых диаграмм. Система водоснабжения включает напорный бак, раздающие и орошающие коллектора, в виде перфорированных труб с отверстиями диаметром 4÷8 мм. Аппарат отличает хрупкость конструкции, сложность изготовления, забивание переливных отверстий, ограничение скорости очистки, низкая температура газов после аппарата (требуется их подогрев).

Кольцевые эмульгаторы конструкции Кочеткова «КОЧ» обеспечивают более высокую эффективность очистки газов от взвешенных частиц и надежность в эксплуатации. Однако высокие скорости запыленного газового потока в лопаточном аппарате (24 м/с), несущего абразивную золу, обусловливают быстрый износ титана и повышенное гидравлическое сопротивление эмульгатора, что требует замены при реконструкции существующего дымососа.

При высокой степени очистки вышеперечисленные эмульгаторы не удовлетворяли требованиям практики и обусловили разработку новой, более совершенной конструкции эмульгатора.

Принцип работы батарейного эмульгатора II-го поколения конструкции Ю.А. Панарина такой же, как у всех эмульгаторов.

В батарейном эмульгаторе II поколения (рис. 1) устранены недостатки батарейного эмульгатора I поколения и кольцевого эмульгатора:

- Насадка выполнена в виде параллелепипеда, изготовление которого значительно проще, чем цилиндрической насадки (изготавливаемой вальцовкой или намоткой на болванку). В соответствии с измененной формой насадки предложено новое выполнение лопастного завихрителя из четырех лопастей, имеющих форму тупоугольных треугольников. При этом стороны, прилегающие к тупому углу, закреплены на соответствующих гранях параллелепипеда, а основания треугольников (стороны лежащие против тупого угла) соприкасаются в одной точке, лежащей на оси параллелепипеда. Такое выполнение эмульгирующей насадки с аксиальными лопастными завихрителями позволяет упростить конструкцию за счет исключения изготовления относительно сложной цилиндрической насадки, а также использования лопастей более простой формы без применения сложного станочного оборудования для придания лопасти формы эллипса в месте ее сопряжения с цилиндром.

- Инициаторы эмульгирования (завихрители) выполняются из титана (рис. 2), кольце-

вой каплеуловитель – из титана или химически абразивостойкого материала, например фаолита.

- Разработана новая конструкция каплеуловителя (самоотмывающийся кольцевой каплеуловитель), в результате чего исключено отложение золы на каплеуловителе и появление брызгоноса (рис. 3).

- Система орошения, состоит из бака орошения и распределительных труб с увеличенным диаметром орошающих отверстий с 4...8 до 15...25 мм. Указанное исключило их забивание и отложение золы во входном патрубке.

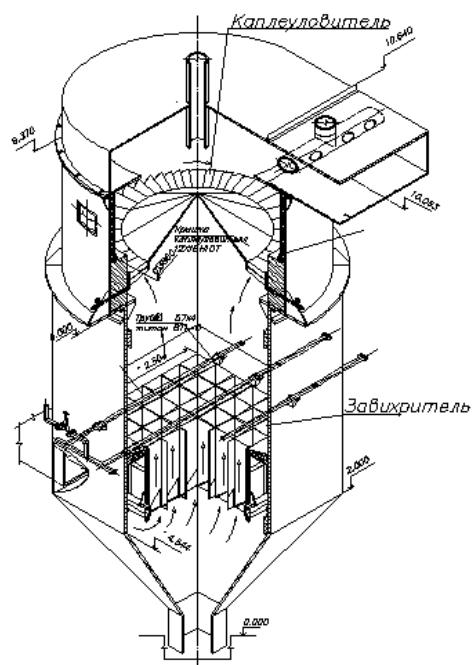


Рисунок 1 – Батарейный эмульгатор II поколения

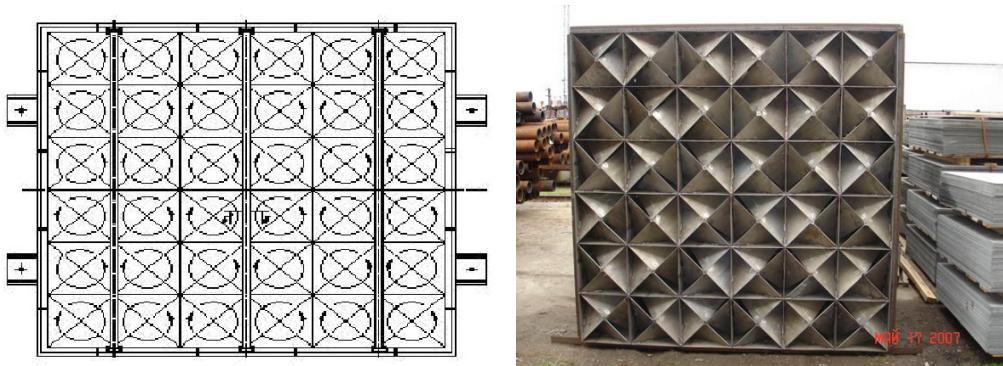


Рисунок 2 – Завихритель

- Снижено количество элементов (насадок), материалоемкость, габариты и стоимость кассет, за счет увеличения единичной производительности насадки.

- Продолжительная надежная работа в коррозионных и эрозионно-активных средах в результате использования титана и коррозионно-стойких материалов. При этом обеспечивается снижение износа титана в 10-12 раз и соответственно увеличение срока службы, из-за уменьшения в лопаточном аппарате скорости дымовых газов содержащих абразивную золу по сравнению кольцевым эмульгатором вдвое с 24 м/с до 12 м/с.

- Уменьшена стоимость аппарата в связи с технологичностью изготовления конструкции.

- Реконструкция или замена существующих дымососов не требуется, достигается экономия электроэнергии на собственные нужды. Подогрев дымовых газов перед дымососом в основном не требуется.

Практика эксплуатации аппаратов пылегазоулавливания показала, что наиболее перспективными аппаратами для ТЭЦ и котельных в условиях Восточно-Казахстанской области являются батарейные эмульгаторы II поколения [2,3], принцип работы которых описан ниже.

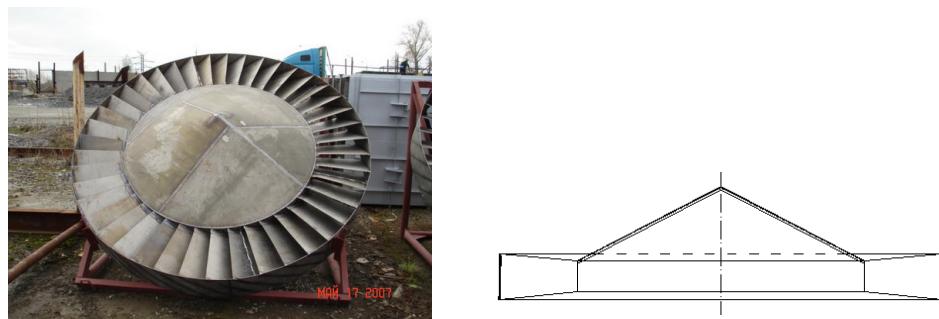


Рисунок 3 – Каплеуловитель

Запыленные дымовые газы через тангенциальный вход поступают в нижнюю часть скруббера под инициатор эмульгирования в завихритель, где происходит их интенсивная закрутка в лопатках ячеек. Закрученный газовый поток направляется в верхнюю часть эмульгатора. Орошающая вода подается через раздающие сопла диаметром 15...25 мм в каждую ячейку. При взаимодействии воды с вращающимся газовым потоком, выходящим из лопаточных аппаратов, происходит образование пенного вращающегося слоя, который накапливается над лопатками. Вращение слоя способствует его турбулизации, повышая межфазную контактную поверхность. Повышенное давление во вращающемся пенном слое за счет действия центробежных сил обуславливает существование только мелких пузырей пены, что многократно увеличивает поверхность контакта фаз и интенсификацию процесса тепломассообмена, чему также способствует противоточное движение «газ – жидкость».

При выходе на стационарный режим возникает противоток газ-жидкость и пульпа с уловленной золой сливаются под действием силы тяжести на коническое днище скруббера, откуда через гидрозатвор удаляется на золоотвал.

Дымовые газы после промывки в эмульсионном слое продолжают вращательное движение в объеме над завихрителем, проходят через раскручиватель, где газовый поток принимает продольное направление. Капли пульпы, возникающие при всхлопывании пузырей в верхней границе эмульсионного слоя и вылетающие из него, под действием цен-

тробежных сил сепарируются на стенку скруббера до верхней части расширителя. За счет высокого уровня тепло- и массообмена между жидкостью и газом во вращающемся пенном слое с высокой эффективностью улавливаются частицы золы и окислы серы. Очищенные от пыли и капель газы удаляются из газоочистителя в выходной газоход [4,5].

#### Преимущества батарейных эмульгаторов II поколения:

- Эмульгаторы II поколения позволяют достичь степени золоочистки более 99 %, что на 1–1,5 % выше других существующих мокрых золоуловителей. Это позволяет снизить выбросы в атмосферу взвешенных частиц и диоксида серы в 2–3 раза. Аэродинамическое сопротивление аппарата около 120 мм вод. ст. и удельный расход воды  $0,2 \div 0,22$  л на  $m^3$ (н.у.) очищаемого газа. Для орошения используется осветленная вода из золоотвала.

- Надежность, обусловленная применением для внутренних узлов титановых сплавов.  
- Простота монтажа (сборка блоками в существующие корпуса).  
- Подавление окислов серы составляет 5…15 % в зависимости от сернистости угля и щелочности воды без введения специальных реагентов.

- Простота в эксплуатации, т.к. не требуется специальных насосов, форсунок и сопел, требующих точной настройки и регулировки.

- Конструкция каплеуловителей исключает брызгонос.  
- Время наработки батарейных эмульгаторов II поколения соответствует времени эксплуатационного периода работы котлоагрегата, т.е. снижение КПД котла не предусматривается.

- Возможно дальнейшее увеличение степени золоочистки более 99,7 % в результате заглушки части насадок, обусловливающее повышение скорости газов в остальных насадках. Это приведет к некоторому росту аэродинамического сопротивления, но запас по нему, как правило, имеется.

На данный момент золоулавливающие установки типа эмульгатора внедрены на всех котлах высокого давления БКЗ 320-140 ст. № 11-14 и ТПЕ 430 А ст. № 15 АО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ». Это позволило фактически за 2008 год уменьшить выбросы золы в атмосферу на 1111 тонн и диоксида серы на 233 тонны.

Исходя из вышеизложенного, АО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ» планирует продолжить внедрение положительного опыта и выполнить реконструкцию существующих на котлоагрегате ЦКТИ 75-39 Ф ст. № 8 скрубберов Вентури с установкой батарейных эмульгаторов II поколения, что позволит также повысить эффективность золоулавливания более чем на 99 %. Материал завихрителя и каплеуловителя – титан.

Диоксид серы улавливается без применения дополнительных средств на 5  $\div$  10 % в зависимости от щёлочности воды.

Степень очистки от окислов серы так же, как и от летучей золы, зависит от нагрузки котла и как следствие скорости в ячейках эмульгатора. С ее увеличением возрастает КПД как по улавливанию твердых частиц, так и  $SO_2$ . После проведения реконструкции при рН орошающей воды, равном 5,7, степень очистки газов от  $SO_2$  в зависимости от нагрузки меняется от 5,3 до 10,8 %.

Согласно «Перечню наилучших доступных технологий», утвержденному Постановлением Правительства РК № 245 от 12.03.2008 г., применяемые на АО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ» способы по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу являются наилучшими доступными технологиями.

Список литературы

1. Справочник по пылеулавливанию / Под ред. А.А.Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Инвентаризация выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для ТОО «АЭС УКТЭЦ» по состоянию на 01.01.1999 г. - Усть-Каменогорск, 1999.
3. Нормативы предельно допустимых выбросов вредных веществ в атмосферу ТОО «АЭС Усть-Каменогорская ТЭЦ». - Алматы, 1999. - Т.1.
4. Пат. №2104752 RU, Российское Агентство по патентам и товарным знакам С1 6 В 01 Д 47/04. Устройство для улавливания токсичных веществ из газообразных выбросов / Панарин Ю.А. [KZ], Галимжанова Н.Р. [KZ], Челноков С.Ю. [KZ], Усеров А.Г. [KZ], Колесник Д.Г. [KZ], Гиманев М.Г. [KZ], Дюскин П.Ф. [KZ], Агафонова Л.Н. [KZ], Леонов В.М. [KZ], Гапкаиров Р.З. [KZ], Алексеева Н.Ю. [RU].
5. Пат. №2008075 RU, Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам С15 В 01 Д 47/04. Способ улавливания токсичных веществ из газообразных выбросов / Панарин Ю.А., Максимов И.А., Кочетков О.П., Устименко Б.П., Иванников В.М. - Опубл. 28.02.94;

Получено 17.07.09

---

УДК 625.7.084

**Р.А. Кабашев**

КазАДИ, г. Алматы

**М.В. Дудкин, М.А. Сакимов**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТКОВ И РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ НА КАЧЕСТВО УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

В соответствии с разработанной методикой [1] и планом эксперимента, начиная с мая 2005 года, в лаборатории СДМ ВКГТУ им. Д. Серикбаева совместно с кафедрой ПТСДМ КазАДИ им. Л.Б. Гончарова были проведены исследования по оценке уплотняющих возможностей дорожных катков, способных адаптироваться к свойствам уплотняемой среды [2]. Показатель плотности определялся методами закладных колец и отбора контрольных кернов с определением показателей в лаборатории, а также с помощью прибора для оперативного неразрушающего контроля плотности и однородности уплотнения асфальтобетонных покрытий и оснований ПАБ-1,0. В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости коэффициента уплотнения песчаной и мелкозернистой асфальтобетонной смесей от исследуемых факторов, имеющие следующий вид:

$$K_y = 0,151 + 0,078X_1 + 0,1982X_2 + 0,5972X_3 + 0,0454X_4 + 0,0002X_1^2 + 0,7799X_3^2 - 0,0608X_1 \cdot X_3 - 0,0036X_1 \cdot X_4 + 0,1059X_3 \cdot X_4 \quad (1)$$

Факторы  $T$ ,  $h$ ,  $G_k$ ,  $n$  представлены в кодированном виде  $X_1, X_2, X_3, X_4$  (табл. 1). При переходе от кодированного вида к натуральным значениям факторов необходимо пользоваться формулой

$$X_i = x_i(X_{i\max} - X_{i\min}) + \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}, \quad (2)$$

где  $X_i$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;

$x_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;

$X_{i\max}$ ,  $X_{i\min}$  – максимальное и минимальное натуральное значение  $i$ -го фактора, соответствующее верхней и нижней границам интервала варьирования.

С уменьшением температуры смеси, как обобщенного показателя технологических свойств асфальтобетонной смеси, ее уплотняемость ухудшается при использовании катков с линейным давлением  $q = 45\ldots65$  кг/см. Для катков с линейным давлением  $q = 80$  кг/см изменение температуры смеси в пределах  $100\ldots160$  °C существенно не сказывается на ее уплотняемости, т.е. тяжелыми катками можно уплотнять более холодные смеси с достижением коэффициента уплотнения  $K_y = 0,97$  при числе проходов  $n = 12$  (рис. 1). Зависимость коэффициента уплотнения от массы и числа проходов катка представлена на рис. 2.

Критерии уплотняемости позволили сравнить между собой её зависимость от изменения параметров рабочих органов различных дорожных катков и различных видов уплотняемых битумоминеральных смесей. Результаты этого сравнения приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

*Факторы, уровни и интервалы варьирования параметров процесса уплотняемости*

Факторы	Уровни варьирования					Интервалы варьирования
	-2	-1	0	1	2	
$x_1$ – температура смеси, Т	80	100	120	140	160	20
$x_2$ – толщина слоя	4	6	8	10	12	2
$x_3$ – масса катка, задняя ось	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	0,9
$x_4$ – число проходов	2	6	10	14	18	4

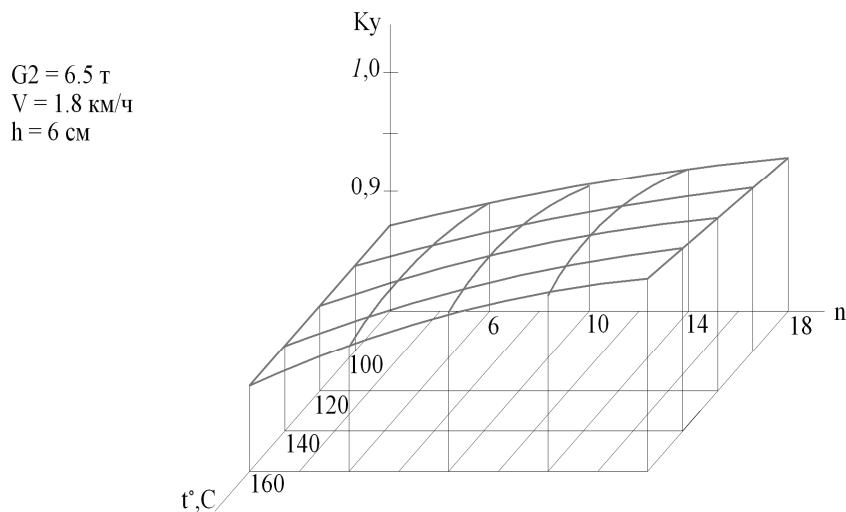


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента уплотнения от температуры асфальтобетонной смеси и числа проходов катка

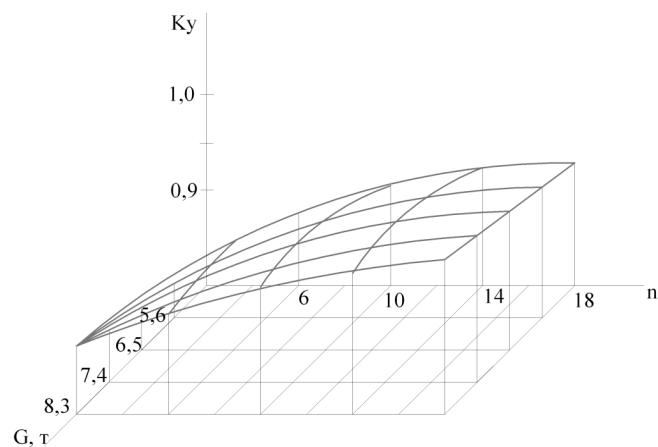


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента уплотнения от массы и числа проходов катка

Таблица 2  
*Показатели качества покрытия уплотняемых смесей*

Материал слоя и толщина в плотном теле	Тип катка	Скорость движения катка, км/ч	Число проходов катка	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент уплотнения
1	2	3	4	5	6
Горячий песчаный а/б H=4 см	ДУ-47А с виб.	1,8	2	2,122	0,938
			5	2,190	0,968
			10	2,239	0,990
			18	2,282	1,009
Горячий песчаный а/б H=4 см	ДУ-48А	1,7	2	2,036	0,900
			5	2,076	0,917
			10	2,104	0,930
			18	2,126	0,940
Горячий песчаный а/б H=4 см	ДУ-31А	4	2	2,17	0,90
			5	2,210	0,973
			10	2,21	0,991
			18	2,28	1,006
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-47А с виб.	1,8	2	2,00	0,873
			5	2,132	0,913
			10	2,193	0,939
			18	2,244	0,961
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-47А с виб.	6,8	2	1,130	0,912
			5	2,229	0,94
			10	2,303	0,986
			18	2,369	1,014
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-31А	4	2	2,160	0,92
			5	2,21	0,994
			10	2,321	0,994
			16	2,368	1,014
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-48А	1,7	2	2,0	0,880
			5	2,137	0,91

			10 18	2,198 2,20	0,941 0,963
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-48А	6,6	2	2,144	0,918
			5	2,233	0,96
			10	2,301	0,98
			24	2,38	1,021
Горячий мелкозернистый а/б H=4 см	ДУ-48А	6,6	2	2,219	0,90
			5	2,214	0,990
			10	2,38	1,021
			18	2,443	1,046
Горячий мелкозернистый а/б H=6 см	ДУ-48А	3,5	2	2,233	0,96
			5	2,315	0,991
			10	2,376	1,017
			16	2,418	1,035
Горячий мелкозернистый а/б H=6 см	ДУ-48А	1,7	2	2,205	0,944
			5	2,278	0,975
			10	2,331	0,998
			20	2,385	1,021
Крупнозернистый горячий пористый а/б H=8 см	Д2-31А	4	2	2,188	0,937
			5	2,251	0,964
			10	2,300	0,985
			18	2,342	1,003

Окончание табл.2

1	2	3	4	5	6
Крупнозернистый горячий пористый а/б H=8 см	ДУ-47А	1,8	2	2,195	0,940
			5	2,253	0,965
			10	2,307	0,988
			18	2,318	0,993
Битумопесчаная смесь II марки H=6 см	ДУ-47А с виб.	1,8	2	1,921	0,971
			5	1,992	1,070
			10	2,047	1,035
			16	2,085	1,054
Битумопесчаная смесь II марки H=6 см	ДУ-47А с виб.	3,4	2	1,892	0,931
			5	1,972	0,970
			10	2,035	1,001
			12	2,051	1,009
Битумопесчаная смесь II марки H=6 см	ДУ-47А с виб.	1,8	2	1,945	0,934
			5	2,015	0,968
			10	2,028	0,974
			18	1,94	0,971
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-47А с виб.	6,8	2	2,037	1,017
			5	2,107	1,02
			10	2,167	1,082
			18	1,849	0,907
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-47А с виб.	1,8	5	1,927	0,94
			10	1,982	0,972
			16	2,031	0,996
			2	1,919	0,949
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-47А с виб.	3,4	5	1,97	0,977
			10	2,032	1,00
			18	2,081	1,029
			2	1,90	0,936
Битумопесчаная смесь II марки H=20-2 с	ДУ-47А	1,8	5	1,967	0,966
			10	2,014	0,989
			18	2,02	1,008
			2	1,909	0,93
Битумопесчаная смесь II марки H=6 см	ДУ-47А без виб.	1,8	5	1,967	0,966
			10	2,014	0,989
			2	1,909	0,93

			18	2,02	1,008
Битумопесчаная смесь II марки H=6 см	ДУ-48А	1,7	2	1,921	0,971
			5	1,974	0,998
			10	2,012	1,017
			18	2,037	1,030
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-31А	4	2	1,897	0,933
			5	1,960	0,964
			10	2,007	0,987
			16	2,047	1,007
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-31А	15	2	1,923	0,960
			5	2,001	0,999
			10	2,061	1,029
			18	2,111	1,04
Битумопесчаная смесь II марки H=8 см	ДУ-31А	4	2	1,841	0,903
			5	1,902	0,933
			10	1,949	0,96
			18	1,990	0,976
Битумопесчаная смесь II марки H=12 см	ДУ-31А	4	2	1,892	0,936
			5	1,949	0,964
			10	1,992	0,98
			18	2,028	1,003
Битумопесчаная смесь II марки H=20-25 см	ДУ-31	4	2	1,87	0,921
			5	1,93	0,99
			10	1,997	0,987
			18	2,08	1,011

Таблица 3

*Результаты сравнительных испытаний уплотняющей способности трехвальцовых двухосных катков различной массы*

Тип катка		ДУ-48		
Масса, т		7,0	9,4	12,6
Линейное давление, кг/см	Передний валец	22	30	41
	Задние вальцы	45	60	79
Скорость (передача)		1	1	1
Толщина уплотняемого слоя, см		6	6	6
Тип смеси		Мелкозернистая асфальтобетонная смесь		
Степень уплотнения, при:	n=12	0,94	0,96	0,98
	n=18	0,96...0,97	0,98	0,99...1,0
Вид и характер уплотненного покрытия		Без трещин, ровное покры- тие	Без трещин, ров- ное покрытие	Трещины, волно- образование

Показатель водонасыщения определяется на образцах, отобранных из уплотняемого материала методами закладных колец и выбуривания.

Водонасыщение характеризует открытую пористость асфальтобетона. С увеличением количества проходов катка этот показатель также стремится к предельному значению, соответствующему предельной плотности. Значения водонасыщения образцов, приготовленных в лаборатории из той же смеси, получились немного выше, чем полученные при испытании кернов, отобранных после 16-18 проходов катка по одному следу. Экспериментально подтверждено, что скорость снижения водонасыщения зависит от толщины уплотняемого слоя, скорости укатки и типоразмера дорожного катка.

Меньшие значения были получены при меньшей толщине уплотняемого слоя и большей массы катка.

Устойчивость по Маршаллу определялась на образцах, полученных методами закладных колец и при выбуривании кернов. Этот показатель определяется при температуре +20 °С. В зависимости от количества проходов катка по одному следу, от толщины уплотняемого слоя, типа асфальтобетона, вида уплотняющей машины, принятого режима уплотнения, жесткости основания экстремум достигается после 2-4 проходов катка по одному следу.

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что для различных материалов при одном режиме уплотнения существует оптимальная толщина уплотняемого слоя, при которой достигается максимальный эффект уплотнения. При прочих равных условиях меньшее количество проходов катка требуется при уплотнении на больших скоростях вибрационными катками с гибкими вальцами.

Деформативность уплотненного асфальтобетона можно характеризовать показателем условной пластичности по Маршаллу, определяемым на тех же образцах, что и устойчивость. С увеличением числа проходов катка величина пластичности уменьшается, достигает экстремума и затем вновь возрастает. Место и нахождение экстремума зависит от многих факторов. Меньшей деформативностью обладают смеси, уплотненные на больших скоростях, катками на пневматических шинах и вибрационными катками. Экстремум достигается раньше при использовании катков тяжелого типа, при прочих равных условиях.

Результаты, приведенные в табл. 2 и 3, получены летом 2005 года. Для построения поверхностей откликов использовались данные, полученные при испытании катков ДУ-48А различной массы, которая регулировалась пригрузением балластом, диаметр вальцов катка оставался постоянным.

#### Список литературы

1. Дудкин М.В. Исследование рабочего процесса вибрационного катка с асимметричным планетарным вибровозбудителем.- Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2003. - 121 с.
2. Дудкин М.В. Определение зависимости между рабочими параметрами дорожного катка с изменяемой геометрией вальца и характеристиками уплотняемого материала / М.В. Дудкин, М.А. Сакимов // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. - 2007. - №1. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2007. - С. 55-58.

Получено 20.07.09

---

УДК 625.7.084

**Р.А. Кабашев**

КазАДИ, г. Алматы

**М.В. Дудкин, М.А. Сакимов**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### РАСЧЕТ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА, АДАПТИРУЮЩЕГОСЯ К УПЛОТНЯЕМОЙ СРЕДЕ

Наибольшая сложность при проектировании вальца с изменяемой кривизной в зоне контакта [1, 2] возникает при оценке деформации его гибкой обечайки (рис. 1). Возможность оценить допускаемые значения деформаций, из условия прочности обечайки при

максимальных и минимальных радиусах кривизны, потребовала провести нестандартные теоретические исследования и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

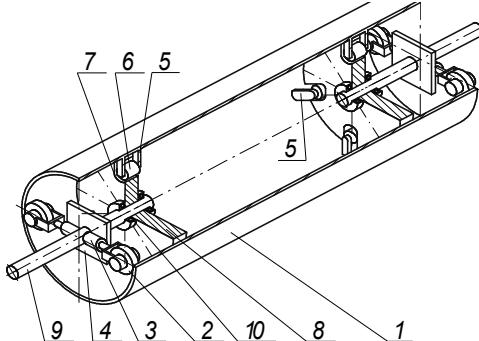


Рисунок 1 - Устройство вальца дорожного катка с гибкой обечайкой: 1 – обечайка из упругого материала; 2 – опорные ролики; 3 – гидроцилиндры; 4 – рама катка; 5 – кронштейны; 6 – цилиндрические упоры; 7 – пазы; 8 – торцевые диски; 9 – центральная ось вальца; 10 – подшипниковый узел

Проанализируем деформации, возникающие при нагружении кольца малой жесткости (обечайки) (рис. 1). Рассмотрим кольцо, нагруженное силами [3], как это показано на рис. 2. Исходя из расчетной схемы (рис. 3), запишем уравнение изгибающих моментов [4]

$$M = M_1 - P(y_1 - y), \quad (1)$$

где  $M$  - изгибающий момент в произвольной точке;  $M_1$  - изгибающий момент в сечении I;  $y_1$  - ордината сечения I;  $y$  - ордината произвольной точки;  $P$  - половина внешней нагрузки, растягивающей кольцо.

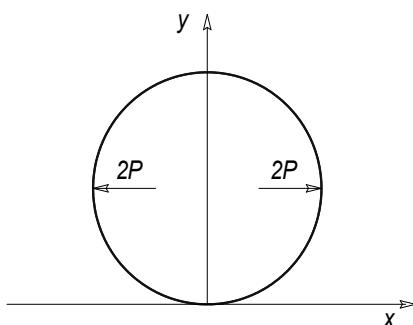


Рисунок 2 – Схема нагружения обечайки малой жесткости

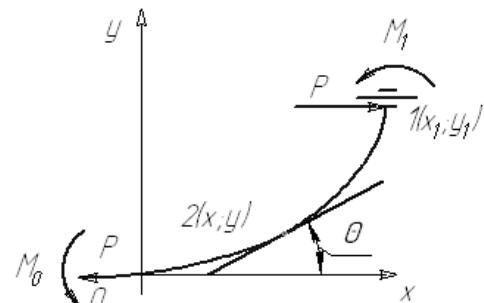


Рисунок 3 – Расчетная схема изгибающих моментов

Для определения деформаций кольца в зависимости от величины силы  $2P$  воспользуемся дифференциальным уравнением упругой линии [5]:

$$\frac{d\theta}{dS} = \frac{M}{EJ} + \frac{1}{R}, \quad (2)$$

где  $\Theta$  - угол между касательной в произвольной точке кольца и осью абсцисс (рис. 3);

$E$  – модуль упругости;  
 $J$  – момент инерции сечения;  
 $R$  – начальный радиус кольца.

Дифференцирование по  $S$  уравнения (2) дает

$$\frac{d^2\theta}{dS^2} = \frac{P}{JE} \cdot \frac{dy}{dS} = \frac{P}{EJ} \cdot \sin \theta = -\frac{P}{EJ} \cdot \sin(\theta - 180^\circ). \quad (3)$$

Используя формулы

$$\beta = \ell \cdot \sqrt{\frac{P}{EJ}}, \quad \ell = \frac{\pi R}{2}, \quad (4)$$

уравнение (3) получим в виде

$$\frac{d^2\theta}{dS^2} = -\frac{\beta^2}{\ell^2} \cdot \sin(\theta - 180^\circ). \quad (5)$$

Умножив почленно уравнение (5) на  $\frac{2d\theta}{dS} \cdot dS = 2d\theta$ , после интегрирования и перехода к половинному аргументу имеем

$$\left( \frac{d\theta}{dS} \right)^2 = 4 \cdot \frac{\beta^2}{\ell^2} \cdot \left[ C^2 - \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} - 90^\circ \right) \right]. \quad (6)$$

Значение постоянной  $C$  находится в интервале  $1 \leq C \leq \infty$ .

Введем обозначение  $K=1/C$  ( $0 \leq K \leq 1$ ) и  $\varphi=(90^\circ - \Theta/2)$ .

При этом  $\varphi_0 = 90^\circ$ , а  $\varphi_1 = 45^\circ$ .

Тогда дифференциальное уравнение (6) примет вид

$$\frac{dS}{\ell} = -\frac{K \cdot d\varphi}{\beta \cdot \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (7)$$

Далее из (7) получим дифференциалы координат

$$\begin{aligned} \frac{dX}{\ell} &= \frac{dS}{\ell} \cos \theta = -\frac{dS}{\ell} (1 - 2 \sin^2 \varphi) = -\frac{dS}{\ell} \left[ 1 + \frac{2}{K^2} (1 - K^2 \sin^2 \varphi - 1) \right] = \\ &= \left( \frac{2}{K^2} - 1 \right) \frac{dS}{\ell} + \frac{2d\varphi}{K\beta} \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dy}{\ell} = \frac{dS}{\ell} \sin \theta = 2 \frac{dS}{\ell} \sin \varphi \cos \varphi = -\frac{2K \sin \varphi \cos \varphi \cdot d\varphi}{\beta \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (9)$$

Интегрируя уравнения (8) и (9) вдоль всей упругой линии 01 с использованием эллиптических интегралов, приедем к следующим зависимостям

$$\beta = K[K(k) - F(k, \varphi)] \quad (10)$$

$$\frac{x_1}{\ell} = \frac{2}{K^2} - 1 - \frac{2}{K\beta} [E(k) - E(k, \varphi)], \quad (11)$$

$$\frac{y_1}{\ell} = \frac{2}{K\beta} (\sqrt{1 - 0,5K^2} - \sqrt{1 - K^2}), \quad (12)$$

где  $\varphi = 45^\circ$ ;

$K(k)$  и  $E(k)$  – соответственно полные эллиптические интегралы Лежандра 1-го и 2-го

рода;

$F(k, \varphi)$  и  $E(k, \varphi)$  – соответственно эллиптические интегралы Лежандра 1-го и 2-го рода.

В уравнениях (10)  $\div$  (12)  $K = \sin\varphi$ .

Применяя формулу (10) при известном значении  $\beta$  (4), определяется величина  $K$ . После чего довольно легко вычисляются  $x_1$  и  $y_1$  – координаты сечения 1 (рис.3).

Некоторая сложность при вычислениях по формулам (10) и (11) заключается в том, что эллиптические интегралы Лежандра определяются численным методом.

Однако использование графических зависимостей (рис. 4  $\div$  7) значительно упрощает решение задачи. Текущие значения координат упругой линии находятся по зависимостям аналогичным (10  $\div$  12). Разница заключается лишь в том, что  $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ . Причем  $\varphi = 90^\circ$  соответствует сечению 0 (рис. 3).

Изгибающие моменты определяются из дифференциального уравнения (2)

$$M = \left( \frac{d\theta}{dS} - \frac{1}{R} \right) EJ, \quad (13)$$

причем  $\frac{d\theta}{dS}$  выражается через  $\frac{d\varphi}{dS}$ . Для сечений 0 и 1 получим

$$M_1 = \frac{EJ}{R} \left( \frac{4\beta}{\pi K} \sqrt{1 - 0,5K^2} - 1 \right), \quad (14)$$

$$M_0 = \left( \frac{2\beta}{K\ell} \sqrt{1 - K^2} - \frac{1}{R} \right) EJ = \frac{EJ}{R} \left( \frac{4\beta}{\pi K} \sqrt{1 - K^2} - 1 \right). \quad (15)$$

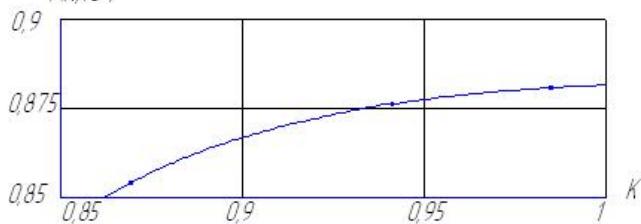


Рисунок 4 – Эллиптический интеграл Лежандра 1-го рода

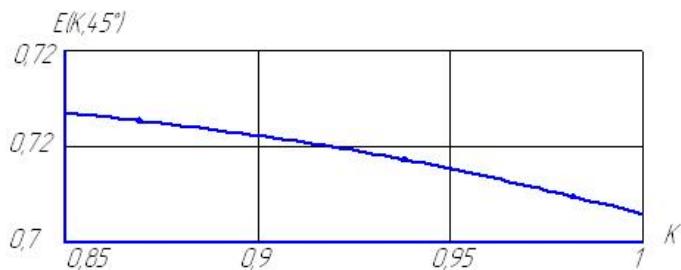


Рисунок 5 – Эллиптический интеграл Лежандра 2-го рода

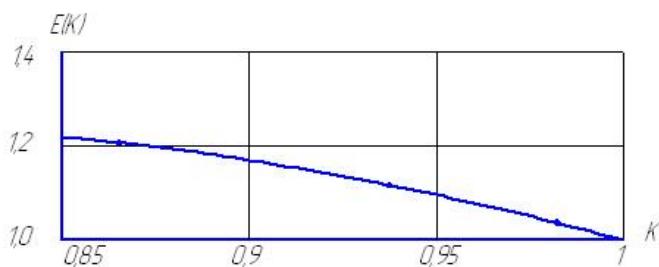


Рисунок 6 – Полный эллиптический интеграл Лежандра 2-го рода

На основании дифференциального уравнения упругой линии выводится также зависимость для вычисления радиуса кривизны в любой точке обечайки [6].

$$\rho = \frac{\ell K}{2\beta \sqrt{1 - K^2 \sin^2(90^\circ - \frac{\theta}{2})}}. \quad (16)$$

Полученные выше формулы позволяют оценить форму обечайки при действии силы  $2P$ , а также рассчитать кольцо на статическую прочность.

Правомерность принятой методики расчета была проверена экспериментально. При проведении опытов, в соответствии со схемой нагружения (рис. 2), кольцо из стали 50 Г деформировалось под действием силы, создаваемой гидроцилиндром (рис. 8).

Параметры обечайки: толщина  $\delta = 2$  мм; ширина  $B = 495$  мм; радиус  $R = 290$  мм.

В процессе экспериментов измерялись величина приложенной силы и соответствующие ей характерные размеры обечайки, показанные на рис. 8.

Аналитически рассчитанные  $2X_1$  и  $2Y_1$  сопоставлялись с полученными из эксперимента. При этом принимались  $E = 2,15 \cdot 10^5$  МПа;  $\ell = 455,8$  мм и  $\beta = 1,562$  при максимальной нагрузке.

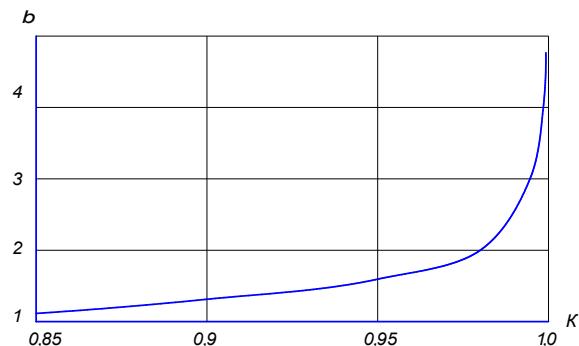
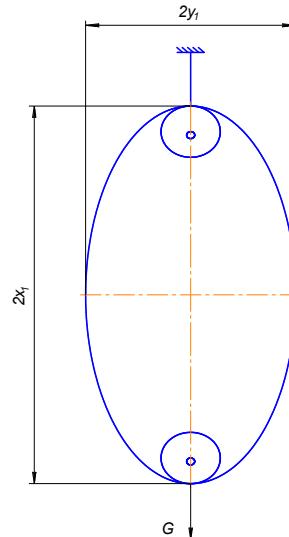
Рисунок 7 – Зависимость приведенного коэффициента нагрузки  $\beta$  от параметра К

Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки для определения деформации обечайки малой жесткости

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных сведены в таблице.

*Характерные размеры обечайки при максимальной нагрузке*

2Р кН	2X <sub>l</sub> , мм		2Y <sub>l</sub> , мм	
	Теория	Опыт	Теория	Опыт
2,03	655,3	660	499,9	495

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод: сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать заключение, что принятая методика расчета гибкой обечайки вальца обладает достаточной степенью точности.

Список литературы

1. Дудкин М.В. Валец дорожного катка / М.В. Дудкин, М.А. Сакимов и др. // Предварительный патент на изобретение РК № 18131. МПК E01C 19/26; Опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.
2. Павлов В.В. Каток с ведущим вальцом переменной кривизны / В.В. Павлов, А.Б. Коняев // Строительные и дорожные машины. - 1995. - № 4. - С. 23-25.
3. Головнин А.А. Виброволновые дорожные катки. Конструкция. Теория и расчет. Опыт применения. - Тверь, 2002. - 75 с.: ил.
4. Обоснование и исследование конструкции ведущего вальца самоходного катка с переменной кривизной в зоне уплотнения: Отчет о НИР. - Тема 785 / Рук. темы Г.С. Маслов. - М., 1988. - 89 с.
5. Кожухов И.Б. Универсальный справочник по математике / И.Б. Кожухов, А.А. Прокофьев. - М.: Лист Нью, 2003. - 544 с.
6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - В 10т. - Т. 1. Механика. - 4-е изд., испр. - М.: Наука, 1988. - 216 с.

Получено 21.07.09

УДК 656.13.05

**А.А. Макенов, О.В. Наумик**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА ДТП В ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ДОРОЖНОЙ ПОЛИЦИИ**

Для автомобильного транспорта характерна большая гибкость в удовлетворении спроса на перевозки грузов различного типа и объема, на изменение маршрутов движения и пунктов доставки, на обеспечение пассажирских перевозок. Благодаря этим качествам автомобильный транспорт играет большую роль в развитии экономики всех стран. Рост объема перевозок грузов и пассажиров автотранспортными средствами происходит более быстрыми темпами, чем на других видах транспорта. На 1 января 2007 года общее количество зарегистрированных транспортных средств (ТС) в Республике Казахстан составило 2 180 400 единиц. Около 80 % парка ТС – это легковые автомобили. Если раньше прирост числа ТС измерялся десятками тысяч, то теперь идет на сотни тысяч.

Однако наряду с положительной ролью, которую автомобильный транспорт играет в развитии экономики государства, необходимо отметить и негативные последствия процесса автомобилизации: загрязнение окружающей среды; градостроительные проблемы,

связанные с выделением городских пространств для движения и стоянки автотранспортных средств; рост дефицита нефтепродуктов и т. д. [1].

Наиболее отрицательными факторами процесса автомобилизации являются дорожно-транспортные происшествия (ДТП) и их последствия, характеризующиеся гибелью и ранением людей, материальным ущербом от повреждения транспортных средств, грузов, дорожных или иных сооружений. По данным Комитета дорожной полиции МВД Республики Казахстан за 1990-2005 гг. произошло 205 617 ДТП, в которых погибло 44 007 человек и 235 627 человек получили ранения различной степени тяжести. За 2003 год в Республике Казахстан на территории городов и населенных пунктов совершено 11 346 ДТП, что составляет 87,51 % от общего количества ДТП. Следует также отметить высокую тяжесть последствий ДТП в Республике Казахстан. На каждые 100 раненых в нашей республике погибает до 20 человек, в то время как в других странах этот показатель значительно ниже. Например в США на 100 раненых погибает 1,3 человека, в Англии – 1,7; в Германии – 2,2; в странах Юго-Восточной Европы – 4,5 человека [2]. С учетом низкой плотности населения и невысокого уровня автомобилизации в Республике Казахстан это обуславливает серьезные проблемы в области обеспечения безопасности дорожного движения.

Важной основой всей работы по обеспечению безопасности дорожного движения является учет и анализ статистических данных о ДТП.

Нами был проведен анализ ДТП по городу Усть-Каменогорску за 2003-2007 гг.

Основными видами ДТП являются наезды ТС на пешеходов и столкновения ТС, что составляет 55 % и 27 %, соответственно (табл. 1). Это объясняется влиянием большого числа градостроительных, социальных и психофизиологических факторов и даже в определенной степени из-за неудовлетворительной организации дорожного движения. Аварийная ситуация возникает также из-за того, что пешеход, переходя проезжую часть улицы в неустановленном месте, не может достоверно оценить скорость приближающегося ТС, а также время, за которое оно пройдет расстояние до пешехода.

Таблица 1  
*Распределение ДТП по видам*

Вид ДТП	Год					Количество ДТП в среднем
	2003	2004	2005	2006	2007	
Столкновение ТС	89	94	94	102	84	93/27
Опрокидывание ТС	14	18	16	22	16	17/5
Наезд на стоящее ТС	5	15	4	8	6	8/2
Наезд на препятствие	20	26	15	21	29	22/6
Наезд на пешехода	173	202	187	193	205	192/55
Наезд на велосипедиста	2	8	2	2	5	4/1
Прочие	10	23	9	13	5	12/4

Примечание. В знаменателе – доля ДТП, %

Анализ статистических данных о ДТП показывает (табл. 2), что основными причинами ДТП являются: превышение скорости движения (25 %), управление ТС в состоянии

алкогольного опьянения (25 %) и иные нарушения (37 %) (нарушение правил проезда железнодорожного переезда, выезд на полосу встречного движения, пересечение сплошной двойной линии).

В большинстве случаев разработка мероприятий, которые направлены на повышение безопасности дорожного движения, основывается на тщательном анализе причин и условий возникновения ДТП, прогнозировании развития ситуации, а также на определении наиболее эффективных направлений борьбы с аварийностью.

Таблица 2  
*Распределение ДТП по причинам*

Причины ДТП	Год					Количество ДТП в среднем / %
	2003	2004	2005	2006	2007	
Превышение скорости	67	75	47	54	98	69/25
Нарушение правил маневрирования	17	19	28	32	29	25/8
Нарушение правил проезда перекрестка, пешеходного перехода	25	30	39	49	38	36/10
Управление ТС в состоянии алкогольного опьянения	89	161	67	71	53	88/25
Иные нарушения	115	101	146	155	132	130/37

Сбор необходимых для анализа сведений осуществляется при помощи специального документа (карточки учета ДТП), в котором регистрируют первичные данные по каждому ДТП. В действующую карточку заносятся сведения, обеспечивающие возможность изучения состояния и причины аварийности: время, место и обстоятельства ДТП; основные причины ДТП; нарушение Правил дорожного движения (водителями, пешеходами, вождиками или велосипедистами), неудовлетворительные дорожные условия, неисправность транспортных средств. Водители ТС, которые нарушили Правила дорожного движения, характеризуются рядом дополнительных показателей: возраст, пол, стаж и т. д.; реквизиты, которые необходимы для связи различных подсистем автоматизированной информационно-поисковой системы «Дорожное движение». Эффективность использования всей информации об аварийности во многом зависит от того, насколько данные карточки учета ДТП точно отображают реальные обстоятельства аварийности. При подробном изучении и анализе действующей карточки учета ДТП были выявлены некоторые недостатки, которые обусловлены [3]:

- неполнотой информации как о дорожной ситуации в момент возникновения ДТП, так и о других существенных факторах, которые можно использовать при исследовании происшествия;
- неполнотой информации, которая характеризует социальное положение водителя ТС (возраст, стаж управления транспортным средством, пол, семейное положение, образование и должность);
- отсутствием необходимой аппаратуры, которая позволяет объективно и точно фик-

---

сировать обстоятельства ДТП.

Решение ряда задач в области обеспечения безопасности дорожного движения (ОБДД) требует более полного анализа причин возникновения ДТП с использованием сведений, которые отсутствуют в карточке учета. При этом содержание дополнительных сведений в значительной степени зависит от цели исследования, состава специалистов и технической оснащенности исследовательской группы, сроков и места проведения анализа и т.д. Поэтому одной из первых задач, которая встает при проведении подобного рода анализа, является определение формы и содержания документов (дополнительных карточек учета, опросных листов и т.д.), которые должны заполняться на месте ДТП или в органах дорожной полиции.

Метод опроса используется для анализа причин возникновения ДТП, прогнозирования аварийности, оценки эффективности планируемых и проведенных мероприятий и др.

Существует несколько особенностей, которые отличают метод опроса от обычного анализа ДТП (заполнение карточки учета ДТП):

- подготовка специального документа, в котором четко формируется цель опроса, обосновывается его необходимость;

- разработка методики опроса, имея в виду подготовку опросных документов; определение места, времени, процедуры проведения опроса; порядок фиксации и сбора результатов опроса; обработка данных опроса, определение методов обработки.

Выбор цели опроса в значительной мере определяется предполагаемыми конечными результатами анализа ДТП по городу Усть-Каменогорску. Для оптимизации данного процесса нами по заданию УДП ДВД ВКО была разработана анкета с целью выявления причин и обстоятельств совершения ДТП.

В анкете предлагаются две группы вопросов: объективные данные о самом участнике дорожного движения и вопросы, которые касаются анализируемой проблемы.

В качестве объективных данных фиксируют возраст, образование, стаж работы, профессию и т. д. При опросах по проблеме ОБДД обычно существенными оказываются следующие сведения: как часто он использует ТС, место жительство и некоторые другие.

В анкете нами были использованы вопросы открытого и закрытого типа. Достоинство открытых вопросов заключается в том, что они позволяют выявить новые аспекты изучаемой проблемы. Однако такие ответы практически не поддаются количественной обработке. Поэтому предлагается комбинированный метод, когда можно выбрать один из готовых и соответствующих вопросу ответ и также предоставляется возможность изложить и свое особое мнение.

В зависимости от того, как сформулированы вопросы, существует метод обработки результатов анкетирования. Этот метод реализован на ЭВМ в виде стандартной программы.

Применение анкетного опроса с соблюдением определенных требований позволяет получить достоверные сведения об объекте исследования. К основным требованиям можно отнести следующие:

- постановка точных и ясных вопросов, которые соответствуют задачам исследования;
- проведение инструктажа опрашиваемых лиц (респондентов), где основное внимание уделяется объяснению целей и задач исследования и важности объективного и точного ответа на вопросы анкеты;

- анонимность анкеты, обеспечение необходимой выборки, а также возможность ма-

шинной обработки.

Указанные требования были учтены нами при разработке анкеты и выполнены непосредственно при проведении опроса.

Необходимое число респондентов было определено при помощи таблицы достаточно больших чисел. По величине вероятности  $p=0,95$  и принимая значение допустимой ошибки  $\varepsilon = 0,05$ , находим, что достаточно опросить 384 человека [4].

Сотрудниками УДП ДВД ВКО были направлены 1000 анкет для проведения анонимного опроса участников дорожного движения.

В связи с тем, что участниками дорожного движения были даны не совсем корректные и объективные ответы, нами первоначально обработаны 230 анкет с помощью разработанного программного обеспечения.

Результаты опроса показали (табл. 3), что чаще всего участниками происшествия оказываются мужчины (84,78 %) в возрасте от 36 до 50 лет (30,26 %), имеющие среднее специальное образование (35,09 %) со стажем управления ТС более 10 лет (37,05 %). При этом водители ТС наиболее часто допускают следующие нарушения ПДД: превышение допустимой скорости (36,52 %), проезд на запрещающий сигнал светофора (13,01 %), стоянка в неустановленном месте (12,2 %) и прочие (26,02 %) (выезд на полосу встречного движения, проезд через железнодорожный переезд на запрещающий сигнал светофора и т. д.).

Таблица 3  
*Результаты анкетного опроса (фрагменты)*

Наименование вопроса		Код	Количество ответов	Доля, %
1	2	3	4	5
1	Возраст:			
	- до 18 лет	10201	9	3,65
	- от 18 до 25 лет	10202	54	23,68
	- от 26 до 35 лет	10203	61	2675
	- от 36 до 50 лет	10204	69	30,26
	- от 50 до 60	10205	27	30,26

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5
	- более 60 лет	10206	8	3,51
2	Стаж управления ТС:			
	- до 1 года	10701	26	11,61
	- от 1 года до 3-х лет	10702	40	17,86
	- от 3-х до 5-ти лет	10703	37	16,52
	- от 5-ти до 10-ти лет	10704	38	16,96
	- более 10 лет	10705	83	37,05
3	Вид происшествия:			
	- столкновение ТС	40101	79	34,2
	- опрокидывание ТС	40102	35	15,15
	- наезд на пешехода	40103	14	6,06

	- наезд на препятствие	40104	14	6,06
	- наезд на стоящее транспортное средство	40105	13	5,63
	- наезд на велосипедиста	40106	5	2,6
	- наезд на гужевой транспорт	40107	3	1,3
	- наезд на животных	40108	4	1,73
	- прочие ДТП	40109	62	26,84
4	Какие нарушения Правил дорожного движения Вы допускали (допускаете):			
	- превышение допустимой скорости	10901	90	36,52
	- проезд на запрещающий сигнал	10902	32	13,01
	- проезд на запрещающий сигнал регулировщи- ка	10903	19	7,72
	- управление ТС в состоянии алкогольного или наркотического опьянения	10904	11	4,47
	- стоянка (остановка) ТС в неустановленном месте	10905	30	12,2
	- прочие	10906	64	26,02

Оказалось, что в большинстве случаев водители управляют легковым автомобилем (77,63 %) марки «ВАЗ», как правило, белого цвета (24,89 %) и с левым расположением рулевого управления (76,47 %).

Преобладающими видами ДТП являются: столкновения ТС (34,2 %), опрокидывание ТС (15,15 %) и прочие происшествия (38,94 %). К прочим ДТП можно отнести: съезд ТС с дороги, падение пассажира и т. д. ДТП, как правило, в большинстве случаев возникают в населенных пунктах (60 %) при скорости движения порядка 40-60 км/ч. Основными факторами, которые влияют на возникновение ДТП, являются: разговор водителя ТС с пассажирами (13,64 %), погодно-климатические условия (15 %) и прочие (разговор по сотовому телефону, музыка в салоне ТС и т. д.) (49 %).

Результаты анализа статистических данных о ДТП показали, что для действенного решения проблемы ОБДД необходимо дальнейшее совершенствование системы учета ДТП в подразделениях дорожной полиции. В этой связи представляется целесообразным разработка новой карточки учета ДТП, что будет способствовать получению более детальных сведений о ДТП и повышению эффективности анализа статистических данных об аварийности.

#### Список литературы

1. Волошин Г.Я. Анализ дорожно-транспортных происшествий / Г.Я. Волошин, В.П. Мартынов, А.Г. Романов. - М.: Транспорт, 1987. - 240 с.
2. Бекмагамбетов М.М. Автомобильный транспорт Казахстана: этапы становления и развития. - Алматы: ТОО «Print-S», 2003. - 456 с.
3. Лукошевичене О.В. Моделирование дорожно-транспортных происшествий. - М.: Транспорт, 1988. - 96 с.
4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. - М.: Наука, 1971. - 576 с.

Получено 22.07.09

**А.А. Макенов**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**Ж.К. Мустафин**

СГУ им. Шакарима, г. Семей

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ  
ОПТИМИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

В настоящее время доминирующей концепцией является системно-процессное проектирование, которое рассматривает объект проектирования в динамике как систему бизнес-процессов в стандарт ИСО 9001:2000 [1]. Данный стандарт направлен на применение «процессного подхода». Особенно интенсивно данный подход начал применяться на практике в связи с широким внедрением систем менеджмента качества (СМК) на базе стандарта ISO 2000. В основе процессного подхода объект-система рассматривается как совокупность иерархически связанных бизнес-процессов. Графически процессы строятся на базе некоторого стандарта (так называемого IDEF-стандарта) [2]. Для построения подобных графических моделей разработано довольно много различного уровня сложности и функциональности программных специализированных средств. Одной из распространенных программных оболочек является BPwin. Воспользовавшись данной программной оболочкой, нами была построена функциональная IDEF-модель перевозки грузов. Начальным этапом динамического процессного моделирования системы управления автоперевозками является разработка иерархии бизнес-процессов в форме функциональных IDEF0-моделей, начиная с контекстной модели (рис. 1).

Дальнейшее построение функциональной модели осуществляется по функциональным траекториям подпроцессов, и при необходимости, функциям и процедурам.

Внедрение новых инновационных методов управления, нацеленных на коренное улучшение качества бизнес-процессов предприятия, называется реинжинирингом. Реинжиниринг предусматривает новый способ мышления – взгляд на построение компании как на инженерную деятельность. Реинжиниринг бизнес-процессов предполагает всесторонний анализ процессов существующего бизнеса, поиск ответов на следующие основные вопросы: почему делается именно это? Почему это делается именно таким образом? Что предприятие хочет изменить и почему? Реинжиниринг – это использование самых последних информационных технологий для достижения совершенно новых деловых целей [3].

В определении реинжиниринга ключевым является слово «процесс». Процессный подход предполагает смещение акцентов от управления отдельными структурными элементами на управление сквозными бизнес-процессами, связывающими воедино деятельность этих структурных элементов. Бизнес-процесс – это совокупность действий, направленных на получение результата (товара, услуги), имеющего ценность для клиента.

На примере автотранспортного предприятия основным бизнес-процессом является доставка груза заказчику по его заявке, которую можно назвать «заявка-доставка». Процесс «заявка-доставка» представляет собой множество внутренних видов деятельности, которые начинаются с одного входа (приема заявки) и заканчиваются доставкой груза клиенту. Назначение процесса состоит в том, чтобы предложить и оказать клиенту транспортную услугу, удовлетворяющую по стоимости, качеству и сервису.



Рисунок 1 – Контекстная IDEF0-модель выполнения автотранспортных услуг

При разработке образа будущего предприятия необходимо понять, как функционирует предприятие в настоящий момент. Для этого необходимо создать существующую модель предприятия (обратный реинжиниринг), которая станет основой для прямого реинжиниринга. Данная модель позволит вскрыть существующие резервы предприятия и отобразить ее узкие места. Для этого требуется описать два взгляда на предприятие: внешний и внутренний. Внешний взгляд показывает перспективу окружения, а внутренний описывает внутреннюю структуру предприятия. Построение процессной модели по методике Г.Н. Кальянова состоит в следующем [4].

Обратный реинжиниринг состоит из двух этапов:

1. Моделирование на основе прецедентов (П-модель), т.е. создание и описание модели в терминах субъектов, которые моделируют процессы взаимодействия с предприятием клиентов и партнеров. Модель, основанная на прецедентах, показывает предприятие как систему, ее заказчиков - как пользователей этой системы, а ее процессы - как различные прецеденты использования системы клиентами. Эта модель используется для представления приоритетных процессов (прецедентов), подлежащих реинжинирингу. Для этого необходимо описать потоки событий и сформировать метрику, чтобы в дальнейшем определить достигаются ли поставленные цели в новом бизнесе.

2. Объектное моделирование (О-модель), т.е. создание модели, описывающей внутреннее содержание предприятия. Для этого следует моделировать только функциональную иерархию предприятия и то, как прецеденты распределяются через функциональные подсистемы.

Определим П-модель для процесса «заявка-доставка». Клиент по телефону или визуально делает заявку оператору, диспетчеру, водителю или менеджеру по услугам, передает груз и осуществляет оплату. В каждом пункте есть собственный телефон, в специальных пунктах находятся диспетчер или оператор, которые вносят заявки в базу данных.

Заявка клиента выполняется на следующий день после заказа. Заявки принимаются в течение всего дня и с 8.00 до 10.00 ч. следующего дня (дозаявки). Заявки вносят в базу данных, печатают фактуры, формируют маршруты, пропуск и составляют отчеты по принятым заявкам за день. Заявки сортируются по маршрутам, передаются водителям вместе с фактурой и пропуском. После обслуживания заявок водители возвращаются в диспетчерскую и отмечают свое прибытие. Всего сформировано 4 основных маршрута. Маршруты делятся на «ночные» (обслуживание круглосуточных магазинов или объектов) и «дневные» (клиентов, работающих днем и междугородние перевозки).

Для разработки О-модели процесса «заявка-доставка» определим объекты, которые представляют участников процесса и их типы (рис. 2).

Интерфейсные объекты представляют в бизнесе операции, каждая из которых должна выполняться одним и тем же ресурсом. Эта задача включает взаимодействие с окружением бизнеса. Интерфейсный объект может участвовать в нескольких прецедентах (например Объект «Водитель»). На интерфейсные объекты ложится ответственность за координацию процесса. Управляющие объекты также представляют операции в бизнесе, но не имеют контакта с окружением бизнеса. Объекты сущности представляют такие сущности, как грузы и предметы, которые обрабатываются бизнесом. Это не человеческие и технические ресурсы, это – продукция, заказ, извещение и т.п. Далее необходимо определить отношение объектов, т.е. ответить на вопрос «как один объект зависит от других объектов?», как объекты взаимосвязаны. Введение отношений, определяющих роли других объектов, способствует структурированию модели и обобщению. Определив все составные части О-модели, можно отразить взаимодействие объектов в процессе, отражающее динамику объектной модели. Этот тип представления содержит помимо объектов, отношения коммуникации, которые необходимы для выполнения процесса. Чтобы определить кто и как инициирует потоки событий, необходимо включить в представление субъекты и отношения, связывающие субъекты с объектами.

Разработав модель процесса «заявка-доставка», отобразим ее в общем виде в масштабе всей компании (рис. 3).

Имея модель существующего процесса, необходимо определить метрики для контроля будущих изменений в модели и увеличения их эффективности. В адекватном наборе метрик присутствуют метрики времени, цены и качества. В исследуемом процессе можно выделить следующие метрики: средняя стоимость обработки 1 заявки, среднее время обработки 1 заявки, процент отказов, процент потерь заявок.

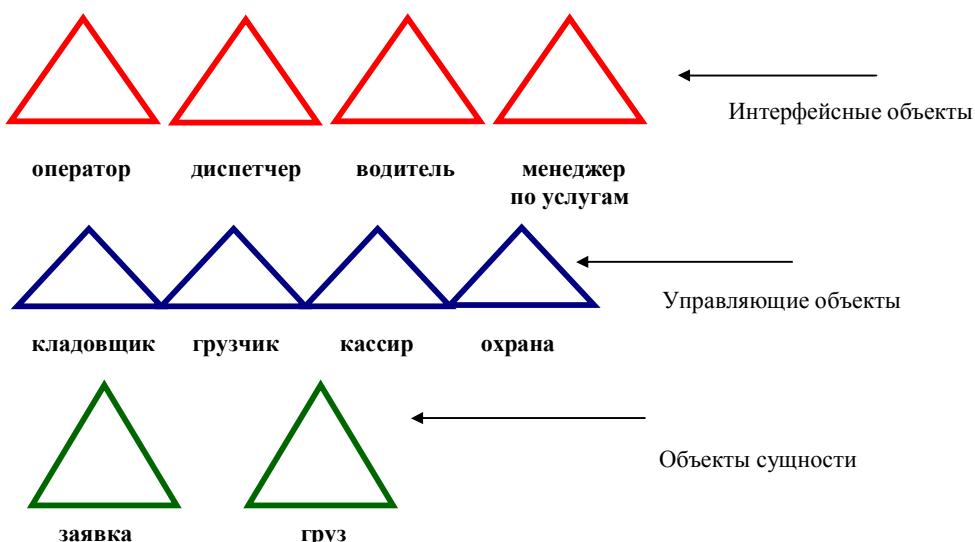


Рисунок 2 – Типы объектов О-модели процесса «заявка-доставка»

Во время работы процесса «заявка-доставка» наблюдались следующие слабые стороны и ошибки:

- наличие трех дифференцированных пунктов приема заявок для клиента составляет большое неудобство при оформлении заявки;
- потеря заявок оператором, диспетчером, водителем;
- принятое неверное количество заказанного продукта;
- неполнная информация о наличии продукции на складах.

Обслуживанием процесса занимаются: диспетчеры - 4, операторы - 8, телефонисты - 4, водители – 55, кладовщики - 9, кассир - 1.

Оборудование, участвующее в процессе: телефоны - 3, компьютеры - 2, автомобили - 47.

Новая модель процесса «заявка-доставка». Основная цель нового процесса заключается в повышении валовой прибыли через повышение грузооборота и завоевания новых клиентов. Процесс должен полностью удовлетворять ожидания клиентов: удобство оформления заявки, своевременная доставка груза, расчет, доброжелательность и вежливость операторов, водителей.

Приняв во внимание все отрицательные и положительные стороны существующего процесса «заявка-доставка», были спроектированы новые П- и О-модели процесса.

П-модель процесса «заявка-доставка» работает следующим образом.

А: Дозвонившись до предприятия, объект «Клиент» делает заявку на следующий день.

Б: Объект «Оператор», проверив наличие транспорта через базу данных, принимает заявку.

В: Объект «Оператор» вносит заявку в базу, отбивает путевку, формирует маршрут и пропуск для Объекта «Водитель».

Г: Объект «Водитель» доставляет груз Объекту «Клиент».

Д: Получив груз, Объект «Клиент» делает расчет.

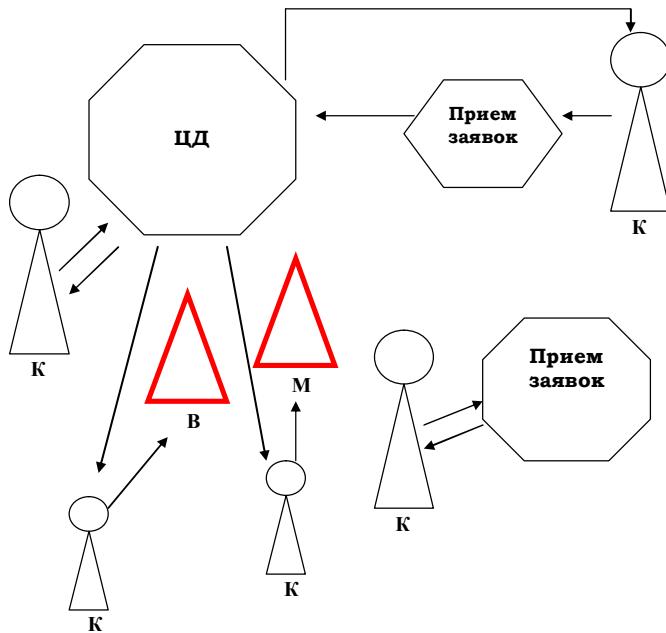


Рисунок 3 – Общий вид процесса «заявка-доставка»: В – водитель, К – клиент, М – менеджер, Д – центральная диспетчерская

Альтернативы хода событий:

1. Если на этапе Б окажется, что транспорт, который заказал Объект «Клиент», отсутствует, Объект «Оператор» должен предложить замену. Когда Объекты «Клиент» и «Оператор» придут к соглашению, прецедент продолжается с пункта В.

2. Если Объект «Клиент» делает заявку Объектам «Менеджер по услугам», «Водитель» или на месте, то прецедент продолжается с пункта В.

О-модель процесса «заявка-доставка» выглядит следующим образом.

Объединяются все пункты приема заявок в один пункт - центральная диспетчерская. В диспетчерской находится 3 телефона, 2 оператора и 2 компьютера, где собрана вся информация о грузе в базе данных. Телефоны специфичны, все переговоры записываются на аудиокассету. Этот телефон необходим для проверки полученных заявок, их содержания с внесенными заявками в базу данных. Также с помощью телефона можно проследить вежливость и доброжелательность операторов к клиенту. На складе у кладовщика также должен находиться компьютер, подключенный к внутренней компьютерной сети. Кладовщик, получив информацию о заказе, сможет своевременно его сформировать.

Ход событий О-модели:

А: Дозвонившись до компании, объект «Клиент» дает стимул, означающий, что он хочет сделать заявку на следующий день.

Б: Объект «Оператор», проверив наличие товара через базу данных, принимает заявку.

В: Объект «Оператор» вносит заявку в базу, отбивает фактуру, формирует маршрут и пропуск в течение дня.

Г: Объект «Диспетчер», получив все дневные заявки, сортирует их по маршрутам в трех направлениях: 1) обслуживание города, 2) обслуживание фирменных торговых точек, 3) обслуживание междугородних перевозок.

Д: Объект «Водитель» утром следующего дня у Объекта «Диспетчер», отметив свой выход на работу, берет сформированные путевку, фактуры и пропуск.

Е: Получив продукт у Объекта «Кладовщик» или «Клиент» и пройдя проверку у Объекта «Охрана», Объект «Водитель» доставляет груз Объекту «Клиент».

Ж: Получив груз, Объект «Клиент» делает расчет.

З: Объект «Водитель», доставив заказ и получив расчет по всем грузам, прибывает в предприятие и сдает деньги Объекту «Кассир».

И: Рассчитавшись с кассой, Объект «Водитель» сдает фактуру Объекту «Кладовщик».

К: Объект «Водитель» сообщает об окончании работы Объекту «Диспетчер».

Альтернативы хода событий:

1. Если на этапе Б окажется, что транспорт, который заказал Объект «Клиент», отсутствует, Объект «Оператор» должен предложить замену. Когда Объекты «Клиент» и «Оператор» придут к соглашению, прецедент продолжается с пункта В.

2. Если Объект «Клиент» делает заявку Объектам «Менеджер по услугам», «Водитель» или на месте, то прецедент продолжается с пункта В.

Новая модель процесса «заявка-доставка» исключает:

- наличие трех дифференцированных пунктов приема заявок;
- потерю заявок оператором, диспетчером, водителем;
- принятие неверного количества заказанного транспорта;
- неполную информацию о наличии транспорта;
- проволочки с формированием заявки.

Появляются новые возможности:

- удобство оформления заявки;
- контроль переговоров оператора и клиента на доброжелательность и вежливость;
- моментальное владение измененной информацией в базе данных;
- сокращение интерфейсных объектов, которые участвуют в процессе, на 7 человек.

В новом процессе обслуживанием будут заниматься: диспетчеры - 3; операторы - 6; водители - 55; кладовщики - 9; кассир – 1.

Оборудование, которое будет участвовать в процессе: специальные телефоны - 3; компьютеры - 5; автомобили - 47.

Произойдут изменения в метриках:

1) средняя стоимость обработки 1 заявки сократится на 43,8 %, за счет сокращения персонала;

2) процент отказов и процент потерь заявок сведется к 0, т.к. в процесс внедряется новое оборудование (специальный телефон), позволяющее исключить потерю заявки и проверить правильность ее составления.

Единственная метрика, над которой следует работать, это среднее время обработки 1 заявки. Время обработки заявки зависит от программного обеспечения и опыта оператора.

Внедрение новой модели не только сократит затраты на обработку заявок и брак от отказов, но и повысит процент поступающих заявок, а также качество обслуживания клиента.

#### Список литературы

1. Вендрев А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 170 с.

2. Ивлев В.А. Реорганизация деятельности предприятий: от структурной к процессной организации / В.А. Ивлев, Т.В. Попова. - М., 2000.
3. Ойхман Е.Г. Рейнжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии / Е.Г. Ойхман, Э.В.Попов. - М.: Финансы и статистика, 1997.
4. Кальянов Г.Н. Процессный подход и типизация бизнес-процессов // Сб. науч. тр., 6-я науч.-практ. конф. - М., 2002. - С.94-96.

Получено 22.07.09

УДК 519.87:62.5

**Г.К.Шадрин, Н.В. Аринова**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СИЛИКАТНОЙ СМЕСИ

Общей целью управления технологическим процессом приготовления силикатной смеси является решение задачи стабилизации трех потоков: конденсат, песок и вяжущее, а также стабилизации влажности смеси. Первые три задачи автономны и могут рассматриваться независимо, то есть как несвязанные системы регулирования. В задаче стабилизации влажности смеси эти контуры фигурируют как низовые контуры и входят в общую каскадную систему регулирования. Поэтому составляется математическое описание по следующим каналам управления: «управляющий сигнал на частотный преобразователь» – «расход песка»; «управляющий сигнал на частотный преобразователь» – «расход вяжущего»; «управляющий сигнал на регулирующий клапан – расход конденсата».

1. Структурная схема (рис. 1), необходимая для математического описания канала расхода песка как объекта регулирования, содержит: 1 звено – частотный преобразователь; 2 звено – электродвигатель; 3 звено – транспортер; 4 звено – весоизмеритель. Первые три звена принимаем апериодическими звенями первого порядка, а звено 4 – апериодическим звеном второго порядка. Возмущения на транспортер связаны с нестабильностью выхода сыпучего материала.

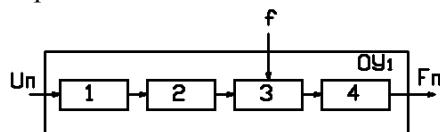


Рисунок 1 – Структурная схема участка подачи песка:  $U_{\Pi}$  – управляющий сигнал на частотный преобразователь подачи песка;  $F_{\Pi}$  – выходной сигнал (расход песка);  $OY_1$  – участок подачи песка,  $f$  – возмущения

Участок подачи песка как объекта управления может быть представлен выражением

$$F_{\Pi}(s) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(a_4 s^2 + a_4 s + 1)} U_{\Pi}(s), \quad (1)$$

где  $s$  – комплексная переменная преобразования Лапласа;

$F_{\Pi}(s)$  – текущий расход песка;

$U_{\Pi}(s)$  – управляющий сигнал на частотный преобразователь 5;

$K_i$  – коэффициент передачи  $i$ -го звена,  $i=1,2,3,4$ ;

$T_i$  – постоянная времени  $i$ -го звена,  $i=1,2,3$ ;

$a_4, a'_4$  – коэффициенты звена второго порядка.

Оценим значения коэффициентов передачи  $K_i$  и постоянных времени  $T_i$  первого канала.

- Передаточная функция частотного преобразователя

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}.$$

Коэффициент передачи частотного преобразователя

$$K_1 = \frac{F_q}{U_{\Pi}} = \frac{50 \Gamma q}{100\%} = 0,5 \quad \left[ \frac{\Gamma q}{\%} \right],$$

где  $F_q$  – частота выходного напряжения частотного преобразователя, подаваемого на двигатель (при 100 % – 50 Гц).

Принимаем постоянную времени 1-го звена  $T_1 = T_{pas}$ . Принимаем типовое значение времени разгона частотного преобразователя  $T_{pas} = 2c$ .

• Конвейер песка можно считать безинерционным звеном, а его динамические свойства объединить с двигателем, т.е. можно объединить 2-е и 3-е звенья. На основании этого представляем все эти элементы единым динамическим элементом, который может быть представлен звеном с передаточной функцией

$$W_{2,3}(s) = \frac{K_{2,3}}{T_{2,3} \cdot s + 1}.$$

Тогда коэффициент передачи объединенного звена

$$K_{2,3} = \frac{F_{\Pi cp}}{F_q} = \frac{90,27 \text{ м/час}}{50 \Gamma q} = 1,8 \quad \left[ \frac{\text{м/час}}{\Gamma q} \right],$$

где  $F_{\Pi cp}$  – средний расход песка.

Приближенно постоянную времени объединенного звена  $T_{2,3}$  можно определить по времени разгона двигателя, так как инерционность этого звена меньше инерционности других звеньев этого участка.

Известно, что время разгона типового асинхронного двигателя мощностью 11 кВт с редуктором и конвейером около 0,9 с. Принимаем время разгона двигателя равным трем его постоянным времени  $T_2$ , находим

$$T_{2,3} = \frac{0,9}{3} = 0,3 \text{ с}.$$

$K_{2,3}$  зависит от площади сечения выпускного отверстия бункера и скорости ленты. Принимаем типовую скорость движения ленты  $v_{\Pi} = 1 \text{ м/с}$ . Уровень помех можно оценить следующим образом. Известно, что расход песка  $F_{\Pi}$  вычисляется по формуле

$$F_{\Pi} = W_{\Pi} \cdot v_{\Pi},$$

где  $W_{\Pi} = S \cdot \rho_{\text{песка}} \cdot 1 \text{ м}$  – погонная нагрузка, т.е. вес песка на 1 метр ленты;

$S$  – площадь выпускного отверстия в бункере;

$\rho_{\text{песка}}$  – насыпная плотность песка;

$v_L$  – скорость ленты.

- Весоизмеритель (конвейерные весы) является апериодическим звеном второго порядка. Его передаточная функция

$$W_4(s) = \frac{K_4}{(a_4 s^2 + a'_4 s + 1)}.$$

Коэффициент передачи конвейерных весов

$$K_4 = \left[ \frac{m/\text{час}}{m/\text{час}} \right] = 1.$$

Тогда передаточная функция 4-го звена

$$W_4(s) = \frac{1}{(a_4 s^2 + a'_4 s + 1)}. \quad (2)$$

$a_4, a'_4$  – коэффициенты передаточной функции, которые зависят от параметров сглаживающего фильтра в составе конвейерных весов.

Для оценки  $a_4, a'_4$  удобно представить (2) в виде

$$W_4(s) = \frac{1}{(T_4 s + 1)(T'_4 s + 1)}$$

Из практики работы  $T_4, T'_4 = 0,1 \dots 0,5 \text{ с}$  – постоянная времени фильтра конвейерных весов.

Если принять  $T_4, T'_4 = 0,3 \text{ с}$ , тогда  $a_4 = T_4 \cdot T'_4 = 0,09 \text{ с}^2$ ,  $a'_4 = T_4 + T'_4 = 0,6 \text{ с}$ .

С учетом вышеизложенного выражение (1) принимает вид:

$$F_n(s) = \frac{K_1 K_{2,3} K_4}{(T_1 s + 1)(T_{2,3} s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} U_n(s) = \frac{0,5 \cdot 1,8 \cdot 1}{(2s + 1)(0,3s + 1)(0,09s^2 + 0,6s + 1)} U_n(s).$$

2. Структурная схема (рис. 2) канала расхода вяжущего содержит: 1 звено – частотный преобразователь; 2 звено – двигатель; 3 звено – секторный питатель; 4 звено – винтовой питатель; 5 звено – ленточный питатель; 6 звено – весоизмеритель. Первые три звена, как и в предыдущем случае, могут быть описаны как апериодические звенья первого порядка; 4, 5 звенья – транспортер и винтовой питатель – звенья чистого запаздывания; 6 звено – весоизмеритель – это апериодическое звено второго порядка. Возмущения на секторный питатель связаны с «зарастанием» (или забиванием) секторов сыпучим материалом. Возмущения на винтовой питатель связаны с неравномерностью подачи материала винтом. Помехи имеют периодическую составляющую с периодом, равным периоду вращения винта, и по амплитуде обычно меньше, чем помехи секторного питателя.

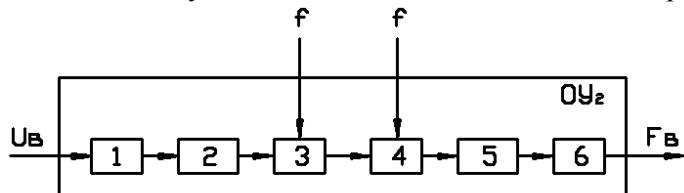


Рисунок 2 – Структурная схема участка подачи вяжущего:  $U_B$  – управляющий сигнал на частотный

преобразователь подачи вяжущего;  $F_B$  – выходной сигнал (расход вяжущего);  $OY_2$  – участок подачи вяжущего,  $f$  – возмущения

Участок подачи вяжущего как объект управления может быть представлен выражением

$$F_B(s) = \frac{K'_1 K'_{2,3} \cdot e^{-\tau_4 s} \cdot e^{-\tau_5 s} \cdot K'_6}{(T'_1 s + 1)(T'_{2,3} s + 1)(a_6 s^2 + a'_6 s + 1)} U_B(s), \quad (3)$$

где  $F_B(s)$  – текущий расход вяжущего;

$U_B(s)$  – управляющий сигнал на частотный преобразователь 10;

$K'_i$  – коэффициент передачи  $i$ -го звена,  $i=1, 2, 3, 6$ ;

$T'_i$  – постоянная времени  $i$ -го звена,  $i=1, 2, 3$ ;

$a_6, a'_6$  – коэффициенты звена второго порядка;

$\tau_4, \tau_5$  – время запаздывания винтового питателя и транспортера.

Оценим значения коэффициентов передачи  $K'_i$  и постоянных времени  $T'_i$  2-го канала.

- Передаточная функция частотного преобразователя такая же, как и для участка подачи песка:

$$W'_1(s) = \frac{K'_1}{T'_1 \cdot s + 1}.$$

Коэффициент передачи  $K'_1$  звена определяется так же, как и для частотного преобразователя 5 в расходе песка  $K'_1 = K_1 = 0,5 \left[ \frac{\Gamma\eta}{\%} \right]$ . Постоянная времени также равна

$$T'_1 = T_1 = 2 \text{ с}.$$

• Двигатель соченен с редуктором, редуктор в свою очередь приводит в движение секторный питатель. Все эти элементы объединены в единую механическую систему, обладающую некоторой инерционностью. Здесь мы не учитываем люфты в редукторе, муфтах и других элементах. На основании этого представляем все эти элементы единым динамическим элементом, который может быть представлен звеном с передаточной функцией

$$W'_{2,3}(s) = \frac{K'_{2,3}}{T'_{2,3} \cdot s + 1}.$$

Расход вяжущего в среднем составляет  $F_B = 24,9 \text{ т/час}$ , получаем значение коэффициента передачи объединенного звена

$$K'_{2,3} = \frac{F_{B\phi}}{F_q} = \frac{24,9 \text{ т/час}}{50 \text{ Гц}} = 0,5 \left[ \frac{\text{т/час}}{\text{Гц}} \right],$$

где  $F_{B\phi}$  – фактический расход вяжущего на выходе секторного питателя;

$F_q$  – частота выходного напряжения частотного преобразователя, подаваемого на двигатель (при 100 % – 50 Гц).

Принимаем постоянную времени объединенного звена  $T'_{2,3} = T_{2,3} = 0,3 \text{ с}$ , как и в слу-

чае дозирования песка.

- Винтовой питатель вращается с постоянной скоростью. Винт при вращении перемещает материал со скоростью, определяемой шагом винта и скоростью его вращения. На основании этого винтовой питатель может быть представлен звеном чистого запаздывания с передаточной функцией вида

$$W_4'(s) = e^{-\tau_4 s}.$$

Время запаздывания  $\tau_4$  зависит от длины питателя, шага винта, скорости вращения винта. Тогда  $\tau_4$  вычисляется по формуле

$$\tau_4 = \frac{l_4}{n_4 \cdot h_4},$$

где  $n_4$  – частота вращения винта, об/с;

$l_4$  – длина питателя, м;

$h_4$  – шаг винта, м/об.

Длина питателя  $l_4 = 10 \text{ м}$ , а шаг винта  $h_4 = 0,3 \text{ м/об}$ .

Рассчитаем скорость вращения винтового питателя. Определим активную площадь трубы питателя. Принимаем, что труба питателя заполнена вязким на 70%. Тогда площадь поперечного сечения питателя с учетом заполнения вязким

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 0,7 = \frac{3,14 \cdot 0,09}{4} \cdot 0,7 = 0,049 \text{ м}^2,$$

где  $S$  - активная площадь трубы питателя;

$d$  - диаметр трубы питателя.

Питатель выдает за один оборот винта объем вязкого, равный

$$V_B = S \cdot h_4 = 0,049 \cdot 0,3 = 0,0147 \text{ м}^3.$$

Питатель должен сделать  $n_4 = 4,3 \text{ об/с}$ , чтобы обеспечить заданную объемную производительность.

Тогда

$$\tau_4 = \frac{10 \text{ м}}{0,3 \text{ м/об} \cdot 4,3 \text{ об/с}} = 7,75 \text{ с}.$$

- Ленточный питатель дает запаздывание и его передаточная функция такая же, как винтового питателя

$$W_5'(s) = e^{-\tau_5 s},$$

где  $\tau_5$  определяется длиной участка ленточного питателя до весоизмерителя  $L_5 = 2,3 \text{ м}$  и его скоростью  $v_5 = 0,5 \text{ м/с}$ .

$$\tau_5 = \frac{L_5}{v_5} = \frac{2,3}{0,5} = 4,6 \text{ с}.$$

- Весоизмеритель считаем апериодическим звеном второго порядка

$$W_6'(s) = \frac{K'_6}{(a_6 s^2 + a'_6 s + 1)}.$$

Коэффициент передачи весоизмерителя

$$K'_6 = \frac{\text{т/час}}{\text{т/час}} = 1.$$

Тогда его передаточная функция принимает вид

$$W_6(s) = \frac{1}{(a_6 s^2 + a'_6 s + 1)}, \quad (4)$$

где  $a_6 = 0,09 c^2$  и  $a'_6 = 0,6 c$  – коэффициенты передаточной функции; они зависят от параметров сглаживающего фильтра в составе конвейерных весов.

С учетом вышеизложенного выражение (3) принимает вид:

$$F_B(s) = \frac{K'_1 K'_{2,3} \cdot e^{-\tau_4 s} \cdot e^{-\tau_5 s} \cdot K'_6}{(T'_1 s + 1)(T'_{2,3} s + 1)(a'_2 s^2 + a'_1 s + 1)} U_B(s) = \frac{0,5 \cdot 0,5 \cdot e^{-7,75} \cdot e^{-4,6} \cdot 1}{(2s + 1) \cdot (0,3s + 1)(0,09s^2 + 0,6s + 1)} U_B(s).$$

3. Структурная схема канала расхода конденсата (рис. 3) содержит: 1 звено – регулирующий клапан; 2 звено – насос с участком трубопровода и форсунками; 3 звено – электромагнитный расходомер. Динамические свойства звеньев на рисунке 4 могут быть представлены следующим образом: 1 звено – апериодическое звено 1-го порядка, 2 звено считаем безынерционным звеном, 3 звено – апериодическое звено 1-го порядка. Возмущения на насос и форсунки связаны с попаданием твердых включений в воду, постепенных «зарастаний» деталей насоса из-за жесткости конденсата. Возмущения на регулирующий клапан вызваны износом рабочих поверхностей и попаданием в отверстие твердых частиц.

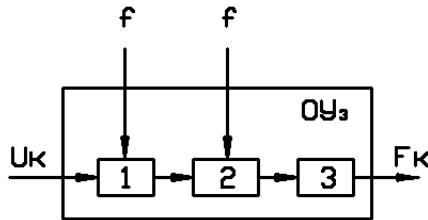


Рисунок 3 – Структурная схема участка подачи конденсата:  $U_K$  – управляющий сигнал на регулирующий клапан подачи конденсата;  $F_K$  – выходной сигнал (расход конденсата);  $OU_3$  – участок подачи конденсата,  $f$  – возмущения

Участок подачи конденсата как объект управления может быть представлен выражением

$$F_K(s) = \frac{K''_1 K''_2 K''_3}{(T''_1 s + 1)(T''_3 s + 1)} U_K(s), \quad (5)$$

где  $F_K(s)$  – текущий расход конденсата;

$U_K(s)$  – управляющий сигнал на регулирующий клапан 15;

$K'_i$  – коэффициент передачи  $i$ -го звена,  $i=1,2,3$ ;

$T'_i$  – постоянная времени  $i$ -го звена,  $i=1,3$ .

Оценим значения коэффициентов передачи  $K'''_i$  и постоянных времени  $T'''_i$  канала.

- Передаточная функция регулирующего клапана

$$W_1''(s) = \frac{K_1''}{(T_1''s + 1)}.$$

Коэффициент передачи регулирующего клапана

$$K_1'' = \frac{\%X_{1PO}''}{U_K} = 1 \left[ \frac{\%X_{1PO}''}{mA} \right],$$

где  $\%X_{1PO}''$  – процент хода регулирующего органа.

Соотношение управляющего сигнала на регулирующий клапан и его процент хода следующее: при управляющем сигнале  $4mA - 0\%$ , а при  $20mA - 100\%$ . Постоянная времени  $T_1'' = 45$  с зависит от типа клапана (для электрического сервопривода).

- Насос с участком трубопровода и форсунками объединены в единое второе звено, т.к. их можно принять безынерционными элементами и они в целом обеспечивают подачу воды. Они однородно влияют на расход воды.

Передаточная функция звена

$$W_2''(s) = K_2''.$$

Коэффициент передачи звена

$$K_2'' = \frac{F_{K\phi}}{\%X_{1PO}''},$$

где  $F_{K\phi}$  – фактический расход конденсата.

Численное значение  $K_2'' = \frac{F_{K\phi}}{\%X_{1PO}''} = \frac{7,4 \text{ т/ч}}{100\%} = 0,074 \frac{\text{т/ч}}{\%X_{1PO}}$

- Передаточная функция расходомера

$$W_3''(s) = \frac{K_3''}{T_3'' \cdot s + 1}.$$

Коэффициент передачи третьего звена  $K_3'' = 1$ .

Постоянная времени  $T_3'' = 1,5 \text{ с}$  - устанавливается при наст

С учетом вышеизложенного выражение (5) принимает вид:

$$F_K(s) = \frac{K_1'' K_2'' K_3''}{(T_1'' s + 1)(T_3'' s + 1)} U_K(s) = \frac{1 \cdot 0,074 \cdot 1}{(45s + 1)(1,5s + 1)},$$

Полученная математическая модель используется при технологических расчетах, изучении процесса и разработки каскадной системы управления процессом смешивания компонентов силикатной смеси.

Получено 10.08.09

по страницам



## РЕВЕРСИВНОЕ СВЕРЛО

Московские изобретатели на 6-й выставке-смотре интеллектуальной собственности Восточного административного округа Москвы показали необычный инструмент - сверло, которое режет независимо от направления вращения.

Это оказалось возможным потому, что рабочие поверхности нового сверла сделали не криволинейными, как у традиционных инструментов, а плоскими. Поэтому при сверлении угол между задней поверхностью сверла и обрабатываемой поверхностью всегда больше нуля, а это и есть непременное условие резания.

«Наука и жизнь» № 1, 2008