

УДК 504.3.054:622

*проф., к.т.н. Давиденко В. А.,
Олейник Т. С.,
Скрипник Е. В.*

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, ebgd@ukr.net)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ НА ШАХТАХ ДОНБАССА

Работа посвящена разработке и исследованию новых способов снижения пылеобразующей способности угольных пластов при использовании новых высокоэффективных рабочих жидкостей, в том числе и при внедрении низкотемпературного увлажнения.

***Ключевые слова:** метан, метанонасыщенность, низкотемпературное увлажнение угля, пылеобразующая способность угля, сорбция, твердый диоксид углерода, хлористый натрий.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Одним из основных вредных веществ антропогенного происхождения является промышленная пыль, которая наряду с оксидом углерода, диоксидом серы и окислами азота доминирует в атмосферном воздухе населенных пунктов, прилегающих к крупным промышленным предприятиям и угольным шахтам. Наиболее существенными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются предприятия теплоэнергетики, угольной и металлургической промышленности, которые выбрасывают около 90 % от мировой эмиссии пыли.

Угольная промышленность Украины является одним из основных загрязнителей атмосферного воздуха пылью. Объемы пылевой эмиссии в Донбассе достигают около 20–30 и более тыс. тонн в год. На Луганщине выбросы пыли за период с 2000 по 2010 гг. колебались в пределах от 6,4 до 10,6 тыс. тонн в год. Основными источниками выбросов пыли на угольных шахтах являются породные отвалы, котельные, использующие в качестве топлива уголь, вентиляционные выбросы из шахт, пункты погрузки и перегрузки. Наиболее мощным источником при этом являются породные отвалы, на долю которых приходится около половины всей шахтной пыли, поступающей в атмосферу. Количество пыли, выно-

симое из шахты в атмосферу вентиляционными потоками, достигает 10–15 % всей шахтной пыли. При этом в этой пыли отмечается повышенное содержание мелких фракций размером менее 10 мкм.

Применяемые на шахтах методы по снижению выбросов пыли в атмосферу (предварительное увлажнение угольных пластов, орошение на выемочных и проходческих комбайнах, туманно-водяные завесы, покрытие поверхности породных отвалов глиной и другие) позволяют снизить количественные показатели пылевых выбросов. Однако концентрации пыли, регистрируемые в атмосферном воздухе населенных пунктов, прилегающих к шахтам, показывают, что превышение предельно-допустимых концентраций (ПДК) по пыли нередко достигает значений 1,3–1,5 и более. Снижение качества атмосферы шахтерских населенных пунктов Луганщины по пылевому фактору является следствием повышения заболевания жителей болезнями пылевой этиологии: астмой, хроническим бронхитом и в долгосрочной перспективе — раком легких. Из-за высокого содержания мелких фракций в составе угольной пыли кровь быстрее сворачивается и переносит меньше кислорода, сокращает приток крови в мозг, что становится причиной высокого кровяного давления, аритмии и сердечных приступов [1].

Постановка задачи. Одним из наиболее важных факторов угольных пластов является его метанонасыщенность, что в значительной мере снижает влагонасыщенность угольного массива рабочими жидкостями. Для повышения смачиваемости угля используют различные поверхностно-активные вещества, что способствует повышению эффективности влагонасыщения угольных пластов. Так как метан в данных условиях находится в поровом объеме угля в свободном состоянии, то он препятствует проникновению нагнетаемой жидкости в увлажняемый массив угля. Поэтому для освобождения порового объема угля от метана, необходимо его перевести из свободного состояния в сорбированное.

В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка способа низкотемпературного насыщения угольных пластов рабочими жидкостями, что позволяет освободить поровое пространство для нагнетаемой рабочей жидкости.

Объект исследования — метанонасыщенные угольные пласты с высоким уровнем пылевыведения.

Предмет исследования — закономерности распространения жидкости в угольных пластах и снижение их пылеобразующей способности при низкотемпературном увлажнении.

Задачи исследования:

- разработка и исследование рецептуры рабочих жидкостей для низкотемпературного увлажнения;
- определение оптимального температурного режима для эффективного сорбционного связывания метана углем;
- определение эффективности влагонасыщения угля низкотемпературными жидкостями по сравнению с традиционными схемами предварительного увлажнения.

Методика исследования. Исследование сорбции метана углями различного метаморфизма. Параметры низкотемпературной обработки угольных пластов основывались на теоретических расчетах с уче-

том температуры и давления окружающего угольного массива.

Изложение материала и его результаты. Исследования процессов нагнетания рабочей жидкости в угольные пласты в различных режимах позволили выявить, что процесс насыщения в газоносных углях обычно рассматривается только лишь в условиях изотермичности. В реальных же условиях температура нагнетаемой жидкости редко совпадает с температурой угольного пласта. Такая разность температур оказывает влияние на состояние метана в порах и трещинах угля, приводит к изменению степени его влагонасыщения. Весьма интересным в этом направлении является вариант, когда нагнетаемая жидкость имеет температуру ниже окружающего горного массива. Пониженная температура флюида вызывает сжатие метана и способствует проникновению жидкости вглубь угольного пласта за счет уменьшения противодействия метана. В более мелких порах и трещинах, в которых появилась возможность проникновения жидкости, возрастает капиллярное давление. Это вызывает дополнительное сжатие метана. Учитывая тот факт, что уголь является хорошим сорбентом и потенциальная газоемкость его выше фактической газоносности, то увеличение внутрикапиллярного давления будет способствовать повышению сорбции содержащегося в угле в свободном состоянии метана. Вследствие этого газовое давление в порах угля повышается незначительно, а эффективность изоляции в угле метана, обусловленная капиллярными силами, возрастает. Все эти процессы способствуют дополнительному проникновению нагнетаемой жидкости в мелкие поры и капилляры, а следовательно и снижению пылеобразующей способности угля. Исходя из выше изложенного, определим дополнительное влагонасыщение угля, обусловленное понижением температуры метана низкотемпературным флюидом.

Из условия прекращения пропитки капилляра имеем:

ГЕОЭКОЛОГИЯ

$$P_k + P_n - P_2 = 0, \quad (1)$$

где P_k — капиллярное давление, Па; P_n — давление от насоса, Па; P_2 — давление газа в капилляре, Па.

Давление газа в капилляре при температуре T_1 с учетом адсорбции части метана на поверхности капилляра может быть записано в виде

$$P_2 = (V_1 - V_{ad1}) = \frac{m_1}{M} RT_1, \quad (2)$$

где V_1 — объем капилляра, занятый свободным метаном при температуре T_1 , м³; V_{ad1} — объем, занимаемый адсорбированными молекулами метана при температуре T_1 , м³; $\frac{m_1}{M}$ — число молей метана, находящегося в газообразном состоянии; R — газовая постоянная, Дж/Кмоль.

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi x^2 l_1, \quad (3)$$

где x — диаметр капилляра, м; l_1 — длина капилляра, занятая метаном при температуре T_1 , м.

$$V_{ad1} = N_{S1} \cdot \pi \cdot l_1 \cdot V_0, \quad (4)$$

где N_{S1} — число адсорбированных молекул метана на поверхности капилляра при температуре T_1 , 1/м²; V_0 — объем одной молекулы метана, м³.

$$\frac{m_1}{M} RT_1 = \frac{N_1}{N_{S1}} RT_1 = N_1 K T_1, \quad (5)$$

$$N_1 - N_2 = \frac{1}{4} \pi x^2 \frac{P_2}{K} \left[\frac{l_1}{T_1} \left(1 - \frac{4N_{S1} \cdot V_0}{x} \right) - \frac{l_2}{T_2} \left(1 - \frac{4N_{S2} \cdot V_0}{x} \right) \right]. \quad (10)$$

Так как общее число молекул метана в капилляре неизменно, то имеет место равенство

$$N_1 + N_{S1} \cdot \pi \cdot x l_1 = N_2 + N_{S2} \cdot \pi \cdot x \cdot l_1, \quad (11)$$

или

где N_1 — число молекул метана, находящихся в газовой фазе внутри капилляра; K — постоянная Больцмана, Дж/К.

С учетом полученных значений V_1 , V_{ad1} и $\frac{m_1}{M} RT_1$ вместо выражения (2) получим

$$P_2 = \frac{N_1 \cdot K \cdot T}{\frac{1}{4} \pi x^2 l_1 \left(1 - 4 \frac{N_{S1}}{x} V_0 \right)}. \quad (6)$$

При том же давлении, но при пониженной температуре уравнение (6) записывается в виде

$$P_2 = \frac{N_2 \cdot K \cdot T_2}{\frac{1}{4} \pi x^2 l_2 \left(1 - 4 \frac{N_{S2}}{x} V_0 \right)}, \quad (7)$$

где N_2 — число молекул метана, находящихся в газовой фазе внутри капилляра при температуре T_2 ($T_2 < T_1$); l_2 — длина капилляра, занятая метаном при температуре T_2 , м; N_{S2} — число адсорбированных молекул метана на поверхности капилляра при температуре T_2 , 1/м².

Из выражений (6) и (7) находим

$$N_1 = \frac{P_2}{K} T_1 \left[\frac{1}{4} \pi x^2 l_1 \left(1 - \frac{4N_{S1} \cdot V_0}{x} \right) \right]; \quad (8)$$

$$N_2 = \frac{P_2}{K} T_2 \left[\frac{1}{4} \pi x^2 l_2 \left(1 - \frac{4N_{S2} \cdot V_0}{x} \right) \right]. \quad (9)$$

Вычитая из выражения (8) выражение (9), получим

$$N_1 - N_2 = \pi x (N_{S2} l_2 - N_{S1} l_1). \quad (12)$$

Сравняя выражения (10) и (12) для отношения $\frac{l_2}{l_1}$ после небольших преобразований, получим

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{N_{S_1} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T_1} \right) + \frac{P_2 \cdot x}{4K \cdot T_1}}{N_{S_2} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T_2} \right) + \frac{P_2 \cdot x}{4K \cdot T_2}}. \quad (13)$$

Но

$$l_2 = l_1 - \Delta l, \quad (14)$$

где Δl — дополнительная часть капилляра, занимаемая жидкостью, м.

Следовательно

$$\frac{l_2}{l_1} = \left(1 - \frac{\Delta l}{l_1} \right), \quad (15)$$

С учетом этого выражение (13) принимает вид

$$\frac{\Delta l}{l_1} = 1 - \frac{N_{S_1} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T_1} \right) + \frac{P_2 \cdot x}{4K \cdot T_1}}{N_{S_2} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T_2} \right) + \frac{P_2 \cdot x}{4K \cdot T_2}}. \quad (16)$$

Используя полученное выражение (16), найдем дополнительный объем, занятый флюидом в единице объема угольного массива при нагнетании жидкости, имеющей температуру метанонасыщенного угольного пласта.

С учетом этого в методике [3], исходя из объемной влагоемкости угля, которая определяется по формуле (17), проведены дальнейшие исследования, направленные на установление дополнительного прироста влажности метаносного угля от разности температур между угольным пластом и флюидом

$$W = V_{жс} / V, \quad (17)$$

где $V_{жс}$ — объем жидкости, заполняющей образец, м³; V — объем образца породы (угля), м³.

Если при температуре T_1 влагоемкость угля составляла $W_1 = (V_{жс1})/V$, а при тем-

пературе T_2 она равна $W_2 = (V_{жс2} + \Delta V)/V$, то поделив W_2 на W_1 , получим

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{V_{жс1} + \Delta V}{V_{жс}} = 1 + \frac{\Delta V}{V_{жс}}. \quad (18)$$

Так как $W_2 = W_1 + \Delta W$, то выражение (18) принимает следующий вид

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\Delta W}{V_{жс1}}, \quad (19)$$

где $\frac{\Delta W}{W_1}$ — дополнительный относительный прирост содержания жидкости в единице объема угля.

$$V_{жс1} = V_0' - V_1, \quad (20)$$

где $V_{жс1}$ — объем поры угля размером \bar{x} , занятый жидкостью при температуре T_1 , м³; V_0' — объем поры угля размером \bar{x} до начала нагнетания жидкости, м³; V_1 — объем поры угля, занятый метаном при давлении P_2 , м³.

Из равенства $P_0 \cdot V_0' = P_2 \cdot V_1$, справедливом при $T_1 = const$, получаем

$$V_0' = \frac{P_2}{P_0} V_1, \quad (21)$$

где P_0 — давление метана в поре угля до начала нагнетания, Па.

Подставляя выражение (21) в выражение (20), получаем

$$V_{жс1} = V_1 \left(\frac{P_2}{P_0} - 1 \right), \quad (22)$$

следовательно, дополнительный прирост влажности в угле составит

$$\frac{\Delta W}{W_1} = \frac{\Delta V}{V_1} \left(\frac{P_2}{P_0} - 1 \right). \quad (23)$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta W}{W_1} = \left(\frac{P_2}{P_0} - 1 \right) \left[1 - \frac{N_{S_1} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T} \right) + \frac{P \cdot \bar{x}}{4K \cdot T_1}}{N_{S_2} \left(1 - \frac{P_2 \cdot V_0}{K \cdot T} \right) + \frac{P \cdot \bar{x}}{4K \cdot T_2}} \right]. \quad (24)$$

Зависимость относительного прироста влажности метанонасыщенного угля от разности температур между угольным пластом и нагнетаемой в него жидкости приведена на рисунке 1. При этом был взят интервал температур 290–330 К, $V_0 = 33,5 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$, $\bar{x} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Приведенная на рисунке 1 зависимость хорошо аппроксимируется выражением

$$\Delta W = W \cdot 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T. \quad (25)$$

Анализ приведенной на рисунке 1 зависимости показывает, что при создании разности температур между газонасыщенным угольным пластом и нагнетаемой жидкостью в пределах 30–40 °С можно достичь дополнительного влагонасыщения угля на 20–25 % и более.

Это в свою очередь будет способствовать снижению пылеобразующей способности угля при предварительном увлажнении метаносных угольных пластов.

В соответствии с установленным пределом разности температур между газонасыщенным угольным пластом и нагнетаемым флюидом (30–40 °С) был разработан способ предварительного увлажнения высокогазоспособного угольного пласта, в котором рабочую жидкость перед нагнетанием в угольный пласт необходимо охлаждать до 0 °С [3].

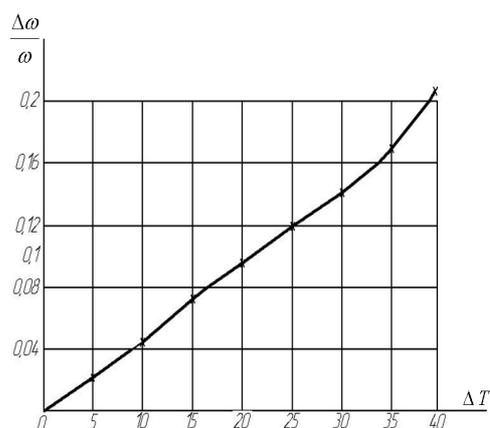


Рисунок 1 Зависимость прироста содержания влажности в единице объема угля от разности температуры между угольным массивом и нагнетаемой низкотемпературной жидкостью

Недостатком этого способа является необходимость создания в штреках специальных камер во вмещающих породах и углях для размещения в них холодильных машин (агрегатов), которые должны охлаждать рабочую жидкость перед нагнетанием в пласт до температуры 0 °С. Это приводит к значительным дополнительным экономическим затратам, что в свою очередь будет повышать себестоимость добываемого угля.

Данный недостаток устраняется путем нагнетания в газосодержащие угольные пласты рабочих жидкостей, разработанных в ДонГТУ. Это достигается путем смешивания рецептурных ингредиентов с водой, в результате чего после смешивания температура флюида будет достигать +1...–3 °С [4]. При этом жидкость при отрицательных температурах не теряет своей подвижности. Рецепт разработанных рабочих жидкостей приведена в таблице 1.

Исследование данных рабочих жидкостей для низкотемпературного увлажнения проводилось на ряде шахт Донбасса («Коммунист-Новая», ПО «Шахтерскантрацит», им. Калинина, им. Скочинского ПО «Донецкуголь», им. Менжинского ПО «Первомайскуголь»). Результаты проведенных исследований показали, что использование рабочих жидкостей с приведенной рецептурой позволяет снизить пылеобразующую способность метанонасыщенных угольных пластов на 67–75 % по сравнению с неувлажненным углем и на 17–35 % по сравнению с увлажненным углем по традиционной технологии. На шахтах «Коммунист-Новая» и им. Менжинского испытывались состав № 1 и состав № 2 соответственно, а на шахтах им. Скочинского и им. Калинина — состав № 3.

При этом в очистных выработках шахт «Коммунист-Новая», им. Калинина и им. Менжинского, где низкотемпературное увлажнение осуществлялось на протяжении длительного времени, была возможность непрерывного проведения исследований в течение года и более. Соответственно по пластам g_2^H , l_4 и k_2^2 было

ГЕОЭКОЛОГИЯ

установлено, что удельное пылевыведение из них было снижено, соответственно, с 1860 г/т до 558,3 г/т, то есть на 70 %; со 137 г/т до 92 г/т, то есть на 67 %; с 1090 г/т до 283,4 г/т, то есть на 75 %. С учетом этого годовой выброс пыли в атмосферный воздух за отчетный год с угольного пласта g_2^H составил 16510 т/год, а в предыдущем году, когда использовалось традиционное предварительное увлажнение угольного пласта, это количество достигало 25400 т/год. По пласту l_4 годовой выброс пыли достиг 3650 т/год, а в предыдущем году — 5800 т/год. По пласту k_2^2 годовой

выброс пыли в атмосферный воздух составил в отчетном году 8400 т/год, а в предыдущем — 11650 т/год. Таким образом, эффективность снижения выбросов угольной пыли на шахте «Коммунист-Новая» достигла 35 %, на шахте им. Калинина — 28 %, а на шахте им. Менжинского — 37 % по сравнению с уровнем выбросов предыдущего года. Это соответствует снижению годовых выбросов в атмосферу по шахте «Коммунист-Новая» на 8890 т/год, по шахте им. Калинина на 3250 т/год, а по шахте им. Менжинского на 2015 т/год.

Таблица 1

Рецептура рабочих жидкостей для низкотемпературного увлажнения угольных пластов

Ингредиенты	Содержание, мас., %	Исходная температура, °С
Состав для смачивания угольной пыли № 1		
Синтанол ДС-10	0,05–0,30	+1...–1 °С
Хлористый аммоний	15–20	
Вода	остальное	
Состав для смачивания угольной пыли № 2		
Диэтаноламида синтетических жирных кислот фракции C_{10} – C_{13}	0,1–0,3	–2...–3 °С
Углекислый натрий	15–18	
Вода	остальное	
Состав для смачивания угольной пыли № 3		
Хлористый натрий	2,5–4,0	+1...–1 °С
Твердый диоксид углерода	8–10	
Вода	остальное	

На шахте им. Скоринского исследования по снижению удельного пылевыведения (пылеобразующей способности низкотемпературными жидкостями) по техническим причинам проводились нерегулярно, из-за чего не удалось получить достоверных данных более чем за 3–4 месяца.

Выводы и направление дальнейших исследований. Проведенные натурные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Полученная эмпирическая зависимость позволяет определить снижение удельного пылевыведения (пылеобразующей способности) угольных пластов в зависимости от разности температур между

газоносным угольным массивом и низкотемпературным флюидом.

2. Проведенными шахтными исследованиями установлено, что использование предлагаемых рецептур рабочих жидкостей, нагнетаемых в угольный пласт, позволяет получить до нагнетания их в массив угля температуру в пределах +1...–3 °С, обеспечивающую разницу между флюидом и угольным пластом на уровне 30–35 °С, что при средней температуре угля на нынешних глубинах (700–800 м) отработки месторождений весьма реально.

3. Шахтными исследованиями установлено снижение выбросов шахтной пыли, поступающей из очистных забоев газонос-

ных угольных пластов через сеть горных выработок в атмосферный воздух, на уровне 28–37 % по сравнению с традиционным предварительным увлажнением угольных пластов.

4. В поступающей в атмосферный воздух пыли было установлено повышенное содержание мелкодисперсной пыли, размером менее 10 мкм. На уровне 17–37 % от общей массы пыли.

5. Разработанный способ обладает экономической эффективностью, которая обра-

зуется за счет исключения необходимости создания камер на штреках во вмещающих породах и углях для расположения в них холодильных установок и работы их самих.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку рецептуры новых рабочих жидкостей, которые должны иметь начальную температуру перед нагнетанием в угольный пласт на уровне –5...–10 °С, что позволит еще более значительно снизить выбросы шахтной пыли в атмосферный воздух.

Библиографический список

1. Угольный атлас. Ископаемое топливо в цифрах и фактах [Текст] / Фонд Генриха Бёлля, Берлин, Германия и «Друзья Земли» (FoEI). — Лондон, 2016. — С. 18.

2. Давиденко, В. А. Теоретические основы низкотемпературного увлажнения газоносных угольных пластов [Текст] / В. А. Давиденко // Материалы международной конференции по борьбе с пылью в угольных шахтах. — Алушта, 1996 — С. 11–18.

3. А. с. СССР 1196516. МПК Е 21 F 5/06. Способ предварительного увлажнения высокогазоносного угольного пласта [Текст] / В. А. Давиденко, Е. А. Будзило, А. Е. Пережилов, Ю. Т. Товстогань, В. С. Игнатов (СССР). — 3746957/22-03 ; заявлено 12.03.84 ; опубликовано 07.12.85, Бюл. 45. — 2 с.

4. Давиденко, В. А. Эффективность снижения пылеобразования при низкотемпературном увлажнении газонасыщенных углей [Текст] / В. А. Давиденко // Стратегия выхода из глобального кризиса : материалы научных чтений. — СПб. : МАНЭБ, 2001. — С. 174–175.

© Давиденко В. А.

© Олейник Т. С.

© Скрипник Е. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ПГМ ДонГТИ Левченко Э. П., д.м.н., и.о. гл. врача ГС «Алчевская городская СЭС» Капрановым С. В.

Статья поступила в редакцию 09.06.2020.

Prof. Davidenko V. A., Oleynik T. S., Skripnik E. V. (DonSTI, Alchevsk, LNR, ebgd@ukr.net)
EFFICIENCY INCREASE FOR REDUCING DUST EMISSIONS INTO ATMOSPHERE OF POPULATED LOCALITIES CONSIDERING COAL MINING AT DONBASS MINES

The work is devoted to development and research of new ways to reduce the dust-forming ability of coal layers when using new highly efficient working liquids and implementing low-temperature wetting.

Key words: low-temperature wetting of coal, methane, sorption, methane saturation, dust-forming ability of coal, sodium chloride, solid carbon dioxide.