

Канд. техн. наук Р.В. Кирия,
инженеры Д.Д. Брагинец, Т.Ф. Мищенко
(ИГТМ НАН Украины)

ИСТЕЧЕНИЕ СЫПУЧЕГО ГРУЗА ИЗ БУНКЕРА С РЕГУЛИРУЕМОЙ БОКОВОЙ ЗАСЛОНКОЙ

Розроблено математичну модель витікання сипкого вантажу із бункера з регульованою боковою заслінкою. Знайдена залежність витрат сипкого вантажу із бункера від кута нахилу заслінки. Отримані результати порівнювалися з експериментальними даними.

EXHAUST BULK MATERIAL FROM CONTROL LATERAL DAMPER

Exhaust bulk material from control lateral damper mathematical model is proposed. Bunker bulk flow as function of damper angle is obtained. The results obtained were compared with experimental data.

Одним из путей повышения эффективности работы горнотранспортного оборудования является применение компьютерных технологий, позволяющих адаптировать работу системы транспорта к изменяющимся условиям работы конвейерных линий с минимальным участием человека.

Для эффективной работы бункеров в таких системах транспорта необходимо иметь управляемые средства их разгрузки, позволяющие поддерживать стабильные параметры грузопотока при изменении внешних условий.

В работах [1, 2] разработаны математические модели истечения сыпучего груза из бункера с различным расположением щелевого отверстия и определена производительность разгрузки сыпучего груза из бункера в зависимости от ширины его выпускного отверстия. Однако математических моделей истечения сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой не существует.

Целью статьи является определение средней скорости и расхода сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой, расположенной в боковой стенке бункера.

Задачами исследований являлись: установление теоретической зависимости расхода сыпучего груза из бункера от угла наклона заслонки, величины выходного отверстия, длины заслонки и физико-механических свойств сыпучего груза; экспериментальные исследования процесса истечения сыпучего груза с различным диаметром частиц из бункера с регулируемой заслонкой, расположенной в боковой стенке бункера.

Рассмотрим истечение сыпучего груза из прямоугольного бункера с боковым щелевым отверстием шириной a , длиной b ($b > a$) и углом наклона заслонки к боковой стенке бункера α (рис. 1).

На основе визуальных исследований процесса истечения сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием и регулируемой заслонкой, так же, как и для бункера с боковым или горизонтальным щелевым выпускным отверстием [1, 2] можно выделить 5 зон: **A, B, C, D, E**, отличающихся друг от друга структурно-механическим состоянием сыпучего груза (см. рис. 1).

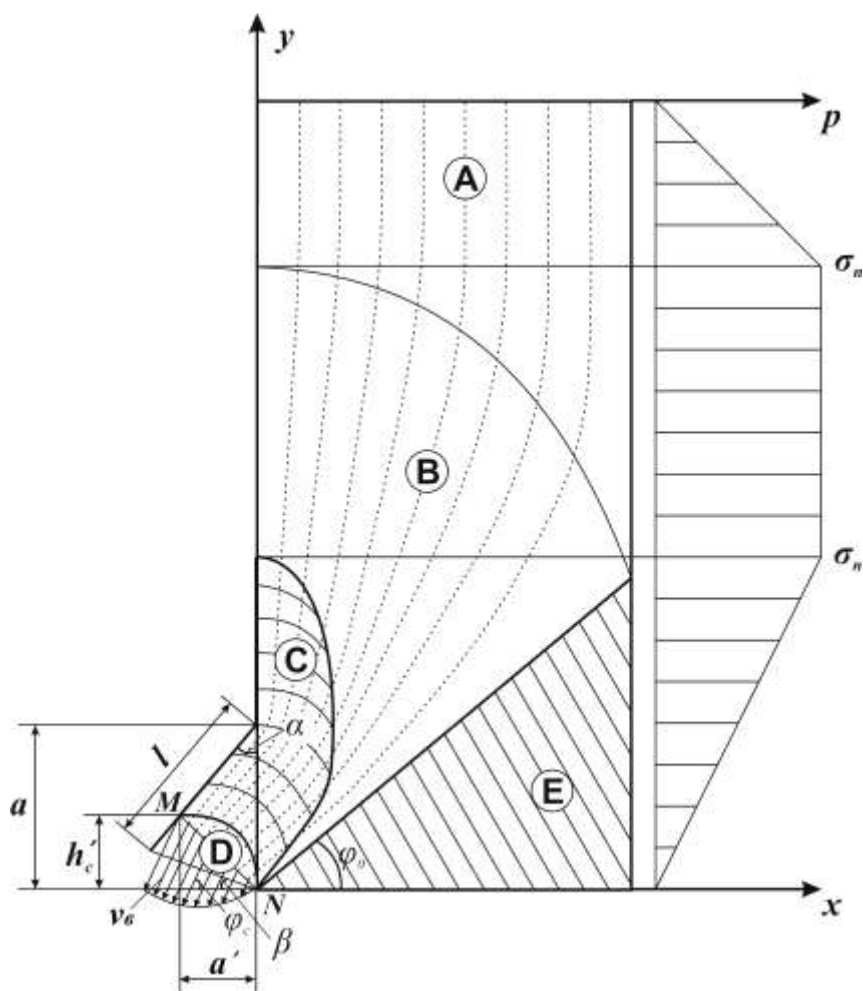


Рис. 1 – Зоны структурно-механического состояния сыпучего груза при его истечении из бункера с боковым щелевым выпускным отверстием и регулируемой заслонкой.

Свободнодисперсное движение сыпучего груза в зоне обрушения **D** в бункере с боковым щелевым выпускным отверстием будет отличаться от движения сыпучего груза в бункере с горизонтальным щелевым выпускным отверстием.

В нашем случае зона динамического свода **C** в отличие от бункера с боковым щелевым отверстием без заслонки продлится дальше вдоль заслонки, и ее нижняя граница в виде параболы с параметрами h'_c и a' соединит точки **M** и **N** (см. рис. 1). При этом h'_c и a' уменьшаются с уменьшением угла наклона заслонки α и при $\alpha \rightarrow 0$ $h'_c \rightarrow 0$ и $a' \rightarrow 0$. В данном случае зона обрушения **D** находится ниже нижней границы динамического свода и представляет собой область, ограниченную параболой **MN** и отрезком, соединяющим концевые точки параболы (см. рис. 1).

Так, как и в работах [1, 2], при описании движения сыпучего груза в области **D** применим теорему Бернулли [3].

При этом из рис. 1 следует

$$h'_c = a - a' \operatorname{ctg} \alpha, \quad (1)$$

где a' – полуширина нижней границы динамического свода, м; h'_c – высота нижней границы динамического свода; α – угол наклона заслонки к боковой

стенке бункера, град.

Предположим, что нижняя граница динамического свода представляет собой полупараболу, параметры которой, согласно [4], связаны соотношением

$$h'_c = K_1 a', \quad (2)$$

где $K_1 = \frac{1}{2} \left(f + \sqrt{1 + f^2} \right)$; f – коэффициент внутреннего трения сыпучего груза.

Из (1) и (2) имеем

$$a - a' \operatorname{ctg} \alpha = K_1 a',$$

откуда

$$a' = \frac{a \operatorname{tg} \alpha}{1 + K_1 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2), получим

$$h'_c = \frac{K_1 a \operatorname{tg} \alpha}{1 + K_1 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4)$$

Для определения объемного расхода сыпучего груза через щелевое отверстие, расположенное на боковой стенке бункера, с регулируемой заслонкой, как и в [1, 2], применим уравнение Бернулли для сыпучих грузов к сечениям 1-1 и 2-2 выделенной трубки в зоне перемешивания **D** (рис. 2).

В результате определим скорость v_e на выходе из зоны **D** по формуле

$$v_e = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \sqrt{2g \left(h + \frac{\sigma_2}{\gamma} \right)}, \quad (5)$$

где

$$\sigma_2 = \gamma |x| \mathfrak{B}, \quad (6)$$

где $\mathfrak{B} = \frac{1}{f} + f - \sqrt{1 + f^2}$.

Здесь ζ – коэффициент местных потерь Дарси-Вейсбаха при истечении сыпучего груза из бункера с отверстием, расположенным в дне бункера, и регулируемой заслонкой; h – перепад высоты между сечениями 1-1 и 2-2 элементарной трубки (см. рис. 2); γ – удельный вес сыпучего груза, кг/м³; σ_2 – главное нормальное напряжение в сыпучем грузе, кг/м².

Расход через выпускное отверстие бункера определим по формуле

$$Q = \int v_e ds, \quad (7)$$

где ds – площадь нормального сечения выделенной трубки (см. рис. 2).

Из рис. 2 имеем

$$ds = b \cos 0,5\pi - (\varphi + \beta) \bar{d}y_1, \quad (8)$$

где φ – угол наклона элементарной трубки к горизонтали, град; β – угол наклона отрезка NB (ось OY_1) к горизонтали, град; y_1 – координата точки K_1 в системе координат OX_1Y_1 .

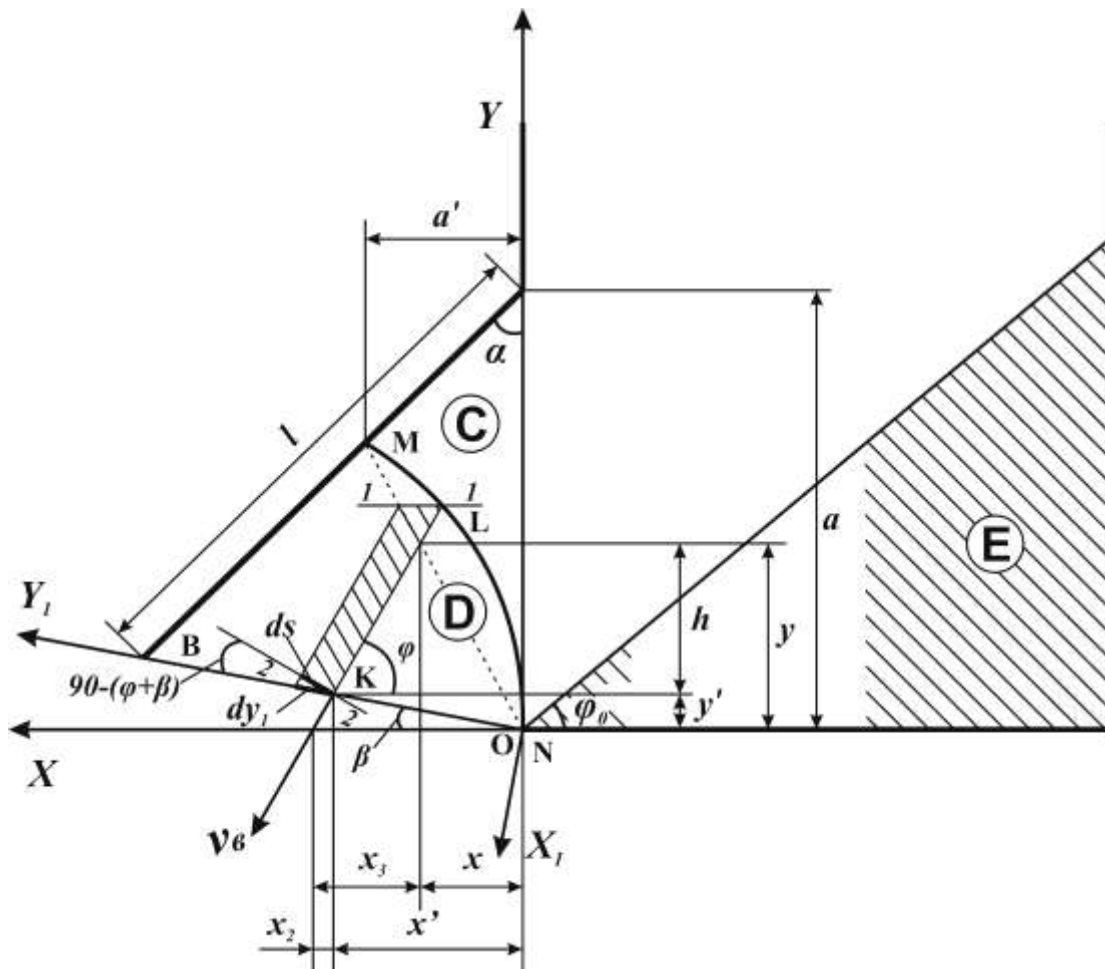


Рис. 2 – Расчетная схема определения расхода сыпучего груза через щелевое отверстие с регулируемой заслонкой, расположенное в боковой стенке бункера.

Подставим (8) в (7), получим

$$Q = b \int v_6 \sin(\varphi + \beta) dy_1. \quad (9)$$

Координату y_1 определим по формуле

$$y_1 = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}, \quad (10)$$

где (x', y') – координата точки K_1 в системе координат OXY .

Из рисунка 2 имеем

$$x' = x + x_3 - x_2. \quad (11)$$

При этом выполняются равенства

$$x_2 = \frac{y'}{\operatorname{tg}\varphi}; \quad x_3 = \frac{y}{\operatorname{tg}\varphi}. \quad (12)$$

Подставляя последние равенства в (11), получим

$$x' = x + \frac{y}{\operatorname{tg}\varphi} - \frac{y'}{\operatorname{tg}\varphi}. \quad (13)$$

Заменяя дугу MN прямой, из рис. 2 имеем

$$y = K_1 x; \quad y' = \frac{x'}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), после преобразования получим

$$x' = \frac{K_1 + \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} x; \quad y' = \frac{(K_1 + \operatorname{tg}\varphi)\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} x. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (10), после преобразования получим

$$y_1 = \frac{(K_1 + \operatorname{tg}\varphi)\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} x. \quad (16)$$

Перепад высоты между сечениями 1-1 и 2-2 элементарной трубки (см. рис. 2) определим по формуле

$$h = y - y'. \quad (17)$$

Подставляя (14) в (17), с учетом (15), после преобразования получим

$$h = \frac{(K_1 - \operatorname{tg}\beta)\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} x. \quad (18)$$

Подставляя в выражение (9) v_e и h из (5) и (18), с учетом (6), после преобразования получим

$$Q = \frac{b\sqrt{2g}}{\sqrt{1+\zeta}} \cdot \int_0^{a'} \sqrt{A'x + \mathfrak{D}x} \cdot B' \sin(\varphi + \beta) dx, \quad (19)$$

где

$$A' = \frac{(K_1 - \operatorname{tg}\beta)\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi}; \quad B' = \frac{(K_1 + \operatorname{tg}\varphi)\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi}.$$

Положим в выражении (19) $\varphi \approx \varphi_c = \operatorname{const}$, после интегрирования с учетом

(3) получим

$$Q = \frac{2}{3} b a^{1,5} \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1+\zeta}} B \sqrt{A+9} \cdot \sin(\varphi_c + \beta) \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{1 + K_1 \operatorname{tg}\alpha} \right)^{3/2}, \quad (20)$$

где

$$A = \frac{(K_1 - \operatorname{tg}\beta) \operatorname{tg}\varphi_c}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_c}; \quad B = \frac{(K_1 + \operatorname{tg}\varphi_c) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_c}.$$

Коэффициент сопротивления ζ , согласно [5], определяется по формуле

$$\zeta = K_1 K_2 \frac{k^2 d^2}{a_1^2}, \quad (21)$$

где K_2 = коэффициент, характеризующий сопротивление, вызванное поворотом потока струи сыпучего груза при выходе из бункера; $a_1 = a \sin \alpha$ – нормальное сечение к выходному потоку сыпучего груза, проведенного через точку N перпендикулярно к заслонке (см. рис. 2).

Подставляя (21) в (20), в результате получим объемный расход Q сыпучего груза из бункера через боковое щелевое отверстие с регулируемой заслонкой, равный [1, 2]

$$Q = \eta b a^{1,5} \sqrt{g}, \quad (22)$$

где

$$\eta = \frac{\delta \eta_0 \sin \alpha}{\sqrt{\delta^2 \sin^2 \alpha + k^2 K_1 K_2}}; \quad (23)$$

$$\delta = \frac{a}{d}; \quad \eta_0 = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin(\varphi_c + \beta) B \sqrt{A+9} \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{1 + K_1 \operatorname{tg}\alpha} \right)^{1,5};$$

$$A = \frac{(K_1 - \operatorname{tg}\beta) \operatorname{tg}\varphi_c}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_c}; \quad B = \frac{K_1 + \operatorname{tg}\varphi_c \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}}{\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_c}.$$

Здесь η – безразмерный коэффициент расхода сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием и регулируемой заслонкой; β – угол наклона выходного сечения сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой, т.е. угол наклона отрезка NB к горизонтали (см. рис. 2), град.; φ_c – среднее значение угла наклона вектора скорости выхода частиц груза из бункера к горизонтали, град.

При этом угол β определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{a/l - \cos\alpha}{\sin\alpha}, \quad (0 \leq \alpha \leq 0,5\pi).$$

Среднее значение угла φ_c приблизительно можно определить по формуле

$$\varphi_c \approx \frac{(0,5\pi - \alpha) + \varphi_0}{2}, \quad (0,5\pi - \alpha \leq \varphi_c \leq 0,5\pi).$$

Средняя скорость истечения v_{cp} сыпучего груза из бункера в этом случае, с учетом (22), определяется по формуле

$$v_{cp} = \frac{Q}{ba} = \eta\sqrt{ga}, \quad (24)$$

Из формулы (23) следует, что при $\delta \rightarrow \infty$ $\eta \rightarrow \eta_0$, т.е. при больших δ (мелких сыпучих грузах) коэффициент расхода η для заданного угла наклона заслонки α принимает постоянное значение η_0 , не зависящее от δ , т.е. ширины отверстия a и среднего размера частицы d сыпучего груза.

На рис. 3 представлены графики зависимости коэффициента расхода η сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием от δ при различных углах наклона заслонки α , рассчитанные по формуле (23).

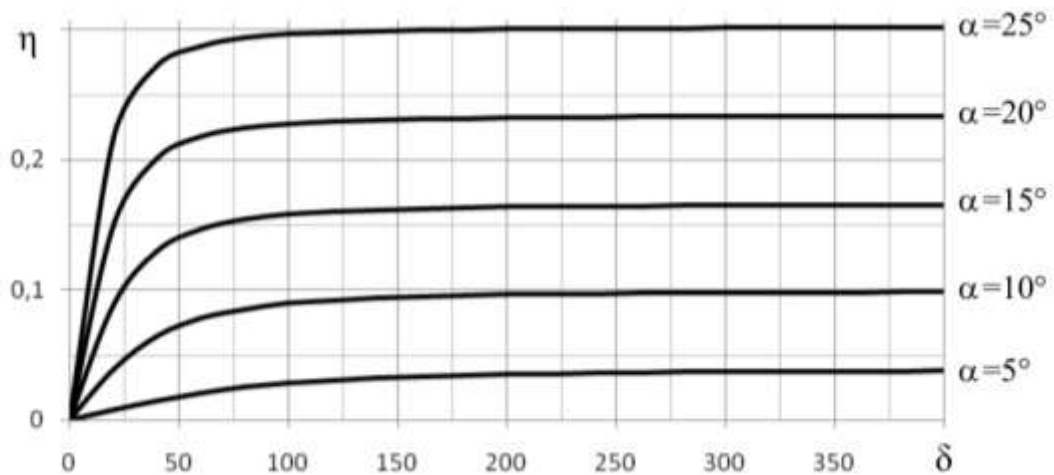


Рис. 3 – График зависимости коэффициента η от параметра δ для бункера с боковым щелевым отверстием при различных углах наклона заслонки α .

При этом параметры бункера и сыпучего груза принимали значения: $b = 0,09$ м; $l = a$; $f = 0,64$; $K_2 = 0,5$, $\alpha = 5^\circ$; 10° ; 15° ; 20° ; 25° .

Из рис. 3 видно, что с увеличением δ , т.е. уменьшением диаметра частиц сыпучего груза d , при любом угле наклона заслонки α коэффициент расхода η сыпучего груза увеличивается и при значениях $\delta > 150$ принимает постоянное значение, зависящее от угла α , т.е. при $\alpha = 5^\circ$; 10° ; 15° ; 20° ; 25° ; $\eta = 0,038$; $0,1$; $0,17$; $0,24$; $0,3$.

На рис. 4 представлен график зависимости коэффициента расхода η сыпучего груза из бункера с боковым выпускным отверстием от угла наклона заслонки α ($\delta = 50$), построенный согласно формуле (23). При этом параметры бункера и груза принимали значения: $b = 0,09$ м; $l = a$; $f = 0,64$; $K_2 = 1$.

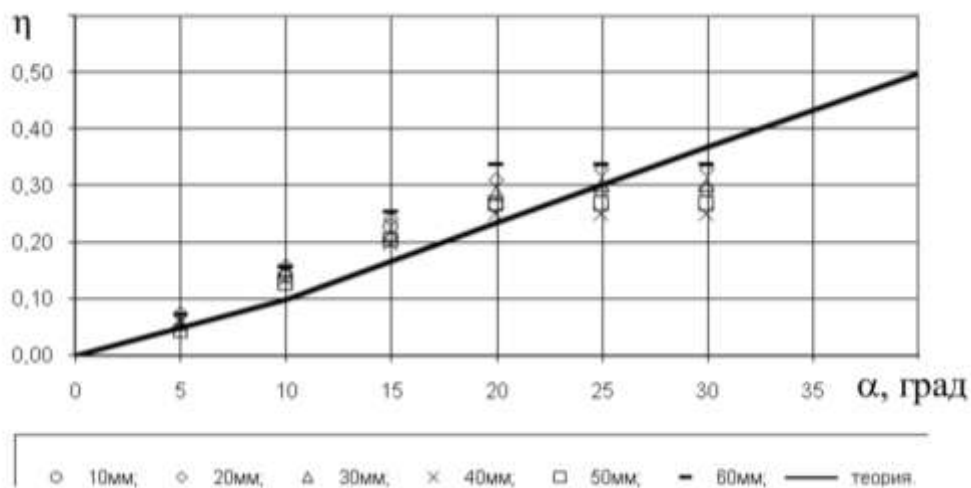


Рис. 4 – График зависимости коэффициента расхода η от угла наклона заслонки α для бункера с боковым выпускным отверстием.

Из графика видно, что с увеличением угла наклона заслонки коэффициент расхода сыпучего груза из бункера с выпускным отверстием, расположенным на боковой стенке бункера, увеличивается приблизительно по линейному закону.

Там же (см. рис. 4) точками показаны экспериментальные значения коэффициента расхода η для углов наклона заслонки $\alpha = 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$ при различных значениях ширины отверстия $a = 10; 20; 30; 40; 50; 60$ мм.

При этом средний диаметр частиц сыпучего груза $d = 0,4\text{--}1$ мм.

Из рис. 4 видно, что при углах наклона заслонки к стенке бункера α , изменяющихся в интервале $5^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$, теоретическая кривая с точностью 10–15 % совпадает с результатами эксперимента.

При значениях $\alpha \geq 25^\circ$ экспериментальные значения практически не изменяются и существенно отличаются от теории. Это связано с тем, что при углах поворота заслонки $\alpha \geq 25^\circ$ струя сыпучего груза при истечении из бункера не касается заслонки.

Выводы. В результате решения поставленных задач можно сделать следующие выводы:

- разработана математическая модель истечения сыпучего груза из бункера с регулируемой боковой заслонкой;
- получена линейная зависимость коэффициента расхода сыпучего груза из бункера от угла наклона заслонки α .

Сравнение теоретических расчетов с результатами экспериментов показало, что расхождение теории с экспериментом не превышает 15 %.

Кроме того, из теоретических и экспериментальных исследований следует, что угол наклона заслонки α , при котором заслонка оказывает влияние на расход груза при его истечении из бункера, находится в пределах $5^\circ < \alpha < 25^\circ$, а при значениях $\alpha \geq 25^\circ$ коэффициент расхода не изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу об истечении сыпучего груза из бункера со щелевым отверстием / Р.В. Кирия, В.Ю. Максютенко, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 80. – С. 351–362.

2. Кирия Р.В. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием / Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Сборник научных трудов / НГУ. – Днепропетровск. – 2009. – № 32. – С. 114–122.
3. Штернлихт Д.В. Гидравлика / Д.В. Штернлихт. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 639 с.
4. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
5. Кирия Р.В. О коэффициенте внутренних потерь при движении сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточных конвейеров / Р.В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2003. – Вып. 41. – С. 159–167.

УДК 622.26:622.235.001.57

Канд. техн. наук В.В. Круковская
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ СВЯЗАННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА, ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ВЗРЫВА ШПУРОВЫХ ЗАРЯДОВ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА

Виконано чисельне моделювання зв'язаних процесів підривання шпурових зарядів, зміни напружено-деформованого стану гірських порід та фільтрації газу у порушеному породному масиві у вибої гірничої виробки. Результати розрахунку порівняно з результатами розв'язання окремих складових задач вибухової дії, зміни у часі геомеханічних і фільтраційних параметрів. Проаналізовано вплив кожного з процесів на загальний результат та визначено ступінь зв'язку розглянутих процесів.

DEGREE OF RELATIONSHIP OF PROCESSES CHANGES THE ROCK MASS STRESS STATE, IMPACT OF BLAST-HOLE CHARGE BLASTING AND METHANE FILTRATION INVESTIGATION

Numerical modeling of coupled processes blast-hole charge blasting, of rock stress-strain state change and methane filtration in disrupted rock massif in the mine face working is completed. The calculation results are compared with the results of solving separate problems of blasting impact, changes of geomechanical and filtration characteristic in time. The influence of each of this processes on the general result is analyzed and the degree of relationship above processes is defined.

Зачастую процессы, происходящие в массиве горных пород при подземной добыче угля (изменение НДС твердого тела, диффузия и фильтрация жидкости и газа, десорбция газа, теплофизические и химические процессы) связаны между собой и оказывают влияние один на другой. Степень этого влияния может быть различной. Например, при расчете параметров напряженного состояния можно пренебречь изменением температуры пород на различной глубине, так как в данном случае процесс теплового расширения очень незначительно влияет на распределение значений геомеханических параметров. А при моделировании процесса выброса угля и метана нельзя исключать из системы ни один из связанных процессов изменения НДС, фильтрации и десорбции метана – математическая модель потеряет свою результативность.

В каких же случаях при математическом моделировании нужно учитывать все происходящие процессы? Какими из них и когда можно пренебречь для упрощения задачи? Каков критерий оценки степени влияния каждого их происходящих в исследуемой области процессов на общий результат? Для решения этих задач было проведено исследование степени связанности различных про-