

Аверкова О.А., канд. техн. наук, доц.,
Плотников К.В., аспирант,
Толмачева Е.И., аспирант,
Емельянов Д.А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Логачев А.К., студент
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ПРИ РАЗГРУЗКЕ ВАГОНОВ В ПРИЕМНУЮ ВОРОНКУ КОРПУСА КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ*

pkv0491@yandex.ru

По разработанной имитационной модели исследуется динамика воздушных потоков при разгрузке руды в приемные воронки корпусов крупного дробления. На основе проведенных вычислительных и натурных экспериментов производится выбор расположения местного вентиляционного отсоса и механических экранов, способствующих повышению эффективности местной вытяжной вентиляции и снижению энергоемкости системы аспирации.

Ключевые слова: аспирация, перегрузка сыпучих материалов, эжекция воздуха, разгрузка вагонов, корпус крупного дробления, метод граничных интегральных уравнений.

Введение. При разгрузке сыпучих материалов вагонами в приемные воронки корпусов крупного дробления происходят интенсивные пылевыведения (рис. 1). Водное орошение форсунками для снижения выбросов пыли не дает значительных результатов. Наиболее надежным, но энергоемким способом локализации пылевыведений является применение систем местной вытяжной вентиляции [1, 2]. Для снижения энергозатрат на эксплуатацию закрытых местных вентиляционных отсосов [3...6] используют свойства рециркуляционных и закрученных воздушных потоков [6, 7]. Свойства отрывных течений и механическое экранирование используют для снижения объема воздуха, поступающего через неплотности [6, 8, 9] либо, напротив, для уменьшения аэродинамического сопротивления местных вентиляционных отсосов открытого типа [10...14].

Целью данной работы является моделирование воздушных потоков при разгрузке сыпучих материалов в приемные воронки, для выбора наиболее рациональной схемы расположения местного вентиляционного отсоса и экранов, способствующих снижению объемов аспирации.

Постановка задачи и основные расчетные соотношения

Геометрические размеры модели приемной воронки изображены на рис. 2. Они соответствуют размерам разработанной экспериментальной установки. Куски руды при падении увлекают за собой воздух, и образуется поток запыленного эжектируемого воздуха. Этот поток будем моделировать цилиндрами, из которых истекает воздух со скоростью равной скорости падения куски железной руды. Будем считать, что куски руды двигаются равноускоренно

и поэтому скорости с которой они толкают воздух, увеличиваются по мере приближения ко дну и составляют 2,2 м/с.



Рис. 1. Разгрузка вагонов с железной рудой на Стойленском ГОКе

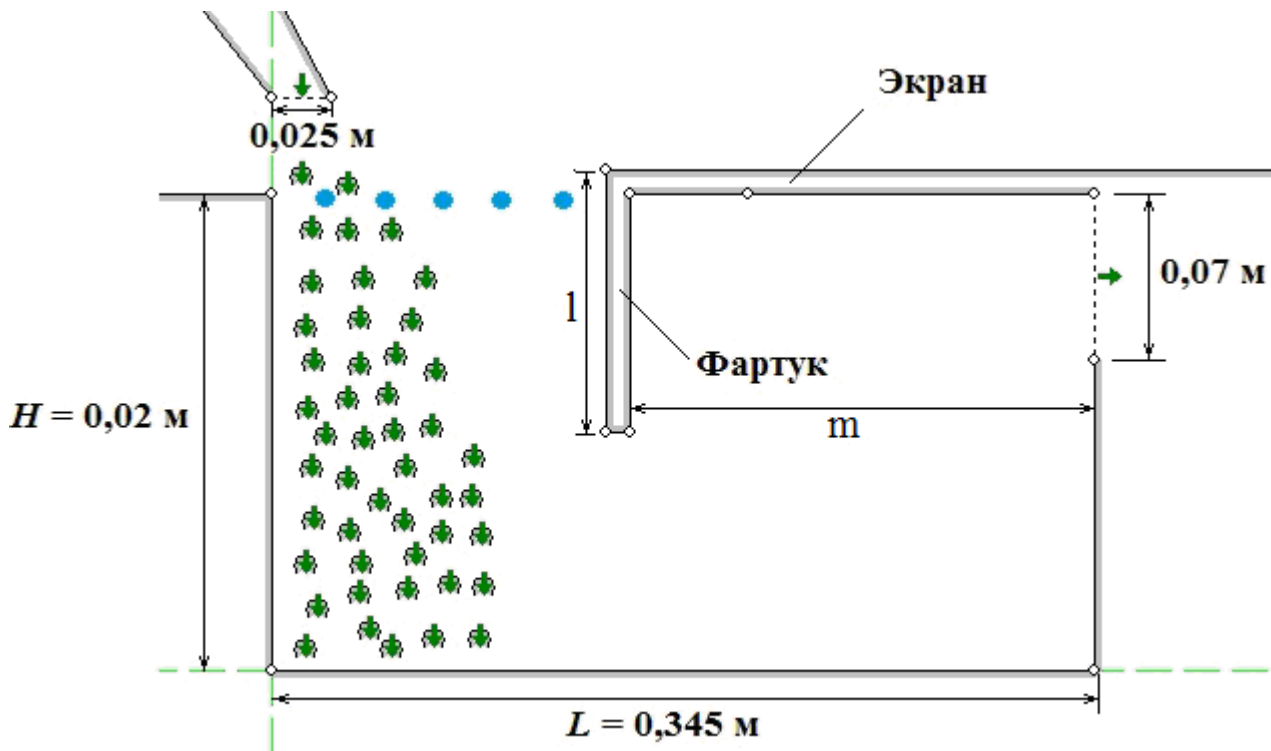


Рис. 2. Геометрия расчетной области:

● – точки замера вертикальной составляющей скорости, ● – цилиндры, из которых истекает воздух

Для моделирования будем использовать эффективный бессеточный метод граничных интегральных уравнений [11, 15, 16].

На границе S области течения непрерывно размещались фиктивные источники (стоки) неизвестной заранее интенсивности $q(\xi)$. Их величины должны быть таковы, чтобы их суммарное воздействие на точки границы индуцировало в них заданные значения нормальной составляющей скорости, то есть выполнялись граничные условия.

Значение скорости в произвольной точке x области вдоль единичного вектора \vec{n} определится из следующей формулы:

$$v_n(x) = \int_S F_2(x, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (1)$$

где $S(\xi)$ обозначает, что ξ является переменной интегрирования; функция

$$F_2(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}$$

выражает собой влияние на точку $x(x_1, x_2)$ единичного источника, расположенного в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$ вдоль единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$.

Формула (1) являлась бы решением задачи, если бы интенсивности $q(\xi)$ были бы известны. Для их определения устремим внутреннюю точку x к граничной точке x_0 вдоль направления

внешней нормали. Получим следующее выражение:

$$v_n(x_0) = \int_S^* F_2(x_0, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (2)$$

где интеграл имеет особенность, что обозначено *. Действительно $\lim_{x_0 \rightarrow \xi} F_2(x_0, \xi) = \infty$. Такое интегральное уравнение называется сингулярным.

Однако интеграл в выражении (2) является сходящимся. Если окружить точку ξ полуокружностью бесконечно малого радиуса и вычислить интеграл по ней, то он будет равен $-\frac{1}{2}q(x_0)$.

Таким образом, получим:

$$v_n(x_0) = -\frac{1}{2}q(x_0) + \int_S F_2(x_0, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (3)$$

где интеграл уже не содержит точку $x_0 = \xi$.

Граничное интегральное уравнение (3) является интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода. Аналитически оно не решается для областей с произвольными границами, поэтому применяется следующий численный метод его решения. Граница области течения разбивается на прямолинейные отрезки (граничные элементы). Вдоль каждого из отрезков интенсивность источников (стоков) не изменяется. Тогда, записав уравнение (3) для середин x_0^p каждого p -го из N полученных отрезков, получим систему N

линейных алгебраических уравнений с N неиз-

вестными $q(\xi^1), q(\xi^2), \dots, q(\xi^N)$:

$$-\frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq p}}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x_0^p, \xi^k) dS(\xi^k) = v_n(x_0^p), \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

ξ^k – произвольная точка k -го отрезка, ΔS^k – k -ый отрезок.

Решив эту систему уравнений и определив неизвестные интенсивности источников (стоков) можно определить искомую скорость во внутренней точке вдоль заданного направления по формуле:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k) dS(\xi^k). \quad (5)$$

На основе приведенных основных расчетных соотношений была разработана компьютерная программа, с помощью которой были выполнены ряд вычислительных экспериментов.

Результаты вычислительных экспериментов и их обсуждение

В ходе вычислительных экспериментов определялось влияние размеров экрана и фартука на вертикальную составляющую скорости в открытом проеме (устье) приемной воронки. Для улавливания пыли это скорость должна быть направлена вниз, т.е. иметь отрицательную величину в выбранной системе координат. Скорость в отсосе должна обеспечивать полное улавливание струи эжектируемого воздуха. В случае, если отсос не будет обеспечивать требуемую скорость воздушный поток распространяется в окружающее пространство, что способствует выбиванию пыли из приемной воронки (рис. 3).

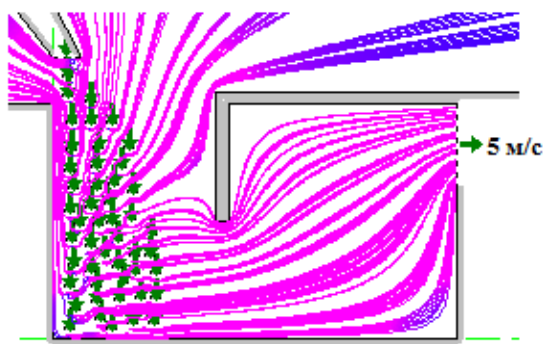


Рис. 3. Случай неполного улавливания струи эжектируемого воздуха

Ширина всасывающего отверстия во всех вычислительных экспериментах фиксирована и равна 0,07 м. Вертикальная составляющая скорости вычислялась в пяти точках, равноудаленных на расстояния 0,02 м друг от друга и от левого края открытой части устья.

При удалении всасывающего отверстия, расположенного на экране, от места выгрузки

вагонов скорость в устье воронки корпуса крупного дробления (ККД) увеличивается, а значит, эффективность местного отсоса возрастает (рис. 4, а...в, табл. 1).

При расположении местного отсоса в верхней части боковой стенки приемной воронки ККД, противоположной от места разгрузки, скорость еще выше, чем при расположении местного отсоса на экране (рис. 4, г, табл. 1).

Однако при снижении отсоса скорость в устье ККД резко падает, а значит, снижается эффективность местного отсоса (рис. 4, д, табл. 1).

При уменьшении длины экрана (рис. 4, е...ж, табл. 1), открытая часть устья воронки ККД расширяется, и как следствие, падает скорость, что способствует выносу пыли из приемной воронки. Таким образом, чем больше длина экрана, тем эффективнее работает местный отсос, но в силу технологических причин, его длина не может превосходить половины ширины воронки.

Увеличивая скорость в отсосе до 12 м/с, добиваемся полного улавливания струи эжектируемого воздуха (рис. 4, з-к, табл. 1).

Заметим, что величины вертикальной составляющей скорости в устье приемной воронки ККД при горизонтальном и вертикальном размещении всасывающего канала местного вентиляционного отсоса достаточно близки между собой (рис. 4, к, рис. 4, л, табл. 1).

При уменьшении длины фартука величина вертикальной составляющей скорости заметно падает (рис. 4, м, табл. 1). А при отсутствии фартука скорость воздуха, при данной скорости в отсосе, будет способствовать выбиванию пыли из приемной воронки ККД (рис. 4, н, табл. 1).

При увеличении длины фартука до 3/4 высоты вертикальная составляющая скорости воздуха возрастает относительно случая 1/2 высоты не во всех точках устья приемной воронки (рис. 4, о, рис. 4, л, табл. 1). Вблизи фартука она убывает.

При дальнейшем увеличении фартука скорость падает (рис. 4, п, табл. 1). Поэтому длина фартука, равная половине высоты приемной воронки, достаточна для эффективной локализации пылевых выбросов.

В случае конструктивного оформления всасывающего отверстия в виде угла (часть расположена на экране, часть на боковой стенке), величины вертикальной составляющей скорости

находятся в диапазоне величин, найденных для отсоса, расположенного только на экране, и от-

соса, расположенного только на боковой стенке (рис. 4, *р*, табл. 1).

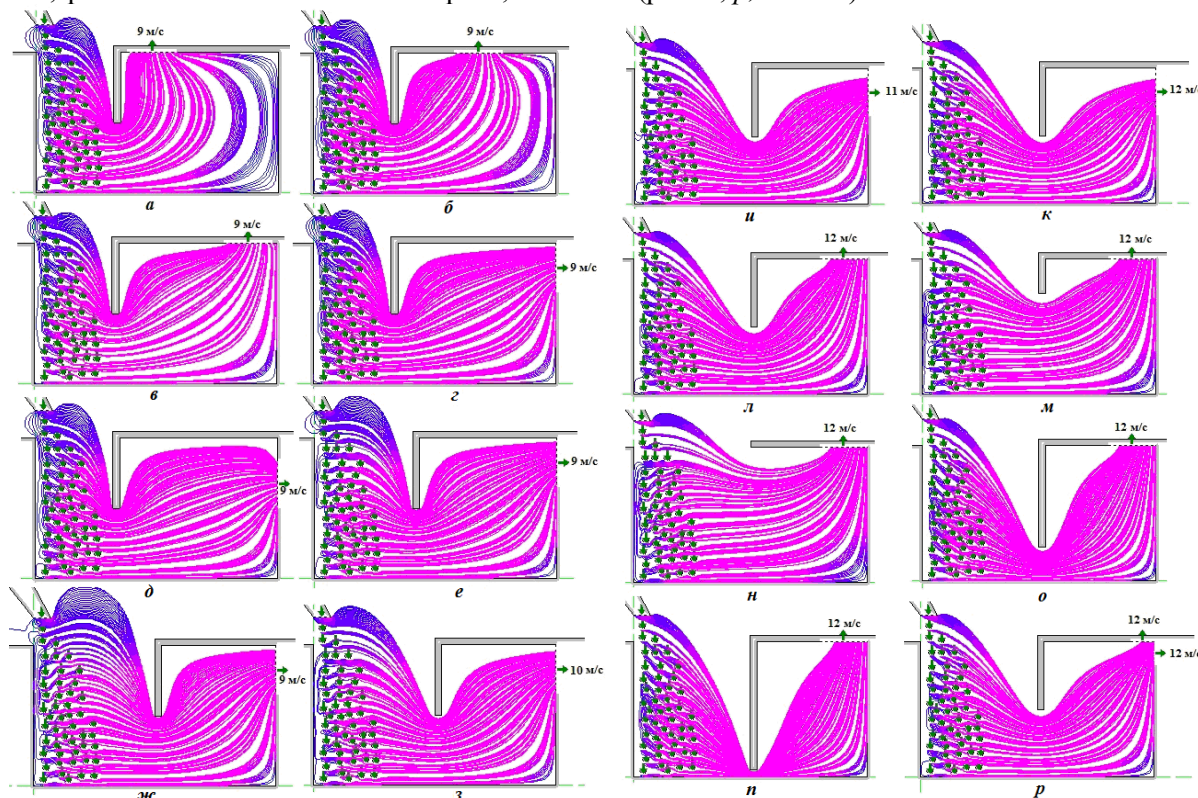


Рис. 4. Линии тока: *а* – $m = 0,235$ м; $l = 0,1$ м; *б* – $m = 0,235$ м; $l = 0,1$ м; *в* – $m = 0,235$ м; $l = 0,1$ м; *г* – $m = 0,235$ м; $l = 0,1$ м; *д* – $m = 0,235$ м; $l = 0,1$ м; *е* – $m = 0,205$ м; $l = 0,1$ м; *жс* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,1$ м; *з* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,1$ м; *и* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,1$ м; *к* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,1$ м; *л* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,1$ м; *м* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,05$ м; *н* – $m = 0,1725$ м; $l = 0$ м; *о* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,15$ м; *п* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,15$ м; *р* – $m = 0,1725$ м; $l = 0,15$ м

Таблица 1

Величины вертикальной составляющей скорости в устье приемной воронки

<i>Х</i>		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Рис. 4 <i>а</i>	v_y , м/с	-0,088	0,014	-0,428	-0,664	-0,868
Рис. 4 <i>б</i>	v_y , м/с	-0,113	-0,014	-0,45	-0,687	-0,894
Рис. 4 <i>в</i>	v_y , м/с	-0,117	-0,02	-0,453	-0,691	-0,899
Рис. 4 <i>г</i>	v_y , м/с	-0,127	-0,03	-0,463	-0,701	-0,910
Рис. 4 <i>д</i>	v_y , м/с	-0,095	0,008	-0,428	-0,661	-0,861
Рис. 4 <i>е</i>	v_y , м/с	0,179	0,339	-0,220	-0,478	-0,718
Рис. 4 <i>жс</i>	v_y , м/с	0,655	0,804	0,917	-0,197	-0,459
Рис. 4 <i>з</i>	v_y , м/с	0,168	0,364	-0,248	-0,518	-0,804
Рис. 4 <i>и</i>	v_y , м/с	-0,147	0,07	-0,575	-0,871	-1,182
Рис. 4 <i>к</i>	v_y , м/с	-0,488	-0,375	-0,921	-1,243	-1,579
Рис. 4 <i>л</i>	v_y , м/с	-0,481	-0,368	-0,915	-1,237	-1,573
Рис. 4 <i>м</i>	v_y , м/с	-0,221	-0,054	-0,711	-1,064	-1,495
Рис. 4 <i>н</i>	v_y , м/с	0,170	0,444	-0,283	-0,571	-0,967
Рис. 4 <i>о</i>	v_y , м/с	-0,618	-0,525	-0,995	-1,287	-1,569
Рис. 4 <i>п</i>	v_y , м/с	-0,598	-0,499	-0,955	-1,234	-1,56
Рис. 4 <i>р</i>	v_y , м/с	-0,485	-0,372	-0,918	-1,241	-1,576

Заметим, что возникающая при разгрузке вагона струя запыленного воздуха настигается по дну приемной воронки, а затем по боковой стенке, что подтверждается экспериментальными наблюдениями (рис. 5). Поэтому оборудова-

ние отсоса в виде уголка имеет смысл. Часть струи будет улавливаться отсосом на боковой стенке, а часть струи, распространяющейся по инерции вверх, будет улавливаться отсосом на экране.

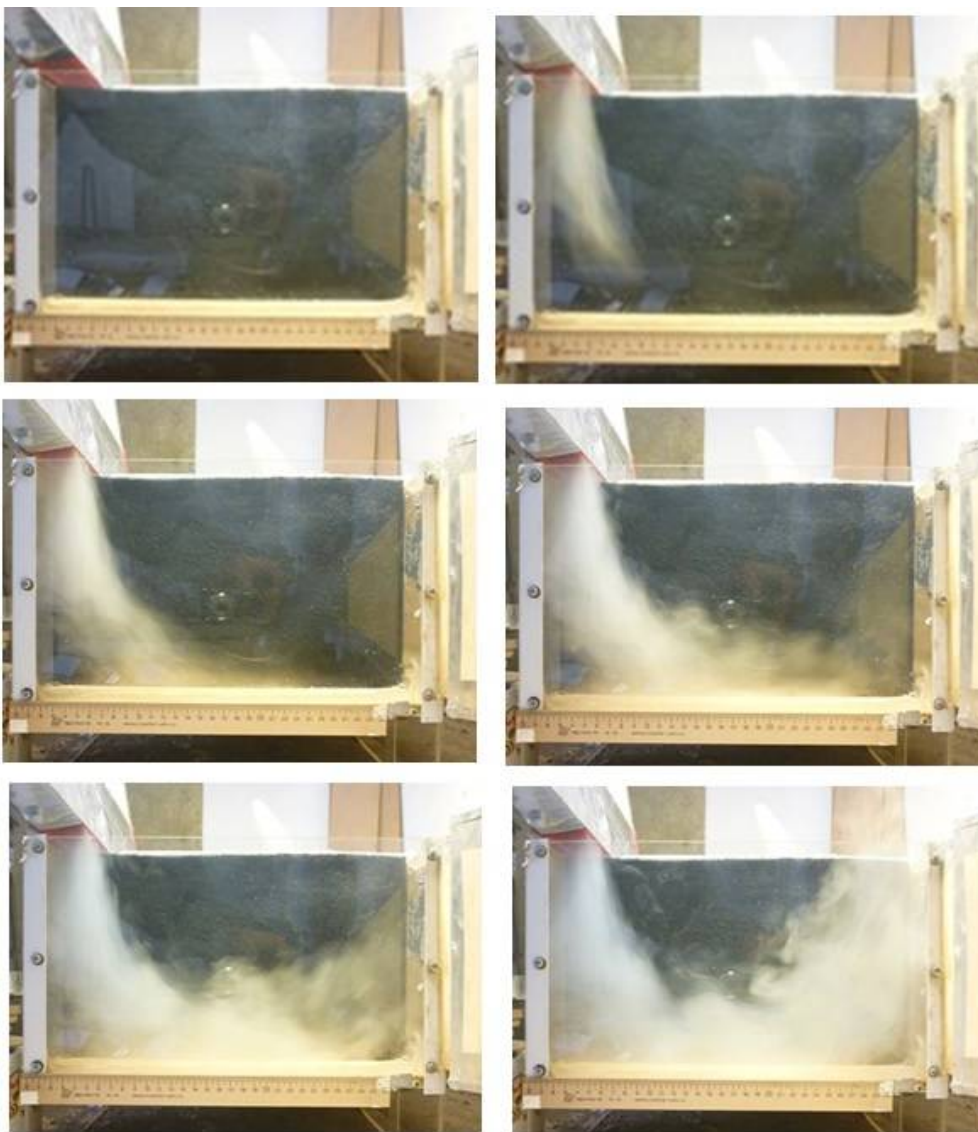


Рис. 5. Экспериментальная картина распространения потока эжектируемого воздуха без вентиляционного отсоса воздуха

Эксперименты, проведенные на разработанном стенде, подтверждают результаты вычислительных экспериментов.

Заключение

На основе метода граничных интегральных уравнений разработана имитационная модель разгрузки сыпучего материала в приемные воронки корпусов крупного дробления. Проведена серия вычислительных экспериментов по разработанной компьютерной программе. Определены размеры механических экранов и фартука, способствующих эффективному улавливанию запыленного воздуха. Длина механического

экрана должна составлять не менее половины ширины устья приемной воронки, а фартук до половины ее высоты. Всасывающее отверстие местного вентиляционного отсоса необходимо располагать в верхнем углу приемной воронки, противоположном месту разгрузки вагонов. Полученные выводы, полученные с помощью вычислительных экспериментов, согласуются с экспериментальными наблюдениями.

**Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ (проект №14-08-31069-мол_а).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Изд. Химиздат, 2005. 659 с.
2. Логачев К.И. Аэродинамика всасывающих факелов. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. 175 с.
3. Логачев И.Н., Логачев К.И., Нейков О.Д. Локализация пылевых выделений при прессовании порошков // Порошковая металлургия. 1995. № 3. С. 100-103.
4. Логачев И.Н., Логачев К.И. О прогнозировании дисперсного состава и концентрации грубодисперсных аэрозолей в местных отсосах систем аспирации // Известия вузов. Строительство. 2002. №9. С.85-90.
5. Логачев И.Н., Логачев К.И. Характеристика пылевых выбросов при перегрузках сыпучих материалов и борьба с ними // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 163-167.
6. Логачёв И. Н., Логачёв К. И., Аверкова О. А. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации // Москва-Ижевск: РХД, 2013. 504 с.
7. Логачев К.И., Пузанок А.И. Численное моделирование пылевоздушных течений вблизи вращающегося цилиндра-отсоса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 2. С. 63-70.
8. Логачёв И. Н., Логачёв К. И., Зоря В.Ю. Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т.11. № 1. С. 43-52.
9. Аверкова О. А., Логачёв И. Н., Логачёв К. И., Логачев А.К. Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 2. С. 33-49.
10. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 1 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №8. С. 70-76.
11. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 2 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №9. С. 80-85.
12. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 3 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №10. С.81-85.
13. Логачев К.И., Посохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2004. №1. С. 29-32.
14. Логачев К.И., Пузанок А.И., Посохин В.Н. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. №7-8. С. 61-69.
15. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Изд. Мир, 1987. 525 с.
16. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов к технике. М.: Изд. Мир, 1982. 248 с.

Averkova O.A., Plotnikov K.V., Tolmacheva E.I., Emelyanov D.A., Logatchev A.K.

SIMULATION OF AIR FLOW WHEN UNLOADING WAGONS IN THE RECEIVING HOPPER OF PAVILION COARSE CRUSHING

On the developed simulation model examines the dynamics of airflow during unloading ore in the receiving hoppers of pavilions coarse crushing. On the basis of computing and natural experiments selects the location of local suction and mechanical ventilation screens that enhance the effectiveness of local exhaust ventilation and reduce energy intensity of aspiration.

Key words: aspiration, overload of bulk materials, air ejection, unloading wagons, pavilions coarse crushing, the method of boundary integral equations.