

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Л.И. Шулятьева

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия, e-mail: schulyatjeva.mrm@yandex.ru

Аннотация: Влияние газодинамических процессов на параметры процесса проведения горных выработок определяет организацию горнопроходческих работ во времени и является актуальной проблемой. Проведен обзор исследований, направленных на разработку технологических схем дегазации пластов, на основании чего определены схемы дегазации, применяемые при проведении горных выработок. Установлено, что применение высокоскоростной проходки выработок без предварительной дегазации высокогазоносных угольных пластов не представляется возможным. Доказано, что безопасное ведение подготовительных работ требует обоснования оптимальных параметров дегазационных мероприятий. К исследованию принята технологическая схема бурения барьерных дегазационных скважин, количество которых и длина зависят от газодинамического состояния угольного массива. Обзор опубликованных научных исследований показал, что основная часть из них посвящена газодинамическим явлениям, причинам их возникновения, применяемым методам дегазации пластов, проблемам, возникающим при их реализации. При разработке календарного графика горно-подготовительных работ скорость проведения выработок, трудоемкость работ должны обосновываться с учетом параметров ведения дегазационных работ. Предложена модель обоснования параметров процесса проведения горных выработок по газоносным пластам в увязке с параметрами схем дегазации массива барьерными скважинами с учетом горно-геологических и горно-технических условий. Модель позволяет обосновать скорость проведения выработки при обеспечении безопасности ведения работ. Результаты исследований могут быть использованы при разработке календарного графика ведения горно-подготовительных работ.

Ключевые слова: газоносность, дегазация, моделирование, технологические процессы, параметры, проведение выработки, факторы ограничения, схемы дегазации, бортовые скважины, скорость, продолжительность дегазации, организация работ.

Для цитирования: Шулятьева Л. И. Моделирование параметров процесса проведения горных выработок в условиях высокой газоносности угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 186–199. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_186.

Modeling parameters of road heading under conditions of high-gas coal seams

L.I. Shulyatieva

Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Vladimir, Russia, e-mail: schulyatjeva.mrm@yandex.ru

Abstract: Influence of gas dynamics on process parameters of road heading governs timing of drivage and is a pressing problem. This article reviews the studies aimed at development of process flowsheets for coal seam drainage, and gas drainage flowsheets are determined for road heading process on this basis. It is found that high-speed road heading is impossible without pre-mine drainage of high-gas coal seams. It is proved that safe preliminary development requires justification of optimized gas drainage parameters. The study involved a barrier gas-drainage drill chart where the number and length of well depended on the gas-dynamic condition of coal. The review of the published scientific studies shows that they mostly address gas-dynamic events, their causes, coal seam drainage methods applied and problems arising during implementation. When developing a time schedule of the preliminary development, the speed and labor content of road heading should be substantiated with regard to the gas drainage parameters. A model is proposed for the justification of the process parameters of road heading in high-gas coal seams in connection with the parameters of the gas drainage flowsheets with barrier wells and with regard to the geological and geotechnical parameters. The model makes it possible to justify the speed of the heading process at its preserved safety. The research findings can be used in development of a time schedule for the preliminary development works.

Key words: gas content, gas drainage, modeling, process flowsheets, parameters, road heading speed, limiting factors, gas drainage flowsheets, sidewall wells, speed, gas drainage duration, organizational management.

For citation: Shulyatieva L. I. Modeling parameters of road heading under conditions of high-gas coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):186-199. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_186.

Введение

Углубление горных работ на угольных шахтах является важным фактором, сдерживающим интенсификацию подземных процессов. Высокий уровень газоносности и выбросоопасности требует дополнительных мер по обеспечению безопасности разработки угольных месторождений. Даже при безлюдной технологии ведения горных работ требуется обеспечить содержание газа-метана, обеспечивающее безопасную работу подземных технологических комплексов.

Проблеме освоения высокогазоносных угольных месторождений, обоснованию параметров технологических схем и процессов посвящены исследования [1, 2]. Обосновывается целесообразность их эксплуатации с использованием современных технико-технологических решений. Проблеме оценки влияния газового фактора на параметры техноло-

гического процесса «выемка угля комбайном» посвящены исследования [3], в результате которых установлено влияние параметров процесса дегазации на производительность очистных комплексов, эффективность использования которых снижается с увеличением содержания газа-метана в массиве. Доказано, что высокопроизводительные очистные комбайны неэффективны вследствие потерь времени на обеспечение допустимой концентрации метана в воздухе. Поэтому при работе на таких пластах должны использоваться такие схемы и обеспечиваться такие параметры процесса дегазации, которые позволят максимизировать нагрузку на очистной забой.

Технология управления геомеханическими процессами в напряженных зонах путем использования опережающих скважин по фронту проведения и в окрестностях выработок на выбросо-

опасных угольных пластах с целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа предложена и оценена авторами исследования [4].

С внедрением на основных процессах угледобычи высокопроизводительной техники выявилось, что ее технические возможности значительно ограничиваются горно-геологическими условиями залегания угольных пластов. Одним из таких условий является газодинамическое состояние угольных пластов и вмещающих пород. В исследованиях, изложенных в публикации [5], исследован метод гидроразрыва тупообрушающейся кровли. В работе [6] предложены технологические схемы дегазации пластов, адаптированные к горно-геологическим условиям. Это, по мнению авторов, значительно снижает вероятность выбросов угля и газа и газоотдачу пласта в период ведения горных работ. Исследованию параметров напряженно-деформированного массива и протекающих в них геомеханических процессов посвящены научные статьи российских ученых [7–10], их цель состоит в разработке моделей развития этих процессов и их влияния на безопасность ведения горных работ. Зарубежные исследования в этом направлении [11–15] также направлены на выявление опасных участков и обоснование применения технологических решений для предотвращения выбросов угля и газа. Наибольшая частота выбросов угля и газа на шахтах приходится на период ведения горно-подготовительных работ. Это обусловлено тем, что с углублением горных работ величина горного давления приближается к пределу прочности углей на сжатие, значительно снижается эффективность проведения дегазационных мероприятий. Разработанные технологические схемы дегазации угольных пластов в период их вскрытия, подготовки и отработки решают важную

проблему: учитывая особенности залегания и газодинамическое состояние, выбрать наиболее эффективные меры, обеспечивающие безопасное ведение горно-подготовительных работ. Это определяет необходимость совершенствования технологических схем (ТС) проведения работ по дегазации угольных пластов, выявления проблем и критических факторов, усложняющих ведение дегазационных мероприятий.

Исследования, представленные в работах [16–19], посвящены разработке методологии математического моделирования и формированию алгоритмических моделей, описывающих процессы, происходящие в недрах месторождений, а также процессы управления в горном производстве [20–22].

Горнодобывающее производство относится к наиболее опасным для человека, вследствие чего много исследований посвящено проблеме мониторинга рискованных ситуаций, связанных с производственным травматизмом, и опасных зон для ведения горных работ [23–27]. Предлагаются мультимедийные роботизированные системы, позволяющие вести непрерывный контроль за состоянием шахтной среды.

Проблеме комплексного обоснования и управления параметрами процессов на угольных шахтах посвящены исследования [28, 29], в которых разработаны модели технологических процессов на угольных шахтах в увязке их с условиями ведения горных работ, предложена модель их совместной оптимизации.

Представленный анализ исследований позволил автору оценить общую картину состояния проблемы, определяемой множеством горно-геологических и горнотехнических условий, направлений совершенствования технологических решений. Однако приведенные исследования касаются, главным образом, технологических схем борьбы с внезап-

ными выбросами и дегазации пластов. В целях обеспечения эффективной организации процессов в шахте важным условием является увязка параметров технологических схем дегазации с параметрами технологических процессов по подготовке и отработке запасов угля.

Как показали исследования, приведенные выше, газодинамические явления рассматриваются как важный сдерживающий фактор при обосновании параметров технологических процессов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. При планировании и организации горно-подготовительных работ возникает проблема обоснования параметров процесса с учетом газодинамического состояния массива, в котором осуществляется проведение выработки в увязке их с параметрами процесса дегазации во времени. В соответствии с этим целью настоящего исследования является обоснование параметров технологического процесса горнопроходческих работ и сопровождающего его процесса дегазации по фронту проведения выработок с учетом параметров ТС дегазации барьерными скважинами.

Обоснование предельно допустимой скорости проведения горных выработок по газоносным пластам

В соответствии с распределением запасов угля на шахтах Кузнецкого бассейна основная их часть расположена на глубине 400...700 м. Дальнейшее углубление горных работ является фактором, усложняющим условия проведения дегазации. Это требует разработки эффективных методов дегазации пластов и борьбы с внезапными выбросами угля и газа.

Параметрами технологического процесса проведения выработки являются их геометрия в пространстве, пара-

метры угольного массива и вмещающих пород, горнотехнические характеристики выработки, способ проведения, набор оборудования в подготовительном забое. При использовании схемы дегазации барьерными скважинами параметрами технологического процесса являются: продолжительность бурения дегазационных скважин, подготовка их к работе, общий объем каптажа метана, остаточная газоносность массива. Результаты проведения дегазационных мероприятий путем бурения дегазационных скважин с дневной поверхности или со сближенных отрабатываемых пластов при моделировании параметров дегазации в период вскрытия, подготовки и отработки выемочных полей могут рассматриваться в качестве исходной информации о состоянии газоносности пластов и вмещающих пород.

В Приказах Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.12.2023 № 498 «Об утверждении Руководства по безопасности "Рекомендации по дегазации угольных шахт"», а также от 31.05.2011 № 262 о применении способов и схем проветривания угольных шахт изложена методика расчета параметров дегазации высокогазоносных угольных пластов. В соответствии с этим предложена методика определения параметров технологического процесса проведения горных выработок.

Безопасное ведение горно-подготовительных работ является основным условием их организации. Его достижение обеспечивается неравенством

$$86 \cdot 400 \cdot S \cdot V_{\text{в}} - Q_{\text{в}} \geq 0, \quad (1)$$

где S — площадь сечения выработки в свету с учетом размещения оборудования, м^2 ; $V_{\text{в}}$ — максимально допустимая скорость движения воздуха в выработке, согласно правилам безопасности, $V_{\text{в}} = 4 \text{ м/с}$; тогда максимально возмож-

ное количество воздуха, проходящего по выработке в сутки, составит

$$Q_{\max} = 86\,400 \cdot S \cdot V_B;$$

Q_B — количество воздуха, необходимое для проветривания, м³/сут,

$$Q_B = Q_{pk} + Q_{cb}; \quad (2)$$

Q_{pk} — расход воздуха в подготовительном забое при работе комбайна,

$$Q_{pk} = \frac{100I_n}{c - c_0}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (3)$$

I_n — абсолютная газообильность подготовительной выработки,

$$I_n = (I_{\text{пов}} - I_{\text{оу}}) \cdot 1440, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (4)$$

$I_{\text{пов}}$ — газовыделение с боковых поверхностей выработки, м³/мин,

$$I_{\text{пов}} = n_1 \cdot m_n \cdot \frac{v_{np}}{T_{cm}} \cdot G_0 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{l}{v_{np}}} - 1 \right), \quad (5)$$

n_1 — количество обнаженных сторон выработки, принимаем равным 3; m_n — дегазируемая скважинами мощность угольного пласта, м; v_{np} — скорость проведения выработки, м/см; G_0 — начальное газовыделение, м³/мин·м², для пластов с газоносностью более 10 м³/т,

$$G_0 = \frac{\gamma \cdot H (\% - \%') \cdot 10^{-3}}{17,3 \cdot (1725 - H)}. \quad (6)$$

γ — средняя объемная масса угля в массиве, т/м³; H — глубина залегания выработки, м; X — газоносность пласта до его дегазации барьерными скважинами, м³/т; X' — остаточная газоносность пласта, м³/т,

$$X' = \frac{Q - t_{\text{дез}} \cdot n_c \cdot P_t}{(S_{np} + 4) \cdot \gamma}, \quad (7)$$

Q — количество метана в массиве на 1 м выработки,

$$Q = (S_{np} + 4) \cdot \gamma \cdot X, \text{ м}, \quad (8)$$

S_{np} — площадь сечения выработки в черне, м²; $(S_{np} + 4)$ — площадь сечения выработки в черне с учетом площади сечения дегазационных камер в бортах выработки, м²; γ — объемная масса угля в массиве, т/м³; $t_{\text{дез}}$ — продолжительность дегазации скважиной, сут; n_c — количество барьерных дегазационных скважин, $n_c = 6 \dots 8$; P_t — производительность 1 м скважины в сутки,

$$P_t = g_0 \cdot \frac{1 - \exp(-\beta \cdot t_{\text{дез}})}{\beta}, \text{ м}^3/\text{сут} \cdot \text{м}, \quad (9)$$

g_0 — начальное удельное газовыделение из скважины, м³/сут·м,

$$g_0 = K \cdot X$$

K — эмпирический коэффициент,

$$K = \frac{1}{16 + 12m_n};$$

β — коэффициент фильтрации, учитывающий влияние газопроницаемости угля,

$$\beta = 0,003 \cdot \exp(-7,6K_m), \quad (10)$$

K_m — коэффициент газопроницаемости, м Дарси (табл. 1); l — длина выработки, в расчетах принимается $l = 20$ м; T_{cm} — продолжительность смены по проходке, мин; $I_{\text{оу}}$ — газовыделение из отбитого угля, м³/мин,

$$I_{\text{оу}} = \frac{v_{np}}{T_{cm}} \cdot S_{np} \cdot \gamma \cdot X' \quad (11)$$

c_0, c — концентрация газа соответственно в поступающей и в исходящей вентиляционной струе, %, $c_0 = 0,5\%$; $c = 1\%$; Q_{cb} — расход воздуха для разбавления газа, выделяющегося из стенок выработки, м³/мин,

$$Q_{cb} = \frac{400 \cdot G_0 \cdot m_n \cdot v_{np}}{c - c_0} \cdot \left(\sqrt{\frac{l}{v_{np}}} + 1 - 1 \right). \quad (12)$$

Реализация приведенной модели позволяет обосновать скорость проведения

Таблица 1

Значения коэффициента фильтрации**в зависимости от коэффициента газопроницаемости****Values of the filtration coefficient depending on the gas permeability coefficient**

Коэффициент газопроницаемости (K_m)	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4
Коэффициент фильтрации (β)	0,0028	0,0014	0,0006	0,0003	0,0001

выработки, обеспечивающую безопасность ведения работ в подготовительном забое. При этом предполагается, что требуемое по критерию безопасности количество воздуха для проветривания не должно превышать максимально допустимую его величину, определяемую исходя из площади сечения выработки и предельно допустимой скорости движения воздуха. Количество воздуха, необходимое для проветривания зависит от горно-технических факторов, параметров выработки и скорости ее проведения. Скорость проведения принята как переменная величина. Необходимо

рассчитать количество воздуха, требуемое для вентиляции выработки в период ее проведения, определяемое как функция переменной.

При расчетах принимались следующие значения: $H = 500$ м, $n_c = 6$, $\gamma = 1,4$ т/м³, $\beta = 0,0006$, $m_n = 3,5$ м, $S_{np} = 16,1$ м², $S_{св} = 12,8$ м².

Последовательность расчетов следующая.

1. С использованием формулы (12) рассчитан расход воздуха для разбавления газа, выделяемого из стенок выработки (м³/сут). Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет расхода воздуха для разбавления газа, выделяющегося из стенок выработки**Calculation of air consumption for diluting gas released from the walls of the mine**

Длительность дегазации ($t_{дег}$), сут	Расход воздуха для разбавления газа из стенок выработки при газоносности пласта до дегазации (X)			
	$X = 10$	$X = 15$	$X = 20$	$X = 25$
10	1993 $v_{пр}$	4486 $v_{пр}$	8970 $v_{пр}$	13455 $v_{пр}$
12	4486 $v_{пр}$	10 466 $v_{пр}$	17 941 $v_{пр}$	284 07 $v_{пр}$
14	8472 $v_{пр}$	18 937 $v_{пр}$	33 389 $v_{пр}$	52 825 $v_{пр}$
16	13 954 $v_{пр}$	32 393 $v_{пр}$	57 311 $v_{пр}$	59 304 $v_{пр}$

Таблица 3

Производительность скважин P_t **Well productivity P_t**

Длительность дегазации, сут	Производительность скважины при газоносности пласта до дегазации (X) и начальном удельном газовыделении (g_0) (для $\beta = 0,0006$)			
	$X = 10$	$X = 15$	$X = 20$	$X = 25$
	$g_0 = 0,17$	$g_0 = 0,259$	$g_0 = 0,345$	$g_0 = 0,431$
10	1,69	2,574	3,427	4,284
12	2,026	3,087	4,11	5,138
14	2,389	3,6	4,792	5,99
16	2,699	4,112	5,474	6,842

Таблица 4

Остаточная газоносность пласта
Residual gas content of the reservoir

Длительность дегазации, сут	Остаточная газоносность пласта при его газоносности до дегазации (X)			
	X = 10	X = 15	X = 20	X = 25
10	6,39	9,51	12,7	15,9
12	4,81	7,1	9,5	11,8
14	2,87	4,25	5,7	7,1
16	0,79	0,97	1,32	1,7

Таблица 5

Величина газовыделения в выработку из отбитого угля
The amount of gas released into the mine from broken coal

Длительность дегазации ($t_{\text{дег}}$), сут.	Величина газовыделения из отбитого угля при газоносности пласта до дегазации (X)			
	X = 10	X = 15	X = 20	X = 25
10	578 $v_{\text{пр}}$	857 $v_{\text{пр}}$	1145 $v_{\text{пр}}$	1433 $v_{\text{пр}}$
12	434 $v_{\text{пр}}$	640 $v_{\text{пр}}$	856 $v_{\text{пр}}$	1064 $v_{\text{пр}}$
14	259 $v_{\text{пр}}$	383 $v_{\text{пр}}$	514 $v_{\text{пр}}$	640 $v_{\text{пр}}$
16	71 $v_{\text{пр}}$	87 $v_{\text{пр}}$	119 $v_{\text{пр}}$	154 $v_{\text{пр}}$

2. Согласно формуле (9) рассчитана производительность скважины P_t ($\text{м}^3/\text{сут} \times \text{м}$). Результаты расчета приведены в табл. 3.

3. Согласно формуле (7) рассчитана остаточная газоносность массива X ($\text{м}^3/\text{т}$). Результаты расчета приведены в табл. 4.

На практике при длительности дегазации 14 сут и более данные показатели зависят от множества факторов дегазационных мероприятий и особенностей углей, поэтому предлагается их воспринимать как теоретически достижимые.

4. Согласно формуле (11) рассчитана величина газовыделения из отбитого угля ($\text{м}^3/\text{сут.}$). Результаты расчета приведены в табл. 5.

5. Рассчитан показатель начального газовыделения G_0 .

6. Расчетами установлено, что величиной газовыделения из боковых поверхностей выработки можно пренебречь из-за незначительного ее влияния на

требуемый объем воздуха для проветривания выработки. Тогда абсолютная газообильность выработки может быть определена по табл. 5.

7. Согласно формуле (3) рассчитан расход воздуха в подготовительном забое при работе комбайна $Q_{\text{рк}}$ (табл. 6).

8. Количество воздуха, необходимое для проветривания подготовительного забоя ($\text{м}^3/\text{сут}$), приведено в табл. 7.

9. Рассчитаем максимально возможное количество воздуха, проходящее по выработке в течение смены, согласно (1), при этом принимаем площадь ее сечения с учетом размещенного оборудования. Тогда эта величина составит $663\ 552\ \text{м}^3/\text{см}$. На основании этого определена максимально возможная по газовому фактору скорость проведения выработки за смену при трехсменной работе забоя (табл. 8).

На рисунке представлена зависимость сменной скорости проведения выработки в зависимости от газоносности пла-

Таблица 6

Расчет расхода воздуха в выработке при работе комбайна**Calculation of air consumption in the mine during harvester operation**

Продолжительность дегазации, сут.	Расход воздуха в выработке при газоносности пласта до дегазации (X)			
	X = 10	X = 15	X = 20	X = 25
10	115 600 $v_{пр}$	171 600 $v_{пр}$	228 800 $v_{пр}$	286 800 $v_{пр}$
12	86 800 $v_{пр}$	128 000 $v_{пр}$	171 400 $v_{пр}$	212 800 $v_{пр}$
14	51 800 $v_{пр}$	76 600 $v_{пр}$	102 800 $v_{пр}$	128 000 $v_{пр}$
16	14 400 $v_{пр}$	17 600 $v_{пр}$	23 800 $v_{пр}$	30 800 $v_{пр}$

Таблица 7

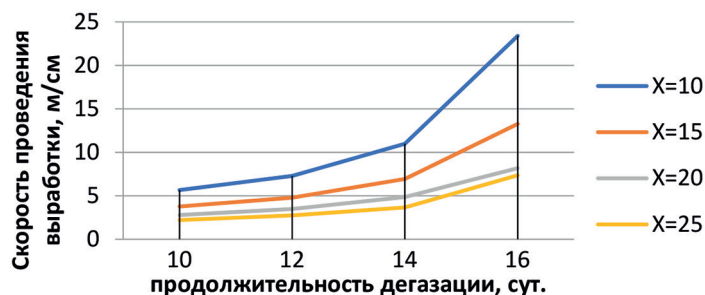
Количество воздуха, необходимое для проветривания подготовительной выработки**Amount of air required for ventilation of the preparation workings**

Продолжительность дегазации, сут	Количество воздуха для проветривания при газоносности пласта до дегазации (X)			
	X = 10	X = 15	X = 20	X = 25
10	117 593 $v_{пр}$	176 086 $v_{пр}$	237 770 $v_{пр}$	300 255 $v_{пр}$
12	91 286 $v_{пр}$	138 446 $v_{пр}$	189 341 $v_{пр}$	241 207 $v_{пр}$
14	60 272 $v_{пр}$	95 537 $v_{пр}$	136 189 $v_{пр}$	180 825 $v_{пр}$
16	28 354 $v_{пр}$	49 999 $v_{пр}$	81 111 $v_{пр}$	90 104 $v_{пр}$

Таблица 8

Расчетные значения максимально возможной скорости**проведения выработки по газовому фактору****Estimated values of the maximum possible rate of production by gas factor**

Продолжительность дегазации, сут	Максимально возможная скорость проведения при газоносности пласта до дегазации (X)			
	X = 10	X = 15	X = 20	X = 25
10	5,66	3,77	2,79	2,21
12	7,27	4,79	3,5	2,75
14	11,0	6,94	4,87	3,67
16	23,4	13,27	8,18	7,36



Сменная скорость проведения выработки комбайном в зависимости от природной газоносности пласта и продолжительности его дегазации

The changeable speed of the combine harvester, depending on the natural gas content of the formation and the duration of its degassing

ста и продолжительности его дегазации бортовыми скважинами.

Как показывают расчеты, проведенные для определенных условий и параметров ведения проходческих работ, интенсивность роста скорости колеблется в пределах от 4 (при $X = 10 \text{ м}^3/\text{т}$) до 3,3 (при $X = 25 \text{ м}^3/\text{т}$).

Аналогичные расчеты проведены для условий с различными значениями площади сечения выработки в свету.

На основе обработки данных получен поправочный коэффициент

$$k_s = \frac{S_{св}}{1,868S_{св} - 11,11}.$$

В работе [29] проведены исследования трудоемкости операций в подготовительном забое: управление и обслуживание комбайна, крепление выработки различными типами крепи, крепление водоотливной канавки, обслуживание конвейера, доставка материалов в подготовительный забой. На основании этого предложена модель расчета численности рабочих в подготовительном забое в смену в зависимости от горно-технологических параметров выработки и условий ее проведения (N_b).

При проведении выработки комбайном КСП-35 получена модель, имеющая следующий вид:

$$\begin{aligned} N_b = & 10,951 \cdot (0,693 + 0,231n_p) \cdot \\ & \cdot (0,96 + 0,013\alpha_b) \cdot (1,185 - 0,129f) \cdot \\ & \cdot (1,015 - 0,005l_n) \cdot \left(\frac{0,855 \cdot S_{np}}{1,467S_{np} - 6,472} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

где n_p — плотность установки крепи (здесь арочной металлической с затяжкой кровли сеткой), рам/м; α_b — угол наклона выработки, град.; f — средняя крепость угля по шкале М.М. Протодьяконова.

Моделирование параметров процесса «бурение скважин» и подготовка к эксплуатации дегазационных скважин

Общий запас времени на бурение скважин и дегазацию можно принять как

$$\max\{t_{экс}\} = l_c / v_{np}, \text{ смен} \quad (14)$$

где l_c — длина скважины, м.

Максимально возможная продолжительность непосредственной дегазации составит

$$\max\{t_{дер}\} = \frac{l_c}{v_{np}} - \bar{T}_{бур}, \quad (15)$$

где $\bar{T}_{бур}$ — общая продолжительность работ по бурению и подготовке скважин к эксплуатации;

$$\begin{aligned} \bar{T}_{бур} = & (t_{pb} \cdot 1,5n_c + L_H \cdot t_{nc}) : \\ & : (T_{CM} N_{CM}), \text{ сут}, \end{aligned} \quad (16)$$

t_{pb} — общая продолжительность работ по бурению, ч.;

$$t_{pb} = t_b + t_{и.ш} + t_{гс} + t_{oc} \quad (17)$$

t_b — продолжительность бурения скважины, ч/скв.,

$$\begin{aligned} t_b = & 0,25l_c \cdot \left(\frac{f}{1,041 - 0,028f} \right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{0,784 + 0,002l_c}{0,025\alpha_c + 0,619} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$t_{и.ш}$ — продолжительность операции по извлечению штанг, ч/скв.,

- при бурении восстающих скважин

$$t_{и.ш} = 0,0029l_c^{2,007} \cdot (0,023\alpha_c + 0,563)^{-1} \quad \text{ч/скв.}, \quad (19)$$

- при бурении скважин по падению

$$\begin{aligned} t_{и.ш} = & \left(\frac{l_c^2}{27,85 - 0,015l_c} \right) \cdot \\ & \cdot (0,023\alpha_c + 0,563)^{-1} \quad \text{ч/скв.}, \end{aligned} \quad (20)$$

α_c — угол наклона скважины к плоскости бурения, град.; t_{rc} — продолжительность герметизации скважины, $t_{rc} = 0,504$ ч/скв.; t_{oc} — продолжительность обсадки скважин, ч/скв.; t_{nc} — продолжительность передвижки станка, принимаем ч/м; L_n — расстояние между нишами (дегазационными камерами), $L_n = 50$ м; N_{cm} — количество смен работы забоя по проведению выработки.

Продолжительность работ по бурению скважин определяется параметрами оборудования и горно-геологическими характеристиками угля. Для установления закономерностей их влияния на продолжительность бурения исследована совокупность данных, сформированных по хронометражным наблюдениям за работой буровых установок при бурении скважин диаметром до 100 мм с выносом штыба водой или сжатым воздухом. На основании этих исследований разработана модель формирования параметров процесса бурения скважин.

Объем бурения скважин на 1 п.м выработки при $L_n = 50$ м

$$\bar{Q}_{\text{бур}} = 1,5n_c \text{ м/м,}$$

на всю длину выработки

$$Q_{\text{бур}} = n_c \cdot L_B + \frac{25 \cdot n_c \cdot L_B}{L_n} = 1,5 \cdot n_c \cdot L_B, \quad \text{м} \quad (21)$$

где L_B — длина проводимой выработки, м.

В работе [29] приведены результаты исследования по обоснованию максимально возможной скорости проведения выработки комбайном КСП-35. Однако при ее расчетах не учитывалось влияние газового фактора. Приведенные результаты позволяют обосновать максимально возможную скорость проведения выработки с учетом газоносности угольного пласта.

Расчетами установлено, что технологическая схема дегазации барьерными дегазационными скважинами дает наибольший эффект при использовании ее по пластам с высоким уровнем газопро-

ницаемости. Эффективность дегазации скважинами возрастает при увеличении ее продолжительности. Так, дегазация шестью скважинами пласта с газоносностью $10 \text{ м}^3/\text{т}$ при $t_{\text{дег}} = 12$ сут. обеспечивает прирост скорости проведения на 28%, а при $t_{\text{дег}} = 14$ сут. — уже на 51%. С возрастанием газоносности этот прирост снижается.

При более высокой газоносности необходимо применение комплексных технологий дегазации на основе объединения технологических схем барьерной дегазации и дегазации скважинами, пробуренными из выработок нижележащего пласта. Это позволяет снизить газоносность пласта до ведения горно-подготовительных работ.

Заключение

Газоносность угольных пластов месторождений России является основным сдерживающим фактором, который снижает эффективность использования скоростных комбайнов, в том числе на горно-подготовительных работах. Это увеличивает продолжительность подготовки выемочных полей, оказывает негативное влияние на концентрацию горных работ, производства, материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Увеличение себестоимости проведения горных выработок связано, в первую очередь, с ростом негативного влияния природных факторов. В настоящее время российскими и зарубежными учеными разработаны эффективные технологические схемы ведения дегазационных мероприятий в угольных шахтах, в том числе комплексными способами дегазации, учитывающими состояние горного массива, которое характеризуется множеством факторов. Вследствие этого поиск и обоснование целесообразных и эффективных способов дегазации, а также оценка их влияния на параметры технологических процессов в шахте оста-

ется актуальной научной и практической задачей. Проведенные исследования посвящены проблеме оценки влияния газового фактора на параметры технологических процессов в подготовительных забоях при проведении выработок комбайнами. В настоящем исследовании предложена и апробирована методика обоснования максимально возможной скорости проведения горной выработки на пластах с высокой газоносностью. Разработан и реализован механизм расчета таких параметров технологического процесса, как скорость проведения выработки, численность проходческой бригады. Предложена модель обоснования оптимальных параметров процесса

дегазации по фронту их проведения, таких как общий объем бурения скважин, запас времени, на процесс непосредственного скважинного извлечения газа. Совмещение в пространстве и времени этих процессов позволяет разработать оптимальный календарный график горно-подготовительных работ с учетом проведения дегазации массива. Оценена эффективность применения метода дегазации барьерными скважинами при различной газоносности пластов.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке организационных мероприятий и составлении графика ведения работ по подготовке и отработке выемочных полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузина Е. С., Мирзабалаев Р. В. Проблематика освоения высокогазоносных угольных месторождений в России // Уголь. — 2025. — № 3. — С. 140–144. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-140-144.
2. Соболев В. В., Коликов К. С., Фомин А. И., Ледаев Н. В., Ли Х. У., Трубицын А. А., Трубицын Н. В. Совершенствование дегазации угольных шахт // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 2 (168). — С. 86–93. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-86-93.
3. Шулятьева Л. И., Майорова Л. В. Моделирование параметров и организация процесса дегазации выемочных полей угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 168–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_168.
4. Исабек Т. К., Демин В. Ф., Шонтаев Д. С., Александров А. Ю. Эффективная технология бурения опережающих дегазационных скважин на выбросоопасных угольных пластах // Уголь. — 2021. — № 6. — С. 11–14. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-11-14.
5. Клишин В. И., Тайлаков О. В., Опрук Г. Ю., Уткаев Е. А., Клишин С. В. Методы гидро-разрыва труднообрушающейся кровли и угольного пласта для исключения динамических явлений в угольных шахтах // Горная промышленность. — 2022. — № 6. — С. 46–53. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-46-53.
6. Егоров А. П., Кондаков И. А. Оценка возможности и эффективности внедрения технологических схем скоростной проходки подземных горных выработок на угольных шахтах // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 22–28. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-22-28.
7. Семенова И. Э., Кулькова М. С. Определение параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с применением натурных и численных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 2-1. — С. 19–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19.
8. Кузнецов Н. Н. Исследование прочностных свойств и удельной энергии деформирования горных пород в условиях трехосного сжатия // Горная промышленность. — 2025. — № 2. — С. 140–145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145.
9. Данильев С. М., Секерина Д. Д., Данильева Н. А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсмических данных // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 260–271.
10. Храмцов Б. А., Лепетюха Д. С., Бабушкин К. С. Исследование напряженного состояния массива горных пород рудника Гремячинского ГОКа // Известия вузов. Горный журнал. — 2025. — № 2. — С. 56–66. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-56-66.

11. Diulin D. A., Prushak V. Y., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322 – 330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.
12. Wang C., Liu X., Zhang L., Xu C. Ground behaviors analysis of a stope covered by the thin bedrock and large-thick alluvium: A case study // *Advances in Civil Engineering*. 2022, vol. article 6176316.
13. Li Y., Huang D., Li X. A. Strain rate dependency of coarse crystal marble under uniaxial compression: strength, deformation and strain energy // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, no. 4, pp. 1153 – 1164. DOI: 10.1007/s00603-013-0443-0.
14. Zhongbin Wang, Lei Si, Dong Wei, Jinheng Gu, Fulin Xu Coal-rock drilling states recognition of drilling robot for rockburst prevention based on multi-sensor information fusion // *Journal of Engineering Research*. 2024, vol. 12, no. 4, pp. 878 – 885. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.004.
15. Шемякин С. А., Шишкин Е. А., Васильев Д. А. Определение скорости бурения вмещающих пород на угольных месторождениях Дальневосточного региона // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2025. – № 4. – С. 49 – 55. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-4-49-55.
16. Kalauz K., Frits M., Bertok B. Algorithmic model generation for multi-site multiperiod planning of clean processes by P-graphs // *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, article 140192. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140192.
17. Meng Q., Wang Z., Zhang Y., Chen L., Gu J. Strain rate effects on characteristic stresses and acoustic emission in rocks // *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, article 960812. DOI: 10.3389/feart.2022.960812.
18. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A. Advanced digital modeling of stress – strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings // *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1072 – 1087. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.
19. Karacan C. Ö. Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance // *International Journal of Coal Geology*. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.
20. Pérez-Perales D., Boza A., Alarcón F., Gómez-Gasquet P. Mathematical programming-based methodology for the evaluation of supply chain collaborative planning scenarios // *Annals of Operations Research*. 2024, vol. 337, pp. 261 – 312. DOI: 10.1007/s10479-024-05917-6.
21. Rakiz A., Absi N., Fenies P. Comparing approaches for a multi-level planning problem in a mining industry // *International Journal of Production Economics*. 2023, vol. 265, article 108999. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108999.
22. Nevskaya M., Shabalova A., Kosovtseva T., Nikolaychuk L. Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation // *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024, vol. 8, no. 8, article 5375. DOI: 10.24294/jipd.v8i8.5375.
23. Lindqvist B., Karlsson S., Koval A., Tevetzidis I., Haluška J., Kanellakis Ch., Ali-akbar Aghamohammadi, Nikolakopoulos G. Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue // *Robotics and Autonomous Systems*. 2022, vol. 154. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104134.
24. Kang H., Gao F., Xu G., Ren H. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines – A review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 37 – 65. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.004.
25. Moss A., Kaiser P. K. An operational approach to ground control in deep mines // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 67 – 81. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.05.008.
26. Zhang X., Wang J., Li H. Coal mine rescue robots based on binocular vision: A review of the state of the art // *IEEE Access*. 2020, vol. 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009387.
27. Joughin W. C. Managing geotechnical uncertainty and risk in mining // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 123, no. 11, pp. 515 – 530. DOI: 10.17159/2411-9717/2990/2023.
28. Zaalouk A., Moon S., Han S. Operations planning and scheduling in off-site construction supply chain management: Scope definition and future directions // *Automation in Construction*. 2023, vol. 153, article 104952. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104952.

29. Мельник В. В., Шулятьева Л. И., Мурин К. М. Комплексное обоснование инновационных решений при проектировании высокопроизводительных угольных шахт / Под общей ред. В.В. Мельника: в 2 т. Т. 1. — М.: Изд-во ТулГУ, 2020, 2021. — 160 с. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Kuzina E. S., Mirzabalaev R. V. The problems of development of highly gas-bearing coal deposits in Russia. *Ugol'*. 2025, no. 3, pp. 140–144. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-140-144.
2. Sobolev V. V., Kolikov K. S., Fomin A. I., Ledyayev N. V., Lee H. U., Trubitsyn A. A., Trubitsyna N. V. Improving coal mine degassing. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025, no. 2 (168), pp. 86–93. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-86-93.
3. Shulyatieva L. I., Mayorova L. V. Parametric modeling and arrangement of gas drainage in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 168–179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_168.
4. Isabek T. K., Demin V. F., Shontaev D. S., Malybaev S. K., Shontaev A. D. & Aleksandrov A. Yu. Effective technology for drilling advance methane drainage boreholes in outburst-prone coal beds. *Ugol'*. 2021, no. 6, pp. 11–14. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-11-14.
5. Klishin V. I., Tailakov O. V., Opruk G. Yu., Utkayev E. A., Klishin S. V. Methods of hydraulic fracturing of poorly caving roof and coal seams to eliminate dynamic phenomena in coal mines. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 6, pp. 46–53. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-46-53.
6. Egorov A. P., Kondakov I. A. Evaluation of the possibility and effectiveness of the implementation of technological schemes for high-speed underground mining in coal mines. *Ugol'*. 2019, no. 10, pp. 22–28. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-22-28.
7. Semenova I. E., Kulkova M. S. Determination of initial rock mass stress-strain state parameters of the Zhdanovskoe deposit using in-situ and numerical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 2-1, pp. 19–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19.
8. Kuznetsov N. N. Study of strength properties and specific deformation energy of rocks under triaxial compression. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 2, pp. 140–145. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145.
9. Danilev S. M., Sekerina D. D., Danileva N. A. Localization of sites for the development of geomechanical processes in underground workings based on the results of the transformation and classification analysis of seismic data. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 260–271. [In Russ].
10. Khramtsov B. A., Lepetiukha D. S., Babushkin K. S. The stress state of the rock mass at the Gremyachinsky GOK's mine. *Minerals and Mining Engineering*. 2025, no. 2, pp. 56–66. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-56-66.
11. Diulin D. A., Prushak V. Y., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322–330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.
12. Wang C., Liu X., Zhang L., Xu C. Ground behaviors analysis of a stope covered by the thin bedrock and large-thick alluvium: A case study. *Advances in Civil Engineering*. 2022, vol. 2022, article 6176316.
13. Li Y., Huang D., Li X. A. Strain rate dependency of coarse crystal marble under uniaxial compression: strength, deformation and strain energy. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, no. 4, pp. 1153–1164. DOI: 10.1007/s00603-013-0443-0.
14. Zhongbin Wang, Lei Si, Dong Wei, Jinheng Gu, Fulin Xu Coal-rock drilling states recognition of drilling robot for rockburst prevention based on multi-sensor information fusion. *Journal of Engineering Research*. 2024, vol. 12, no. 4, pp. 878–885. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.004.
15. Shemiakin S. A., Shishkin E. A., Vasiliev D. A. Determining the drilling rate of host rocks in the coal deposits of the Far Eastern region. *Minerals and Mining Engineering*. 2025, no. 4, pp. 49–55. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-4-49-55.
16. Kalauz K., Frits M., Bertok B. Algorithmic model generation for multi-site multiperiod planning of clean processes by P-graphs. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, article 140192. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140192.
17. Meng Q., Wang Z., Zhang Y., Chen L., Gu J. Strain rate effects on characteristic stresses and acoustic emission in rocks. *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, article 960812. DOI: 10.3389/feart.2022.960812.

18. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A. Advanced digital modeling of stress–strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings. *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1072 – 1087. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.
19. Karacan C. Ö. Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance. *International Journal of Coal Geology*. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.
20. Pérez-Perales D., Boza A., Alarcón F., Gómez-Gasquet P. Mathematical programming-based methodology for the evaluation of supply chain collaborative planning scenarios. *Annals of Operations Research*. 2024, vol. 337, pp. 261 – 312. DOI: 10.1007/s10479-024-05917-6.
21. Rakiz A., Absi N., Fenies P. Comparing approaches for a multi-level planning problem in a mining industry. *International Journal of Production Economics*. 2023, vol. 265, article 108999. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108999.
22. Nevskaya M., Shabalova A., Kosovtseva T., Nikolaychuk L. Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024, vol. 8, no. 8, article 5375. DOI: 10.24294/jipd.v8i8.5375.
23. Lindqvist B., Karlsson S., Koval A., Tevetzidis I., Haluška J., Kanellakis Ch., Ali-akbar Aghamohammadi, Nikolakopoulos G. Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022, vol. 154. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104134.
24. Kang H., Gao F., Xu G., Ren H. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines – A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 37 – 65. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.004.
25. Moss A., Kaiser P. K. An operational approach to ground control in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 67 – 81. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.05.008.
26. Zhang X., Wang J., Li H. Coal mine rescue robots based on binocular vision: A review of the state of the art. *IEEE Access*. 2020, vol. 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009387.
27. Joughin W. C. Managing geotechnical uncertainty and risk in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 123, no. 11, pp. 515 – 530. DOI: 10.17159/2411-9717/2990/2023.
28. Zaalouk A., Moon S., Han S. Operations planning and scheduling in off-site construction supply chain management: Scope definition and future directions. *Automation in Construction*. 2023, vol. 153, article 104952. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104952.
29. Mel'nik V. V., Shulyat'eva L. I., Murin K. M. *Kompleksnoe obosnovanie innovatsionnykh resheniy pri proektirovanii vysokoproizvoditel'nykh ugol'nykh shakht*. Pod red. V.V. Melnika, v 2 t, t. 1 [Comprehensive justification of innovative solutions in the design of high – performance coal mines: in 2 volumes, vol. 1], Moscow, Izd-vo TulGU, 2020, 2021, 160 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шулятьева Людмила Ивановна — д-р техн. наук, профессор,
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
e-mail: schulyatjeva.mrm@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-5834-9243.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

L.I. Shulyatieva, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vladimir State University
named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
600000, Vladimir, Russia, e-mail: schulyatjeva.mrm@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5834-9243.

Получена редакцией 01.03.2026; получена после рецензии 20.07.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 01.03.2026; received after the review 20.07.2026; accepted for printing 20.09.2026.