

1,2,3- кількість екскаваторів у комплексі

Рисунок 6 - Графік залежності середньої продуктивності автосамоскидів від кількості екскаваторів у комплексі при: а) довжині ділянки з обмежувачими умовами 562,5 м б) використанні автосамоскидів меншої ширини

Так при довжині ділянки з однополосним рухом 187,5 м відчутне падіння середньої експлуатаційної продуктивності екскаватора відбувається лише за умови одночасної роботи 3 екскаваторних вибоїв і складає: 90-100 м<sup>3</sup>/зм. При обмежувачих ділянках більшої довжини (375 м, 562,5 м) починає проявлятися значне падіння продуктивності екскаватора і у комплексах з двома вибоями - досягає 50 м<sup>3</sup>/зм та 170 м<sup>3</sup>/зм відповідно. А у випадку одночасної роботи 3 вибоїв падіння середньої продуктивності екскаватора у комплексі складає 7 % і 24% його можливої продуктивності при сприятливих гірничотехнічних умовах (120 м<sup>3</sup>/зм та 600 м<sup>3</sup>/зм відповідно).

Результати свідчать, що кожного разу при існуванні на шляху транспортування ділянок з умовами, обмежувачими рух, необхідно обґрунтувати раціонально допустиму довжину ділянки (як правило, до 150-250 м) та провести техніко-економічне порівняння варіантів з можливістю виключення даного впливу на продуктивність комплексу.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розроблено імітаційну модель, що дозволяє проводити оцінку впливу типу виймально-навантажувального і транспортного обладнання, відстані транспортування гірничої маси та параметрів кар'єрних доріг на роботу екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру. Встановлено, що існує потенціал у досягненні високої продуктивності екскаватора за умови використання автосамоскидів більшої вантажопідйомності, оскільки час основної роботи виймально-навантажувального обладнання зростає при зменшенні сумарної тривалості маневрових операцій транспорту у вибої під час зміни. Наочно показано, що для кожного типу екскаваторно-автомобільного комплексу існують економічно доцільні межі використання в залежності від відстані транспортування. Автосамоскиди більшої вантажопідйомності мають значний потенціал у раціональному використанні за значних відстаней транспортування.

Встановлено, що зниження продуктивності екскаватора в екскаваторно-автомобільному комплексі зі значною кількістю вантажопотоків при наявності однієї ділянки дороги з попереми́ним одностороннім рухом становить 3-5%, при наявності двох ділянок зниження продуктивності досягає 6-7%, при наявності трьох ділянок – 6-24%. Прийнята норма́ми технологічного проектування максимальна довжина ділянки з одностороннім рухом, що дорівнює 500 м, не впливає на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу, тільки якщо через дану ділянку обслуговується один екскаватор.

В подальшому планується виконати дослідження з оптимізації техніко-економічних показників глибоких залізрудних кар'єрів на основі комплексного управління структурою і параметрами кар'єрних вантажопотоків.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерновий Ю.В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: Практикум / Ю.В. Жерновий. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2007. – 312 с.
2. Sturgul, R. Mine Design: Examples Using Simulation / R. Sturgul. // Littleton: SME. – 2000. – 102 p.
3. Ракович, Г.М. Застосування засобу імітаційного моделювання GPSS WORLD для рішення задач планування та обробки експерименту / Г. М. Ракович // Сучасні проблеми моделювання. -2014. - Вип. 2. -С.108-118
4. Schriber, T. J. Simulation using GPSS / T. J.Schriber. - New York: John Wiley & Sons -1974. – 209 p.
5. Kolonja, B. Simulation of In-Pit Crushing Systems Using AutoMod / B.Kolonja, R.Stanic and J. Hamovic // 19th Mining Congress, 1-5 November 2003, New Delhi. p. 517-531.
6. Литвинов, С.В. Обоснование рациональных схем пересечения автомобильных и железных дорог карьеров / С.в. Литвинов: Автореф.дисс. ... канд.техн.наук. - Кривой Рог, КНУ, 1990. -19 с.
7. Слободянюк, Р.В. Определение рационального количества карьерных автосамосвалов / Р.В. Слободянюк // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. - Дніпропетровськ, 2012. — Вип. 103. — С. 196-202.
8. Слободянюк, Р.В. Вплив відстані транспортування на оптимальну структуру екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру / Р.В. Слободянюк // Київ: Вісник НТУ «КПІ». – 2015. – С. 100–105.
9. Слободянюк, Р.В. Дослідження впливу параметрів технологічних автодоріг на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу / Р.В. Слободянюк // Житомир: Вісник ЖДТУ. – 2015. – С. 9–14.
10. Surface Mining: 2nd edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1990. – 234 p.

#### REFERENCES

1. Zhernovyi Iu.V. (2007), Imitatsiine modeliuвання system masovoho obsluhovuvannia [Simulation of queueing systems], Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
2. Sturgul, R. (2000), “ Mine Design: Examples Using Simulation” , Littleton, CO.
3. Rakovych, G.M. (2014) "Application of simulation modeling GPSS WORLD for problem solving and treatment planning experiment", *Suchasni problemy modeliuвання*, no. 2. pp.108-118.
4. Schriber, T. J.(1974), “Simulation using GPSS”, *John Wiley & Sons*, New York, USA.
5. Kolonja, B., Stanic, R. and Hamovic, J. (2003), “Simulation of In-Pit Crushing Systems Using AutoMod”, *19th Mining Congress*, New Delhi, 1-5 November 2003, pp. 517-531.
6. Litvinov, S.V. (1990), "The Substantiation of rational schemes of crossing roads and railways quarrie", Abstract of Ph.D. dissertation, Kryvyi Rih, Ukraine, pp. 19-35.
7. Slobodyanyuk, R.V. (2012), “Determination of the rational number of dump trucks”, *Geo Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no.103, pp. 196-202.
8. Slobodyanyuk, R.V. (2015), “Influence of distance of transportation on the optimal structure of Open-Pit’s excavator-automobile complex”, *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu “Kyivskyy politekhnichnyi instytut”*, pp. 100–105.
9. Slobodyanyuk, R.V. (2015), “Research of influence of technological roads parameters on the perfor-

mance of excavator –automobile complex”, *Visnyk Zhytomyrskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu*, pp. 9–14.

10. Surface Mining (1990) (2nd edition), *Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.*, Littleton, Colorado, USA.

---

#### Про автора

**Слободянюк Роман Валерійович**, магістр, інженер, Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет» (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна, [slobod\\_roman@mail.ru](mailto:slobod_roman@mail.ru).

#### About the author

**Slobodyanyuk Roman Valeriyovych**, Master of Science, Engineer, State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University» (SHEI “KNU”), Kryvyi Rih, Ukraine, [slobod\\_roman@mail.ru](mailto:slobod_roman@mail.ru).

---

**Аннотация.** Разработана имитационная модель, позволяющая проводить оценку влияния типа выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, расстояния транспортирования горной массы и параметров карьерных дорог на работу экскаваторно-автомобильного комплекса карьера. Определен круг задач, связанных с оптимизацией работы экскаваторно-автомобильного комплекса, для решения которых рационально применение имитационного моделирования.

Установлено, что для каждого типа экскаваторно-автомобильного комплекса существуют экономически целесообразные границы использования в зависимости от расстояния транспортирования. Автосамосвалы большой грузоподъемности имеют значительный потенциал рационального использования при больших расстояниях транспортирования. Установлено, что снижение производительности экскаватора в экскаваторно-автомобильном комплексе при наличии одного участка дороги с попеременным односторонним движением составляет 3-5%, при наличии двух участков снижение производительности достигает 6-7%, при наличии трех участков - 6-24%. Принятая нормами технологического проектирования максимальная длина участка с односторонним движением, равная 500м, не влияет на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса, только если через данный участок обслуживается один экскаватор.

**Ключевые слова:** имитационная модель, экскаваторно-автомобильный комплекс.

**Abstract.** A simulation model was designed in order to estimate impact of the cutter, loader and truck type, distance for the rock mass transporting and parameters of the pit roads on the operation of excavator-and-truck complex in the opencast mines. A scope of tasks associated with optimization of excavator-and-truck complex work was determined for solving of which a simulation modeling was applied.

It was found that certain economically expedient limits exist for usage of each type of excavator-and-truck complex depending on distance of the rock transportation. Dump trucks with greater carrying capacity have significant potential for rational using at considerable distances of transporting. It is stated that productivity of an excavator in the excavator-and-truck complex decreases by 3-5% in case of one road segment with alternately one-way traffic, by 6-7% - in case of two such segments and 6-24% - in case of three segments. Maximal length 500 m for a segment with one-way traffic accepted by norms of process engineering does not impact on productivity of the excavator-and-truck complex if only one excavator operates in this segment.

**Keywords:** simulation model, excavator-and-truck complex

*Статья поступила в редакцию 05.08.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком*

УДК 622.23.05

**Лутс И. О.**, ассистент АОТ  
**Пугач С. И.**, ассистент каф. АОТ  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ КОНВЕЕРНОЙ ЛЕНТЫ**

**Лутс І. О.**, асистент каф. АОП  
**Пугач С. І.**, асистент каф. АОП  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

### **ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК ВЛАГОЄМНИХ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ І ПОВЕРХНЕЮ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ**

**Luts I. O.**, asistent  
**Pugach S. I.**, asistent  
(State HEI «NMU»)

### **INTERACTING WATER-CONTAINING FINE PARTICLES AND THE SURFACE SYSTEMS CONVEYOR BELT**

**Аннотация.** Цель - установление закономерностей взаимодействия между частицами руды и поверхностью конвейерной ленты с целью определения адгезионных свойств влагоемких мелкодисперсных систем влияющих на интенсивность пылеобразования при работе конвейера.

Установлено, что величина капиллярной составляющей силы адгезии зависит от силы поверхности натяжения жидкости, отношения толщины слоя жидкости к радиусу частицы и от кривизны мениска, образованного при смачивании частицы жидкостью.

Разработана математическая модель процесса взаимодействия частиц руды с конвейерной лентой учитывающая силы адгезии и аутогезии.

По результатам исследования намечены пути создания способов и средств для снижения запыленности воздуха в горной выработке.

**Ключевые слова:** конвейерная лента, силы адгезии, запыленность, атмосфера, горная выработка, руда.

**Актуальность.** Силы взаимодействия влагоемких мелкодисперсных систем (глинистые частицы) с конвейерной лентой являются результатом молекулярного взаимодействия [1], которые характеризуются ван-дер-ваальсовскими силами, зависящими от зазора между контактирующими телами. В развитии сил взаимодействия влагоемких мелкодисперсных частиц основная роль принадлежит капиллярным силам, результирующее действие которых вызвано силами поверхностного натяжения менисков воды. Если зазор мал, то силы молекулярного взаимодействия суммируются в капилляры и сила взаимодействия возрастает, а если зазор велик, то возникающее расклинивающее действие воды существенно уменьшает силу взаимодействия.

---

© И.О. Лутс, С.И. Пузач, 2015

При достижении капиллярными силами определенной величины со временем происходит самопроизвольное сближение частиц увлажненного глинистого материала между собой и поверхностью ленты, результатом которого является возникновение молекулярной связи между ними. При удалении жидкости из пограничного слоя за счет возможного испарения и перехода жидкости в менее влажные вышележащие слои глины, адгезия которой к ленте увеличивается. Наличие влаги в зоне контакта увлажненного материала и ленты вызывает появление силы сцепления направленной тангенциально к поверхности контакта и силы взаимодействия, направленной нормально к поверхности ленты.

Смачиваемость марганцевой руды водой довольно низкая (65,2%), что связано с минералогическим и фракционным составом пыли и небольшим временем смачивания, недостаточным для набухания глинистых частиц.

Естественная влажность добываемой марганцевой руды в среднем составляет 27%, что превышает максимальную молекулярную влагоемкость. Можно считать, что между транспортируемой рудой и поверхностью конвейерной ленты возникает прослойка жидкости. Количественная оценка взаимодействия частиц марганцевой руды с поверхностью конвейерной ленты при возникновении на ней слоя жидкости имеет важное значение при обосновании и выборе способов и средств снижения адгезии между поверхностями руды и конвейерной ленты.

В связи с изложенным весьма важное значение приобретает расчет сил адгезии между отдельной частицей и поверхностью конвейерной ленты.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим взаимодействие сферической частицы радиуса  $R$  с плоской поверхностью конвейерной ленты при наличии на ней слоя жидкости толщиной  $h$ . Углы смачивания частицы к указанной поверхности будем считать известными (рис. 1).

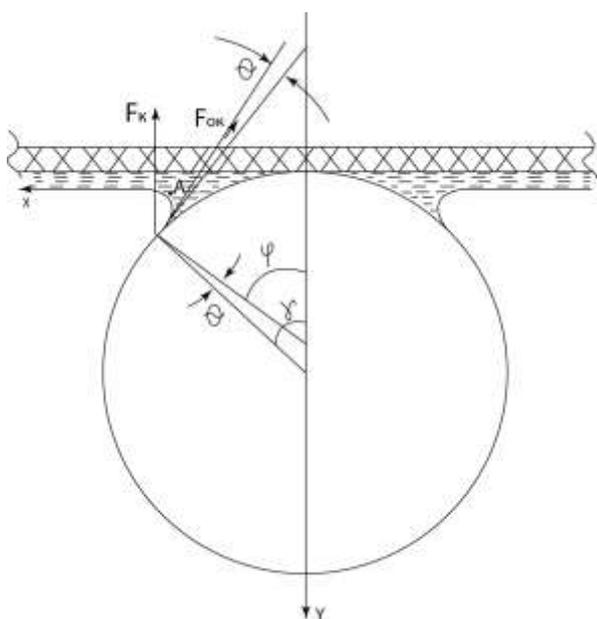


Рисунок 1 - Расчет капиллярной составляющей силы адгезии

Определим форму меридиональной кривой [3] (кривая, вращением которой образуется искривленная поверхность раздела жидкость-газ). Примем за ось  $x$  поверхность жидкости на ленте, за ось  $y$  – вертикальную прямую, проходящую через центр сферической частицы. Пусть  $x$  и  $y$  означают текущие координаты точки, лежащей на меридиональной кривой.

Давление  $P$  внутри жидкости на уровне точки  $A$  равно [4]

$$P = P_0 - \rho g \gamma,$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, Па,  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

То же давление можно выразить по формуле Лапласа [5]

$$P = P_0 - \sigma \cdot k,$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, н/м,  $k$  - абсолютное значение кривизны поверхности жидкости в точке  $A$ , 1/м.

Следовательно

$$\rho g \gamma = P_0 - P = \sigma \cdot k.$$

Считая радиус частиц во много раз больше толщины слоя [6], пренебрегаем в силу этого изменением давления в жидкости по высоте под влиянием гравитационных сил. Тогда

$$P_0 - P = \sigma \cdot k = const.$$

Абсолютное значение кривизны поверхности в точке  $A$  равно

$$k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

где  $R_1$  - радиус кривизны меридиональной кривой, лежащей в плоскости  $xu$ , м,  $R_2$  - радиус кривизны перпендикулярного к меридиональной кривой нормального сечения, м.

Известно, что

$$\frac{1}{R_1} = -\frac{y''}{(1+y'^2)^{1.5}}$$

(штрих обозначает дифференцирование по оси  $x$ ). Радиус кривизны  $R$ , является величиной отрицательной.

Радиус кривизны  $R_2$  легко определить с помощью известной из дифференциальной геометрии теоремы Менье [2], согласно которой

$$x = R_2 \cos \alpha, \tag{1}$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью нормального сечения и осью  $x$ .

Подставляя в выражение (1) значение  $\cos \alpha$  получим

$$R_2 = \frac{x(1+y'^2)^{0.5}}{y'}.$$

Таким образом, дифференциальное уравнение, определяющее форму меридиональной кривой, примет вид

$$\frac{y'}{(1+y'^2)^{0.5}} - \frac{y''}{(1+y'^2)^{1.5}} = \text{const} = 2H \quad (2)$$

Преобразуя выражение (2) к виду

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{xy'}{(1+y'^2)^{0.5}} \right) = 2Hx \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) получим

$$\frac{xy'}{(1+y'^2)^{0.5}} = Hx^2 + B, \quad (4)$$

где  $B$  – постоянная интегрирования.

Выражение (4) после несложных преобразований приводится к виду

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Hx^2 + B}{\sqrt{x^2 - (Hx^2 + B)^2}} \quad (5)$$

откуда

$$y = \int \frac{Hx^2 + B}{\sqrt{x^2 - (Hx^2 + B)^2}} dx + c, \quad (13)$$

где  $c$  – вторая постоянная интегрирования.

Капиллярная составляющая силы адгезии [7], действующая на частицу равна

$$F_k = F_{ok} \sin \varphi, \quad (6)$$

где  $F_{ok}$  – сила поверхностного натяжения, действующая по периметру смачивания и направленная по касательной к мениску,  $H$ ;  $\varphi$  – угол между касательной к мениску в точке наивысшего поднятия жидкости и перпендикуляром к оси  $x$ , рад.

$$F_{ok} = 2\pi\sigma \cdot x, \quad (7)$$

где  $x$  – ордината точки наивысшего поднятия жидкости.

$$x = R \sin \gamma, \quad (8)$$

где  $\gamma$  - угол между радиусом, проведенным в точку наивысшего поднятия жидкости и радиусом, проведенным в точку касания частицы с поверхностью ленты.

Из чертежа (см. рис.1) следует

$$\cos \gamma = \frac{R - h - y}{R} = 1 - \frac{h}{R} - \frac{y}{R}, \quad (9)$$

где  $y$  – ордината точки наивысшего поднятия жидкости.

Считая, что  $y$  значительно меньше  $R$ , из выражения (9) получим

$$\cos \gamma = 1 - \frac{h}{R}$$

откуда

$$\sin \gamma = \sqrt{\frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2}}. \quad (10)$$

Используя известное из тригонометрии соотношение [8]

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

и учитывая выражение (5), получим

$$\sin \varphi = \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} = \frac{Hx^2 + B}{x}. \quad (11)$$

Подставим выражение (7) и (11) с учетом выражений (8) и (10) в формулу (6), получим

$$F_k = 2\pi\sigma \cdot R^2 H \left( \frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right) + 2\pi\sigma \cdot B, \quad (12)$$

При  $h = 0$ ,  $F_k = 0$ , тогда  $B = 0$  и выражение (11) примет вид

$$F_k = 2\pi\sigma \cdot R^2 H \left( \frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right).$$

Частица будет удерживаться на поверхности [9], если  $F_k \geq P$ , где  $P = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$  – сила тяжести, действующая на частицу,  $\rho$  – плотность частицы.

Разделить обе части выражения (12) на силу тяжести [10], действующую на