

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
GEOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-91-102

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫСОТЫ УСТУПА И ШАГА СМЕЩЕНИЯ ОБРАТНОЙ
ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТЫ ПРИ ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО
ПРОСТРАНСТВА ПОРОДОУГОЛЬНОЙ ЗАХОДКИ****Селюков Алексей Владимирович,
Терентьев Данил Дмитриевич**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: sav.ormpi@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

09 декабря 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:
22 июня 2025 г.Принята к публикации:
30 июня 2025 г.Опубликована:
28 августа 2025 г.**Ключевые слова:**обратная гидравлическая
лопата, высота уступа, шаг
смещения, породугольная
заходка, выработанное
пространство.**Аннотация.**

Открытая разработка угольных месторождений Кузбасса главным образом определяется следующим пространственным принципом ведения горных работ – вдоль линии простираения свиты пластов. Согласно этому, покрывающие и вмещающие вскрышные породы из забоя перемещают средствами автомобильного транспорта на внешние отвалы, что в целом определяет негативное воздействие горного предприятия на окружающую среду. Известны технологические решения – углубочно-сплошная система разработки, когда вскрышная порода размещается во внутреннем отвале. При обосновании вида выемочного оборудования для этой системы необходимо учесть основную ее особенность – попеременное производство в породугольной заходке вскрышных и добычных работ одним экскаватором. Причем основное требование предъявляется к добычным работам и заключается в обеспечении селективной разработки пластов с минимальными потерями и засорением угля породой. Поэтому добычные работы в рассматриваемых условиях являются ведущими при выборе оборудования и расчете параметров системы разработки. Для обеспечения низкого уровня потерь угля выемка пласта должна осуществляться со стороны его кровли, а траектория движения режущей кромки зубьев ковша должна совпадать с направлением залегания пласта. Поэтому технологические возможности выемочного оборудования должны наиболее полно отвечать этому условию. В настоящем исследовании выбор вида выемочного оборудования основывается на сопоставлении условий залегания пластов в породугольной заходке и технологических возможностей одноковшовых экскаваторов по прочерпыванию – обратных гидравлических лопат (экскаватор типа ЭГО), с отличительным признаком (расчетом параметров) от ранее существующих работ – закладкой выработанного пространства породугольной заходки.

Для цитирования: Селюков А.В., Терентьев Д.Д. Обоснование высоты уступа и шага смещения обратной гидравлической лопаты при закладке выработанного пространства породугольной заходки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 91-102. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-91-102, EDN: XOGWUL

При освоении открытым способом
перспективных угольных месторождений

Кузнецкого бассейна эффективность будет обеспечиваться за счет применения систем разработки с внутренним отвалообразованием, в частности, за счет использования углубочно-сплошной рабочей зоны карьерных полей [1]. Первоначальным этапом такого технологического решения является целенаправленное формирование техногенного потенциала выработанного пространства путем строительства емкости под отвал. Как отмечают ученые-горняки из МГГУ [2, 3], связующим звеном и методической основой, обобщающей параметры открытой геотехнологии, является высота уступа в зоне углубления горных работ. Причем следует отметить, что в работах вышеуказанных авторов выбор основывается на группе критериев, объединяющих такие условия, как режим горных работ, массогабаритные показатели оборудования и эффективность освоения инвестиционных ресурсов, а также период окупаемости. В вышеобозначенных работах не установлена взаимосвязь высоты уступа, условий залегания пластов и применяемого добычного оборудования для углубочно-сплошной рабочей зоны и использования вскрышного комплекса типа ЭО (по классификации технологических комплексов, предложенных акад. В. В. Ржевским [4]).

Отдельно следует отметить, что в ряде работ, посвященных проектированию послонной отработки породугольных панелей, имеются отдельные методические основы, учитывающие влияние высоты уступа, условий залегания пласта, но не предусматривающие закладку выработанного пространства породугольной заходки в углубочно-сплошной рабочей зоне [5-11]. Расчеты параметров, включая определение высоты уступа слоевых технологических схем, выполнены к.т.н. Стрельниковым А. В. для условий установки ЭГО в пределах угольного пласта [12, 13].

Технологическое решение закладки выработанного пространства отработанной породугольной заходки (в дальнейшем используем аббревиатуру ПУЗ) обусловлено спецификой применения вскрышного экскаваторно-отвального технологического комплекса в зоне углубочных работ [14], поэтому все дальнейшие расчеты в данной публикации будут рассматриваться с позиции определения следующих параметров:

- параметр 1 – расчет в поперечной плоскости сечения ПУЗ высоты уступа, совмещенного с траекторией нижнего черпания экскаватора типа ЭГО (находится за пределами пласта) и условием залегания наклонных и крутопадающих пластов

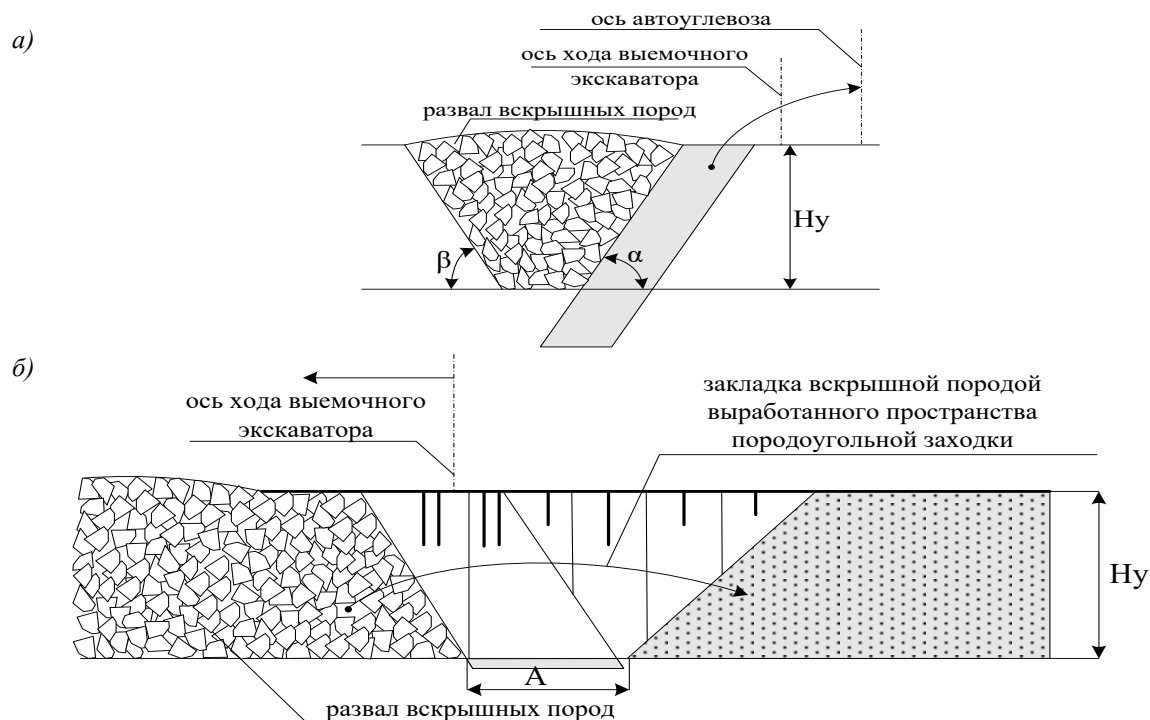


Рис. 1. Общие схемы отработки породугольных заходок экскаватором типа ЭГО в условиях углубочно-сплошной рабочей зоны, поперечное сечение (а), продольное сечение (б), где H_y – высота ПУЗ, м; α – угол падения пласта, град.; β – угол откоса уступа, град., A – величина смещения ЭГО по линии простирания пласта

Fig. 1. General schemes for mining coal-bearing approaches with an EGO-type equator in conditions of a deep-continuous working zone, cross section (a), longitudinal section (b), where H_y – the height of the PUZ, m; α – the angle of incidence of the formation, deg.; β – the angle of slope of the ledge, deg., A – the magnitude of the EGO's displacement along the line of the stratum

(общая схема представлена на Рис. 1а);

- параметр 2 – определение шага передвижки экскаватора по линии простирания пласта относительно проверки ограничения радиуса черпания в пределах ширины заходки и радиуса разгрузки в выработанное пространство ПУЗ (общая схема представлена на Рис. 1б).

Дальнейшее аналитическое и графическое моделирование определения параметров отработки ПУЗ экскаватором ЭГО основывается относительно параметров 1 и 2.

Сравнительной оценке добычных работ карьерными лопатами посвящено исследование Кузнецкого филиала НИИОГР [15]. Основное внимание уделено определению величины потерь угля при прочерпывании угольно-породного контакта экскаваторами различного типа. Анализ производился для мехлопаты ЭКГ-12,5, прямой гидравлической лопаты ЭГ-12 и обратной гидравлической лопаты ЭГО-8. Зачистка почвы пласта экскаваторами ЭКГ-12,5 и ЭГ-12 осуществляется верхним черпанием, экскаватором ЭГО-8 – нижним. Для этих экскаваторов построены зависимости потерь угля от угла падения пласта. В анализе отмечено [15], что при разработке прямыми лопатами, механическими или гидравлическими, наклонных и крутых пластов в процессе выемки угля (по почве пласта) зубья ковша отрываются от плоскости угольно-породного контакта раньше, чем достигается максимальная высота черпания экскаватора. Если в этих условиях работать с максимальной высотой черпания, то на почве пласта останутся целики угля в виде призм недобора. Доказано, что потеря угля в целиках экономически не оправдана и, кроме того, если черпать породу над кровлей пласта также по плоскости угольно-породного контакта, то оставляемая над кровлей пласта породная призма недобора будет засорять уголь.

В связи с этим рациональная высота уступа для прямых лопат определяется условием, при котором осуществляется прочерпывание угольно-породного контакта. В тех же условиях для обратных гидролопат, которые производят черпание ниже уровня стояния и работают в тяговом режиме (движение ковша «на себя»), высота уступа определяется из условия максимального использования параметров экскаватора. При этом параметры призмы недобора могут быть сведены к минимуму.

Применение экскаваторов типа ЭГО для разработки ПУЗ по бестранспортной технологии имеет следующие особенности [14]. Экскаватором попеременно производится выемка взорванной породы со складированием в выработанное пространство породугольной заходки и выемка угольных пластов с погрузкой угля в автотранспорт.

В ряде публикаций [15-17] рекомендуется работа обратной гидролопаты нижним черпанием для обеспечения высокой производительности, хотя не исключается работа верхним черпанием. Однако при верхнем черпании время рабочего цикла экскаватора существенно увеличивается, что снижает его производительность. Добычные работы производятся при нормальной высоте уступа, т. е. при подготовке к выемке пластов с работой обратных гидролопат необходимо обеспечить сохранность пласта и минимальное его перемешивание с породой. Подготовка к выемке таких пластов теоретически обоснована в работе [18], где представлены схемы обустройства сложноструктурных угольных блоков.

Высота уступа при работе обратных гидролопат определяется по условию ведения добычных работ. Высота уступа должна отвечать следующим требованиям: должно обеспечиваться максимальное использование рабочих параметров экскаваторов; должна выполняться операция закладки ПУЗ породой; должна обеспечиваться погрузка угля в углевоз при установке его на площадке уступа; должна обеспечиваться безопасная работа экскаватора.

Определение высоты уступа при работе обратных гидролопат нижним черпанием рассмотрено в работах [15-17]. Впервые теоретическое обоснование высоты отработки забоя нижним черпанием изложено в работе горного института Кольского научного центра РАН [17]. В работе приведен геометрический анализ формирования траектории движения зубьев ковша при копании, однако не представлено аналитическое уравнение этой траектории. На основании анализа траектории отмечается, что высота забоя определяется расстоянием между уровнем стояния экскаватора и зубьями ковша при наибольшем возможном наклоне рукояти вниз. Фактором, влияющим на высоту забоя при разработке массива взорванной горной массы, является ширина призмы возможного обрушения, определяемая углом долговременной устойчивости откоса уступа или забоя. По условию безопасной работы экскаватора его необходимо устанавливать за ее пределами. В работе рекомендуются следующие значения глубины забоя (высоты уступов): для экскаваторов отечественного производства ЭГО-6 – 10м, ЭГО-8 – 12м, ЭГО-15 – 13м. Однако эти показатели рассчитаны только для не взорванного массива при рабочем угле откоса, равном 70°. Кроме того, в работе отсутствуют исследования по влиянию угла устойчивого откоса на высоту забоя (высоту уступа). Следует также отметить, что предлагаемый в работе [17] метод определения высоты забоя затруднен для практического применения, так как представляет

сложную систему тригонометрических формул. В справочнике [16] отмечается, что максимальная высота уступа для работы обратных гидролопат при работе их нижним черпанием зависит от угла устойчивого откоса с учетом дополнительной нагрузки на массив, возникающей при работе экскаватора. В работе также отмечается, что при использовании данных этой таблицы рекомендуется для более мощных экскаваторов принимать меньшее из возможных значений, для экскаваторов с меньшей вместимостью ковша – большее значение. Данные справочника имеют практический интерес и используются в исследовании, но необходимы дополнительные расчеты, как по другим моделям экскаваторов, так и для условий разработки взорванных пород.

В работе Кузнецкого филиала НИИОГР [15] рассмотрены условия применения обратных

гидролопат для разработки сложноструктурных угольных месторождений Кузбасса. В работе описана траектория движения зубьев ковша обратной гидравлической лопаты параболой вида

$$H_{yi} = a * R_{ci}^2 + b * R_{ci} \quad (1)$$

где H_{yi} – текущее значение глубины черпания (высоты уступа), м; R_{ci} – текущее значение радиуса черпания, м; a , b – коэффициенты уравнения.

Формулы для расчета коэффициентов уравнения выведены для трех характерных точек траектории в', 2 и 3 (Рис. 2). Точка в' расположена на горизонте установки экскаватора и принята отстоящей от оси вращения экскаватора на расстояние максимального радиуса черпания ($R_{c,max}$). Точка 2 соответствует положению зубьев ковша при максимальном угле наклона рабочего оборудования экскаватора

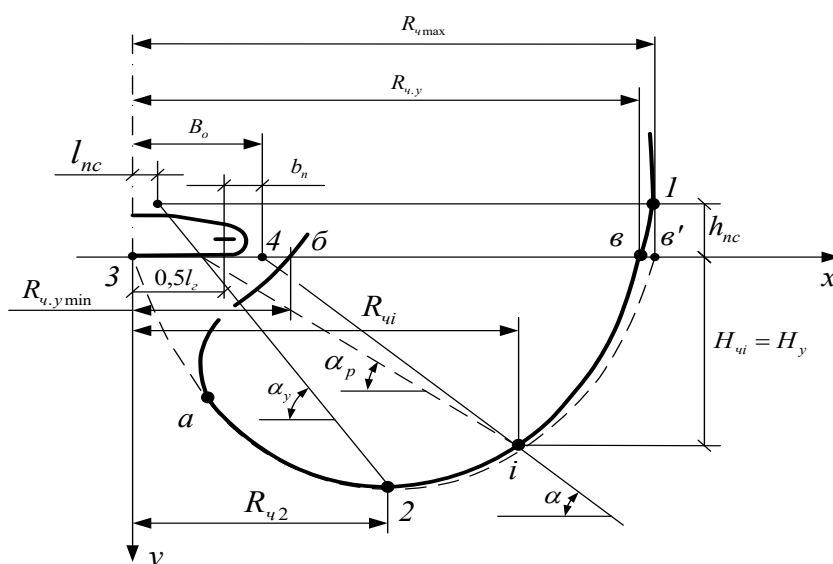


Рис. 2. Схема к определению значений высоты уступа и радиуса черпания по траектории движения экскаватора типа ЭГО при нижнем черпании, где α – угол падения пласта, град., α_p – рабочий угол откоса уступа, град., α_y – устойчивый угол откоса уступа, град., $R_{c,max}$ – максимальный радиус черпания, м, $R_{c,min}$ – минимальный радиус черпания, м., R_{cy} – радиус черпания на горизонте установки экскаватора, м., $R_{c,min}$ – минимальный радиус черпания на горизонте установки экскаватора, м., R_{ci} – радиус черпания от оси хода до точки i , м., R_{c2} – радиус черпания от оси хода до точки 2, м., b_n – берма безопасности, м., B_o – расстояние от оси хода до верхней бровки ПУЗ, м., l_z – длина гусениц ЭГО, м., l_{nc} – длина, определяющая положение точки 2 на траектории черпания, м., h_{nc} – вертикальное расстояние от верхней площадки уступа до зубьев ковша экскаватора при максимальном радиусе черпания, м., H_{ci} – глубина черпания, м., H_y – высота уступа, м, 1, 2, 3, 4, а, в, в' – точки, фиксирующие траекторию движения ковша ЭГО

Fig. 2. Scheme for determining the values of the height of the ledge and the scooping radius along the trajectory of the EGO-type excavator during lower scooping, where α – the angle of incidence of the formation, deg., α_p – the working angle of the slope of the ledge, deg., α_y – the stable angle of the slope of the ledge, deg., $R_{c,max}$ – the maximum scooping radius, m, $R_{c,min}$ – the minimum scooping radius, m., R_{cy} – scooping radius on the installation horizon, m., $R_{c,min}$ – minimum scooping radius on the excavator installation slide, m., R_{ci} – scooping radius from the stroke axis to point i , m., R_{c2} – scooping radius from the stroke axis to point 2, m., b_n – safety berm, m., B_o – the distance from the stroke axis to the upper edge of the PUZ, m., l_z – the length of the EGO tracks, m., l_{nc} – the length determining the position of point 2 on the scooping trajectory, m., h_{nc} – the vertical distance from the top of the ledge to the teeth of the excavator bucket at the maximum scooping radius, m., H_{ci} – the scooping depth, m., H_y – the height of the ledge, m, 1, 2, 3, 4, a, b, b' are the points fixing the trajectory of the EGO bucket movement.

к горизонту, равному 60° . Согласно порядку формирования траектории движения зубьев ковша [17], максимальный радиус черпания достигается в т. 1 на Рис. 1 при максимально выдвинутом рабочем оборудовании ($R_{ч.макс}$) на высоте оси пяты стрелы ($h_{пс}$) относительно уровня установки экскаватора. На участке т. 1-т. 2 траектория описывается по окружности с радиусом ($R_{ч.макс} - l_{пс}$), где $l_{пс}$ – положение оси пяты относительно оси вращения экскаватора. Поэтому расстояние т. 2 относительно экскаватора меньше, чем $R_{ч.макс}$. Поэтому принята в работе [15] траектория движения ковша, проходящая через т. 2, может давать при расчетах отклонения по высоте уступа в меньшую сторону.

Для повышения точности расчетов за характерную опорную точку целесообразно принять т. 1, а не т. 2 (Рис. 2). Согласно работе [17] от точки 2 траектория описывается кривой 2-а-б, так как это участок траектории от вращения экскаватора с плоскостью установки экскаватора. На основании уравнения траектории предложен метод определения высоты уступа, заключающийся в совместном решении уравнений траектории движения зубьев ковша и линии устойчивого откоса уступа.

На основании этого метода для условий разработки массива горных пород нижним черпанием при угле рабочего откоса уступа более 60° рекомендуется принимать его высоту для крепких пород равной (0,8-0,9) $H_{ч.макс}$, а для мягких пород с углом рабочего откоса уступа менее $45-50^\circ$ высоту уступа принимать равной (0,65-0,8) $H_{ч.макс}$. В работе [15] также учитывается угол устойчивого откоса уступа при установке экскаватора в забое. Однако его величина при расчетах высоты уступа не указывается.

Анализ приведенных публикаций позволил

сделать следующие промежуточные выводы. Существует ряд рекомендаций по определению высоты уступа при работе обратной гидролопаты нижним черпанием. Однако методики, по которым рассчитываются значения высоты уступа, не полностью отвечают сформулированным выше требованиям.

Поэтому в данной работе проведены дополнительные исследования по уточнению существующих рекомендаций с учетом выполнения сформулированных требований к высоте уступа и закладки ПУЗ. За основу расчета высоты уступа принят методический подход, предложенный КФ НИИОГР, включающий аналитическое описание траектории движения зубьев ковша и совместное решение уравнения траектории и уравнения линии откоса уступа. Однако за характерную начальную точку принимается т. 1, а не т. 2 (Рис. 2).

Траектория движения зубьев ковша описывается параболой вида

$$y_i = a * x_i^2 + b * x_i + c \quad (2)$$

где x_i – текущее значение глубины черпания, м; y_i – текущее значение радиуса черпания, м; a , b , c – коэффициенты уравнения параболы.

Коэффициенты a , b , c определяются из решения системы уравнения

$$\begin{aligned} a * \sum x^4 + b * \sum x^3 + c * \sum x^2 &= \sum x^2 * y \\ a * \sum x^3 + b * \sum x^2 + c * \sum x &= \sum x * y \\ a * \sum x^2 + b * \sum x + c * n &= \sum y \end{aligned} \quad (3)$$

Координаты y_i для т. 2 ($R_{ч2}$) определяется по формуле, предложенной в работе [12]

$$y_i(R_{ч2}) = L_{пс} + (H_{ч.макс} + h_{пс}) + ctg \alpha_y \quad (4)$$

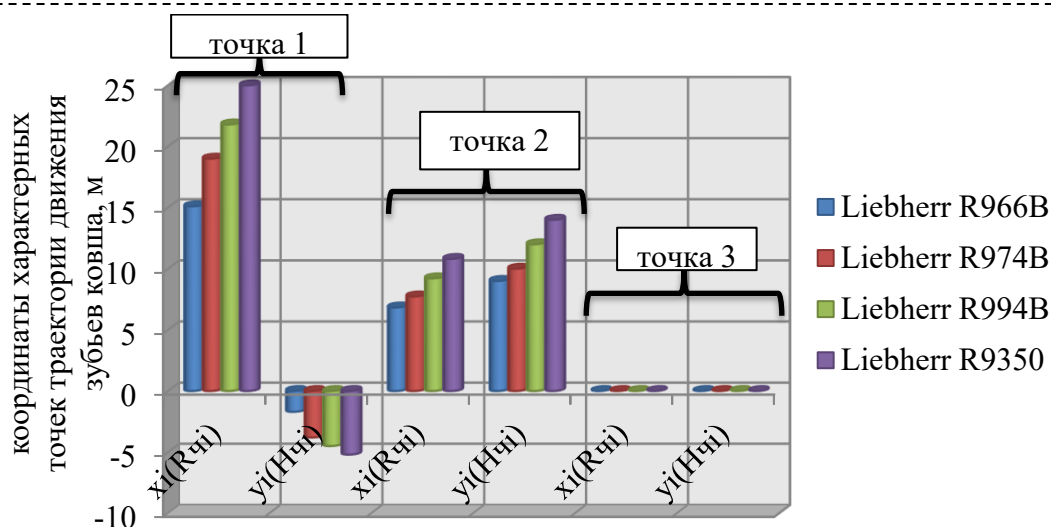


Рис. 3. Значения координат характерных точек траектории движения зубьев ковша обратной гидравлической лопаты в системе координат x_i и y_i

Fig. 3. The coordinate values of the characteristic points of the trajectory of the teeth of the bucket of the reverse hydraulic shovel in the coordinate system x_i and y_i

Значения координат характерных точек траектории движения зубьев ковша ЭГО в системе координат x_i, y_i и выраженных в метрах приведены на Рис. 3.

Для дальнейших расчетов уравнения для определения текущих значений H_{qi} и R_{qi} имеют вид

$$\begin{aligned} H_{qi} &= a * R_{qi}^2 + b * R_{qi} \\ R_{qi} &= \frac{\sqrt{b^2 - 4 * a * H_{qi}} - b}{2 * a} \end{aligned} \quad (5)$$

Как отмечалось выше, высота уступа определяется по условию ведения добычных работ на момент выполнения операции зачистки почвы пласта, когда максимально используются рабочие параметры экскаватора.

Высота уступа (забоя) определяется совместным решением уравнений траектории движения зубьев ковша и профиля откоса уступа, образованного линией горизонта установки экскаватора и почвой пласта (ломанная 3-4-й на Рис. 2).

$$H_{qi} = a * R_{qi}^2 + b * R_{qi} \quad (6)$$

$$R_{qi} = H_{qi} * ctg\alpha + 0,5 * l_r$$

Ширина бермы безопасности зависит от углов устойчивого откоса уступа по не взорванному массиву α_y и угла залегания пласта α . При угле устойчивого откоса больше или равном углу залегания пласта ($\alpha_y \geq \alpha$) ширина бермы безопасности равна нулю ($b_n=0$).

При $\alpha_y < \alpha$ ширина бермы безопасности при зачистке почвы пласта определяется по формуле

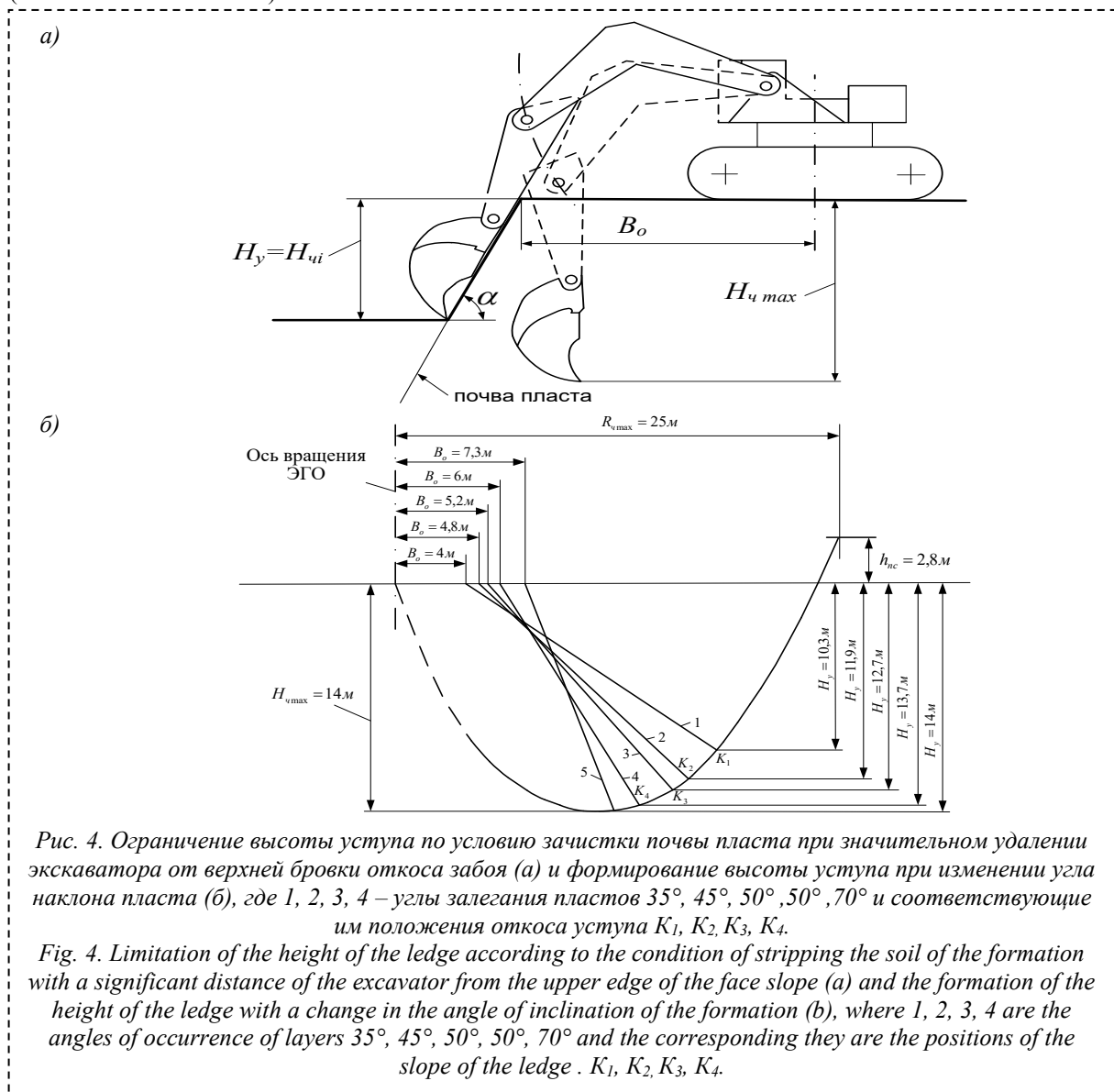
$$b'_n = H_y * (ctg\alpha_y + ctg\alpha) \quad (7)$$

Заменяем в формуле 6 параметр b'_n , получаем систему уравнений вида

$$H_{qi} = a * R_{qi}^2 + b * R_{qi} \quad (8)$$

$$R_{qi} = H_{qi} * ctg\alpha + 0,5 * l_r + H_{qi} * (ctg\alpha_y + ctg\alpha)$$

Решая уравнения относительно H_{qi} , получаем развернутое квадратное уравнение



$$a * H_{\text{чи}}^2 * \text{ctg}^2 \alpha_y + a * H_{\text{чи}} * \text{ctg} \alpha_y * l_r + 0,25 * a * l_r^2 + b * H_{\text{чи}} * \text{ctg} \alpha_y + 0,5 * l_r - H_{\text{чи}} = 0 \quad (9)$$

Для сокращения объема формулы расчета параметра $H_{\text{чи}}$ обозначим

$$T = \frac{(a * \text{ctg} \alpha_y * l_r + b * \text{ctg} \alpha_y - 1)}{a * \text{ctg}^2 \alpha_y} \quad (10)$$

$$Q = \frac{(0,25 * a * l_r^2 + 0,5 * b * l_r)}{a * \text{ctg}^2 \alpha_y}$$

Тогда $H_{\text{чи}}$ определится по формуле

$$H_{\text{чи}} = H_y = 0,5 * (\sqrt{T^2 - 4 * Q} - T) \quad (11)$$

На основе приведенных методических положений проведены расчеты по определению высоты уступа согласно следующих положений.

Положение оси вращения экскаватора относительно бровки забоя B_0 определяется по формуле (Рис. 4а), м:

$$B_0 = 0,5 * l_r + b'_n \quad (12)$$

При расчете высоты уступа проводится проверка по условию технической возможности обратной гидролопаты производить зачистку почвы пласта на всю высоту забоя, это обусловлено тем, что при больших углах залегания пласта параметр B_0 может достигать значения 9-12 м. В этом случае возникает вероятность того, что стрела не сможет занять своего положения, так как верхняя бровка откоса будет этому препятствовать (Рис. 4б). Такая проверка осуществлялась графическим способом для больших значений угла залегания пласта ($\alpha=70-90^\circ$) и при необходимости высота уступа корректировалась.

На Рис. 4 на примере экскаватора Liebherr R9350 показано формирование высоты. Как видно из схемы, при углах наклона пласта $36-50^\circ$ положение нижней бровки откоса забоя, точки K_1 , K_2 , находятся на крутом верхнем участке

ветви параболы и обуславливают небольшую высоту уступа. Необходимо отметить, что на этом участке небольшое изменение угла залегания пласта (например, на 5°) приводит к увеличению высоты уступа на 0,8–0,9 м. При углах залегания пласта $50-60^\circ$ высота уступа возрастает за счет того, что нижняя бровка откоса забоя (точка K_3) смещается по траектории вниз. Однако темп роста высоты забоя уменьшается до 0,4–0,6 м (при изменении угла падения пласта на 5°), так как на участке траектории начинается переход от крутого участка параболы к пологому. При крутом залегании пластов ($60-70^\circ$) нижняя бровка забоя располагается вблизи вершины параболы на пологом участке и здесь изменение высоты уступа незначительное (0 до 0,1 м). При углах залегания пластов свыше 70° ($70-90^\circ$) и при большей ширине бермы безопасности b'_n (4-8м) сказывается влияние технической возможности осуществления экскаватором нижнего копания, как было показано выше на Рис. 4а. В соответствии с таким порядком происходит формирование высоты уступа по условию зачистки почвы угольного пласта при добычных работах.

На Рис. 5 показаны графики зависимости высоты уступа H_y от угла падения пластов, построенные по аналитическим формулам 1-12.

Аналитические зависимости функции $H_y = f(\alpha)$, показывают, что с увеличением угла наклона пласта возрастает высота уступа, так как при малых значениях α требуется максимальное использование радиуса черпания, но, согласно траектории движения зубьев ковша, обеспечивается малая высота забоя. С увеличением угла α лучше используется параметр по глубине черпания, и высота уступа возрастает. Максимальное использование глубины черпания при крутом залегании пластов

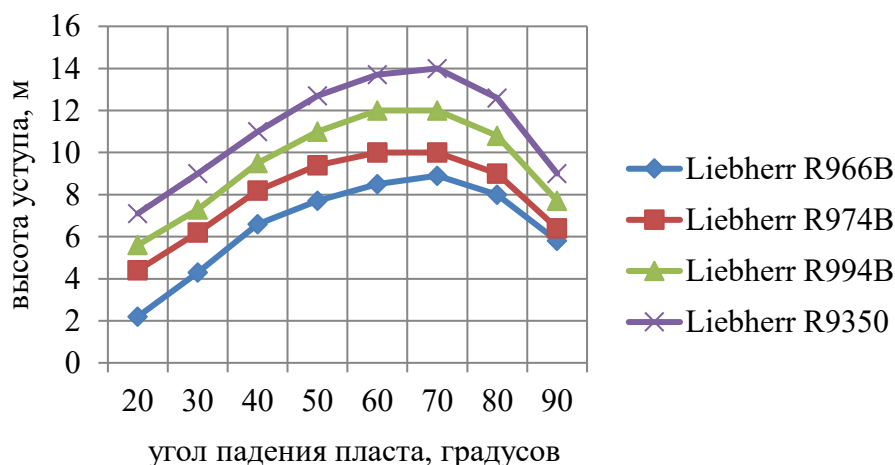


Рис. 5. Расчетная зависимость высоты уступа от угла падения пласта для экскаватора типа ЭГО
Fig. 5. The calculated dependence of the height of the ledge on the angle of incidence of the formation for an excavator of the EGO type

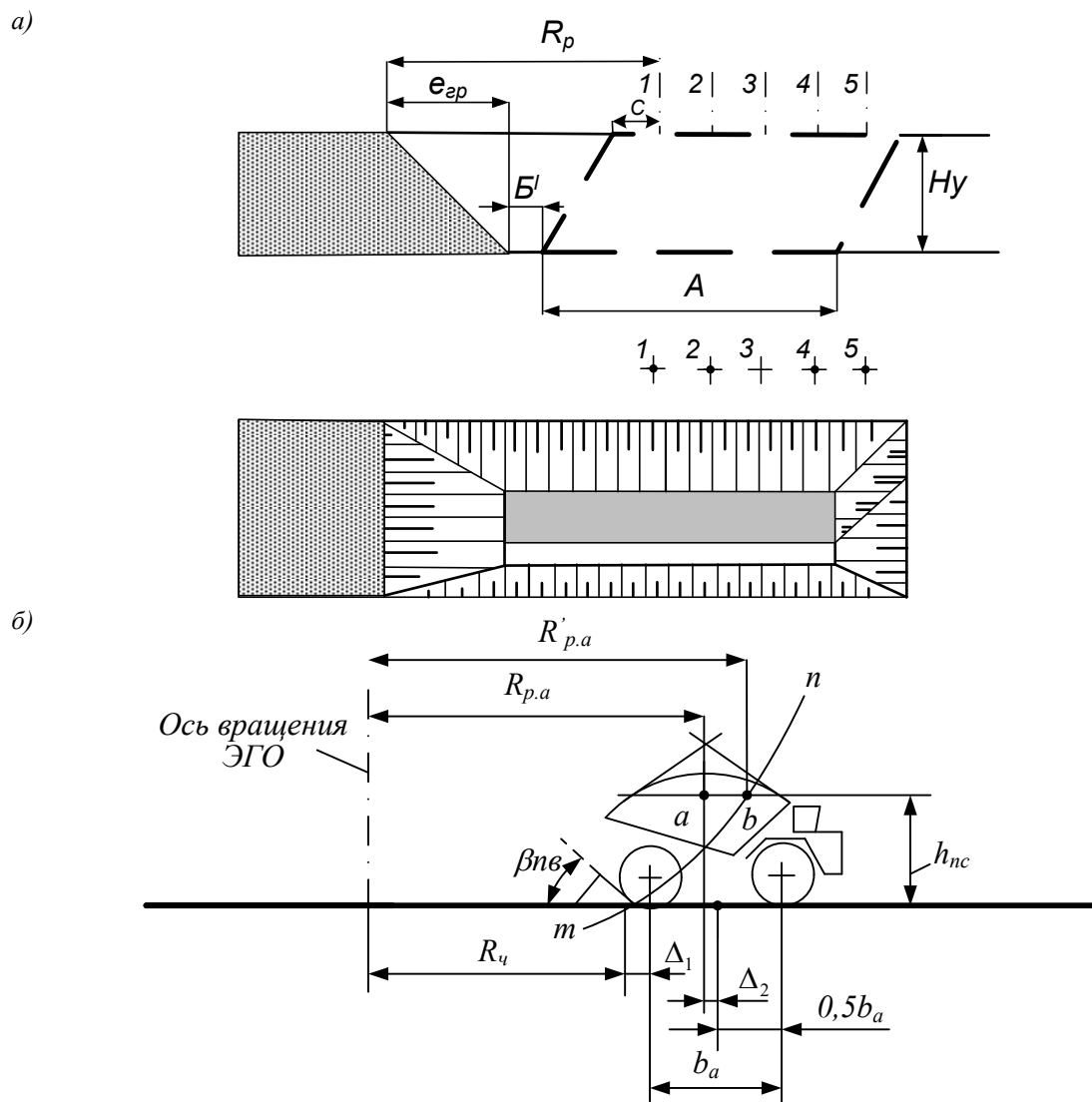


Рис. 6. Технологическая схема производства работ ЭГО на момент зачистки пласта и засыпки выработанного пространства ПУЗ (а) и расчетная схема проверки возможности погрузки угля в автосамосвалы ЭГО, где A – ширина экскаваторной заходки, м, B' – расстояние между заходкой и засыпанным пространством, м, e_{2p} – выход разгрузочного параметра, м, 1-5 – положение ЭГО в пределах заходки, h_{nc} – погрузочная высота автосамосвала, м; $R'_{p,a}$ – максимальный радиус разгрузки на уровне высоты погрузки автосамосвала, м; $R_{p,a}$ – необходимый радиус погрузки на уровне высоты погрузки автосамосвала, м; R_u – радиус черпания экскаватора, м, точка a – положение ковша в начале погрузки породы в кузов, точка b – пересечение траектории движения зубьев ковша с поверхностью, расположенной на уровне высоты погрузки автосамосвала, кривая nm – участок траектории движения зубьев ковша. Δ_1 – положение от задних колес автосамосвала относительно линии нижней бровки породного вала, м; Δ_2 – смещение точки центра погрузки a относительно середины базы автосамосвала, м (принимаем $\Delta_1 \approx \Delta_2 = 1,4$ м), β_{nv} – угол откоса породного вала, град

Fig. 6. The technological scheme of EGO's work at the time of stripping the formation and filling the worked-out space of the PUZ (a) and the calculation scheme for checking the possibility of loading coal into EGO dump trucks, where A – the width of the excavator entry, m, B' – the distance between the entry and the filled space, m, e_{2p} – the exit unloading steam meter, m, 1-5 – the position of the EGO within the approach, h_{nc} – the loading height of the dump truck, m; $R'_{p,a}$ – the maximum unloading radius at the level of the dump truck loading height, m; $R_{p,a}$ – the required loading radius at the level of the dump truck loading height, m; R_u – the radius of the excavator, m, point a is the position of the bucket at the beginning of loading the rock into the body, point b is the intersection of the trajectory of the bucket teeth with the surface located at the level of the dump truck loading height, curve nm is the section of the trajectory of the bucket teeth. Δ_1 is the position from the rear wheels of the dump truck relative to the line of the lower edge of the rock shaft, m; Δ_2 is the displacement of the loading center point a relative to the middle of the base of the dump truck, m (we take $\Delta_1 \approx \Delta_2 = 1.4$ m), β_{nv} – the slope angle of the rock shaft, deg

– 60-75°. При дальнейшем залегании пластов снижение высоты уступа связано с конструктивными особенностями ЭГО.

В целях оценивания шага смещения сделаем ограничение, что все работы выполняются в пределах максимальных рабочих параметров экскаватора, тогда с позиции выемочных работ линейным размером, характеризующим шаг смещения, будет экскаваторная заходка шириной A (м), но с условием ее перпендикулярности относительно линии простирания пласта. С учетом того, что пределах заходки выполняется сразу несколько рабочих процессов, таких как отработка толщи вскрышных пород над кровлей пласта, выемка и погрузка угля в автосамосвалы, закладка выработанного пространства ПУЗ породой, параметры будут рассчитываться относительно этого положения. На Рис. 6а представлена общая схема производства работ на момент зачистки почвы пласта экскаватора.

уступа на расстоянии ширины бермы безопасности. При 4 и 5 положении экскаватор осуществляет оборку откоса уступа. При такой схеме добычных работ необходимо оценить возможность погрузки угля в автосамосвалы обратной гидравлической лопатой (Рис. 6б)., в рассматриваемой схеме автосамосвал устанавливается на одном горизонте с выемочным экскаватором [14]. Проверка на возможность погрузки осуществляется путем сравнения параметров $R_{p,a}$ и $R'_{p,a}$. Если $R_{p,a} \leq R'_{p,a}$, то радиуса разгрузки экскаватора на высоте погрузки автосамосвала достаточно. Если $R_{p,a} > R'_{p,a}$, то автосамосвалы по принятой схеме невозможны.

Параметр $R'_{p,a}$ рассчитывается по уравнению траектории движения зубьев ковша

Параметр $R_{p,a}$ определяется по формуле, м

$$R_{p,a} = R_{\text{ч}} + \Delta 1 + 0,5 * b_a - \Delta 2 \quad (13)$$

Установка обратной гидравлической лопаты в пределах заходки для осуществления разработки

Таблица. Значения параметров $H_y, B', C, e_{\text{зр}}$ для обратных гидравлических лопат

Table. Values of parameters $H_y, B', C, e_{\text{зр}}$ for reverse hydraulic blades

Экскаватор, ширина заходки	Параметр	Ед. изм.	Угол падения пласта α , градус																	
			35			45			55			65			75			85		
			α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3
Liebherr R966B, A=23м	H_y	м	6,6	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0
	B'	м	2,7	3,4	4,1	2,0	2,9	3,7	1,6	2,5	3,4	1,4	2,3	3,2	1,9	2,8	3,6	3,2	3,8	4,4
	C	м	4,9	4,4	4,0	4,6	4,2	3,8	4,6	4,2	3,6	4,5	4,0	3,5	4,7	4,3	3,8	5,0	4,6	4,2
	$e_{\text{зр}}$	м	1,8	2,3	2,7	1,1	1,5	1,9	0,4	0,8	1,4	0,1	0,6	1,1	0,7	1,1	1,6	2,5	2,9	3,3
Liebherr R974B, A=24м	H_y	м	8,2	8,1	8,6	7,4	7,9	8,4	7,0	7,5	8,0	6,6	7,1	7,6	6,2	6,7	7,2	5,8	6,3	6,8
	B'	м	1,8	2,7	3,5	1,1	2,1	3,1	0,7	1,8	2,8	0,7	1,8	2,8	1,3	2,3	3,2	2,8	3,5	4,2
	C	м	1,5	1,1	0,6	1,4	0,8	0,2	1,3	0,7	0,1	1,3	0,7	0,1	1,4	0,9	0,4	1,8	1,3	1,0
	$e_{\text{зр}}$	м	7,4	7,8	8,3	6,4	7,0	7,6	5,9	6,5	7,1	5,9	6,5	7,1	6,7	7,2	7,7	8,7	9,2	9,5
Liebherr R994B, A=25м	H_y	м	9,5	9,4	9,9	8,6	9,1	9,6	7,4	7,9	8,4	6,8	7,3	7,8	6,4	6,9	7,4	5,9	6,4	6,9
	B'	м	1,0	2,0	3,0	0,2	1,4	2,5	0	0,9	2,1	0	0,9	2,1	0,2	1,5	2,6	2,0	2,9	3,7
	C	м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$e_{\text{зр}}$	м	10,2	10,1	10,6	8,8	9,3	9,8	7,9	8,4	8,9	7,1	7,6	8,1	6,9	7,4	7,9	9,0	9,5	10,0
Liebherr R9350, A=29м	H_y	м	11,0	10,9	11,4	10,0	10,5	11,0	9,0	9,5	10,0	8,0	8,5	9,0	7,0	7,5	8,0	6,0	6,5	7,0
	B'	м	0,2	1,4	2,5	0	0,6	1,9	0	0,1	1,5	0	0	1,4	0	0,6	1,9	1,3	2,3	3,2
	C	м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$e_{\text{зр}}$	м	11,5	11,4	11,9	10,0	10,5	11,0	9,0	9,5	10,0	8,7	9,2	9,7	7,5	8,0	8,5	10,0	10,5	11,0

Определение ширины заходок A для ЭГО представлено в работах [19, 20]. По соотношению $A/H_y^{\text{max}} = 2,1-2,6$ заходки можно считать широкими, так как для нормальных заходок это соотношение 0,8-1,2 [19, 20]. Широкие заходки, как известно [4, 17], отрабатываются с нескольких установок экскаватора по ширине заходки, поэтому производство добычных работ также принимается по этой схеме. Схема позволяет равномерно по ширине заходки зачистить угольный пласт. Путем маневрирования экскаватор последовательно занимает несколько положений 1, 2, 3, При первом положении экскаватор находится от верхней бровки откоса

одним прямолинейным ходом осуществляется по условию

$$R_{\text{чmax}} \geq (A - b_{\text{п}} - 0,5 * \text{Ш}_{\text{хг}}) \quad (14)$$

где $\text{Ш}_{\text{хг}}$ – ширина хода ЭГО, м [21].

Управляющим параметром поперечной установки экскаватора в пределах заходки является расстояние между бровкой откоса контура заходки и ходовой тележкой экскаватора (параметр C на Рис. 6а). Если условие (формула 14) выполняется, то экскаватор не надо смещать в сторону от бровки, так как радиуса черпания достаточно для полной разработки за один проход и зачистки откоса уступа по массиву. Тогда $C=0$.

Если условия не выполняются, то экскаватор необходимо сместить в сторону массива на расстояние, обеспечивающее зачистку откоса уступа.

Величина смещения C определяется по формуле

$$C = A - b_n - 0,5 * Ш_{хг} - R_{чmax} \quad (15)$$

Величина «выхода» разгрузочного параметра ЭГО в выработанное пространство ПУЗ для ее закладки определяется по формуле

$$e_{гр} = R_{рmax} - K_n * H_y * ctg\alpha_y - 0,5 * Ш_{хг} - C \quad (16)$$

где K_n – коэффициент, учитывающий заложение откоса уступа [22].

Результаты проверки и величина параметра $e_{г.р}$ приведены в таблице

Анализ таблицы показывает, что экскаватор Liebherr R966B не эффективен при работе, в этом случае «выход» разгрузочного параметра $e_{г.р}$ незначительный (0,1-3,0), что не позволит засыпать выработанное пространство. Другой экскаватор Liebherr R994B пригоден для сброса породы в выработанное пространство, так как имеет параметр для сброса $e_{г.л}$ в пределах $6 \div 10$ м. Особенно приемлемы по параметру $e_{г.р}$ экскаваторы Liebherr R974B и Liebherr R9350, что составляет для первого от 8 до 12 м и для второго от 10 до 13 м.

Вывод. При применении обратных гидравлических лопат для разработки породугольных заходов для наклонных и крутопадающих пластов высота уступа может быть принята в зависимости от угла падения пластов в пределах 0,8 - 1,0 $H_{ч.мах}$ ($H_{ч.мах}$ – максимальная глубина копания экскаватора). Черпание обратной гидролопаты рекомендуется ниже, так как применение верхнего черпания может привести к увеличению уровня потерь или засорению угля породы. Передвижка экскаватора вдоль линии простирания пласта осуществляется на основе расчета величины «выхода» разгрузочного параметра ЭГО в выработанное пространство породугольной заходки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В. С. Формирование ресурсосберегающих технологий открытой разработки свит наклонных и крутых угольных пластов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук 05.15.03. МГТУ. 1997. 40с.
2. Коваленко В. С., Штейнцайг М. Р. Об эффективности использования техногенного ресурса выработанного пространства при углубочно-сплошных системах разработки угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №5. С. 211–215.
3. Таланин В. В. Обоснование параметров и технологии строительства карьера первой очереди при углубочно-сплошных поперечных системах разработки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. : МГТУ, 2006. 20 с.
4. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Часть 2.

Технология и комплексная механизация. М. : Недра, 1985. -549с.

5. Литвин О. И. [и др.] Определение энергоэффективного положения рабочего оборудования и эффективного радиуса черпания гидравлических экскаваторов на открытых горных работах // Маркшейдерия и недропользование. 2022. № 4 (120). С. 38–44.

6. Литвин О. И. [и др.] Об определении параметров забойных блоков при ведении горных работ обратными гидравлическими лопатами // Горная промышленность. 2021. № 6. С. 76–81.

7. Кацубин А. В. [и др.] Технология опережающей выемки наклонных и крутых угольных пластов обратными гидравлическими лопатами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 11. С. 27–36.

8. Литвин О. И. Обоснование рациональных технологических параметров производства вскрышных работ обратными гидравлическими лопатами на разрезах Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 119 с.

9. Сысоев А. А., Литвин О. И. Рациональная мощность слоя при отработке вскрышных уступов обратными гидравлическими экскаваторами // Кемерово. Вестник КузГТУ. 2008. № 2. С. 35–37.

10. Тюленев М. А. [и др.] Матричный метод идентификации схем забоев обратных гидравлических лопат // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S10. С. 34–41.

11. Стрельников, А. В. Обоснование структур слоевых технологических схем разработки угленасыщенных зон разрезов Кузбасса обратными гидравлическими лопатами: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 152 с.

12. Стрельников А. В. Типовые паспорта забоев для разработки угленасыщенных зон карьерных полей разрезов Кузбасса обратными гидравлическими лопатами. Часть 1. Общие положения // Техника и технология горного дела. 2019. № 3 (6). С. 4–20.

13. Стрельников А. В. Типовые паспорта забоев для разработки угленасыщенных зон карьерных полей разрезов Кузбасса обратными гидравлическими лопатами. Часть 2. Паспорта экскаваторных забоев // Техника и технология горного дела. 2019. № 4 (7). С. 4–29.

14. Терентьев Д. Д., Селюков А. В. Патент 2830622 РФ, МПК E21C 41/00 (2006.01) E21C 41/28 (2006.01) СПК E21C 41/00 (2024.01) E21C 41/28 (2024.01) Способ открытой разработки угольной свиты.

15. Томаков П. И., Ненашев А. С., Рыбаков Б. Н. Гидравлические обратные лопаты для разработки сложноструктурных месторождений Кузбасса: Обзор. ЦНИИУголь. М., 1984. 50 с.

16. Открытые горные работы (справочник) // Горное бюро. М. : 1994. 590 с.

17. Мельников Н. Н., Неволин Д. Г., Скобелев Л. С. Технология применения и параметры карьерных гидравлических экскаваторов. Отв. ред. Н. Н. Мельников. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. 212 с.

18. Репин Н. Я., Богатырев В. П. [и др.] Буровзрывные работы на угольных разрезах. Под ред. Репина Н. Я. М.: Недра, 1987. 254 с.

19. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы. М. : Недра, 1985. 509с.

20. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. М. : Недра, 1982. 405 с.

21. Томаков П. И., Наумов И. К. Технология, механизация и организация открытых горных работ. М. : Изд-во Московского горного института, 1992. 464 с.

22. Беляков Ю. И. Экскаваторные работы: Справочник рабочего. М. : Недра, 1992. 288 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Селюков Алексей Владимирович, докт. техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, кафедра открытых горных работ (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: sav.ormpi@kuzstu.ru

Терентьев Данил Дмитриевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, кафедра открытых горных работ (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: vesorionovich@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Селюков Алексей Владимирович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования.

Терентьев Данил Дмитриевич – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, написание текста, выводы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

TO SUBSTANTIATE THE MINING REGIME OF DEEP-CONTINUOUS DEVELOPMENT SYSTEMS WITH AN EXCAVATOR-DUMP OVERBURDEN TECHNOLOGICAL COMPLEX

Alexey V. Selyukov,
Danil D. Terentyev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: sav.ormpi@kuzstu.ru



Article info

Received:

09 December 2024

Accepted for publication:

22 June 2025

Accepted:

30 June 2025

Published:

28 August 2025

Keywords: reverse hydraulic shovel, ledge height, displacement pitch, rock-cut, worked-out space

Abstract.

The open-pit mining of Kuzbass coal deposits is mainly determined by the following spatial principle of mining operations - along the strike line of the formation formation. According to this, the covering and enclosing overburden rocks from the face are transported by means of motor transport to external dumps, which generally determines the negative impact of the mining enterprise on the environment. Technological solutions are known – an in-depth continuous development system, when the overburden is placed in an internal dump. When justifying the type of excavation equipment for this system, it is necessary to take into account its main feature – the alternate production of overburden and mining operations in a coal mine with one excavator. Moreover, the main requirement is imposed on mining operations, which consists in ensuring the selective development of formations with minimal losses and clogging of coal with rock. Therefore, mining operations in the conditions under consideration are leading in the selection of equipment and calculation of the parameters of the development system. To ensure a low level of coal losses, the excavation of the formation should be carried out from the side of its roof, and the trajectory of the cutting edge of the bucket teeth should coincide with the direction of the formation. Therefore, the technological capabilities of the excavation equipment should most fully meet this condition. In this study, the choice of the type of excavation equipment is based on a comparison of the conditions of occurrence of layers in the rock-coal excavation and the technological capabilities of single-bucket excavators for excavation - reverse hydraulic shovels (excavator type EGO), with a distinctive feature (calculation of parameters) from previously existing works - the laying of the worked-out space of the coal deposit.

For citation: Selyukov A.V., Terentyev D.D. To substantiate the mining regime of deep-continuous development systems with an excavator-dump overburden technological complex. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):91-102. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-91-102, EDN: XOGWUL

REFERENCES

1. Kovalenko B.C. Formation of resource-saving technologies for the open development of formations of inclined and steep coal seams. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences 05.15.03. MGSU. 1997. 40 s.
2. Kovalenko B.C., Steinzeig M.R. On the efficiency of using the technogenic resource of the developed space in deep-continuous coal field development systems. *Mining information and analytical bulletin*. 2009; 5:211–215.
3. Talanin V.V. Substantiation of the parameters and technology of the construction of the first stage quarry with deep-continuous transverse development systems. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. M.: MGSU; 2006. 20 p.
4. Rzhnevsky V.V. Open-pit mining. Part 2. Technology and complex mechanization. M.: Nedra; 1985. 549 s.
5. Litvin O.I. [et al.] Determination of the energy-efficient position of working equipment and the effective scooping radius of hydraulic excavators in open-pit mining. *Surveying and subsoil use*. 2022; 4(120):38–44.
6. Litvin O.I. [et al.] On determining the parameters of downhole blocks during mining operations with reverse hydraulic shovels // *Mining industry*. 2021; 6:76–81.
7. Katsubin A.V. [et al.] Technology of advanced excavation of inclined and steep coal seams with reverse hydraulic shovels // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 11:27–36.
8. Litvin O.I. [et al.] Justification of rational technological parameters for the production of stripping operations with reverse hydraulic shovels at Kuzbass sections: dis. ... candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2012. 119 p.
9. Sysoev A.A., Litvin O.I. Rational layer power when working off overburden ledges with conventional hydraulic excavators // *Kemerovo. Bulletin of KuzSTU*. 2008; 2:35–37.
10. Tyulenev M.A. [et al.] Matrix method of identification of reverse hydraulic shovel face schemes. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; S10:34–41.
11. Strelnikov A.V. Substantiation of the structures of layered technological schemes for the development of carbon-saturated zones of Kuzbass sections with reverse hydraulic shovels: dis. ... candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2012. 152 p.
12. Strelnikov A.V. Standard passports of faces for the development of coal-saturated zones of quarry fields of Kuzbass sections with reverse hydraulic shovels. Part 1. General provisions. *Mining engineering and technology*. 2019; 3(6):4–20.
13. Strelnikov A.V. Standard passports of faces for the development of coal-saturated zones of quarry fields of Kuzbass sections with reverse hydraulic shovels. Part 2. Passport of excavator faces. *Technique and technology of mining*. 2019; 4(7):4–29.
14. Terentyev D.D., Selyukov A.V. Patent 2830622 RF, IPC E21C 41/00 (2006.01) E21C 41/28 (2006.01) SEC E21C 41/00 (2024.01) E21C 41/28 (2024.01) Method of open-pit mining of a coal formation.
15. Tomakov P.I., Nenashev A.S., Rybakov B.N. Hydraulic reverse shovels for the development of complex-structured deposits of Kuzbass: Review. *TSNIEiugol. M.*, 1984. 50 s.
16. Open-pit mining (handbook). Mining Bureau. M., 1994. 590 s.
17. Melnikov N.N., Nevolin D.G., Skobelev L.S. Technology of application and parameters of quarry hydraulic excavators /Ed. N.N. Melnikov. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1992. 212 s.
18. Repin N.Ya. [et al.] Drilling and blasting operations at coal mines. Ed. Repin N.Ya. M.: Nedra; 1987. 254 s.
19. Rzhnevsky V.V. Open-pit mining. Part 1. Production processes. M.: Nedra; 1985. 509 s.
20. Typical technological schemes of mining operations at coal mines. M.: Nedra, 1982. 405 s.
21. Tomakov P.I., Naumov I.K. Technology, mechanization and organization of open-pit mining. M.: Publishing House of the Moscow Mining Institute; 1992. 464 s.
22. Belyakov Yu.I. Excavator works: Handbook of the worker. M.: Nedra; 1992. 288 s.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexey V. Selyukov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: sav.ormpi@kuzstu.ru

Danil D. Terentyev, Postgraduate student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: vesorionovich@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexey V. Selyukov – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research.

Danil D. Terentyev – data collection and analysis, review of relevant literature, writing text, conclusions

All authors have read and approved the final manuscript.

