

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.33.013.3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА ПО ДЛИНЕ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

С. Василевский¹, П. Ямроз²

Научно-исследовательский институт механики пластов Польской Академии наук,

¹E-mail: wasilewski@imgpan.pl, ²jamroz@imgpan.pl,
ул. Реймонта, 27, 30-059, г. Краков, Польша

Представлен анализ экспериментальных данных, включающих пространственно-временное распределение концентраций метана в условиях разработки очистным забоем с помощью врубовых машин. Определены источники выброса метана и характер его распространения по длине сплошного забоя и в районе смежной выработки. Проведенный анализ направлен на подготовку входных данных для верификации цифровых моделей области очистного забоя, а также для воспроизведения алгоритма управления универсальной врубовой машины, используемой для разработки пластов в условиях риска метановыделения. Объект исследования — очистной забой 841а, пласт 405/2 на шахте Бельшовице. По длине забоя установлены 9 индикаторов метана, включая 2 непосредственно в зоне забоя, используемые в качестве стандартной меры по предупреждению аварийных ситуаций при выбросе метана. В ходе экспериментального исследования размещены 10 дополнительных индикаторов в очистном забое и в районах смежных выработок, из них 4 непосредственно в зоне забоя.

Вентиляционная система шахты, концентрация метана, очистной забой

DOI: 10.15372/FTPRPI20180617

В практике горных работ принято считать, что выработки большой протяженности являются зонами высокой опасности естественного и техногенного характера. На протяжении многих лет в исследовательских центрах по добыче полезных ископаемых ведутся технические разработки машин с дистанционным автоматизированным управлением без непосредственного присутствия машиниста в кабине комбайна. В 2002–2013 гг. на шахтах Польши произошло 13 случаев возгораний и взрывов метана, инициированные фрикционным искрением при работе комбайна.

Во всем мире, в том числе и в Польше, использование механизированных горнодобывающих комплексов — широко распространенный способ при подземной разработке каменноугольных пластов. С целью обеспечения безопасности работников шахт, а также для увеличения объемов добычи во многих исследовательских центрах и промышленных областях ведутся работы, связанные с автоматизацией и контролем управления комбайнов, являющихся средствами проведения горных работ. Это сложная задача, решение которой зависит от горнотехнических и геологических условий, а также разнообразных факторов, влияющих на эффектив-

ность сплошной системы разработки угля. Выемочные комплексы состоят из врубовой машины, которая производит выемку и погрузку добытого угля, скребковых конвейеров, расположенных в очистном забое и во вспомогательном штреке. Они перемещают добываемый уголь с места выработки к погрузочным комплексам (система ленточных конвейеров), сюда также входят детали механизированной крепи и вспомогательные устройства.

Статистические данные показывают, что при разработке пластов с увеличением глубины происходит увеличение метановыделения, что повышает опасность возникновения аварии на участках очистной выработки. Концентрация метана в воздушном потоке зависит от интенсивности метановыделения и мощности вентиляционной системы. Источники выделения метана — угольные пласты, вмещающие породы, разрыхленный уголь на забойном конвейере, поверхность после прохода очистного комбайна и оставленные горные выработки. Интенсивность выделения зависит от свойств пласта, параметров забоя, особенностей трещинообразования и дробления в углепородном массиве, а также от производительности очистного комбайна.

Испытания в горнодобывающей промышленности, проведенные в Польше и по всему миру, свидетельствуют о том, что выделение метана представляет опасность и подвергает высокому риску машинистов очистных комбайнов в условиях подземной выработки большой протяженности; вместе с тем оно снижает эффективность разработки вследствие ограничения непрерывности работы выемочных комплексов на каменноугольных месторождениях в условиях опасности выбросов метана [1–3]. Метановыделение — значимый фактор, снижающий объемы добычи после остановки работ вследствие отключения электроэнергии из-за превышения допустимой концентрации метана в очистном забое. Осуществление сложных операций, связанных с подачей электроэнергии, приводит к длительным простоям выемочного комплекса, поэтому во избежание аварийного отключения питания и потерь объемов добываемого угля принимают следующие меры.

В шахтах, где наблюдается выделение метана, применяются различные способы решения проблемы отключения электроэнергии, например остановка или замедление хода очистных комбайнов. Для этого устанавливаются дополнительные датчики метана, а также используются переносные анализаторы метана, когда необходимо измерить концентрацию метана в выходящем потоке воздуха непосредственно перед очистным комбайном в зоне разработки.

В связи с существующей опасностью выброса метана в зоне очистного забоя главная цель — сокращение количества людей на наиболее опасных участках во время процесса выемки. Для этого предпринимались попытки разработать алгоритм автоматизированной системы управления работой очистного комбайна [4]. Проведены экспериментальные исследования и измерения для определения мгновенных изменений параметров рудничной атмосферы в выемочных участках шахты в зависимости от направления движения воздушных потоков на каждом участке. Исследовано влияние выемочных комплексов и очистных комбайнов на концентрацию метана в рудничной атмосфере очистного забоя и смежных выработках. Другим важным элементом является указание и выбор места для проведения измерений (расположение датчика) в зависимости от конкретных условий с целью интеграции в систему обратной связи очистного комбайна. Решение данной проблемы положено в основу инновационного подхода в автоматизации выемочного комплекса в условиях выделения метана. Это позволит увеличить объемы добычи и обеспечить безопасность рабочих за счет использования дистанционного управления врубовыми машинами.

Для построения и проверки правильности цифровых моделей, наряду с экспериментальными исследованиями, велась регистрация параметров для возможности прогнозирования оценки состояния вентиляционной системы и уровня риска в зоне забоя, являющейся наиболее опасной для работников шахты [5–8].

ПАРАМЕТРЫ И УСЛОВИЯ ПРОВОДИМОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки автоматизированной системы управления выемочным комплексом необходимы знания механизмов и взаимосвязей метановыделения и процесса смешивания метана с приточным воздухом в зависимости от интенсивности и метода проведения горных работ. До настоящего времени выполнено несколько уникальных исследований с целью изучения описываемых процессов.

Проведенные эксперименты и наблюдения на шахте Будрык [9, 10] выявили высокую изменчивость скорости движения воздушных масс и концентрации метана во время работы очистного комбайна и другой техники в районе забоя. Установлено, что врубовая машина, обладая большими габаритами, в процессе работы, представляет собой движущееся препятствие, перекрывающее рабочий участок поперечного сечения забоя, что приводит к локальному нарушению движения воздушной массы и увеличению концентрации метана, а также к поступлению метана с участков заброшенных выработок. Описанные явления связаны с прямой зависимостью направления воздушного потока от движения врубовой машины. Наблюдалось повышение концентрации метана в направлении воздушного потока; направление хода очистного комбайна в зависимости от направления движения воздуха также влияло на концентрацию метана. В [9] описывается обоснование моделей шахтной системы вентиляции, где особое внимание уделено метановыделению в процессе шахтных работ с применением врубовой машины в очистном забое при эксплуатации системы обрушения пород кровли. Обоснование осуществлялось при помощи компьютерного моделирования выбранного участка с анализом влияния работы очистного комбайна и сопутствующего метановыделения на распространение метана и его концентрацию в воздухе. Результаты моделирования сравнивались с данными датчиков метана мониторинговой системы шахты во время проведения измерений. Для этой цели использовались восемь датчиков концентрации метана, три из которых устанавливались в области забоя. Эксперимент проводился в течение нескольких часов, в ходе которых система мониторинга воздушных масс, обычно используемая для предупреждения опасных ситуаций, связанных с выбросом метана в шахтах, фиксировала параметры. Оказалось, что стандартной разрешающей способности датчиков метана, составляющей 0.1 % CH_4 , недостаточно для достижения целей исследования. Дополнительно использовалась портативная система контроля и измерительное оборудование; проведена синхронизация времени дополнительного оборудования и приборов для выполнения наблюдений.

Эксперименты на шахте Бельшовице стали продолжением предыдущих испытаний, но применено новое специализированное оборудование. Цель данных исследований — выявление зоны и степени нарушения параметров воздуха в области очистного забоя вследствие работы комбайна и шахтного оборудования выемочного комплекса. По сравнению с предыдущими испытаниями, настоящее включало рабочий цикл комбайна по ходу продвижения его навстречу, т. е. в направлении воздушного потока, и в обратном направлении во время зачистки забоя. Все измерительные приборы размещались в зоне забоя и интегрировались в испытательную систему. В процессе испытаний использовались стандартные приборы системы мониторинга, применяемые в качестве метанометрической защиты в условиях шахты. Таким образом созданы условия для осуществления длительных наблюдений в очистном забое, что позволило провести из-

мерения. В [10] показаны результаты долгосрочного наблюдения за параметрами рудничной атмосферы шахты с использованием повышенной скорости движения воздушных масс, датчика концентрации метана и датчика, расположенного в месте нахождения врубовой машины. В ходе эксперимента исследовалось влияние работы врубовой машины на рассредоточение метана, характеристики воздушного потока и распределение давления в очистном забое. Результаты испытаний использованы для обоснования методики применяемой программы VentZrobby для определения выбросов метана в ходе шахтных работ. Работа врубовой машины оценивалась по двум циклам: во время проходки комбайна в направлении движения воздушного потока и во время простоя комбайна в периоды остановки работы машин.

Последние испытания, включающие регистрацию концентрации метана по длине очистного забоя, проводились в забое Сw-4 на шахте КWK Будрык в 2013 г. Исследование направлено на определение локальных концентраций метана вдоль выемочной выработки, используя распределенную систему контроля с увеличением количества датчиков. В [11] частично представлены записи параметров рудничной атмосферы шахты, указывающие на повышенное метановыделение в канале очистного забоя даже при отсутствии работ по выемке угля.

По итогам проведенных экспериментов и испытаний на моделях отметим, что основная цель наблюдений — определение источников метановыделения в зоне очистного забоя. Известно, что источник выделения метана образуется вследствие действия врубовой машины во время вскрытия угольного пласта и измельчения угля, после чего выделение метана из угля может происходить как на скребковом конвейере в очистном забое, так и за пределами очистного забоя, вдоль окаточной выработки. Значимым источником выделения метана в очистном забое может оказаться завал на выработанном пространстве, в таком случае сложно измерить концентрацию метана, а следовательно, его доля в пространстве очистного забоя оценивается по остатку.

Вторая цель испытаний — определение закономерности распределения метана по длине очистного забоя с целью установления возможного местоположения датчиков для обеспечения эффективной метанометрической защиты в очистном забое и интеграции датчика(ов) в систему управления врубовой машины. Конечная цель испытаний — возможность контроля скорости проведения горных работ в зависимости от изменения концентрации метана и его распределения вдоль очистного забоя для того, чтобы сохранить непрерывность разработки и минимизировать время простоя техники. Управление скоростью выемки зависит от многих факторов, например на шахте Будрык играли роль горно-геологические условия. Несмотря на сложность поставленной задачи, опыт показал, что это возможно.

В то же время результаты показали, что настоящие исследования направлены преимущественно на изучение проблем метановыделения с определением их источников. Это дало возможность для развития и обоснования моделей основных источников выделения метана (выработанное пространство, разрыхленный уголь). В ходе компьютерного моделирования предприняты попытки объединить различные источники метановыделения в очистном забое. Для того чтобы использовать данные измерений с целью моделирования контроля управления выемочного комплекса, необходимо провести комплексный анализ полученных кривых концентраций метана в различных частях проветриваемой области для определения точек размещения датчиков, интегрированных в систему управления выемочного комплекса.

В настоящей работе представлен анализ, основанный на результатах измерений, проведенных в течение рабочей смены и данных, полученных во время экспериментов в действующем очистном забое 841a, пласт 405/2wg на глубине 1000 м, шахта КWK Бельшовице.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве места для проведения наблюдений выбран очистной забой 841а, пласт 405/2wg на глубине 1000 м на шахте Бельшовице (выемка горизонтальными слоями и обрушение пород кровли). Согласно техническим и геологическим данным, высота очистного забоя составляла 2.4–3.0 м, длина забоя 135–150 м, длина панели 890 м. В соответствии с проектом ширина вруба комбайна 0.8 м, по опасности выброса метана разрабатываемый угольный пласт отнесен к категории IV, II группа по самовозгоранию, взрывоопасность класса III и по опасности взрыва угольной пыли пласт отнесен к классу В. Интенсивность вентиляции метана в забое 841а составляла $15.14 \text{ м}^3 \text{CH}_4/\text{мин}$, с абсолютным показателем интенсивности $18.08 \text{ м}^3 \text{CH}_4/\text{мин}$. Скорость потока воздуха на входе в забой равна 1200, а на выходе из забоя — $1600 \text{ м}^3/\text{мин}$ (подача свежего воздуха $400 \text{ м}^3/\text{мин}$). Длина выемочной выработки 134.7 м (суточная добыча 1507 т/день). Выработка проводилась в смены В1 и С1, с прекращением работ по выемке в смены А и В1, а также по субботам и воскресеньям.

В очистном забое 841а с целью обеспечения метанометрической защиты и мониторинга параметров вентиляции применялась система контроля непрерывного определения концентрации метана с возможностью отключения электрооборудования в течение 15 мин.

Контроль распространения метана по длине очистного забоя 841а осуществлялся с использованием дополнительной экспериментальной системы, установленной в зоне забоя. Для этого дополнительные датчики метана размещались в зоне поступающего свежего воздуха в очистном забое 841а в вентиляционном штреке и в зоне отработанного воздуха очистного забоя в конвейерном штреке. Источники поступления метана непосредственно в очистной забой контролировались датчиками метана, расположенными вдоль стенки канала. Для обеспечения оптимального соотношения с помощью дополнительных датчиков, установленных над конвейером, транспортирующим добытый уголь, можно оценить концентрацию метана, выделяющегося из разрыхленного угля и смешивающегося с потоком свежего воздуха в вентиляционном штреке очистного забоя 841а. Список датчиков метана, установленных в области забоя 841а, представлен в табл. 1, а их местоположение обозначено на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Датчики определения концентрации метана на контрольном участке

Область забоя	Шахтная система контроля вентиляции	Дополнительная измерительная система
Вентиляционный штрек	2 датчика метана, 1 датчик скорости воздушного потока	3 датчика метана, 1 датчик скорости воздушного потока
Забой с указанием углов и вентиляционного паруса	4 датчика метана	4 датчика метана, 1 датчик скорости воздушного потока, 3 датчика температуры, 3 датчика влажности, 3 датчика барометрического давления
Конвейерный штрек	4 датчика метана, 1 датчик скорости воздушного потока	3 датчика метана

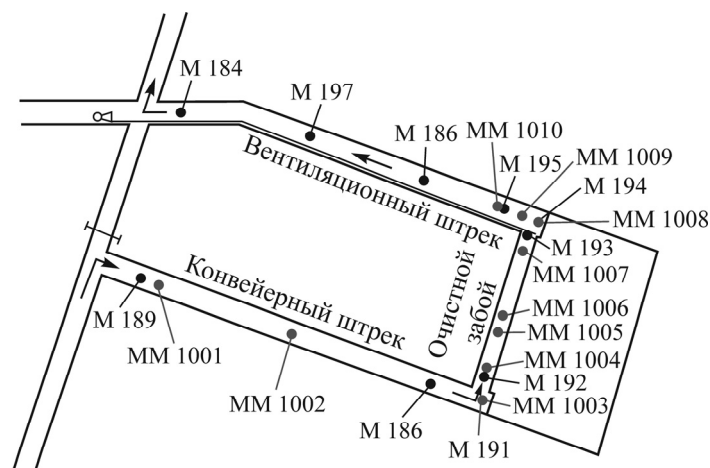


Рис. 1. Зона проветривания очистного забоя 841а, пласт 405/1

Датчики метана с нумерацией М 184–М 197 обеспечивали метанометрическую защиту по длине очистного забоя в шахтной системе мониторинга вентиляции, тогда как сенсоры под номерами ММ 1001–ММ 1010 интегрированы в дополнительную измерительную систему. Местоположение датчиков метана обеих систем измерения показано на рис. 2 с учетом расстояния от датчиков до зоны проветривания на входе.

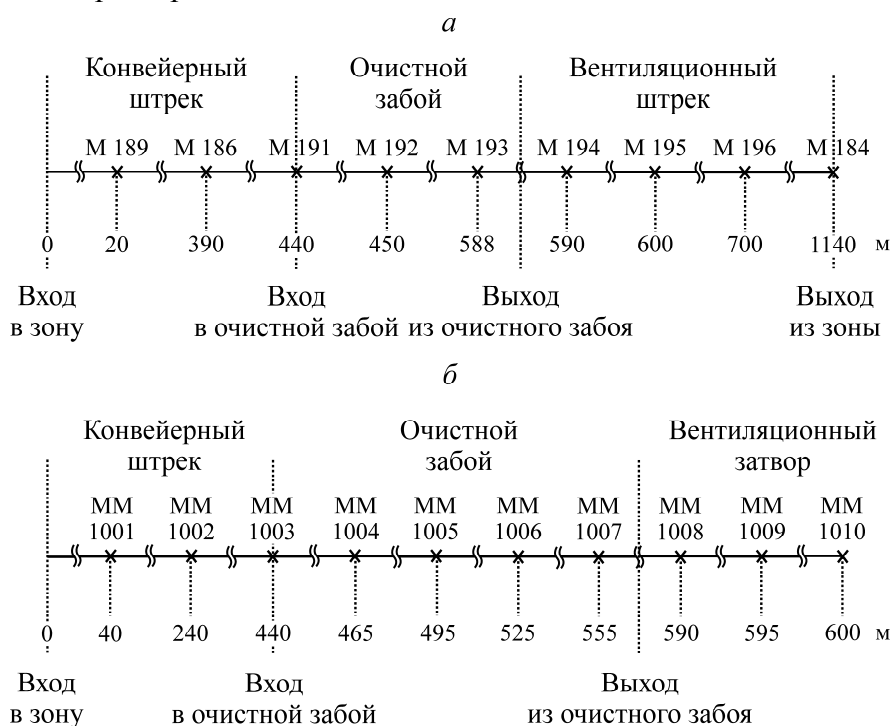


Рис. 2. Расположение датчиков метана в шахтной системе вентиляции (а) и дополнительной системы контроля (б) на расстоянии от входа в зону проветривания

Датчики метана, установленные в зоне очистного забоя, регистрировали концентрацию метана с точностью до 0.1 % CH_4 в шахтной системе контроля вентиляции, в то время как датчики метана дополнительной системы контроля фиксировали значения концентрации метана с точностью до 0.01 % CH_4 .

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПО ДЛИНЕ ЗАБОЯ 841a

Анализ распределения концентраций метана по длине очистного забоя 841a, пласт 405/2wg проводился 01.10.2009 г. в течение рабочей смены с 3⁰⁰ до 7⁰⁰. Результаты системы контроля подходят только в качестве приблизительного определения уровня концентрации метана (рис. 3). Низкая разрешающая способность датчиков метана в связи с изменчивостью сигнала не позволяет отследить внезапные изменения концентрации метана, которые за время проведения наблюдений часто возникали на уровне разрешающей способности данных приборов.

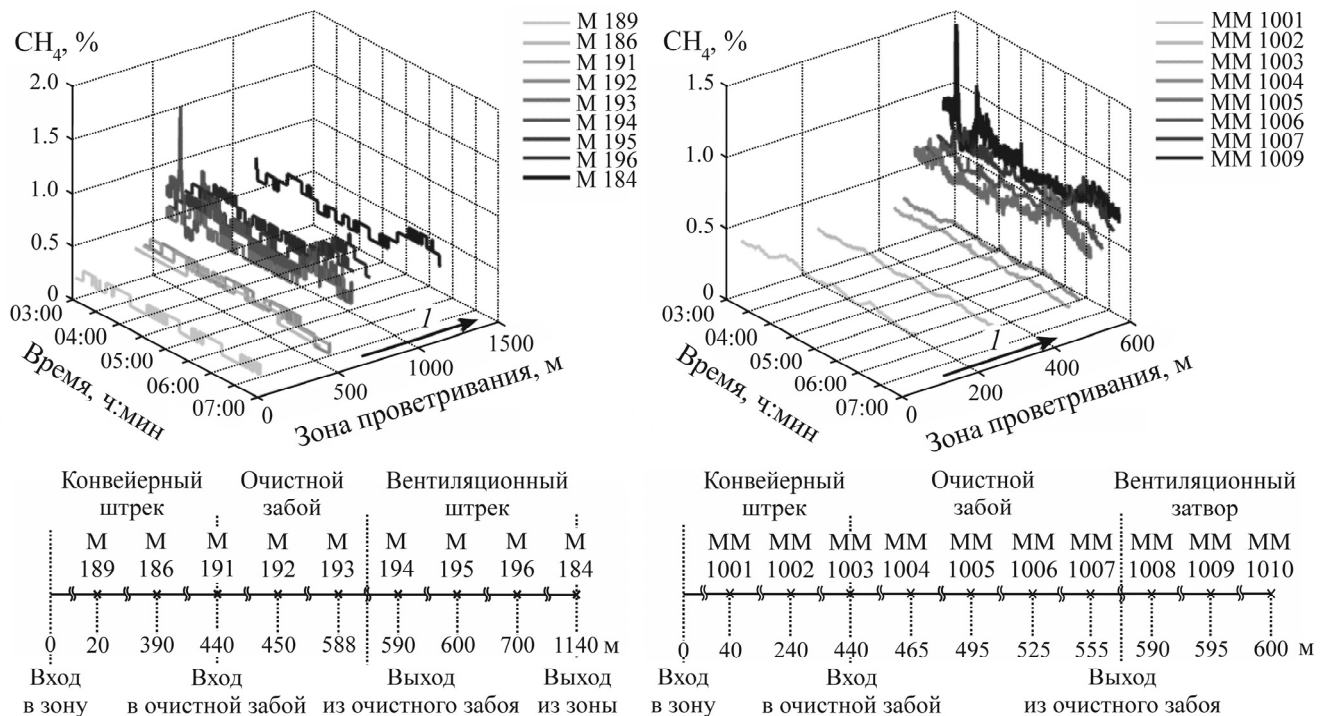


Рис. 3. Концентрация метана в очистном забое 841a: *I* — направление воздушного потока

Анализ изменений концентраций метана в зоне проветривания очистного забоя во время работы врубового комбайна основан на данных, полученных датчиками метана дополнительной системы контроля, и проводился для отдельных участков очистного забоя (вентиляционный штрек, очистной забой, вентиляционный затвор и конвейерный штрек).

Конвейерный штрек. Данные по содержанию метана в зоне конвейерного штрека над ленточным конвейером, транспортирующим добываемый уголь, показывают высокое изменение концентраций метана (рис. 4). Повышенная концентрация метана (ММ 1001) 0.37–0.45 % CH₄ наблюдалась в зоне входа. Незначительное ее снижение до 0.30 % CH₄ наблюдалось в центральной части вентиляционного штрека (ММ 1002). Однако на входе в очистной забой концентрации минимальные и изменяются от 0.25 до 0.28 % CH₄ (ММ 1003). Увеличение концентрации метана отмечалось на участках, параллельных движению транспортируемой угольной массы и в направлении, противоположном потоку воздуха (наиболее высокие значения в области входного затвора зафиксированы датчиком ММ 1001). Такие изменения концентраций вдоль вентиляционного штрека вызваны постепенным смешиванием концентраций метана, выделяемого из разрыхленной угольной массы в процессе дегазации, особенно в районе пересечения конвейерного штрека и наклонной выработки, в месте расположения точки перехода между конвейерами.

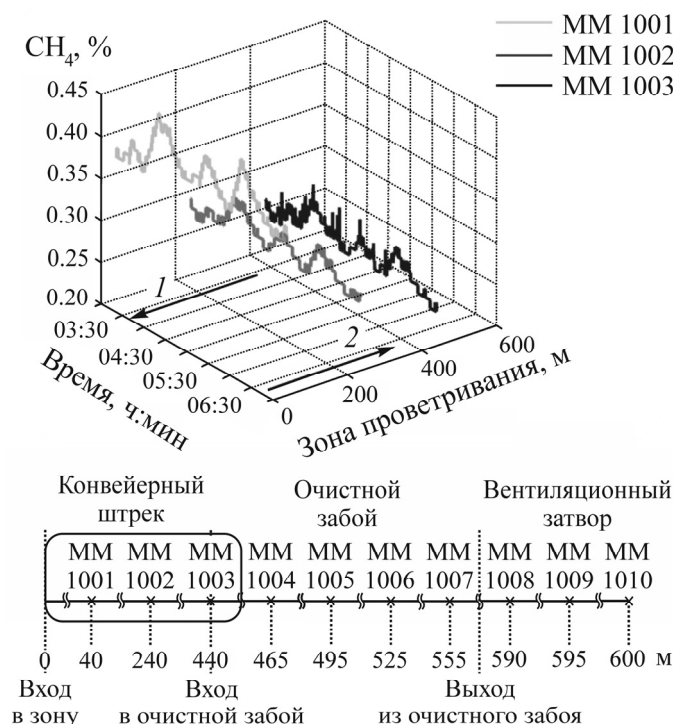


Рис. 4. Концентрации метана — вентиляционный штрек, наклонная выработка, сопряженная с контрольной зоной: 1 — направление транспортировки угля; 2 — направление воздушного потока

Дополнительное внимание уделено анализу изменчивости сигнала при регистрации концентраций метана всех датчиков, расположенных в конвейерном штреке, в течение всего периода измерений. Изменение концентраций метана носит устойчивый характер по отношению ко всем полученным данным и возникает в соответствующее время. Можно выделить три периода повышения и понижения концентрации метана, которые могут быть связаны с работой врубовой машины, особенно в периоды комбайновой выемки и транспортировки угольной массы. Текущие координаты и продвижение врубовой машины показаны на рис. 5.

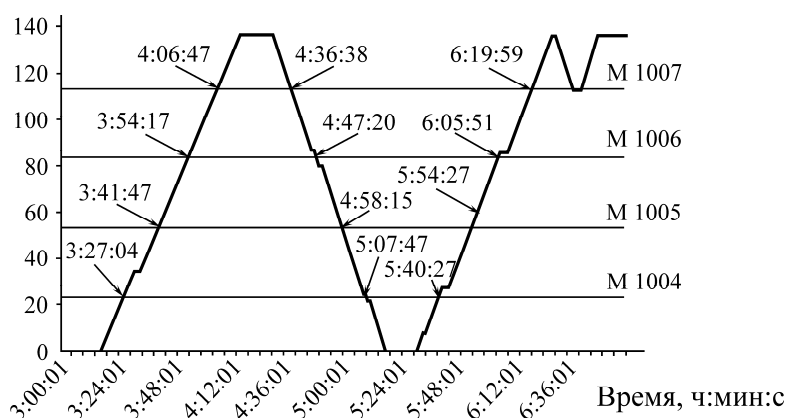


Рис. 5. Продвижение врубового комбайна во время проведения эксперимента

Очистной забой. Анализ данных измерений концентрации метана в области забоя указывает на их повышение в связи с расположением датчиков по длине забоя. Датчики, находящиеся около входа (ММ 1003 — у входа и ММ 1004 — на расстоянии 1/4 длины очистного забоя),

зафиксировали концентрации на уровне таковых в вентиляционном штреке при сохраняемой изменчивости сигнала. В то же время концентрация метана, зарегистрированная в забое 841а, указывает на явное повышение уровня при движении вверх вдоль забоя, особенно это заметно по датчикам, размещенным в другой половине сплошного забоя ММ 1005 – ММ 1007. Стоит подчеркнуть схожий характер внезапных отклонений концентрации, связанный с процессом выработки и эксплуатацией техники в очистном забое. Зафиксированные значения концентрации метана показаны на рис. 6.

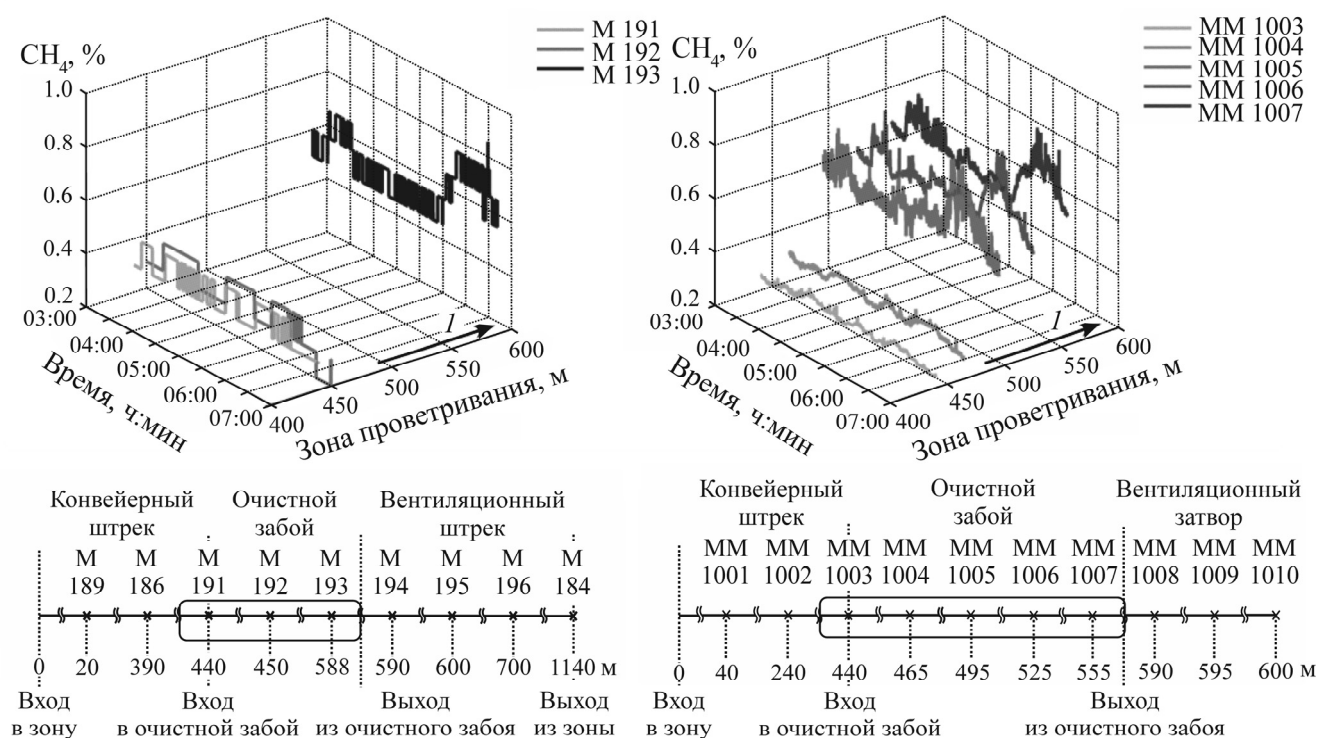


Рис. 6. Зафиксированная концентрация метана по длине очистного забоя 841а: I — направление воздушного потока

Вентиляционный затвор. Во время проведения испытаний три датчика метана были установлены на боковой стенке вентиляционного затвора (рис. 7).

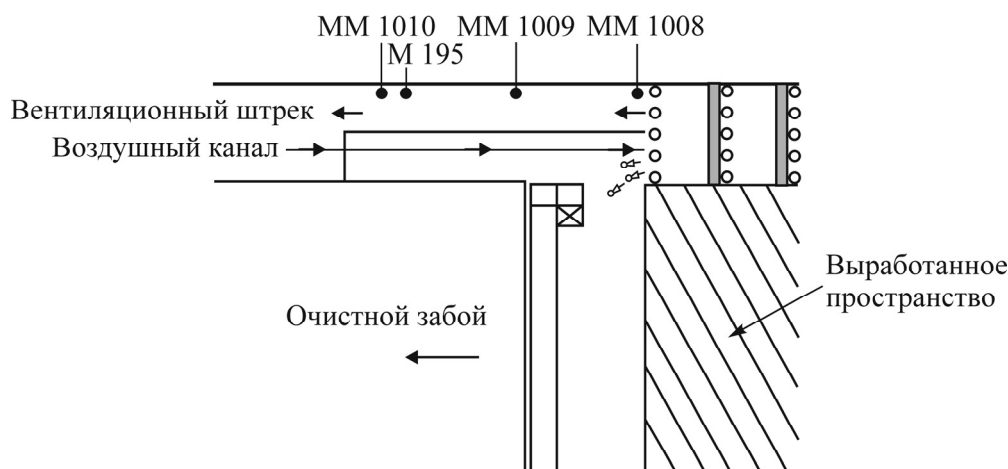


Рис. 7. Расположение датчиков — вентиляционный затвор

Зона расположения датчиков является областью интенсивного смешивания метана, приносимого из очистного забоя, с потоком воздуха из зоны разработки угля и выработанного пространства, а также с потоками свежего воздуха, поставляемого к выходу забоя вентиляционным каналом. Несмотря на схожесть изменчивости сигналов при регистрации метана, зафиксированные концентрации в зоне вентиляционного затвора показали, что полученные значения различались в зависимости от локализации датчиков метана (рис. 8).

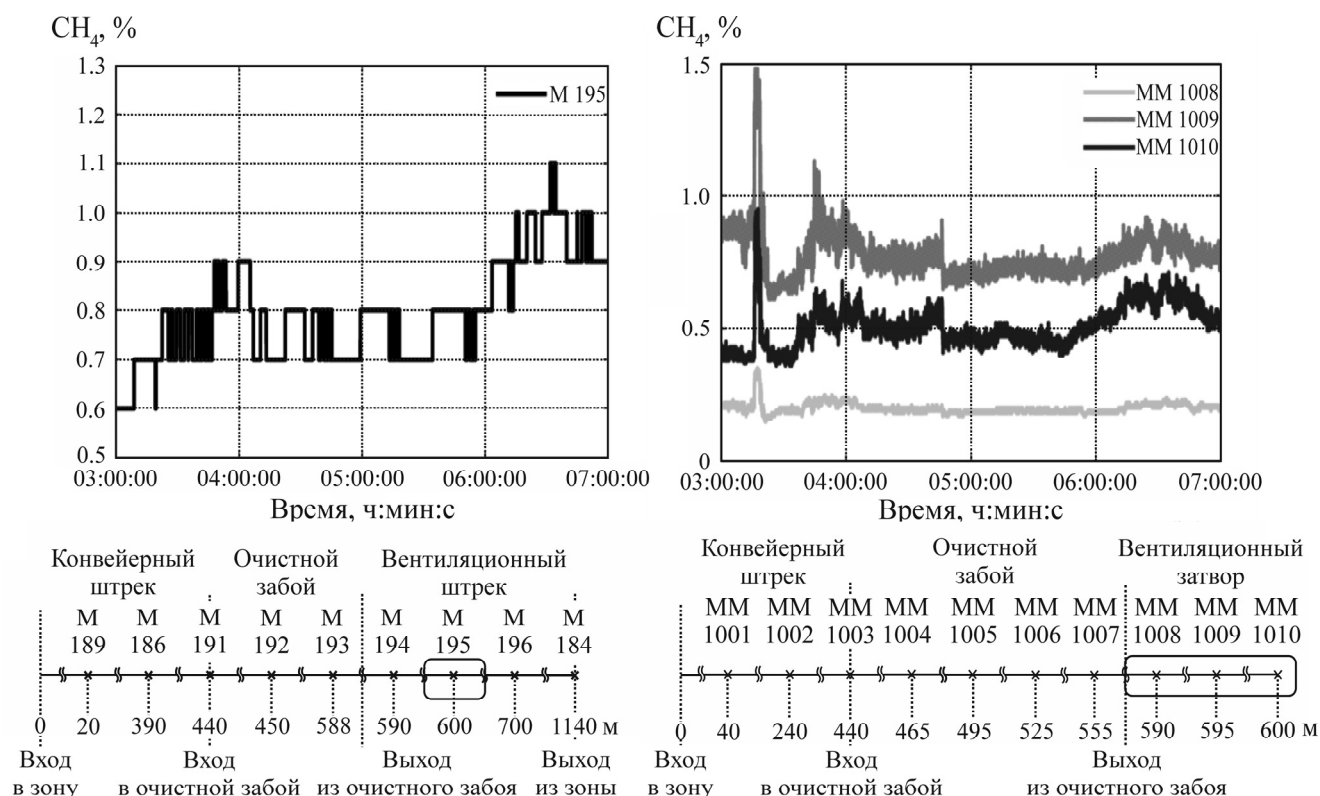


Рис. 8. Зафиксированная концентрация метана — вентиляционный затвор

Наименьшие значения концентрации метана зафиксированы датчиком MM 1008, расположенным вблизи выхода очистного забоя и рядом с выходным отверстием вентиляционной трубы. Вдоль самого вентиляционного затвора наблюдалось изменение концентрации метана с тенденциями сходных изменений. Наивысшее среднее значение концентрации метана отмечено датчиком MM 1009 системы контроля и датчиком системы мониторинга шахты M 195.

Вентиляционный штрек. На выходе из исследуемой зоны проветривания на расстоянии 570 м от сопряжения очистного забоя с вентиляционным штреком расположен датчик шахтной системы контроля вентиляции M 184. Кривые концентраций метана в потоке отработанного воздуха в области выхода наблюдаемой зоны проветривания указывают на схожесть характера изменений с данными датчиков дополнительной системы контроля, стабилизирующихся за пределами вентиляционного затвора. Во время проведения испытания концентрация метана, зафиксированная датчиком M 184, удерживалась на уровне или чуть превышало диапазон изменений концентрации в очистном забое. Сравнение концентраций, полученных датчиком M 193 на выходе из очистного забоя, показано на рис. 9.

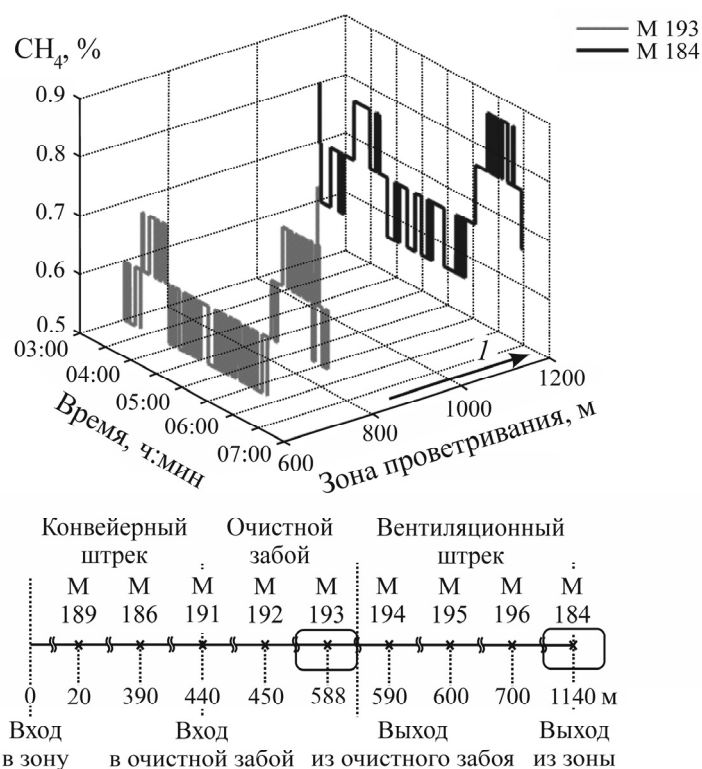


Рис. 9. Зафиксированная концентрация метана — конвейерный штрек

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования стали результатом попытки определить закономерность метановыделения по длине очистного забоя и выемочных выработок. Данные, полученные с использованием обеих измерительных систем, указывают на разные источники выделения метана в наиболее опасных зонах горной выработки.

Представленный анализ распространения метана по длине выработки помог определить возможное расположение датчиков метана на второй половине выемочной выработки для обеспечения автоматизированной системы добычи и безопасности процесса. Размещение таких датчиков за зоной выхода очистного забоя (в зоне смешивания метана и чистого воздуха) требует дополнительного анализа размера области смешивания и распространения выделяемого метана в пределах этой зоны.

Анализ данных, зарегистрированных системой мониторинга шахтной вентиляции, показал, что разрешающая способность датчиков метана, используемых в данной системе, недостаточна для достижения целей исследования, а именно оценки влияния работы очистного комбайна на изменение концентрации метана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cecala A. B., Zimmer J. A., and Thimons E. D. Determination of optimal longwall face methane monitoring locations, Min. Eng., 1994.
2. Schatzel S. J., Karacan C. O., Krog R. B., Esterhuizen G. S., and Goodman V. R. Guidelines for the prediction and control of methane emissions on longwalls, NIOSH, Circular 9502, Pittsburgh, 2008.

3. **Kissell F. N. and Cecala A. B.** Preventing methane ignitions at longwall faces CHAPTER 4 in Handbook for methane control in mining, NIOSH IC 9486 Information Circular, 2006.
4. **Schaeffer M.** Longwall automation, State of the Art. Joy Corp., Mine Expo Int., Las Vegas, 2008.
5. **Dziurzyński W. and Krach A.** Mathematical model of methane emission caused by a collapse of rock mass crump, Arch. Min. Sci., 2001, Vol. 46, No. 4. — P. 433–449.
6. **Dziurzyński W., Krach A., and Palka T.** Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling, Energies, 2017, 10. — Paper 1451.
7. **Wala A. M., Yingling J. C., Zhang J., and Ray R.** Validation study of computational fluid dynamics as a tool for mine ventilation design, Proc. of the 6th Int. Mine Ventilation Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, 1997.
8. **Kumar P., Mishra D. P., Panigrahi D. C., and Sahu P.** Numerical studies of ventilation effect on methane layering behaviour in underground coal mines, Current Sci., 2017, Vol. 112. — P. 1873–1881. 10.18520/cs/v112/i09/1873-1881.
9. **Dziurzyński W., Krach A., Palka T., and Wasilewski S.** Validation of the computer program for ventilation simulation VentMet in the face region, taking into account time-variant methane inflows due to cyclic operations of the shearer and loader, Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, 2007, Vol. 9 (1–4). — P. 3–26.
10. **Dziurzyński W., Krach A., Palka T., and Wasilewski S.** The validation of VentZroby software procedures with the use of the mine atmosphere condition monitoring system, 2009.
11. **Jamróz P. and Wasilewski S.** Methane concentration analysis along the longwall during the mining works, Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, 2016, 18 (1). — P. 3–11.

Поступила в редакцию 5/VII 2018
После доработки 6/VIII 2018
Принята к публикации 28/XI 2018