

## Математическое описание эффективности пылеподавления низконапорным орошением в этажерочных цехах предприятий стройиндустрии

*А.И. Евтушенко, И.И. Евтушенко, А.Д. Тютина, В.А. Колтакова*

*Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** В данной статье рассмотрен наиболее часто употребляемый в промышленности при транспортировке сыпучих материалов метод борьбы с пылью, который заключается в использовании систем жидкостного орошения. Указаны ключевые факторы, способствующие эффективной борьбе с пылью, рассмотрена возможность применения поверхностно-активных веществ. Авторы затрагивают такую актуальную на сегодняшний день проблему, как дальнейшее развитие и изучение методов обеспыливания при производстве строительных изделий и конструкций.

**Ключевые слова:** воздух, пыль, транспортировка, сыпучие строительные материалы, обеспыливание, система орошения, математическое моделирование, низконапорное орошение, экологическая безопасность, мелкодисперсные частицы.

В настоящее время наиболее часто используемым методом борьбы с пылью является использование систем жидкостного орошения. По мере смачивания мелкодисперсных частиц вес каждой пылинки увеличивается, что снижает ее способность подниматься в воздух рабочей зоны. По мере того как группы частиц становятся тяжелее, окружающему воздуху становится все труднее их уносить. Ключевыми факторами в эффективной борьбе с пылью являются в данном случае правильное нанесение влаги, тщательное расположение сопла, контроль размера капель, выбор наилучшего рисунка распыления и типа распылительной форсунки [1,2].

Системы орошения могут также использовать другие распыляемые жидкости, такие как растворы поверхностно-активных веществ для снижения поверхностного натяжения капель жидкости, растворы, содержащие антифриз агенты для применения в чрезвычайно холодных средах и более вязкие жидкие растворы, которые высыхают, чтобы создать пленку на запыленных поверхностях, чтобы предотвратить попадание пыли в воздух [3,4].

Однако большинство систем жидкостного орошения используют в качестве распыляемой среды воду. Хотя использование водяных распылителей является достаточно простым методом, необходимо оценить целый ряд факторов, чтобы повысить его эффективность. Реализовать это можно с помощью математического моделирование процесса обеспыливания воздуха.

Авторами были проведены замеры концентрации пыли в воздухе рабочих зон бетоносмесительных узлов, в местах пересыпки инертных материалов на ленточных транспортерах этажерочных цехов предприятий ЖБИ в городах Волгоградской и Ростовской областей (Рис. 1 – 3).



Рис. 1. – Этажерочный цех по производству товарного бетона



Рис. 2. – Бетоносмесительный узел



Рис. 3. – Ленточный транспортёр

На основе результатов работ [5 – 8], эффективность процесса обеспыливания воздуха низконапорным орошением можно описать следующей формулой:

$$E_{\text{эф}} = [1 - (1 - E_{\text{эф1}}) \times (1 - E_{\text{эф2}}) \times (1 - E_{\text{эф3}})]B_1, \quad (1)$$

где  $E_{\text{эф}}$  – общая эффективность обеспыливания низконапорным орошением;  
 $E_{\text{эф1}}$  – эффективность захвата пылевых частиц каплями диспергированной

жидкости под действием адгезионных сил;  $E_{\text{эф2}}$  – эффективность захвата под действием электростатических сил;  $E_{\text{эф3}}$  – эффективность инерционного захвата;  $B_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий гидрокинетические свойства материала пылевых частиц относительно вещества орошающей жидкости.

Количественное описание процесса обеспыливания возможно только при условии рассмотрения эффективности каждого его этапа.

В соответствии с [5, 9]:

$$E_{\text{эф1}} = 2/3 \left( \frac{3,56B_2}{\mu_B V_K D_K D_{\Pi}^2} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где  $B_2$  – константа межмолекулярного взаимодействия с учетом эффекта электромагнитного запаздывания, Дж.м;  $V_K$  – средняя скорость капли, м/с;  $\mu_B$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $D_K$  – средний поверхностно-объемный диаметр капли, м;  $D_{\Pi}$  – медианный диаметр пылевых частиц, м.

Известно [9], что:

$$E_{\text{эф2}} = \left( \frac{0,85q_K}{D_{\Pi} D_K^2 \mu_B V_K} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $q_K$  – заряд капли, Кл.

Вводя вместо  $q_K$  массовую электростатическую характеристику процесса, удельную электрозаряженность факела орошения  $q$ , Кл/кг, [5,10] и проводя несложные математические преобразования, получим:

$$E_{\text{эф2}} = 0,032q \left( \frac{D_K \rho_{\text{ж}}}{Q_{\text{н}} D_{\Pi} \mu_B V_K} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Рассматривая взаимодействие пылинки с каплей в процессе их движения и считая критерий Стокса определяющим в этом механизме, многие авторы [5, 11, 12] предлагают следующий вид зависимости эффективности инерционного захвата частиц пыли каплями диспергированной жидкости от числа Стокса:

$$E_{\text{эфз}} = \frac{Stk}{Stk+a_1}, \quad (5)$$

где  $a_1$  – эмпирический коэффициент, определяющий динамические условия в зоне инерционного захвата.

Однако в оценке коэффициента  $a_1$  имеются большие расхождения, которые можно объяснить зависимостью его, прежде всего, от скорости движения капли, продолжительности действия воздушного потока на каплю и другими факторами. Таким образом, число Стокса не единственный критерий, определяющий эффективность инерционного захвата. Учет физических механизмов деформации и дробления капель позволяет более точно оценить значение коэффициента  $a_1$ . Под действием воздушного потока меняется траектория движения капель, они могут коалесцировать и дробиться. Протекающие процессы могут вызвать заметное изменение размеров капель, скорости их движения и зависят от двух выделенных режимов распространения жидкостного аэрозоля. Расчеты позволили определить зависимость эмпирического коэффициента  $a_1$  в выражении (5) от выделенных скоростных режимов распространения жидкостного аэрозоля:  $a_1=100$  при  $V_k \leq V_{кр}$ ;  $a_1=1000$  при  $V_k > V_{кр}$ . С учетом сказанного выражение (5) примет вид:

$$E_{\text{эфз}} = \begin{cases} \frac{Stk}{Stk+100} & \text{при } V_k \leq V_{кр} \\ \frac{Stk}{Stk+1000} & \text{при } V_k > V_{кр} \end{cases}, \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для условий свободного распространения факела диспергированной жидкости при отсутствии каких-либо ограничений этому распространению (каналов, стенок и т.п.) и при скорости движения воздуха до 1,5 м/с, когда наблюдается полное перекрытие пылевоздушного потока факелом орошения.

Ограниченные в пространстве источники выделения пыли (наличие ограждающих конструкций, внутренний объем устройств, аппаратов и т.п.) и

скорости движения окружающего воздуха более 1,5 м/с могут существенно повлиять на величину эффективности  $E_{эф3}$ . Известно, что на эффективность инерционного захвата, экспоненциально зависящую от основных технологических параметров процесса орошения, непосредственное влияние оказывает коэффициент свободного прохождения пылевого потока через зону орошения. Заменяя этот коэффициент соотношением геометрических характеристик пылевого потока и факела орошения, для случая  $d_B > d_\phi$  получим:

$$E_{эф3} = \begin{cases} \frac{Stk}{Stk+100} \frac{\exp\left(\frac{d_B}{d_\phi} - 1\right)}{\exp\left(\frac{d_B}{d_\phi} - 1\right)^2} \text{ при } V_K \leq V_{KP} \\ \frac{Stk}{Stk+1000} \frac{\exp\left(\frac{d_B}{d_\phi} - 1\right)}{\exp\left(\frac{d_B}{d_\phi} - 1\right)^2} \text{ при } V_K > V_{KP} \end{cases}, \quad (7)$$

где  $d_B$  – эквивалентный размер (диаметр) пылевого потока в зоне орошения, м;  $d_\phi$  – диаметр сечения факела орошения на расстоянии длины активной зоны факела от оросителя, м, равный:

$$d_\phi = 2h_\phi \tan(\alpha/2), \quad (8)$$

где  $h_\phi$  – длина активной зоны факела орошения, м;  $\alpha$  – корневой угол раскрытия факела орошения, град.

Поправочный коэффициент  $B_1$  в формуле (1) учитывает различия захвата гидрофобных и гидрофильных частиц, связанные с возникновением расклинивающего давления. Величина этого давления определяется природой пыли и жидкости. При выраженном сродстве между молекулами поверхностных слоев твердого тела и жидкости ( $\cos\theta \rightarrow 1$ ) расклинивающее давление на границе раздела фаз не возникает и, наоборот, при отсутствии такого сродства ( $\cos\theta \rightarrow 0$ ) оно максимально.

Процесс смачивания происходит в динамических условиях и носит неравновесный характер. Зависимость коэффициента  $B_1$  от стабильности

поверхностных слоев капель, а следовательно, от скоростных режимов распространения жидкостного аэрозоля, аналогична полученной зависимости эффективности инерционного захвата от числа Стокса (выражение (6)). В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость для расчета  $B_1$ :

$$B_1 = \frac{\cos \theta}{\cos \theta + 1/a_1}, \quad (9)$$

Тогда, с учетом двух выделенных режимов распространения жидкостного аэрозоля можно записать:

$$B_1 = \begin{cases} \frac{\cos \theta}{\cos \theta + 0,01} & \text{при } V_K \leq V_{KP} \\ \frac{\cos \theta}{\cos \theta + 0,001} & \text{при } V_K > V_{KP} \end{cases}, \quad (10)$$

Подставив выражения (2), (4), (6), (7) и (10) в исходную зависимость (1) после несложных математических преобразований окончательно получим уточненную параметрическую зависимость для определения эффективности обеспыливания низконапорным орошением:

$$E_{\text{эф}} = \left[ 1 - \left( 1 - 14,48 \left( \frac{B_2}{\mu_B V_K D_{\Pi}^{2 \cdot 0,147 (d_c / \tan(\alpha/2))^{1/2}} H_H^{1/3}} \right)^{3/2} \right) \times \right. \\ \left. \left( 1 - 0,037 q \left( \frac{(d_c / \tan(\alpha/2))^{1/2}}{\mu d_c^2 H_H^{5/6} D_{\Pi} \mu_B V_K} \right) \right) \times \left( 1 - \frac{Stk}{Stk + a_1'} \right) \right] \times \\ \frac{\cos \theta}{\cos \theta + 1/a_1'} \quad (11)$$

Зависимость (11), являющаяся результатом предложенного нами математического описания и лежащая в основе прогноза эффективности процесса обеспыливания низконапорным орошением, с учетом принятых допущений и граничных условий, конечно не отражает абсолютно всех

особенностей взаимодействия пылевого и жидкостного аэрозолей. В частности, строгий количественный прогноз эффективности обеспыливания низконапорным орошением возможен только в режиме  $V_{кр} \leq V_{др}$ . Это объясняется тем, что если скорость  $V_{кр}$  определяет нижнюю границу переходной области, в пределах которой процесс дробления выражен единичными актами и погрешность определения эффективности обеспыливания  $E_{эф}$  незначительна, то  $V_{др}$  является ее верхней границей и указывает на массовый характер процесса дробления. В этих условиях использование выражения (11) повлечет за собой значительную погрешность расчетов. Несмотря на это структура предложенного математического описания процесса, по нашему мнению, позволяет по мере уточнения этих особенностей и получения их количественных оценок дополнять и совершенствовать предложенное математическое описание.

Выводы:

1. Использование систем жидкостного орошения по-прежнему является наиболее часто применяемым методом борьбы с пылью при транспортировке сыпучих материалов на ленточном конвейере в этажерочных цехах предприятий стройиндустрии.
2. Рассчитать и повысить значение эффективности процесса обеспыливания воздуха низконапорным орошением можно с помощью метода математического моделирования.
3. Получены формулы для расчета показателя эффективности и математического описания процесса обеспыливания низконапорным орошением применительно к транспортировке сыпучих строительных материалов на ленточном конвейере в этажерочных цехах предприятий стройиндустрии.

## Литература

1. Пушенко С.Л., Волкова Н.Ю. Повышение эффективности системы управления охраны труда на предприятиях стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1849](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1849)
2. Евтушенко А.И., Евтушенко И.И., Нор-Аревян С.Л., Бельская Я.В. К вопросу исследования путей повышения эффективности пылеподавления орошением // Инженерный вестник Дона, 2016, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3726](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3726)
3. Son, B.S., Song, M.R., Yang, W.H A study on PM10 and VOCs concentrations of indoor environment in school and recognition of indoor air quality // Proceedings of Indoor Air. Belgium: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2005. pp. 827-832.
4. Mohamed A., Hanaa M.A. Improving the Construction Industry Quality Using the Seven Basic Quality Control Tools // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2019. №7. pp. 412-420.
5. Саранчук В.И., Качан В.Н., Рекун В.В. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли. Киев: Наукова думка, 1984. 216 с.
6. Журавлев В.П., Рекун В.В., Беспалов В.И., Страхова Н.А. Саранчук В.И. Системы борьбы с пылью на промышленных предприятиях. Киев: Наукова думка, 1994. 191 с.
7. Журавлев В.П., Глузберг В.Е. Исследование физических процессов, протекающих при пылеподавлении с помощью орошения// Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. 1978. №4.С. 18-21.
8. Евтушенко И.И., Беспалов В.И. К вопросу взаимосвязи аэрогидродинамического режима и физико-химических свойств жидкости при обеспыливании ленточных конвейеров орошением // Безопасность жизнедеятельности. Пром. безопасность и охрана труда, 2009. №7. С. 18–20

9. Ярославский З.Я., Долгоносов Б.М. Исследование воздействия магнитных полей на воду // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. М.:Цветметинформация, 1971.С. 51-55.

10. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 392 с.

11. Цыцура А.А. Физико-химическая модель пылеулавливания при гидрообеспыливания // Обеспыливание в строительстве. Ростов н/Д: РИСИ, 1987. С. 44-45.

### References

1. Pushenko S.L., Volkova N.Ju. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1849](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1849).

2. Evtushenko A.I., Evtushenko I.I., Nor-Arevjan S.L., Bel'skaja Ja.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2016, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3726](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3726)

3. Son, B.S., Song, M.R., Yang, W.H. Proceedings of Indoor Air. Belgium: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2005. pp. 827-832.

4. Mohamed A., Hanaa M.A. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2019. №7. pp. 412-420.

5. Saranchuk V.I., Kachan V.N., Rekun V.V. Fiziko-himicheskie osnovy gidroobespylivaniya i preduprezhdeniya vzryvov ugol'noj pyli [Physicochemical principles of hydro-dusting and prevention of coal dust explosions]. Kiev, 1984. 216 p.

6. Zhuravlev V.P., Rekun V.V., Bepalov V.I., Strahova N.A. Saranchuk V.I. Sistemy bor'by s pyl'ju na promyshlennyh predpriyatijah [Industrial dust control systems]. Kiev, 1994. 191 p.

7. Zhuravlev V.P., Gluzberg V.E. Tehnikabezopasnosti, ohrana truda i gornospasatel'noe delo. 1978. №4. pp. 18-21.



8. Evtushenko A.I., Bepalov V.I. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. Promyshlennaja bezopasnost' i ohrana truda. 2009. №9. pp. 2-4.
9. Jaroslavskij Z. Ja., Dolgonosov B.M. Voprosy teorii i praktiki magnitnoj obrabotki vody i vodnyh sistem [Questions of theory and practice of magnetic treatment of water and water systems]. Moskva, 1971. pp. 51-55.
10. Uzhov V.N., Val'dberg A.Ju., Mjagkov B.I. Ochistka promyshlennyh gazov ot pyli [Cleaning industrial gases from dust]. Moskva, 1981. 392 p.
11. Cыкура A.A. Fiziko-himicheskaja model' pyleulavlivanija pri gidroobespylivanii [Physicochemical model of dedusting during hydrodusting]. Rostov-on-Don, 1987. pp. 44-45.