

УДК 622.834

**Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: dotcenkoo@mail.ru

УСТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПОЧВУ ПЛАСТА ВО ВРЕМЕНИ

В статье приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных по изменению давления на почву отработанного пласта во времени модифицированной логистической функцией Перла — Рида. Получены зависимости, описывающие процесс нарастания горного давления в выработанном пространстве для глубин разработки, характерных для Донбасса (до 1100 м).

Ключевые слова: *давление на почву извлеченного пласта, обрушенные породы, выработанное пространство, стабилизация горного давления, глубина разработки, S-образная кривая, экстраполяция.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Ухудшение условий добычи угля на больших глубинах из-за интенсивного проявления горного давления способствует увеличению числа выработок, имеющих неудовлетворительные эксплуатационные условия. Решить проблему устойчивости можно путем поддержания подготовительных горных выработок, проводя их вслед за очистным забоем [1] в обрушенных и уплотненных породах выработанного пространства. В процессе выемки угля за лавой происходит обрушение пород непосредственной кровли, а затем и основной. В процессе уплотнения обрушенных пород происходит рост их давления на почву извлеченного угольного пласта, изменяется напряженно-деформированное состояние пород, что необходимо учитывать при установлении параметров размещения и крепления выработок, проводимых в выработанном пространстве.

Таким образом, **целью** настоящей работы является установление закономерностей изменения давления обрушенных пород в выработанном пространстве лавы во времени.

Объект исследования — процесс уплотнения обрушенных пород выработанного пространства.

Предмет исследования — закономерности изменения давления уплотняющихся

во времени пород на почву извлеченного пласта.

Задачи исследования:

– на основе экспериментальных данных проанализировать характер изменения давления на почву пласта уплотняющихся пород;

– обосновать наиболее предпочтительную аппроксимирующую функцию, описывающую связь давления обрушенных пород на почву пласта с продолжительностью уплотнения; оценить ее адекватность;

– экстраполировать полученную зависимость для широкого диапазона значений глубин разработки.

Методика исследования. В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ результатов инструментальных наблюдений за изменением давления на почву отработанного пласта, аппроксимацию результатов экспериментальной работы с применением методов математической статистики.

Изложение материала. В выработанном пространстве лавы давление на почву отработанного пласта создают породы, отслоившиеся от массива кровли и находящиеся внутри области подработки.

Механические процессы, происходящие в подработанных массивах, зависят от времени, так как обрушенные породы по мере отхода лавы постепенно уплотняются. Про-

цесс уплотнения характеризуется скоростью и длительностью. В работе [2] представлены результаты установления времени стабилизации горного давления на почву извлеченного пласта, полученные посредством анализа процесса оседания подработанной горными работами земной поверхности:

$$t_{акт} = \sqrt{H \cdot f} \cdot (m \cdot L \cdot v)^{0,12}, \text{ сут.}, \quad (1)$$

где H — глубина разработки, м;

f — средняя крепость пород, формирующих свод обрушения;

m — вынимаемая мощность пласта, м;

L — длина лавы, м;

v — скорость подвигания лавы, м/мес.

Для зависимости (1) установлены граничные условия: $240 < H < 1100$ м; $4,95 < f < 6,5$; $1 < m < 2,3$ м; $24 < v < 83$ м/мес.; $78 < L < 310$ м.

В большинстве случаев давление определяют путем заложения динамометров в выработанном пространстве вслед за очистным забоем [1, 3] с последующим измерением нагрузки на них во времени по мере отхода лавы. В работе [3] приведены результаты изменения давления в выработанном пространстве лав в условиях Челябинского угольного бассейна ($H=240$ м). Показания динамометров представлены на рисунке 1 в виде точек в системе координат $t-P$, где t — время проведения замера после прохода лавы, сут.; P — давление, фиксируемое прибором, МПа.

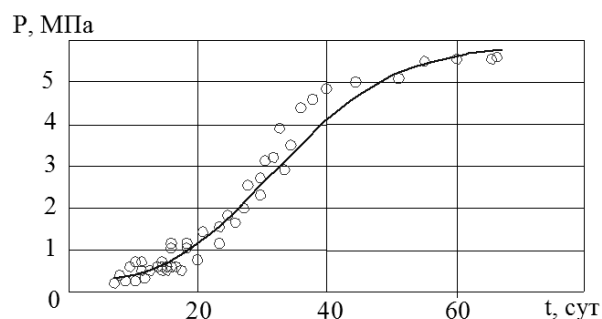


Рисунок 1 — Фактические данные замеров изменения давления в выработанном пространстве лавы и аппроксимирующая их логистическая кривая

Продолжительность стабилизации давления пород на уровне γH совпадает со временем оседания массива $t_{акт}$, рассчитанного по формуле (1) и составляет 73 суток после прохода лавы. В течение указанного периода давление изменяется в 3 этапа: умеренного роста, интенсивного роста и стабилизации.

Автор в работе [3] для определения величины давления в каждый момент времени предлагает использовать кусочную аппроксимацию, где для каждого из этапов изменения давления предлагается отдельная зависимость. Данный подход неудобен с практической точки зрения ввиду отсутствия четкой информации о том, на каком расстоянии от лавы начинается тот или иной этап изменения давления и каков вес пород, не принимающих участия в том или ином периоде. Экспериментальные данные [3] необходимо аппроксимировать одной зависимостью.

При построении модели важна достаточная точность и простота описания основной кривой процесса нарастания горного давления в выработанном пространстве на всем промежутке его стабилизации. До посадки основной кровли (шаг посадки $l_n = 10$ м) давление имеет нулевое значение; с момента обрушения пород (на 7-е сутки после прохода лавы) берет начало этап умеренного роста. Обрушаясь с разрывом сплошности, породы образуют свод. При формировании свода обрушенных пород давление в выработанном пространстве интенсивно нарастает и далее, по мере восприятия сводом веса вышележащих пород, стабилизируется.

В процессе аппроксимации были рассмотрены экспоненциальная функция вида

$$P(t) = \frac{t}{e^{a-bt} - 1}, \text{ гиперболическая } P(t) = \frac{t}{a-b \cdot t}$$

и логистическая зависимости. Наилучшим образом данные корреляционного поля (рис. 1) могут быть описаны S-образной кривой, называемой логистой. Её применение в «закрытой системе» оправдано,

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

так как имеет место предельная величина (γH), сверх которой рост давления в выработанном пространстве невозможен.

Рассмотрим логистическую зависимость Перла — Рида [4], которая отражает медленное увеличение от асимптотического минимума, переходящее в быстрое многократное увеличение на стадии интенсивного роста, по окончании которого начинается этап стабилизации, заключающийся в замедлении роста давления и в достижении асимптотического максимума:

$$P(t) = \frac{A}{1 + a \cdot e^{-bt}}, \quad (2)$$

где A — предельное значение давления, МПа;

t — время протекания процесса, сут.;

a, b — параметры логистической кривой.

Для описания рассматриваемого процесса зависимость (2) представим в модифицированном виде:

$$P(t) = \frac{\gamma H \cdot g \cdot 10^{-3}}{1 + a \cdot \exp \left[-b \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) \right]}, \quad (3)$$

где $P(t)$ — величина давления в выработанном пространстве в момент времени t после прохода лавы, МПа;

γ — объемная масса пород, т/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

t — время после прохода лавы, сут.;

$l_{\text{п}}$ — шаг первичной посадки кровли, м;

v — средняя скорость подвигания очистного забоя, м/сут.;

$t_{\text{акт}}$ — продолжительность периода стабилизации горного давления, сут.

Отношение $l_{\text{п}}/v$ переносит начало кривой в точку, соответствующую времени посадки основной кровли, с которого да-

вление начинает умеренно расти. Параметр a определяет месторасположение кривой на временной оси. Его изменение смещает кривую вправо или влево. На крутизну центральной части кривой оказывает влияние значение параметра b .

На предварительной стадии обработки данные проверялись на аномальность по критерию Ирвина λ_p :

$$\lambda_p = \frac{|P_t - P_{t-1}|}{\sigma_p}, \quad (4)$$

где σ_p — среднеквадратичное отклонение результирующего признака (P).

Табличное значение $\lambda_{\text{табл}} = 1,1$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе наблюдений $n = 47$ превышает расчетные значения, следовательно, аномальные данные не выявлены.

Для нахождения параметров уравнения регрессии (3) исходная формула преобразуется к виду

$$\frac{\gamma g H \cdot 10^{-3}}{P(t)} - 1 = a \cdot e^{-b \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right)}. \quad (5)$$

Обозначив левую часть уравнения как Y , прологарифмируем уравнение (5):

$$\ln(Y) = \ln(a) - b \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \quad (6)$$

Проведя замену $\ln(Y) = D$, $\ln(a) = c$, получим линейное уравнение

$$D = c - b \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \quad (7)$$

Нахождение параметров выражения (7) сводится к решению системы уравнений методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} nc - b \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) = \sum D, \\ c \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) - b \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right)^2 = \sum D \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \end{cases} \quad (8)$$

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

При решении системы (8) получены параметры: $b=0,111$, $c=-3,614$. Так как $c = \ln(a)$, тогда $a = e^{-3,614} = 0,027$.

Зависимость изменения давления в выработанном пространстве для рассматриваемых условий разработки [3] имеет вид

$$P(t) = \frac{5,886}{1 + 0,027 \cdot e^{-0,111 \cdot \left(t + \frac{10}{1,25} - 73 \right)}}, \text{ МПа. (9)}$$

На рисунке 1, кроме данных фактических замеров, показана аппроксимирующая их логистическая кривая.

Коэффициент детерминации уравнения регрессии (9) составил $R^2 = 0,966$, что подтверждает высокую взаимосвязь величины давления от времени после прохода лавы. Существенность уравнения в целом проверена по F -критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,95$. Расчетное значение F -критерия ($F_p = 26,7$) превышает табличное его значение ($F_{табл} = 1,46$), т. е. уравнение статистически значимо. Средняя ошибка аппроксимации равна 19,3 %, следовательно, качество уравнения хорошее.

Логистическая зависимость (9) описывает процесс нарастания давления горных пород в выработанном пространстве лавы, ведущей разработку на глубине 240 м. По вертикали она ограничена величиной максимального давления $\gamma g H$, а по горизонтали — продолжительностью периода стабилизации давления $t_{акт}$.

Большинство шахт Донбасса ведет работы на глубинах около 1000 м, и, следовательно, интерес представляет значение давления в этих условиях разработки. Зная величину $t_{акт}$ (1), представляется возможным экстраполировать полученную зависимость (9) на глубины разработки, характерные для Донбасса. Задача сводится к нахождению параметров a и b зависимости (3) для различных глубин ведения очистных работ. Найти их значения возможно при предположении о геометрическом подобии систем $H-t_{акт}$, получаемых при переносе фактических данных работы [3] в другую систему, отличную от исходной масштабом.

На рисунке 2 горизонтальными линиями отмечены верхние границы нарастания давления при различных значениях H , а вертикальными линиями — длительность процесса стабилизации давления, соответствующей каждой величине асимптотического максимума функции (3).

При использовании метода наименьших квадратов найдены коэффициенты регрессии для различных глубин разработки (табл. 1).

На рисунке 3 показаны кривые для определения параметров зависимости (9).

Параметр a определяется по степенной зависимости

$$a = 0,256 \cdot H^{-0,42} = 0,37/t_{акт} . \quad (10)$$

Аналогично находится параметр b :

$$b = 11,05 \cdot H^{-0,84} = 8,08/t_{акт} . \quad (11)$$

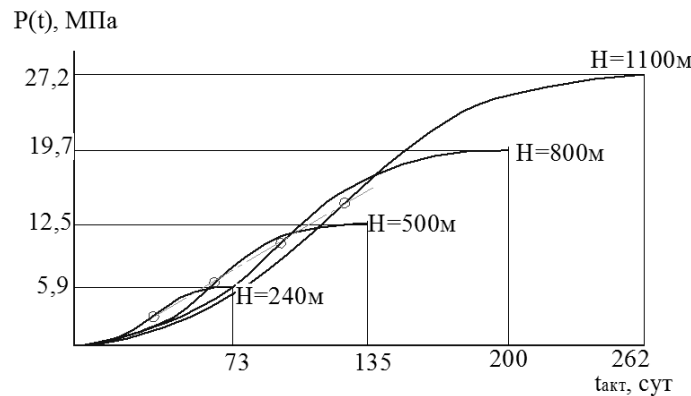


Рисунок 2 — Границы логистической кривой (3) при различной глубине разработки

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

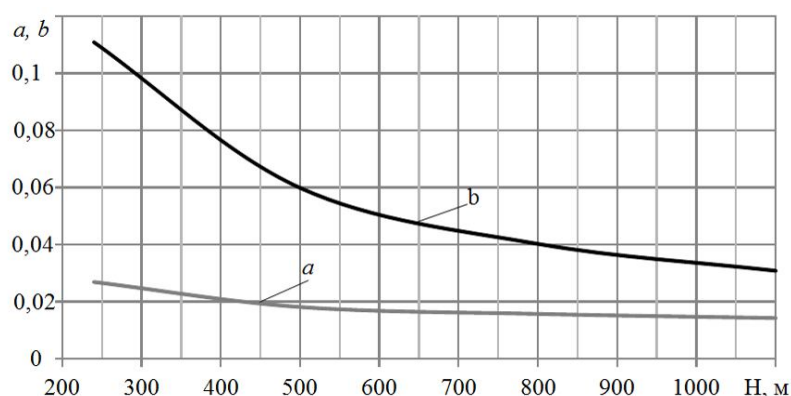


Рисунок 3 — Определение значений параметров a и b уравнения регрессии (3)

Таблица 1
Значения коэффициентов регрессии (3) a и b при различных глубинах ведения работ

H , м	$t_{\text{акт}}$, сут	a	b
240	73	0,027	0,111
500	135	0,0182	0,0599
800	200	0,0158	0,0403
1100	262	0,0143	0,0309

Для определения величины давления на почву отработанного пласта по мере продвижения очистного забоя предложен следующий алгоритм:

1) рассчитывается длительность активного периода оседаний земной поверхности, равная времени стабилизации горного давления на почву отработанного пласта, по эмпирической степенной зависимости (1);

2) по зависимостям (10) и (11) определяются значения параметров a и b для конкретной глубины разработки;

3) по зависимости (3) рассчитывается величина давления на почву отработанного пласта на конкретный момент времени после прохода лавы.

Список источников

1. Зборщик М. П. Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве. К. : Техника, 1978. 176 с.
 2. Установление времени стабилизации горного давления на почву извлеченного пласта / О. Л. Кизияров, О. Г. Доценко, Г. А. Аверин, Н. В. Гришко // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24 (67). С. 25–32.
 3. Гапанович Л. Н., Гайдуков Ю. Г., Лаврухин В. Н. Исследование закономерностей проявления горного давления в выработанном пространстве при выемке угля слоями в Челябинском бассейне // Уголь. 1974. № 2. С. 13–18.

Выводы и направление дальнейших исследований. Оседание подработанного очистными работами массива и стабилизация горного давления в выработанном пространстве лавы взаимосвязаны между собой и имеют одинаковую продолжительность.

Изменение давления в выработанном пространстве проходит в три этапа: умеренного роста, интенсивного роста и стабилизации. Для его описания подходит логистическая кривая, ограниченная по вертикали величиной максимально возможного давления γH , а по горизонтали — продолжительностью активного развития сдвижений массива $t_{\text{акт}}$. Предложены эмпирические зависимости для определения величины давления на почву отработанного пласта, создаваемого обрушенными и уплотненными породами.

Дальнейшие исследования будут направлены на обоснование параметров крепления горных выработок, проводимых по обрушенным уплотненным породам.

4. Кынин А. Т., Привень А. И. Простейшие модели развития технических систем / Методолог : [сайт]. [2017]. URL: <http://www.metodolog.ru/node/940>.

5. Dotsenko, O. Pressure variation of caved rocks in mined-out area of face / O. Dotsenko // School of Underground Mining : 7th international conference. Dnepropetrovsk : NGU, 2013. P. 217–221.

© Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А.,
зам. гл. инженера по производству и перспективному развитию
ПП «Шу „Луганское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Чепурным Д. С.**

Статья поступила в редакцию 14.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Доценко Ольга Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: dotcenkoo@mail.ru

Кизияров Олег Леонидович, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. геотехнологий и безопасности производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Аверин Геннадий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Dotsenko O. G., Kiziyarov O. L., Averin G. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: dotcenkoo@mail.ru)

IDENTIFYING THE PRESSURE VARIATION OF GOB ROCKS IN THE WORKED-OUT AREA ON THE LAYER SOIL OVER TIME

The article presents the results of the experimental data approximation on pressure-response data on the spent layer by means of the time-modified logistic Pearl-Reed function. There have been obtained the dependencies that define how rock pressure builds up in the worked-out area to mining depths typical for Donbass (up to 1100 m).

Key words: ground pressure of layer excavation, gob rock, worked-out area, stabilization of rock pressure, mining depths, S-curve, extrapolation.

References

1. Zborshchik M. P. Protecting deep mine workings in the worked-out area [Ohrana vyrabotok glubokih shaht v vyrabotannom prostranstve]. K. : Tekhnika, 1978. 176 p. (rus)
2. Kiziyarov O. L., Dotsenko O. G., Averin G. A., Grishko N. V. Determining the time required for stabilization of rock pressure on the soil of the excavated layer [Ustanovlenie vremeni stabilizacii gornogo davleniya na pochvu izvlechennogo plasta]. Scientific work collection of DonSTI. 2021. Iss. 24 (67). Pp. 25–32. (rus)
3. Gapanovich L. N., Gajdukov Yu. G., Lavruhin V. N. Examining the patterns of rock pressure manifestations in the worked-out area while extracting coal layers from the Chelyabinsk basin

[Issledovanie zakonornostej proyavleniya gornogo davleniya v vyrabotannom prostranstve pri vyemke uglya slojami v Chelyabinskom bassejne]. Ugol'. 1974. No. 2. Pp. 13–18. (rus)

4. Kynin A. T., Priven' A. I. Simple models of development of technical systems [Prostejshie modeli razvitiya tekhnicheskikh sistem]. Metodolog. 2017. URL: <http://www.metodolog.ru/node/940>.

5. Dotsenko O. Pressure variation of caved rocks in mined-out area of face. School of Underground Mining : 7th international conference. Dnepropetrovsk : NGU, 2013. Pp. 217–221.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dotsenko Olga Gennadiyevna, PhD in Engineering, Assistant professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: dotcenkoo@mail.ru

Kiziyarov Oleg Leonidovich, PhD in Engineering, Assistant professor, Head of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Averin Gennadiy Alekseyevich, PhD in Engineering, Assistant professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia