

8. Эффективный способ адаптации математической модели при моделировании процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Буткарев А.П., Сквирский Е.С., Некрасова Е.В., Козырев П.И. // Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов черной металлургии. М.: Металлургия, 1988. - С. 3-12.

9. Братчиков С. Г. Теплотехника окисковывания железорудного сырья / С. Г. Братчиков, Ю. А. Берман, Я. Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 344 с.

10. Мищенко И.М., Хлапонин Н.С. Развитие агломерации – основное направление энергосбережения и повышения эффективности в доменном производстве. – Металл и литье Украины, 2006. – № 3–4.

11. Калиткин Н.Н. Численные методы // под ред. А.А. Самарского / М.: Наука, 1978. – 512 с.

12. Белоцерковский Я.Л., Клейн В.И., Леонтьев Л.И. и др. Энергопотребление при агломерации. – Екатеринбург: УРО РАН, 1998. – 57 с.

13. Копоть Н. Н. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин//Н.Н.Копоть, А.Б. Воробьев, С.С. Гончаров, А.А. Буткарев, А.П. Буткарев // Сталь, 2010. - № 3. - С. 8-13. Рукопись подано до редакції 17.03.16

УДК 622.807.622.684

О.В. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук, доц., Н.Ю. ШВАГЕР, д-р техн. наук, проф.,
Т.А. КОМИССАРЕНКО, канд. техн. наук, доц., М.В. ДОМНИЧЕВ, канд. техн. наук,
И.А. НЕСТЕРЕНКО, студент, Криворожский национальный университет

СВЯЗЫВАНИЕ ЧАСТИЦ ПЫЛИ МОСТИКАМИ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЕ ЗАГУЩЕНИИ

В связи со значительными темпами снижения глубины железорудных карьеров возрастает роль автомобильного транспорта, при перемещении горной массы. Одновременно с этим также возрастает грузоподъемность автосамосвалов. Это в свою очередь приводит к увеличению давления на полотно временных щебеночных карьерных и прикарьерных технологических автодорог. Следствием этого является переизмельчение щебня, что приводит к неорганизованному выбросу пыли в атмосферу.

Для борьбы с таким негативным явлением чаще всего используют воду или водные растворы солей.

Взаимодействие частиц пыли, находящихся в перманентно изменяющейся жидкой среде, для простоты можем представить в виде двух частиц в первоначально переувлажненной среде.

Для борьбы с этим негативным явлением чаще всего используют воду или водные растворы солей магния или кальция, которые образуют вокруг пылинок в щебенной смеси полотна дороги жидкие манжеты (мостики). Прочность манжет при связывании каменного материала определяется комплексным взаимодействием физико-химических свойств жидкости и связуемой пыли.

Связи между частицами пыли в этот период обеспечиваются за счет прочности жидких манжет. Однако эти связи непрочны. При механическом внешнем воздействии на пылинки расстояние между ними значительно сокращается в вследствие чего происходит уплотнение щебня. Это приводит к существенному удалению жидкости из щебня, переупаковки частиц пыли при одновременном и интенсивном испарении влаги.

Ключевые слова. аутогезия, адгезия щебеночные автодороги, водные растворы солей.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Выброс пыли из щебеночных автодорог происходит из конструктивного слоя износа упрочняющего полотна, призванного омоноличивать щебень или гравий. Толщина этого слоя составляет несколько сантиметров и зависит от типа автомобилей эксплуатирующих дорогу.

Все основные процессы образования пыли при переизмельчении щебня и ее связывание происходят, в основном, в этом слое при взаимодействии жидкости с минеральными частицами. Поэтому для предотвращения выбросов пыли с дорожного полотна производится профилактическое его смачивание водой или раствором соли. На первом этапе этого процесса наблюдается переизбыток влаги в сыпучей среде. Происходит это по двум причинам : 1) необходимость увлажнения всей толщи дороги диктует потребность в одновременно большом количестве воды; 2) проникновение ее в толщу дороги происходит в течении длительного времени (нескольких десятков минут). А поэтому на полотне дороги удерживается определенный запас влаги.

Для простоты представим две частицы минеральной пыли связанных жидким мостиком (манжетой) в разных стадиях смачивания.

На начальной стадии смачивания, при переизбытке жидкости, мениск манжеты будет выпуклым (рис. 1а).

Пытаясь принять естественное равновесное положение мениска (горизонтальное), капли будут раздвигать частицы, что препятствует на этом этапе их аутогезии.

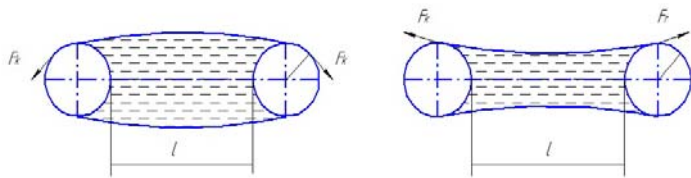


Рис. 1. Взаимодействие жидкости с частицами пыли

Одновременно между частицами пыли и жидкостью происходит взаимодействие, в результате чего осуществляется коагуляция примесей, находящихся в растворенном состоянии и образовании значительного количества ионов солей, которые присутствуют в растворе. Связь между частицами пыли в этот период обеспечиваются за счет прочности жидких манжет. Однако эта связь непрочна. В дальнейшем, при внешнем механическом воздействии на щебень, происходит значительное его уплотнение ее, как результат - сокращается расстояние между частицами пыли. Это приводит к существенному удалению жидкости из щебня, переупаковки частиц пыли при одновременном интенсивном испарении влаги.

По мере испарения жидкости под действием температуры и низкой влажности воздуха мениск опускается и занимает вогнутое положение (рис. 1б), что, в свою очередь, ведет к образованию канатного состояния [1]. В этот период под действием сил поверхностного натяжения F_k частицы сближаются. Этому также способствует снижение давления в жидкости между частицами за счет лапласовых сил.

Одновременно между частицами пыли и жидкостью происходит взаимодействие, в результате чего осуществляется коагуляция примесей, находящихся в растворенном состоянии.

Анализ исследований и публикаций. Предельное состояние оставшейся после испарения влаги в массиве упрочняющего слоя щебеночной или гравийной автодороги характеризуется тем, что в зоне контакта частиц пыли образуются кольца - мостики. К этому периоду под действием сил поверхностного натяжения смачивающей жидкости частицы сближаются. Этому также способствует снижение давления в жидкости между частицами за счет лапласовых сил

Таким образом, чтобы обеспечить аутогезию влажной пыли необходимо не только максимально сократить зазор между частицами пыли, но ввести и максимальное количество ионов соли в смачивающую жидкость, т.е. ее загустить.

В этом случае прочность на разрыв сыпучего материала осуществляется за счет капиллярного давления и разрыва жидкостных мостиков, соединяющих частицы пыли [1]

$$T = F_k / S + P_k, \quad (1)$$

где F_k - сила, представляющая поверхностное натяжение жидкости в манжете (мостике) определяется из выражения, Н

$$F_k = 2 \pi r \sigma_n, \quad (2)$$

где r - радиус капилляра, м. Вследствие малости этой величины можно считать, что площадь сечения капилляра связана с его радиусом зависимостью $S = 6/r$; σ_n - коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Па.

Капиллярное давление в жидкости мостика

$$P_k = (\sigma_n \cos \theta) / R_2. \quad (3)$$

где θ - краевой угол смачивания жидкости, определяемой экспериментально, град; R_2 - гидравлический радиус, определяемый из отношения площади сечения к периметру частицы, смоченной водой, м.

Постановка задачи. В соответствии с требованиями стандартов [2,3], используемый для упрочнения щебеночного (гравийного) покрытия отсева должен иметь кубическую форму зерен. В состав отсева входят фракции различных размеров, в т.ч. и частицы пыли до 50 мкм, представляющие опасность не только для горнорабочих, но и работающих механизмов.

Задача борьбы с выбросами пыли на дорогах предусматривает связывание пыли в агрегаты именно этой дисперсности с тем, чтобы они не могли планировать в воздушной среде.

Поэтому можно полагать, что кубическая форма минерального сырья, особенно в части до 50 мкм, примерно близка к сферической. Кроме этого, вследствие малости частичек пыли можно считать, что их радиус будет близок к радиусу капилляра.

Это допущение позволяет связать гидравлический радиус капилляра и степень заполнения жидкостью первого пространства зависимостью [1]

$$R_2 = W / (1 - W) S, \quad (4)$$

где W - объемное содержание жидкости в сыпучем материале, m^3 .

Неточность в оценке формы частиц А.Д. Зимон рекомендует учесть поправочным коэффициентом $a=6-8$.

Тогда, с учетом $6S=r$, имеем

$$R_c = Wr/6(1-W)a, \quad (5)$$

Подставляя в (1) величины из (3-5), получим выражение для определения прочности пыли, связанной водяными мостиками

$$T = \frac{6\sigma_n a(1-W)(\cos\theta + 1)}{rW}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $\cos\theta=-1$ $T=0$, а при $\cos\theta=1$, прочность манжеты достигает максимума

$$T_{\max} = \frac{40a\sigma_n(1-W)}{rW}. \quad (7)$$

Однако, в (6) и (7) не учитывается влияние расклинивающего давления в капилляре, которое зависит от изменяющейся рН в самой жидкости.

Изложение материала и результаты. В то же время в Кривбассе, например ПАО ИнГОК, существует проблема эффективного использования технической воды при подавлен и пыли на щебеночных технологических дорогах из-за ее щелочности (рис 2)

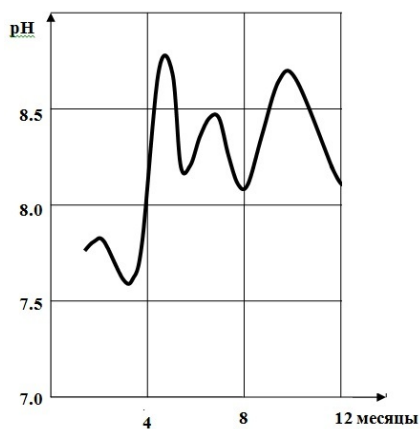


Рис. 2. Годовое изменение щелочности технической воды ПАО «ИнГОК»

А.Д. Зимон [4] показал существенное влияние указанного фактора на число адгезии пыли. Так, им установлено, что при изменении рН жидкости с 7.0 (нейтральной) до 8.0 (щелочная среда) число адгезии снижается на порядок. Однако, при дальнейшем росте рН, число адгезии начинает возрастать.

При определении влияния рН жидкости на аутогезию пыли гранита и железистых кварцитов 0,25 мм нами были использованы вода и стандартные растворы.

Прочность пыли определяли методом разрывных цилиндров [5,6]. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Прочность на разрыв пыли гранитов $d \leq 0,25$ мм смоченной водными растворами

Жидкость	рН	Поверхностное натяжение, Па	Прочность средняя пыли на разрыв, Па	Коэффициент К
Дистиллированная вода	7	0,072	1467	1,0
Вода техническая	7,33	0,075	1209	0,8
Водный раствор натрия тетраборнокислого 0,01 м	9,18	0,069	1092	0,7
Водный раствор гидрата окиси кальция	12,45	0,064	752	0,5

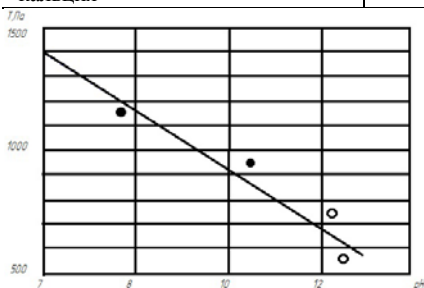


Рис. 3. Зависимость аутогезии пыли гранита от щелочности жидкой рН среды ($d < 0,25$ мм, $t = 20^\circ C$)

Из полученных результатов следует, что аутогезия пыли также снижается с ростом щелочности смачивающей жидкости. Однако, влияние рН среды на аутогезию пыли значительно ниже ее адгезии [4] и может быть учтено коэффициентом K

И тогда формула (6) приобретает вид

$$T = \frac{6Ka\sigma_n(1-W)(\cos\theta + 1)}{rW}, \quad (8)$$

$$K = T_p/T_e, \quad (9)$$

где T_p - прочность на разрыв пыли, смоченной раствором, Па; T_e - прочность на разрыв пыли, смоченной дистиллированной водой, Па.

Таким образом, коэффициент K должен учитывать взаимодействие растворов с минеральной пылью различных горных пород используемых для приготовления щебня. Так для гранитной пыли $K=0,8-0,5$ в зависимости от щелочности раствора.

Из (8) следует, что прочность манжет определяется в основном физико-химическими свойствами жидкости. В частности, когда θ приближается к 90° , процесс смачивания тормозится и прекращается при $\theta=180^\circ$.

Наибольшие выбросы пыли из поверхности щебеночных автодорог происходит в основном во время сухого периода года.

Вследствие интенсивного испарения влаги коэффициент поверхностного натяжения жидкости в этих условиях стремительно приближается к критическому порогу и роль манжет при связывании пылевых частиц исчерпывается.

Так как в изменяющихся погодных условиях процесс связывания пыли должен быть непрерывным, то смачивающий пыль раствор должен обладать еще и способностью к загущению с тем, чтобы при полном испарении влаги из щебеночной смеси продолжалось уже склеивание частиц пыли в агрегаты за счет сорбированных на их поверхности ионов солей растворов.

Известно [7,8], что загущение раствора в значительной степени зависит от валентности ионов и их радиусов - чем выше валентность и меньше радиус, тем больше ионов расположится в манжетах (мостиках) жидкости.

За счет меньшего радиуса ионов во времени увеличивается не только их диффузия в массив щебеночной смеси (табл. 2), но и их сорбция на поверхности частиц пыли (табл. 3) [9].

Из табл. 2,3 следует, что исходя из размеров ионов и их сорбции на поверхности минеральных частиц, из ряда солей первой место среди водных растворов занимает магний.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов диффузии ионов солей растворов, используемых при пылеподавлении

Ион	Радиус иона [8] $1 \cdot 10^{-10}$ м	Коэффициент диффузии ($t=20^\circ\text{C}$)	
		10^{-9} м ² /с	10^{-4} м ² /сутки
Mg^{2+}	0,78	3,14	2,7
Na^+	0,98	2,5	2,2
Ca^{2+}	1,06	2,3	2,0

Таблица 3

Насыщение смачивания ионами магния при $+20^\circ\text{C}$

Проба	Время контакта, мин	$\Pi_{\text{экв}} \times 10^{-5}$ MgCl_2 в растворе	$\Pi_{\text{экв}} \times 10^{-5}$ сорбированного MgCl_2
1	60	4,60	2,25
2	90	4,28	2,57
3	120	3,95	2,90
4	180	3,85	3,00
5	1260	0,55	6,30
6	1440	0,45	6,40

С другой стороны, загущение раствора, связанное с удельной плотностью растворенного в нем вещества, имеет ограничения.

Так при увеличении плотности бишофита более 1220 кг/м^3 , а хлористого магния - 1300 кг/м^3 , смачивающие характеристики раствора ухудшаются (6) в связи с приближением краевого угла смачивания (рис. 4) к критическому порогу.

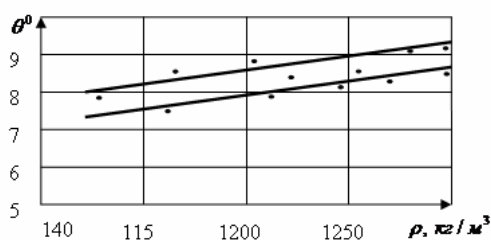


Рис. 4. Зависимость угла смачивания от удельной плотности раствора: 1 - раствор бишофита; 2 - раствор хлористого кальция (CaCl_2)

Так как нерегулируемые выбросы пыли происходят в основном из щебеночной смеси конструктивного слоя износа автодороги [7,8], то глубина пропитки этого слоя смачивающим и загущенным раствором соли имеет первостепенное значение.

Однако при загущении раствора тормозится его проникновение в пылевидные слои щебня (рис. 5 - кривые 2,3,4).

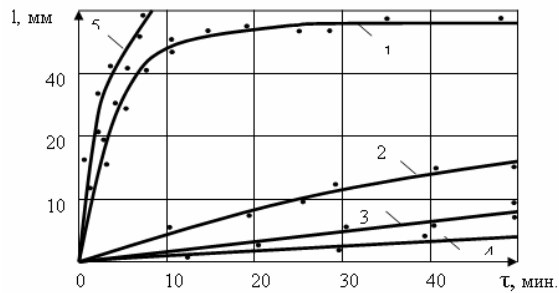


Рис. 5. Проникновение раствора бишофита в пыль фракции 0-0,25 мм, $t=20^{\circ}\text{C}$, $q=1 \text{ л/м}^2$: 1 - вода техническая; 2,3,4 - бишофит $\rho = 1,15$; $\rho = 1,26$; $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$; 5 - пыль, предварительно смоченная водой, а раствор $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$

Выводы и направление дальнейших исследований. Происходит это потому, что смачивание частиц пыли жидкостью и ее проникновение в сыпучую среду определяется взаимодействием жидкости с каменным материалом и зависит от их взаимной химической природы.

Поскольку изменить химический состав твердого тела невозможно, поэтому необходимо воздействовать на смачиватель или поверхность минеральных частиц.

В первом случае вводят в смачиватель поверхностно-активные вещества, а во втором - модифицируют поверхность минеральных частиц путем образования на ней адсорбционного слоя воды [10,11].

Предварительное в минимальных количествах введение воды в упрочняющий слой щебеночной дороги сокращает время пропитки загущенным до максимальной концентрации раствором в 8-10 раз (см. рис. 4).

Таким образом, загущение солевого раствора позволяет не только повысить прочность жидких мостиков (манжет) между минеральными частицами за счет использования в растворах солей с минимальным радиусом ионов (например, Mg^{2+}), но и связывать частицы пыли в агрегаты уже мостиками солей сорбированных на их поверхности при испарении влаги из щебеночной смеси.

Концентрация солей магния или кальция в растворе должна быть такой, чтобы краевой угол смачивания не превышал $80-90^{\circ}$ (для бишофита этот предел составляет $1,25-1,3 \text{ г/см}^3$, а хлористого кальция - соответственно $1,19-1,21 \text{ г/см}^3$); предварительное образование адсорбционного слоя воды на поверхности частиц пыли упрочняющего слоя щебеночной дороги позволяет увеличить скорость его пропитки загущенным раствором соли в 8-10 раз; при возрастании щелочности водного раствора солей в пределах $7 > \text{pH} \leq 12$ аутогезия пыли снижается в 2,0-2,5 раза, но это снижение меньше адгезии.

Список литературы

1. Зимон А.Д., Андрианов Е.М. Аутогезия сыпучих материалов М.: Металлургия, 1973. - 288 с.
2. ДСТУ Б.В.2.7-34-95 Щебень из вмещающих горных пород и отходов сухого магнитного обогащения железистых кварцитов ГОКов и рудников Украины. - Госкомградостроительство Украины. - Киев, 1996. - 12 с.
3. ДБН В.2.3-4-2000 Автомобильные дороги. - К.: Госстрой Украины, 2000. - 114 с.
4. Зимон А.Д. Адгезия мыли и порошков. - М.: Химия, 1976. - 430 с.
5. Коузов А.П., Скрыбина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. - Л.: Химия, 1983. - 183 с.
6. Андрианов Е.И., Зимон А.Д., Янковский С.С. Заводская лаборатория. - М., 1972. - 376 с.
7. Болдырев А.И. Физическая и коллоидная химия. - М.: Высшая школа, 1974. - 504 с.
8. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. - М.: Химия, 1966. - 976 с.
9. Характеристики процессов в технологии противопылевой обработки щебеночной дороги растворами солей / А.Е. Лапшин, О.В. Нестеренко, Л.Д. Ермак, В.Н. Назаренко // Разраб. рудн. месторожд. - Кривой Рог, 2004. - С. 73-75.
10. Сум Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. - М.: Химия, 1976. - 231 с.
11. Таубман А.Е., Никитин С.А. О механизме процесса улавливания частиц пыли водными растворами поверхностно-активных веществ // ДАН СССР. - № 5, 1956.
12. Майорова Л.П., Горбачев В.П. Охрана окружающей среды при проектировании автомобильных дорог Хабаровск, 1993. - 147 с.

Рукопись поступила в редакцию 08.02.16