

УДК 622.41: 533.6

ИССЛЕДОВАНИЕ УТЕЧЕК ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЛАВ

к.т.н. Бокий Б.В., к.т.н. Ирисов С.Г. (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

При проведенні очистних робіт витяг повітря скрізь вироблений простір змінюватимуться періодично. Витяг повітря з функцією розхіда повітря скрізь робочий простір лави.

ANALYSIS OF AIR LEAKS THROUGH GOB-WELLS OF HIGH-STRESSED LONGWALLS

Bokiy B.V., Irisov S.G.

During carrying out of second working periodical changes of air leakage. Air leakage ratio is subject to longwall air flow rate.

В настоящее время перед угледобывающими предприятиями Донбасса возникла новая задача: необходимость каптажа и утилизации метана для решения энергетических и экологических проблем. В условиях шахты им. Засядько каптаж метана осуществляется при помощи дегазационных скважин, пробуренных на подрабатываемый массив, и путём всасывания из выработанного пространства через трубопровод изолированного газоотвода. Пригодность метановоздушной смеси (МВС), капируемой изолированным газоотводом (ИГО), для утилизации путём сжигания в котельнях зависит от концентрации C метана в данной МВС, так как при $C \leq 14 - 16 \%$ горение МВС переходит во взрыв. Величина C при одной и той же газообильности выработанного пространства зависит от интенсивности его проветривания, т. е. от утечки воздуха $Q_{ут}$, просачивающегося через данное пространство. Изучению зависимости $Q_{ут}$ от разного рода факторов посвящены работы многих исследователей, в результате чего сформировано мнение о том, что $Q_{ут}$ зависит от схемы проветривания, от мощности пласта и от прочности пород его кровли. При этом утечка воздуха через выработанное пространство не рассматривается как самостоятельная величина, а принимается в долях от расхода воздуха через рабочее пространство лавы $Q_{оч}$ [1]. Чаще всего для характеристики утечки принимают коэффициент утечки воздуха $k_{ут}$, определяемый из выражений

$$k_{yt} = Q_{yч}/Q_{оч} \quad (1)$$

$$k_{yt} = Q_{yч}/(Q_{yч} - Q_{yt}) \quad (2)$$

где $Q_{yч}$ – расход воздуха, подаваемого на участок, $m^3/мин$.

В нормативном документе [1] предлагается считать, что k_{yt} увеличивается при увеличении вынимаемой мощности пласта m_b и коэффициента прочности f пород кровли. Следует отметить, что разрабатываемый шахтой пласт m_3 имеет слабую кровлю, $f = 3-4$, а пласт l_1 – прочную, $f = 7-9$. Однако наши предварительные исследования показали, что при постоянстве m_b и f значение k_{yt} может сильно варьировать, тем самым указывая на влияние и других факторов. Такими факторами могли быть процессы движения слоёв непосредственной и основной кровель. Как известно, для этих процессов свойственна периодичность, проявляющаяся по мере увеличения длины выработанного пространства L_b . Поэтому следовало ожидать, что при наличии связи k_{yt} с процессами посадки кровли данный коэффициент будет подвержен периодическим изменениям по мере увеличения расстояния L_b между лавой и монтажным ходком.

Для оценки k_{yt} ИТР участка ВТБ периодически проводили газо-воздушные съёмки в участковых штреках и в лаве с использованием автоматических приборов для измерения скорости воздуха АПР-2 и газоанализаторов «Сигнал – 5». Измерялись следующие расходы воздуха: Q_k – расход воздуха на свежей струе в 10 – 20 м перед лавой на конвейерном штреке; Q_{kk} – расход воздуха, выходящего через вентиляционную дверь с конвейерного штрека на фланговую наклонную выработку; Q_n – расход воздуха по лаве в 10 – 15 м от сопряжения с конвейерным штреком; Q_{cp} – расход воздуха в средней части лавы; $Q_{вых}$ – расход воздуха по лаве в 10 – 15 м от сопряжения с вентиляционным штреком; Q_o – расход воздуха в струе подсвеживания на расстоянии 10 – 20 м перед лавой; $Q_{ф}$ – расход воздуха по вентиляционному штреку в направлении к флангу выемочного поля; $Q_{ц}$ – расход воздуха по вентиляционному штреку в направлении к центру выемочного поля (в сторону массива); m_b – вынимаемая мощность пласта. Исследования проводились в 10, 11, 12 западных и 12 восточной лавах пласта l_1 , в 16 западной и 16 и 17 восточных лавах пласта m_3 . Схемы проветривания данных участков изображены на рис. 1, а, б, в, а результаты исследования k_{yt} в выработках участка 16 западной лавы пласта m_3 представлены на рис. 2. Как следует из графика на рис. 2, k_{yt} в периоды возвратноточного проветривания изменялся при изменении L_b по синусоиде с затухающей амплитудой.

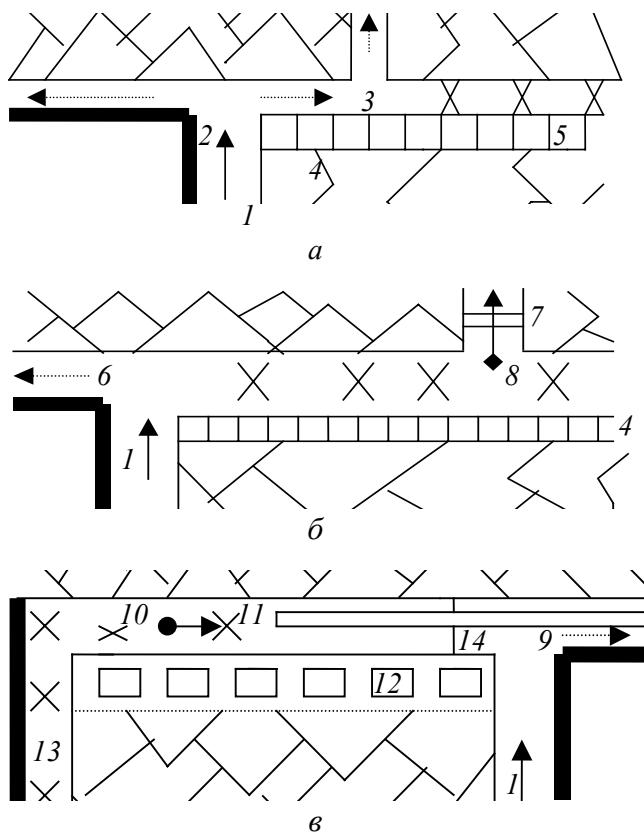


Рис. 1. Фрагмент схемы проветривания 16-й западной лавы: *а* – пласта m_3 при раздвоении исходящей струи воздуха; *б* – возвратного проветривания при изолированном газоотводе из выработанного пространства через промежуточный ходок № 7; *в* – при изолированном отводе МВС из погашаемой части вентиляционного штрека в сторону массива (начальный период отработки выемочного поля). 1 – свежая струя в рабочем пространстве лавы; 2 – исходящая к центру в сторону массива; 3 – исходящая в сторону промежуточного вентиляционного ходка №7, значительно превосходящая по расходу струю 2; 4 – изолирующая околоштрековая полоса; 5 – «погашенный» участок 16-го вентиляционного штрека; 6 – исходящая к центру струя воздуха; 7 – чураковая перемычка в ходке № 7; 8 – трубопровод изолированного газоотвода в ходке №7; 9 – исходящая струя по вентиляционному штреку, направляемая в сторону массива; 10 – направление всасывания МВС из погашаемого штрека; 11 – трубопровод изолированного газоотвода; 12 – околоштрековая полоса из деревянных костров под вентиляционным штреком; 13 – погашенный монтажный ходок; 14 – парус

Коэффициенты в формуле, отражающие данную синусоиду, были найдены при помощи программы ПК «Поиск решения». Значение одного из коэффициентов оказалось равным длине лавы $l_{оч} = 279$ м, что позволило предположительно представить зависимость $k_{ут}$ от $L_в$ в виде функции при корреляционном отношении $\eta = 0,993$

$$k_{ут} = 1,22 + 3l_{оч} \sin[\pi(L_в - l_{оч})/l_{оч}]/L_в^{1,29} \quad (3)$$

Как видно из (3) и графика на рис. 2, при возвратном проветривании значения $k_{ут}$, практически, функционально связаны с $L_в$ и в среднем составляют $k_{ср} = 1,22$. В связи с тем, что полупериод синусоиды соответствовал $l_{оч}$, можно было бы считать косвенно доказанной связь $k_{ут}$ с процессами посадки кровли. Однако характер изменения $m_в$ по $L_в$ также подчинялся периодической зависимости, которую при $\eta = 0,9766$ отражали (4) и рис. 3.

$$m_в = 2,05 - 1,13 \cdot 10^{-2} \cdot (L_в - 2,8) + 0,163 \sin[\pi(L_в - 2,8)/4,4] \quad (4)$$

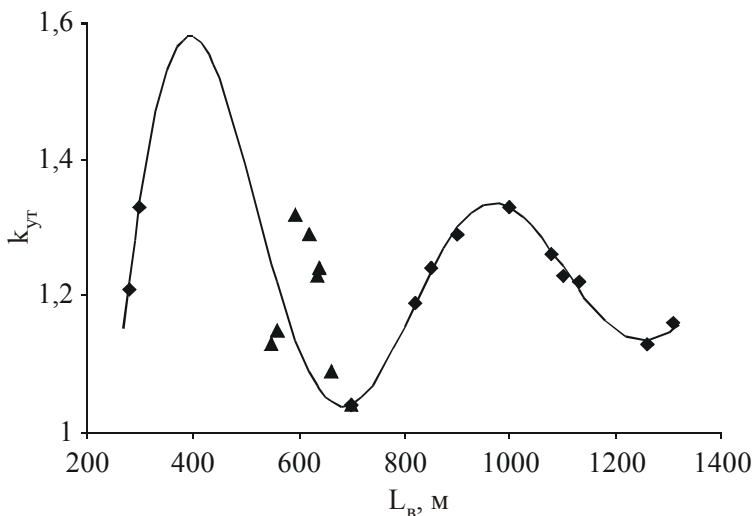


Рис. 2. График изменения $k_{ут}$ по мере увеличения длины выработанного пространства $L_в$ 16 западной лавы пласта m_3 : \blacklozenge – поведение $k_{ут}$ при возвратной схеме проветривания с изолированным газоотводом из выработанного пространства в сторону фланговой наклонной выработки; \blacktriangle – при прямоточной и комбинированной схемах проветривания с отводом на фланг значительной части исходящей струи воздуха

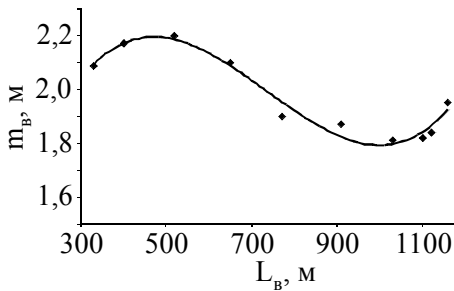


Рис. 3. График зависимости вынимаемой мощности пласта m_b от длины выработанного пространства L_b 16 западной лавы

вывод может быть сформулирован следующим образом: в условиях легко обрушающихся слоёв непосредственной кровли и применения крепи ЗКД-90 увеличение вынимаемой мощности пласта способствует снижению коэффициента утечек через выработанное пространство.

Как видно на рис. 4, корреляция между k_{yt} и m_b уступает корреляции k_{yt} на L_b , что обусловило необходимость дальнейших исследований связи k_{yt} с m_b . В наших исследованиях в качестве m_b принималось среднее из 9 – 11 измерений при данном положении линии лавы в выемочном поле, т.е. при данном значении L_b . Измерения m_b регулярно проводились геологической службой шахты, однако даты измерений m_b и k_{yt} не совпадали между собой. Данное обстоятельство обуславливало необходимость использования расчётно-

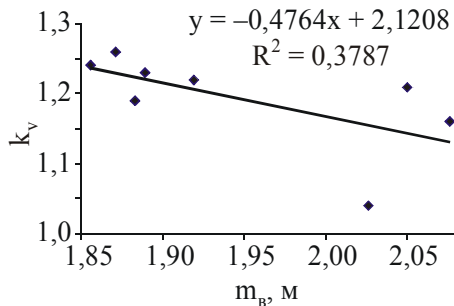


Рис. 4. График зависимости k_v от m_b для условий 16 западной лавы пласта m_3 ($y = -0,4764x + 2,1208$; $R^2 = 0,3787$)

Как следует из графика на рис. 3 и (4), теснота связи между m_b с L_b не уступает тесноте связи k_{yt} с L_b , поэтому можно было предположить, что на k_{yt} влияло изменение m_b .

Характер этой связи иллюстрирует график на рис. 4, что позволяет сделать предварительный вывод, противоречащий общепринятым представлениям о влиянии m_b на k_{yt} , согласно которым при увеличении m_b увеличивается и k_{yt} [1]. Наш предварительный вы-

вод может быть сформулирован следующим образом: в условиях легко обрушающихся слоёв непосредственной кровли и применения крепи ЗКД-90 увеличение вынимаемой мощности пласта способствует снижению коэффициента утечек через выработанное пространство. Как видно на рис. 4, корреляция между k_{yt} и m_b уступает корреляции k_{yt} на L_b , что обусловило необходимость дальнейших исследований связи k_{yt} с m_b . В наших исследованиях в качестве m_b принималось среднее из 9 – 11 измерений при данном положении линии лавы в выемочном поле, т.е. при данном значении L_b . Измерения m_b регулярно проводились геологической службой шахты, однако даты измерений m_b и k_{yt} не совпадали между собой. Данное обстоятельство обуславливало необходимость использования расчётного значения m_b , которое определялось как функция от L_b . Исследования показали, что корреляция между k_{yt} и m_b была отрицательной для всех наблюдаемых добычных участков. Наиболее существенной была корреляция между k_{yt} и m_b на участке 10 западной лавы пласта I_1 , что иллюстрирует рис. 5, а наименьшей – на участке 11 западной лавы (см. рис. 6), о чём будет сказано ниже.

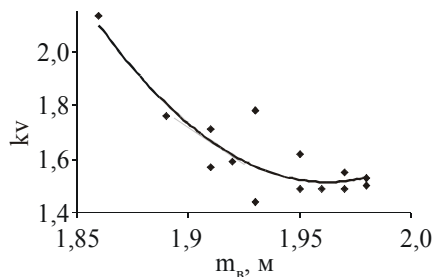


Рис. 5. График зависимости k_v от m_b для условий 10 западной лавы пласта I_1 ($y = 55,513x^2 - 217,89x + 215,31$; $R^2 = 0,7905$)

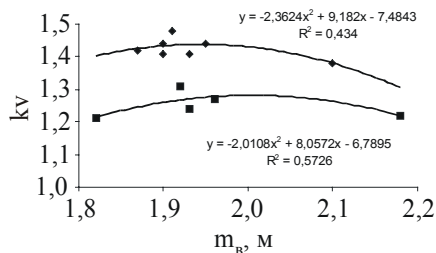


Рис. 6. График зависимости k_v от m_b для условий 11 западной лавы пласта I_1 : 1 – при $Q_{\text{вых}} < 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($y = -2,3624x^2 + 9,182x - 7,4843$; $R^2 = 0,434$); 2 – при $Q_{\text{вых}} > 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($y = -2,0108x^2 + 8,0572x - 6,7895$; $R^2 = 0,5726$)

Как следует из графика на рис. 6, в условиях равенства m_b значение k_v при $Q_{\text{вых}} > 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ гораздо меньше, чем при $Q_{\text{вых}} < 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$. Это можно объяснить тем, что с ростом $Q_{\text{уч}}$ увеличивались $Q_{\text{вых}}$ и $Q_{\text{ут}}$, но вследствие увеличения скорости потока менялся режим движения воздуха через выработанное пространство, который становился более энергозатратным. Допустим, переходной или ламинарный режим потока через выработанное пространство изменялся на турбулентный, что снижало проницаемость выработанного пространства. Режим потока через рабочее пространство лавы до и после изменения $Q_{\text{вых}}$ оставался неизменным (турбулентным), поэтому относительный рост $Q_{\text{вых}}$ превосходил относительный рост $Q_{\text{ут}}$, что и являлось причиной снижения k_v .

Отрицательная корреляция между $k_{\text{ут}}$ и m_b наблюдалась в разных горно-геологических условиях, при слабых и прочных кровлях. Это могло быть обусловлено особенностями поперечного сечения лав с крепью ЗКД - 90, за счёт которых увеличение m_b в большей степени снижало аэродинамическое сопротивление рабочего пространства лавы, чем выработанного. Всё это свидетельствовало о необходимости пересмотра и уточнения методики расчёта $k_{\text{ут}}$, предложенной в [1].

Кроме того представление о $k_{\text{ут}}$ как о некоторой постоянной величине следует считать неверным, так как между расходами воздуха $Q_{\text{уч}}$ и $Q_{\text{вых}}$ отсутствует, хотя бы примерно, постоянное соотношение, что могло бы явиться основанием для отнесения $k_{\text{ут}}$ к категории коэффициентов. Значение $k_{\text{ут}}$ следует рассматривать как функцию не-

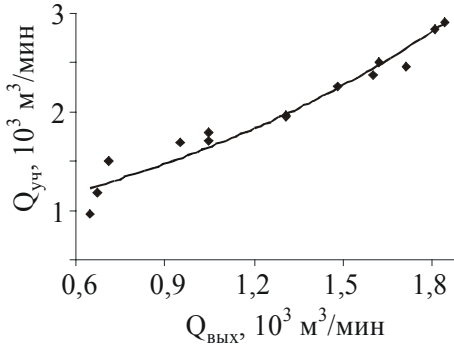


Рис. 7. График зависимости $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$ для участка 10 западной лавы пласта I_1 ($y = 770e^{0,0007x}$; $R^2 = 0,9159$)

множества параметров, одним из которых является $Q_{уч}$ или $Q_{вых}$. Об этом свидетельствует график на рис. 7.

Как следует из графика на рис. 7, между $Q_{уч}$ и $Q_{вых}$ могла существовать практически функциональная зависимость, представленная экспонентой. Данный вид зависимости являлся хотя и наиболее распространённым, согласно нашим данным, но всё же частным случаем. Имела место и линейная зависимость $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$, однако при этом прямая линия графика пересекала ось ординат в области $Q_{уч} \gg 0$, следовательно, при увеличении $Q_{вых}$ значение $k_{ут}$ снижалось. Всё это свидетельствует о том, что на стадии проектирования вентиляции значение $k_{ут}$ должно приниматься в зависимости от $Q_{вых}$ и данная зависимость должна быть найдена для разных горно-геологических и технологических условий.

Необходимо тщательное изучение видов зависимости $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$ в возможно более широком диапазоне изменения последней, так как в некоторых случаях эта зависимость может носить прерывистый характер (см. график на рис. 8).

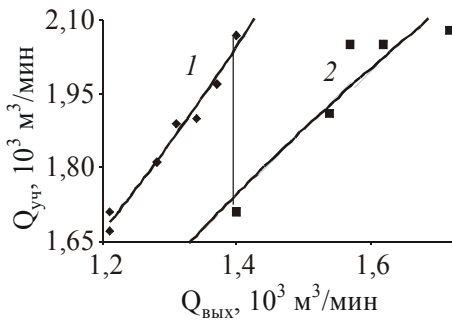


Рис. 8. График зависимости $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$ для условий 11 западной лавы пласта I_1 . 1 – $y = 495,42e^{0,001x}$, $R^2 = 0,9773$; 2 – $y = 1903,8 \ln(x) - 12045$, $R^2 = 0,864$

скольких параметров, одним из которых является $Q_{уч}$ или $Q_{вых}$. Об этом свидетельствует график на рис. 7.

Как следует из графика на рис. 7, между $Q_{уч}$ и $Q_{вых}$ могла существовать практически функциональная зависимость, представленная экспонентой. Данный вид зависимости являлся хотя и наиболее распространённым, согласно нашим данным, но всё же частным случаем. Имела место и линейная зависимость

Как следует из графика на рис. 8, в зависимости от расхода воздуха через лаву меняется характер зависимости $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$. При $Q_{вых} \leq 1400$ м³/мин зависимость $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$ экспоненциальная, при $Q_{вых} \geq 1400$ м³/мин – логарифмическая. Следует предполагать, что область $Q_{вых} = 1400$ м³/мин является граничной, где одна закономерность связи $Q_{уч}$ с $Q_{вых}$ сменяется другой закономерностью (Экспоненту

сменяет логарифмическая функция, являющейся обратной по отношению к экспоненте). При этом чётко проявляется тенденция к снижению $k_{\text{УТ}}$ в области $Q_{\text{ВЫХ}} > 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ при одной и той же вынимаемой мощности $m_{\text{в}}$ (см. рис. 6).

Разрыв функции $Q_{\text{УЧ}}$ от $Q_{\text{ВЫХ}}$ нельзя представить как результат возможной ошибки измерений, так как на графике в областях $Q_{\text{ВЫХ}} \leq 1400$ и $Q_{\text{ВЫХ}} \geq 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ чётко прослеживаются две разных зависимости $Q_{\text{УЧ}}$ от $Q_{\text{ВЫХ}}$ с коридорами ошибок, далеко отстоящими друг от друга по линии $Q_{\text{ВЫХ}} = 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ (Эти коридоры узки и не показаны на рис. 6). Можно также представить, что данный разрыв функции не является таким резким, как это представлено на рис. 8, а наличие «обрыва» на линии графика обусловлено ошибкой в определении абсцисс (значений $Q_{\text{ВЫХ}}$). Однако окончательный вывод по поводу возможного «обрыва» линии графика при $Q_{\text{ВЫХ}} = 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$ не может быть сделан на основании имеющихся данных.

График зависимости $Q_{\text{УЧ}}$ от $Q_{\text{ВЫХ}}$ характеризует вентиляционную сеть участка со следующими особенностями:

- схема проветривания комбинированная с раздвоением исходящей струи к центру и на фланг выемочного поля ($Q_{\text{Ц}}$ и $Q_{\text{Ф}}$);
- схема проветривания является Н – образной, поэтому $Q_{\text{УЧ}}$ должно определяться с учётом расхода воздуха, просачивающегося на фланг через перемычку, установленную на конвейерном штреке возле его сопряжения с фланговым ходком:

$$Q_{\text{УЧ}} = Q_{\text{к}} - Q_{\text{кк}} \quad (5);$$

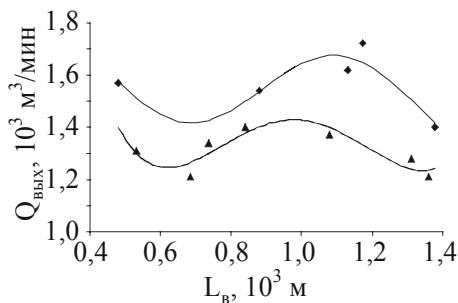


Рис. 9. Графики зависимости $Q_{\text{ВЫХ}}$ от длины выработанного пространства 11 западной лавы пласта 1₁: 1 – для $Q_{\text{ВЫХ}} > 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$; 2 – для $Q_{\text{ВЫХ}} < 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$

– породы непосредственной и основной кровли пласта устойчивы, а разрабатываемый пласт опасен по динамическим явлениям, которые имели место при отработке выемочного поля 11 западной лавы;

– скорость подвигания лавы составляла 4 – 5 м/сутки.

Характер зависимости $Q_{\text{ВЫХ}}$ от $L_{\text{В}}$ представлен на рис. 9, графики которого свидетельствуют, что в пределах

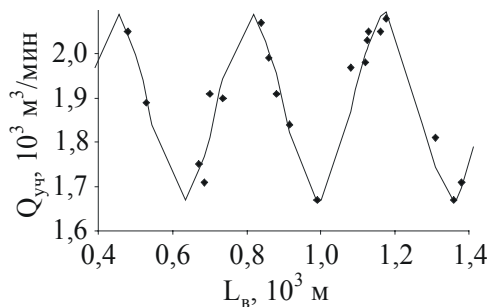


Рис. 10. График зависимости расхода воздуха $Q_{уч}$ по участку 11 западной лавы от длины выработанного пространства $L_{в}$

нить сдвиг по фазе, то кривые становятся, практически, эквидистантными.

Однако сходство кривых на рис. 9 ещё не объясняет сущности явления, обусловившего смену характера зависимости $Q_{уч}$ от $Q_{вых}$ при $Q_{вых} \geq 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$, но подкрепляет предположение о существовании самого факта смены характера данной зависимости.

На рис. 10 представлен график зависимости $Q_{уч}$ от $L_{в}$, из которого следует, что изменения $Q_{уч}$ во всём диапазоне $L_{в}$ подчиняется одной и той же зависимости, выражаемой формулой функционального ряда (данный ряд предполагает возможность резкого изменения ординаты при незначительном изменении абсциссы. Возможна также аппроксимация экспериментальных данных рис. 10 обычной синусоидой, которая обуславливает невысокий $\eta = 0,81$). Однако характер зависимости $Q_{уч}$ от $L_{в}$, который представлен на рис. 10, нельзя считать распространённым. Скорее всего, это редкий случай. Для условий прямоточного проветривания расходы $Q_{уч}$ и $Q_{вых}$ закономерно убывают с ростом $L_{в}$, так как увеличивается аэродинамическое сопротивление $R_{ф}$ участка вентиляционного штрека позади лавы. Для комбинированной схемы проветривания с раздвоением исходящей из лавы струи воздуха увеличение $R_{ф}$ компенсируется снижением аэродинамического сопротивления струе, направляемой в сторону массива.

Для построения линии графика на рис. 10 и для отыскания значений коэффициентов мы ограничились тремя первыми членами функционального ряда, что позволило достаточно хорошо ($\eta > 0,965$) аппроксимировать экспериментальные значения $Q_{уч}$. Данный ряд имеет вид

каждого из двух диапазонов $Q_{вых}$, $Q_{вых} < 1400$ и $Q_{вых} > 1400 \text{ м}^3/\text{мин}$, существует свое, синусоидальное, распределение $Q_{вых}$ по $L_{в}$. Кривые, отражающие характер данного распределения, сдвинуты по фазе относительно друг друга: ординаты нижней кривой опережают по фазе ординаты верхней, примерно, на 50 м. Если же устранить сдвиг по фазе, то кривые становятся, практически, эквидистантными.

$$Q_{\text{уч}} = 1880 + 205[\sin(0,0172(L_B - 354)) - \frac{1}{9} \sin(0,0517(L_B - 354)) + \frac{1}{25} \sin(0,0862(L_B - 354)) - \dots]. \quad (6)$$

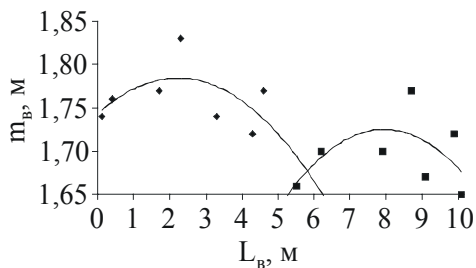


Рис. 11. График распределения вынимаемой мощности пласта m_b по длине L_b выемочного поля 17 восточной лавы пласта m_3

Как следует из графиков на рис. 9 и 10, по мере движения лавы расходы воздуха $Q_{\text{уч}}$ и $Q_{\text{вых}}$ периодически колеблются относительно определённых уровней. Такая периодичность, скорее всего, является следствием периодичности процессов опускания кровли и периодичности воздействия на пласт опорного давления, которое может влиять на m_b . Такое влияние с большей вероятностью может быть

обнаружено при разработке менее прочных пластов и при большей глубине разработки. Вероятно поэтому для менее прочного пласта m_3 при изменении L_b периодичность изменения m_b проявляется более чётко (см. рис. 3 и 11), чем для более прочного пласта l_1 (см. рис. 12, 13).

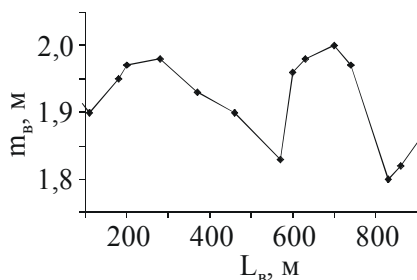


Рис. 12. График распределения m_b по длине L_b выемочного поля 10 западной лавы пласта l_1

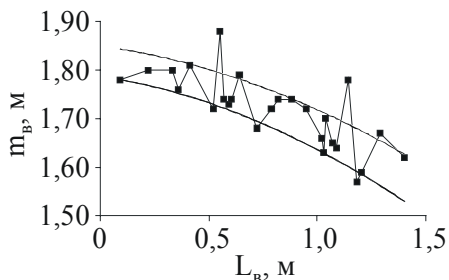


Рис. 13. График распределения m_b по длине выемочного поля 11 западной лавы пласта l_1

Технико-экономические проблемы горного производства

Как видно по рис. 13, величина m_v в 11 западной лаве снижалась по мере отхода лавы от монтажного ходка и это снижение, границы которого обозначены двумя параболой, было обусловлено геологическими факторами. Изменения величины m_v в границах данных парабол могло быть следствием техногенных причин. Рис. 6 свидетельствует, что плавное изменение m_v слабо влияет на k_v , а в большей мере влияет расход воздуха по лаве.

Результаты проведенных исследований не могут рассматриваться как окончательные. Скорее их можно считать началом весьма трудоёмких исследований возможных связей расходов воздуха по выработкам и выработанному пространству участка с процессами опускания кровли. Эта связь, будучи установленной, позволит более эффективно осуществлять оперативное управление проветриванием добычных участков. В настоящее время можно только констатировать многообразие факторов, влияющих на k_v , и неопределённость их влияния на распределение воздуха между рабочим и выработанным пространством лавы.

Выводы

В настоящее время утечка воздуха через выработанное пространство не только усугубляет проветривание добычных участков, но и препятствует утилизации метановоздушной смеси, каптируемой из выработанного пространства изолированным газоотводом. Коэффициент утечек воздуха через выработанное пространство, расходы воздуха по лаве и участку в определенных горно - геологических условиях периодически изменяются по мере удаления лавы от монтажного ходка. Коэффициент утечек воздуха не следует рассматривать как постоянную величину, так как он является функцией расхода воздуха через рабочее пространство лавы. При увеличении вынимаемой мощности пласта коэффициент утечек снижается, а не растёт, как это предусмотрено руководством по проектированию вентиляции. Необходимо дальнейшее исследование факторов, влияющих на утечку воздуха через выработанное пространство высоконагруженных лав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Государственный нормативный акт об охране труда. Киев, 1994.– 311 с.