

УДК 622.235.535



**О. А. ВОВК,**  
канд. техн. наук  
(НТУУ «КПИ»)

Горнодобывающие предприятия в процессе ведения подземных работ нарушают равновесное состояние силовых гравитационных полей, создавая очаги концентрации напряжений до критических уровней, что приводит к разрушению породы с высвобождением энергии, частично эмитируемой в окружающий массив в виде колебаний. Энергетическая интенсивность этих событий и их сейсмической компоненты часто достаточна для разрушений и повреждений как подземных выработок, так и поверхностных природных и инженерных объектов, расположенных на гипоцентральной дистанции  $r_{\Gamma} \leq r_{\text{б}}$  и эпицентральной  $r_{\text{эп}} \leq r_{\text{б}}$  ( $r_{\text{б}}$  – расстояние, безопасное для охраняемых объектов).

По мере увеличения глубины ведения горных работ указанные динамические проявления техногенного происхождения становятся все более масштабными и сейсмоопасными, актуальность их изучения для локализации или предотвращения значительно возрастает. Конечной целью этих разработок должно стать получение надежных критериев и механизмов прогноза сейсмобезопасности охраняемых объектов, расположенных в пределах критических расстояний от очага сейсмоколебаний. Помимо из-

## Сейсмобезопасность подземных и поверхностных сооружений при горных ударах и подземных взрывах

Предложена методика определения уточненных критических параметров массовой скорости (ускорения) с учетом поправки к нормативным показателям на влияние частотно-временной характеристики системы грунт–сооружение и методики оценки сейсмоопасности при взрывных технологиях воздействия на сейсмоопасные зоны концентрации напряжений в призабойном участке угольного пласта и породах кровли.

**Ключевые слова:** горный удар, сейсмоизлучатель, сейсмический очаг, тротильный эквивалент.

**Контактная информация:** o.a.vovk@mail.ru

лучаемых горным ударом сейсмоколебаний их источником могут быть взрывные работы, направленные на повышение безопасности и надежности ведения очистных и подготовительных работ в удароопасных пластах.

Сущность буровзрывных технологий заключается в управлении геодинамическими процессами, направленными на дезинтеграцию напряженного угольного и породного массива для снятия критического напряжения в кровле, призабойной зоне и перемещения максимума давления передней части свода вглубь массива на возбуждение горного удара в заданное время и в желаемом месте, для расположения очага и др. Возбуждаемые взрывами сейсмические волны также могут представлять опасность, в частности для подземных сооружений, и должны стать предметом детального изучения. Достоверность конечных результатов исследований (оценка интенсивности колебаний в заданном пункте – на поверхности

либо на контуре подземной выработки) зависит от того, насколько корректно получены начальные параметры волн, определены свойства среды вдоль луча и составлен алгоритм их движения от начала и до завершения у заданного пункта.

Сложность установления связи между параметрами колебаний среды в массиве и на поверхности и окончательной реакцией на них сооружений вынуждает прибегать к эмпирическим либо полуэмпирическим методам их получения с использованием, как правило, расчетного аппарата промышленной сейсмоки. Главный критерий определения степени сейсмоопасности – показатель массовой скорости (ускорения), исходя из которого разработана нормативная база. Основываясь на этом критерии, изучению и анализу подлежат пять составляющих комплексной проблемы прогнозирования сейсмоопасности горных ударов:

- получение количественных параметров колебаний волны

в начале движения, в частности скорости распространения  $v_p, v_s$ , массовой скорости (ускорения) на упругой границе  $u_{\max}^H, a_{\max}^H$  периода колебаний  $T$ , а также радиуса излучателя  $r_{\text{и}}$ ;

- определение указанных параметров у основания сооружения (на контуре подземного объекта);
- нахождение поправочных коэффициентов прохождения (преломления) на скоростных границах пород с разными акустическими свойствами и коэффициентом передачи энергии на границе грунт-фундамент;

- составление шкалы безопасности с учетом поправки на влияние частотно-временной характеристики в виде отношения « $m$ » периодов  $T/T_0$  ( $T_0$  – период собственных колебаний защищаемого объекта);

- установление границы зоны  $r_0$ , за пределами которой обеспечивается сейсмобезопасность объектов, расположенных в горном массиве и на поверхности.

Один из главных показателей рассматриваемых динамических проявлений – энергия очага возбуждения сейсмоколебаний. Хотя механизмы возникновения сейсмических колебаний отмеченных разновидностей различаются между собой, на некотором удалении от очага (по приобретению канонической формы) оба типа волн движутся по одним и тем же законам, что позволяет при изучении горных ударов опираться на научный потенциал промышленной сейсмологии. Это обстоятельство крайне важно, учитывая ограниченную научную базу по вопросам сейсмобезопасности горных ударов.

Поэтому при расчетах искомых параметров волны в качестве одной из исходных энергетических оценок сейсмического действия горных ударов используется графоаналитический метод, основанный на допущении об эквивалентности энергии горного удара и ее сейсмической компоненты взрыву тротилового заряда массой  $Q_{\text{т.э}}$ , при плотности его, равной единице, и удельной энергии  $3,4 \cdot 10^6$  Дж/кг [1]. Принимая сейсмическую компоненту 2 – 3 % общей энергии очага, получим удельную сейсмическую энергию на упругой границе  $(6,8 - 10,2) \cdot 10^4$  Дж/кг, или в среднем  $8,5 \cdot 10^4$  Дж/кг.

Сейсмический очаг характеризуется следующими энергетическими параметрами:

полной энергией очага  $\mathcal{E}_{\text{оч}}$ ;

начальной сейсмической энергией, равной 2 – 3 % общей энергии, т. е.

$$\mathcal{E}_{\text{н}}^c = (0,02 - 0,03)\mathcal{E}_{\text{оч}}; \quad (1)$$

удельной потенциальной упругой энергией породы очага [7]:

$$\mathcal{E}_{\text{о6}}^{y_d} = \mathcal{E}_{\text{о}}^{y_d} + \mathcal{E}_{\text{нл}}^{y_d} = \sigma_{\text{сж}}^2 \left\{ \left( \frac{1-2\nu}{6E} \right) + \left( \frac{1+\nu}{3E} \right) \right\}; \quad (2)$$

плотностью энергии на упругой границе [2]

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_{\text{н}}^c / 4\pi r_{\text{и}}^2; \quad (3)$$

удельной энергией на расстоянии  $r$  от очага [2, 4],

$$\mathcal{E}_r = 0,625\rho v_p (u_{\text{н}}^2 T) \quad (4)$$

или [2]  $\mathcal{E}_r = 1,75 \cdot 10^6 \mathcal{E}_s r^{-3,2}, \quad (5)$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости;

$r_{\text{и}}$  – радиус излучателя;

$\rho$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;

$v_p$  – скорость продольной волны, м/с;

$u_{\text{н}}$  – массовая скорость волны в пункте на расстоянии  $r$  от очага.

Поток сейсмической энергии на расстоянии  $r$  от очага  $\mathcal{E}_T$  находят из выражения [2]

$$\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_{\text{н}}^c \cdot 0,7e^{-1,75 \cdot 10^{-3}r}. \quad (6)$$

Комплекс задач по оценке сейсмоопасности включает в себя установление закономерностей изменения в динамике начальных параметров на упругой границе вплоть до достижения безопасных для защищаемых объектов предельных значений, фиксируя, таким образом, границу опасной зоны. Фактически очаг следует рассматривать как источник двух главных разновидностей сейсмических волн (продольных и поперечных), возбуждаемых независимыми сейсмоизлучателями, размеры которых определяют разные упругие границы. Расстояние  $r_T$  получают путем преобразования алгоритмов, описывающих изменения динамических, энергетических и силовых показателей в функции расстояния, приравнивая к существующим нормативам их критических значений, в частности, принимая  $u_{\text{н}} = u_{\text{доп}}$ . Для нахождения начальных показателей массовой скорости  $u_{\text{н}}^H$  в научной литературе приводится ряд эмпирических и полуэмпирических формул с той или иной степенью достоверности получаемых результатов в зависимости от многих факторов и прежде всего от соответствия паспортных упругих характеристик  $E, \nu$  и их производных  $v_p, v_s$  исследуемым условиям.

Предложенные авторами в работах [3 – 5] методы оценки массовой скорости на упругой границе представляют собой функции физико-механических свойств породы очага, но отличаются по струк-

туре, причиной чего могут быть разные методические подходы и конфигурация сейсмоизлучателя. Поскольку ни одна из формул не может рассматриваться в качестве универсальной достаточно надежной методикой, целесообразно выполнить сравнительные расчеты для одинаковых условий, например гранитов, со следующими характеристиками [6]:  $\sigma_{сж} = 15,5 \cdot 10^7$  Па;  $\sigma_p = 0,8 \cdot 10^7$  Па;  $\sigma_{сд} = 1 \cdot 10^7$  Па;  $E = 6,6 \cdot 10^{10}$  Па;  $\nu = 0,22$ ;  $\rho = 2600$  кг/м<sup>3</sup>. Полученные данные необходимо сравнить с показателями, полученными в лабораторных условиях на образцах с упомянутыми характеристиками.

Скорость частиц грунта в объемной волне вдоль луча изменяется по закону [1]

$$u(r) = K_1 K_2 K_3 (r/Q_{т.э})^{-2}, \quad (7)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий свойства среды, при движении по гранитам принимается равным 700;

$K_2$  – коэффициент преломления на скоростной границе, равный при наличии одной границы,

$$K_2 = (2\rho_1 v_{p1}) / (\rho_1 v_{p1} + \rho_2 v_{p2}); \quad (8)$$

$K_3$  – коэффициент отражения от свободной поверхности либо от стенки подземной выработки, при угле падения луча  $\gamma = 0$  принимается равным 2;

$Q_{т.э}$  – масса заряда по тротиловому эквиваленту.

Коэффициент преломления на скоростной границе при падении луча под углом  $\gamma$  к плоскости, разделяющей среды с различными акустическими свойствами,

$$K_{np} = \frac{2\rho_1 v'_{p1}(1 - \sin\gamma)}{\rho_1 v'_{p1}(1 - \sin\gamma) + \rho_2 v_{p2}}. \quad (9)$$

При большем количестве скоростных границ, равном  $n$ , суммарный коэффициент преломления  $K_n$  находим из выражения

$$K_n = K_1^2 K_2^3, \dots, K_{n-1}^n. \quad (10)$$

При движении сейсмической волны в однородной среде массовую скорость, изменяющуюся с расстоянием, можно вычислить по формуле

$$u(r) = u_m^n e^{-\alpha r}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,

$$\alpha = 2\pi / (v_p T) = w / v_p; \quad (12)$$

$T$  – период колебаний; в гранитах этот показатель находят из эмпирического соотношения

$$T = 0,003 \sqrt[6]{Q_{т.э}}; \quad (13)$$

$w$  – круговая частота, рад.

Основываясь на критерии сейсмической энергии горного удара, определим текущую массовую скорость, используя формулы (4) и (5) [3]:

$$u_{т} = 1,265 \sqrt[5]{\Delta_r / (\rho v_p T)}. \quad (14)$$

Здесь  $\Delta_r$  находим из формулы (5).

На контуре подземной выработки скорость колебаний частиц принимаем

$$u_{т}^k = 2 u_{т}. \quad (15)$$

Зная допустимые скорости из работы [5], в зависимости от характеристик горных пород и класса расположенных подземных сооружений  $u_{доп}$ , установим радиус зоны  $r_6$ , безопасной для сооружений на поверхности, из выражения [3]:

$$r_6 = \sqrt{(K_1 K_2 K_3 / u_{доп}) Q_{т.э}^{2/3}}. \quad (16)$$

Для поверхностных объектов этот параметр в виде эпицентрального расстояния вычислим по следующей зависимости, учитывающей глубину нахождения очага  $H$  [1]:

$$r_6^{эп} = \sqrt{(K_1 K_2 K_3 / u_{доп}) (Q_{т.э}^{2/3} - H^2)}, \quad (17)$$

где  $u_{доп}$  – допустимая скорость колебаний согласно нормативной шкале, скорректированная с учетом временных параметров системы грунт–сооружение путем умножения на коэффициент

$$K_n = f(T/T_0) = u_{доп}^{гп} / u_0; \quad (18)$$

$u_{доп}^{гп}$  – скорректированный показатель массовой скорости у основания фундамента сооружения,

$$u_{доп}^{гп} = u_0 (C/B_{зд}); \quad (19)$$

$u_0$  – нормативное значение допустимой скорости, см/с.

Здесь корректирующая функциональная зависимость в правой части выражения (19) частотной характеристики представляет собой соотношение функции характеристик охраняемых зданий

$$C = f(T_0, \varepsilon) \text{ и } B_{зд} = f(T, T_0, \lambda); \quad (20)$$

$$C = 1,1315 T_0^2 / \sqrt{\varepsilon}; \quad (21)$$

$$B_{зд} = \left[ (1 - m^2)^2 + (4\lambda^2 / \pi^2 + \lambda^2) m^2 \right]^{-0,5}, \quad (22)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент демпфирования;

$\lambda$  – декремент затухания охраняемого здания.

Как следует из расчетов нормативных показателей для зданий III класса, скорректированных согласно формулам (18) – (22) при изменении показателя  $m$  от 0,08 до 0,875 и до единицы, т. е. пределов резонансной области и диапазоне периодов

## БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

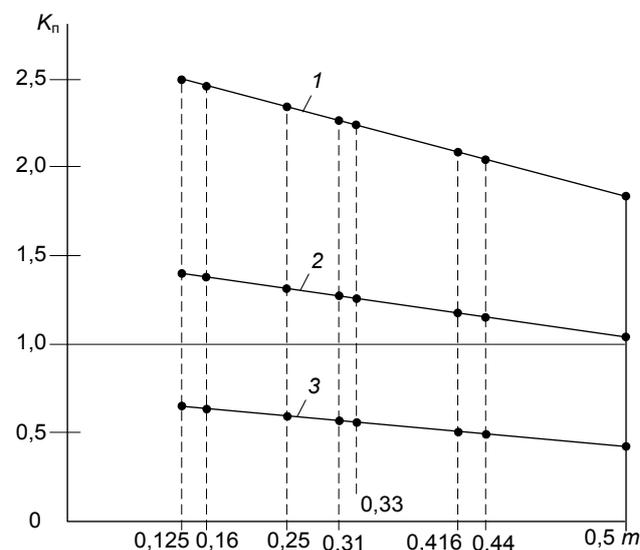
$T_0, c$	$u_0, \text{см/с}$ [5]	$a_{\text{доп}}, \text{мм/с}^2, K_{\text{п}}$ при $\lambda = 0,3$ и следующих значениях $m$													
		0,125		0,16		0,25		0,31		0,416		0,44		0,5	
		$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$	$a_{\text{доп}}$	$K_{\text{п}}$
0,2	7,0	1758,4	0,62	1374	0,61	877,8	0,59	709,0	0,57	530,0	0,53	500,0	0,51	440,0	0,48
	5,0	1256,0	0,61	981,3	0,61	628,0	0,59	506,5	0,57	378,3	0,52	356,8	0,52	314,0	0,48
	3,0	753,6	0,63	588,8	0,61	376,8	0,59	303,9	0,57	227,0	0,52	214,1	0,51	188,4	0,48
	2,0	502,4	0,63	392,5	0,61	251,2	0,59	202,6	0,57	151,3	0,52	142,7	0,51	125,6	0,48
	1,0	251,2	0,63	196,3	0,61	125,6	0,59	101,3	0,57	75,7	0,52	71,4	0,51	62,8	0,48
	0,5	125,6	0,63	98,1	0,62	62,8	0,59	50,6	0,57	37,8	0,52	35,7	0,52	31,4	0,48
0,3	7,0	1172,3	1,42	915,8	1,39	586,1	1,35	472,7	1,28	351,7	1,18	333	1,16	293,1	1,09
	5,0	837,3	1,42	654,2	1,38	418,7	1,35	337,7	1,29	251,2	1,18	237,9	1,16	209,3	1,09
	3,0	502,4	1,42	392,5	1,38	245,3	1,38	202,6	1,29	150,7	1,18	142,7	1,16	125,6	1,09
	2,0	334,9	1,42	261,7	1,38	167,5	1,35	135,1	1,29	100,5	1,18	95,2	1,16	83,7	1,09
	1,0	167,5	1,42	130,8	1,39	83,8	1,35	67,6	1,29	50,3	1,18	47,6	1,16	41,8	1,09
	0,5	83,7	1,42	65,4	1,39	41,9	1,35	33,8	1,29	25,1	1,19	23,8	1,16	20,9	1,09
0,4	7,0	879,2	2,51	687,0	2,46	440,0	2,39	354,5	2,29	265,0	2,10	250,0	2,07	219,8	1,92
	5,0	628,0	2,44	490,6	2,46	314,0	2,39	253,0	2,29	189,2	2,10	178,4	2,07	157,0	1,92
	3,0	376,8	2,51	294,4	2,46	188,4	2,39	148,4	2,34	113,5	2,10	107,0	2,08	94,2	1,92
	2,0	251,2	2,51	196,3	2,46	125,6	2,39	101,3	2,28	75,7	2,10	71,4	2,07	62,8	1,93
	1,0	125,6	2,52	98,2	2,46	62,8	2,39	50,7	2,28	37,8	2,10	35,7	2,07	31,4	1,92
	0,5	62,8	2,51	49,1	2,46	31,4	2,39	25,3	2,30	18,9	2,10	17,9	2,07	15,7	1,92

собственных колебаний сооружений 0,2 – 0,4 с, допустимую скорость смещения грунта в зависимости от соотношения « $m$ » можно принимать меньше либо больше нормативных. Так, для зданий с  $T_0 = 0,4$  с характерна (при прочих равных условиях) значительно более высокая сейсмостойкость, что позволяет увеличить допустимые скорости более чем в 2 – 2,5 раза по сравнению с предусмотренными действующими нормативными актами. В качестве примера приведем расчеты влияния временных параметров системы грунт-здание на допустимые ускорения в сейсмической волне, принимая допущение о гармоническом характере сейсмоколебаний в сопоставлении с данными нормативной шкалы для этих же условий и нормативных показателей ускорения  $a_{\text{доп}}$  (таблица). Расчеты выполним, используя соотношение

$$a_{\text{доп}} = 2\pi u_0 / T. \quad (23)$$

На рис. 1 приведена графическая интерпретация зависимости преломления коэффициента  $K_{\text{п}}$  от соотношения « $m$ » в соответствии с таблицей при разных значениях периода собственных колебаний  $T_0$  зданий III класса. Как следует из таблицы и рис. 1 зависимость  $K_{\text{п}} = f(m)$  имеет линейный характер при всех значениях нормативных показателей для сооружений с одинаковым периодом собственных

колебаний. Линейный вид соотношений  $a(T_0, m)$  позволяет оценить степень сейсмоопасности по параметру векторной скорости (ускорения) на ограниченном экспериментально-расчетном материале за счет экстраполяции.



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента  $K_{\text{п}}$  от нормативов сейсмоопасности по критерию ускорения с учетом временного фактора при периоде собственных колебаний: 1 –  $T_0 = 0,4$  с; 2 –  $T_0 = 0,3$  с; 3 –  $T_0 = 0,2$  с.

В работе [5] предлагается формула для определения эпицентрального расстояния по критерию допустимой массовой скорости

$$r_{\text{без}}^{\text{эп}} = \sqrt{\left[ K_{\text{п}} u_{\text{м}}^{\text{т}} / \left( u_{\text{доп}} / 2K_{\text{пр}}^{\text{н}} \right) \right] - H^2}, \quad (24)$$

где  $K_{\text{п}}$  – суммарный коэффициент преломления;  
 $u_{\text{м}}^{\text{т}}$  – текущая массовая скорость на фронте волны, находится из уравнения (17);  
 $K_{\text{пр}}^{\text{н}}$  – коэффициент преломления при прохождении волны из скальной породы в наносы при их мощности, превышающей критическую. В противном случае влияние наносов не учитывается. Тогда формула (24) представим в виде

$$r_{\text{без}}^{\text{эп}} = \sqrt{2,91 \left[ K_{\text{п}} \left( u_{\text{м}}^{\text{т}} / u_{\text{доп}} \right) \right]^{1,54} - H^2}. \quad (25)$$

Основываясь на критерии энергетических показателей сейсмических колебаний, вызванных горными ударами, радиус безопасной зоны для подземных выработок в окрестностях очага можно найти из выражения [2]

$$r_6 = 1,75 \cdot 10^6 \mathcal{E}_s / \mathcal{E}_r, \quad (26)$$

где  $\mathcal{E}_s$  – находим из формулы (3) и  $\mathcal{E}_r$  – из уравнения (4).

При этом в формуле (4) вместо  $u_{\text{м}}^2$  принимается  $u_{\text{доп}}^2$  для конкретного класса подземной выработки и свойств окружающих ее пород в соответствии с нормативными данными [5].

**Выводы.** Предложена методика вычисления уточненных критических параметров массовой скорости (ускорения) с учетом поправки к норматив-

ным показателям на влияние частотно-временной характеристики системы грунт–сооружение в виде коэффициента  $K_{\text{п}}$ . На основе этого критерия предложены формулы для установления эпицентрального и гипоцентрального расстояния от очага до границы безопасной зоны, при этом энергия очага рассчитывается по тротиловому эквиваленту.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chudek M. O prognozowaniu intensywnosci sejsmicznego oddzialywania tapniecia / M. Chudek, A. A. Kuzmenko, O. A. Wowk // Geotechnika-Geotechniks 2002: materialy naukowe X Jubileuszowe Miedzynarodowe Sympozjum. – Chesc 1. – Ustron (PI). – 2002. – S. 195 – 205.
2. Chudek M. O propagacji enerddji sejsmickej przy procesach dynamicznych / O. A. Wowk, A. A. Kuzmenko // Zeszyty naukowe politechniki slaskiej. Ser. Gornictwo. –2004. – S. 59 – 69.
3. Кузьменко А. А. Распространение сейсмозрывных волн в многослойном горном массиве / А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк, О. Н. Чала // Вісник НТУ України «КПІ». Сер. Гірництво. – 2010. – Вип. 19. – С. 15 – 20.
4. Вовк О. А. Определение исходных параметров для изучения сейсмических колебаний в горном массиве при взрывных работах и горных ударах / О. А. Вовк, А. Е. Гай, Л. Н. Леванкова // Вісник НТУ України «КПІ». Сер. Гірництво. – 2005. – Вип. 12. – С. 32 – 42.
5. Вовк О. О. Вплив підземних гірничих робіт на стан довкілля / О. О. Вовк, В. М. Ісаєнко, В. Г. Кравець, О. О. Вовк. – К.: Вид-во НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2011. – 543 с.
6. Родионов В. Н. Механический эффект подземного взрыва / [В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др.]. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

### ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

#### Год 1972

В журнале № 5 в статье «Угольная промышленность Украины в 1971 году» описаны результаты работы предприятий угольной промышленности Украины в 1971 г.

План угледобычи в целом по Украине выполнен на 103,9 %, выдано на-гора 209,43 млн т, из них 7,93 млн т угля сверх плана.

По сравнению с 1970 г. количество действующих очистных забоев и их суммарная протяженность сократились. Так, на 1 января 1971 г. функционировал 1881 очистной забой общей длиной 277,6 км, а на 1 января 1972 г. насчитывалось 1745 действующих забоев общей длиной 265,87 км. Средняя длина очистного забоя возросла со 146 до 150 м, среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев повысилось с 37,2 до 37,7 м, или на 1,3 %, что, однако, на 3,1 % ниже запланированного уровня.

Среднесуточная нагрузка на очистной забой увеличилась с 320 т в 1970 г. до 340 т угля в 1971 г., или на 6,3 %, в том числе на действующих – с 335 до 348 т угля, или на 3,9 %. Среднесуточная нагрузка на шахту-разрез (административную единицу) повысилась с 2219 до 2356 т, или на 6,2 %, причем исключительно за счет роста добычи угля по шахтам. Изменение всех перечисленных показателей наглядно отражает существующую в угольной промышленности тенденцию к дальнейшему повышению концентрации угледобычи.