

Обоснование ширины экскаваторного забоя

Б.А. Абушаев¹, Г.С. Абушаева²

¹ООО «АТОМСТРОЙРЕЗЕРВ», Москва

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: В данной статье рассмотрен вопрос об обосновании ширины экскаваторного забоя как возможная основа для информационного технологического проектирования земляных работ. Произведена оценка влияния ширины экскаваторного забоя на длину хода экскаватора и, как следствие, на количество разрабатываемого грунта на одной технологической стоянке. Определена наиболее эффективная ширина экскаваторного забоя с помощью безразмерного коэффициента, характеризующего площадь поверхности разработки грунта, а также произведена оценка влияния физико-механических свойств грунтов на геометрию экскаваторного забоя.

Ключевые слова: экскаваторный забой, длина хода экскаватора, ширина призмы обрушения, устойчивость откоса, допустимое давление.

Актуальность исследования

Глобальная цифровизация человеческой деятельности не могла не затронуть строительную отрасль. Формирование информационных моделей становится неотъемлемой частью объектов капитального строительства. Однако, информационное моделирование технологических процессов не менее актуальная задача, поскольку информация о позиционировании строительной техники, степени готовности объекта, потребности в материальных и трудовых ресурсах, в конкретный момент времени может являться инструментом для максимально эффективной организации строительства. Если информационное моделирование объектов строительства имеет широкое распространение и использование, то цифровизация технологических процессов строительства в гораздо меньшей степени решенная задача. Поскольку каждый технологический строительный процесс обладает своей спецификой и затрагивает различные области науки, то данная задача является достаточно обширной и требует изучения всех возможных факторов, влияющих на её результат [1].

Форма экскаваторного забоя при лобовой проходке экскаватора

Для обоснования ширины экскаваторного забоя, охарактеризуем его геометрическую форму при «лобовой» проходке экскаватора. Форма забоя в таком случае представляет собой призму, в основаниях которой лежат фигуры вращения, ограниченные характеристиками экскаватора и грунта, подвергающегося разработке. На рисунке 1 представлена форма экскаваторного забоя при лобовой проходке, как в верхнем, так и в нижнем основании фигуры разработки лежит сектор кольца. Радиус большей дуги сектора равен максимальному радиусу разработки экскаватора, а меньшая дуга ограничена шириной призмы обрушения откоса.

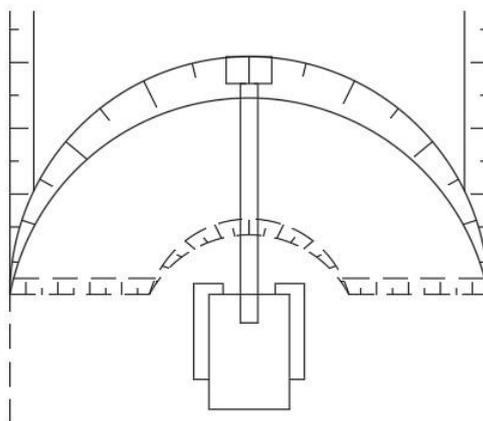


Рис.1. Форма экскаваторного забоя при лобовой проходке.

Ширина экскаваторного забоя

С целью определения наиболее эффективного технологического хода экскаватора, при разработке грунта в котловане определим влияние ширины забоя на количество технологических стоянок. Данный фактор оказывает существенное влияние на длительность разработки котлована, поскольку с увеличением количества стоянок увеличивается и суммарная длительность технологических переездов землеройной техники [2].

Рассмотрим вариант разработки грунта, при котором экскаватор производит половину вращения поворотной платформы вокруг своей оси, т.е. ширина забоя равна двум максимальным радиусам разработки.

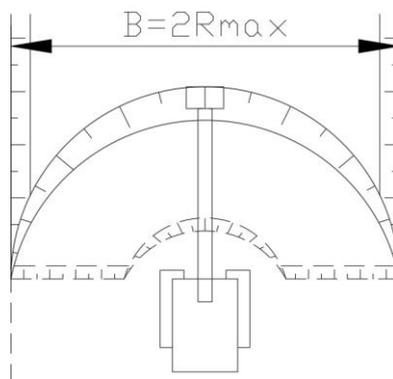


Рис.2. Экскаваторный забой с шириной, равной двум максимальным радиусам разработки.

Определяющим параметром в данном вопросе является количество разрабатываемого грунта на одной стоянке [3], поэтому определение степени влияния ширины забоя произведем на основании оценки площади разрабатываемой поверхности. Итак, при ширине забоя, равной двум максимальным радиусам разработки, площадь разрабатываемой поверхности будет максимальной, однако возникает вопрос, какому приращению координат будет соответствовать следующая технологическая стоянка, при условии, что разработка грунта с последующей стоянки должна исключать наличие недоступных зон? На самом деле, при ширине забоя, равной двум максимальным радиусам разработки, даже самое незначительное приращение координат стоянки экскаватора будет формировать наличие недоступных для разработки участков. Для наглядного обоснования данного утверждения построим из самых удаленных мест разрабатываемой поверхности, окружности с радиусом, равным максимальному радиусу разработки. Возможные координаты последующей стоянки должны соответствовать точке или сектору пересечения таких окружностей.

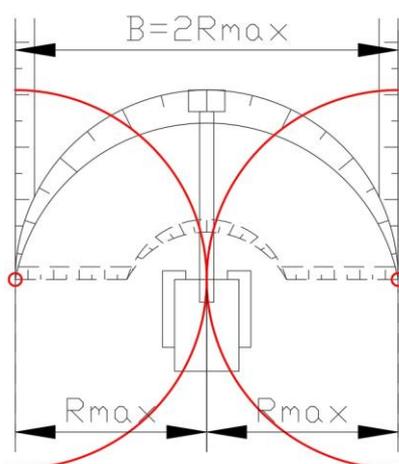


Рис.3. Схема постановки последующей стоянки экскаватора.

На рисунке 3 видно, что точка пересечения окружностей соответствует существующему положению экскаватора, тем самым постановка следующей стоянки без образования недоступных для разработки мест невозможна. На основании вышеуказанных рассуждений, оценку влияния ширины забоя произведем по площади разрабатываемой поверхности грунта не первой (базовой) стоянки экскаватора, а каждой последующей. Определим величину площадей разрабатываемых поверхностей грунта для дифференцированных с некоторым шагом, забоев экскаватора.

В качестве примера рассмотрим еще один вариант с шириной забоя, равной $1,8R_{max}$.

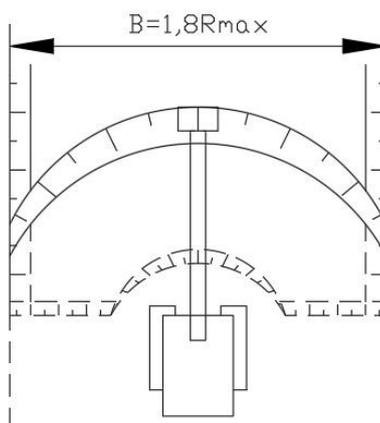


Рис.4. Экскаваторный забой с шириной, равной $1,8 R_{max}$.

Произведем аналогичные построения и определим возможные координаты последующей технологической стоянки экскаватора.

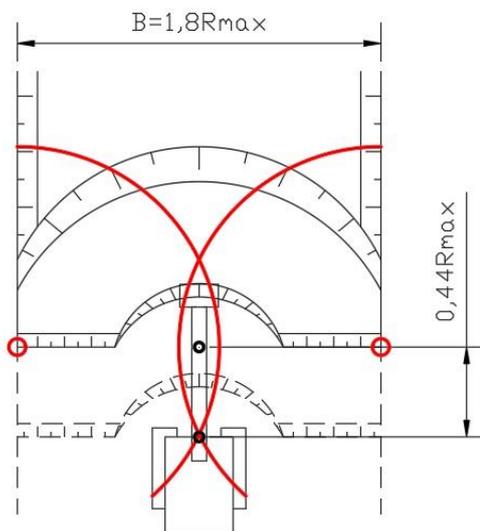


Рис.5. Схема постановки последующей стоянки экскаватора, при ширине забоя, равной $1,8 R_{max}$.

Так, при ширине забоя, равной $1,8$ от максимального радиуса разработки, приращение координат (длина хода экскаватора) соответствует $0,44 R_{max}$. Далее определим площадь разрабатываемой поверхности грунта в безразмерных величинах, зависимых от максимального радиуса.

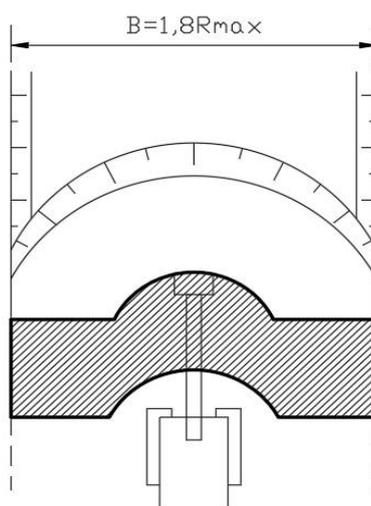


Рис.5. Площадь разрабатываемой поверхности грунта последующей стоянки.

Выполнив аналогичные построения и вычисления величины безразмерного коэффициента, характеризующего площадь поверхности разработки грунта, для различных значений ширины забоя сформируем сравнение результатов в табличном виде.

Таблица 1. Величина безразмерного коэффициента, характеризующего площадь поверхности разработки грунта, при различных значениях ширины забоя

$B=1,8R_{max}$	$B=1,6R_{max}$	$B=1,4R_{max}$	$B=1,2R_{max}$
9,52	11,98	12,43	11,05

Таким образом, с уменьшением ширины экскаваторного забоя увеличивается величина приращения координат между стоянками экскаватора, однако зависимость площади разрабатываемой поверхности от увеличения длины хода экскаватора является нелинейной. На основании результатов вычисления величины безразмерного коэффициента, характеризующего площадь разрабатываемой поверхности, представленных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективной шириной забоя является ширина, равная $1,4 R_{max}$.

Влияние характеристик грунта на геометрию забоя

Большая часть параметров, формирующих геометрию забоя, носят исходный характер, например максимальный радиус разработки – задается техническими характеристиками экскаватора; глубина котлована, величина откоса – параметры, заданные проектом. Исключением в данном случае является ширина призмы обрушения, ограничивающая ширину экскаваторного забоя.

Ширина призмы обрушения – проекция поверхности скольжения откоса на его верхнюю горизонтальную плоскость (отрезок bc на рисунке 6).

В условиях потери равновесия откоса, когда сумма сдвигающих моментов превосходит сумму удерживающих моментов, разрушение откоса будет происходить в пределах поверхности скольжения.

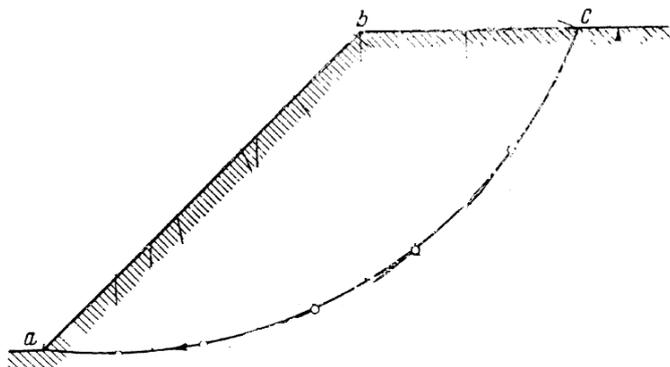


Рис.6. Поверхность скольжения откоса.

Сама форма наиболее опасной поверхности скольжения определяется графоаналитическим способом – метод круглоцилиндрических поверхностей. Решение данного метода сводится к определению такого клина скольжения, при котором коэффициент устойчивости откоса (отношение удерживающих сил к сдвигающим) будет минимальным [4,5].

Превышение предельно-равновесного состояния откоса может быть достигнуто в двух случаях:

1) Величина откоса (угла наклона откоса к горизонту) превышает условие устойчивости для данного типа грунта, т.е. сумма сдвигающих сил при таком угле, больше, чем сумма удерживающих сил. Условие устойчивости для рыхлых грунтов (обладающих внутренним трением и силой сцепления) можно выразить уравнением равновесия. Для этого спроецируем на параллельную наклонной поверхности откоса ось действующие силы:

$$P * \sin \alpha = N * \operatorname{tg} \varphi + c * L \quad (1)$$

где левая часть уравнения проекция веса грунта – сдвигающая сила, правая часть – удерживающие силы.

Таким образом, для каждого типа грунта оптимальной величиной откоса будет являться такой угол наклона, при котором величина силы тяжести грунта в призме возможного обрушения будет меньше суммы сил внутреннего трения и сцепления.

2) Второй возможной причиной обрушения откоса может являться избыточное давление на горизонтальную поверхность. В зависимости от характера приложенного давления, угла наклона действующего давления можно сформировать уравнение плоского предельного состояния. Решением данного уравнения является предельная допустимая величина давления на горизонтальную поверхность, а также горизонтальное положение приложения данного давления относительно верхнего края откоса, при которых откос остается устойчивым [6,7].

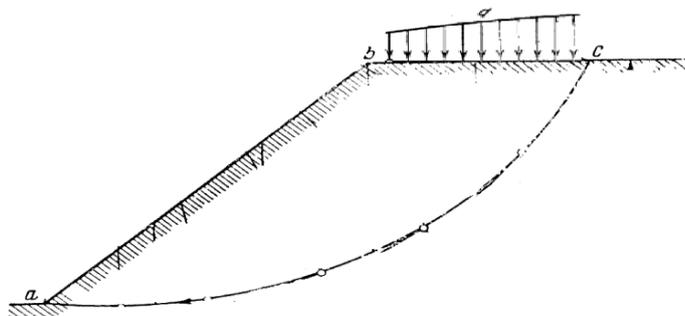


Рис.7. Давление на горизонтальную поверхность откоса.

Поскольку данная задача рассматривается в вопросе механизированной разработки грунта в котловане, приложение давления на горизонтальную поверхность является величиной исходной и постоянной. Вследствие того, что само понятие ширины призмы обрушения является пограничным, при котором коэффициент устойчивости откоса минимален, можно предположить, что решение ряда дифференциальных уравнений В.В.

Соколовского, результатом которого являются граничные условия устойчивости откоса, можно принять обоснованием ширины призмы возможного обрушения.

В.В. Соколовский в вопросе о несущей способности откосов рассматривает две основные задачи: 1) определение величины максимального давления на горизонтальную поверхность равноустойчивого откоса при заданной его форме; 2) определение формы равноустойчивого откоса при действии заданного давления на горизонтальную поверхность. В решении первой задачи вычисляется ряд дифференциальных уравнений устойчивости откоса, основанных на условиях прочности для связных грунтов и грунтов, обладающих внутренним трением. Результатом численного решения первой задачи является величина безразмерного предельного давления « σ_z », при различных углах внутреннего трения грунта « φ » и углах наклона откоса к горизонту « α ».

Таблица 2. Фрагмент значений безразмерного давления σ_z .

Значения предельного давления на горизонтальную поверхность откоса, при расстоянии от вершины откоса до края приложения нагрузки (у, м)									
у, м	при φ , град								
	20				30				
	При α , град								
	10	20	30	40	10	20	30	40	50
0	12,7	10,9	9,1	7,3	24,3	19,6	15,7	12,6	10,3
0,5	14,8	12	9,7	7,6	32,6	24,4	18,1	13,8	10,9
1	16,6	13,1	10,2	7,9	39,8	28,8	20,3	14,9	11,5
1,5	18,2	14,1	10,7	8,1	46,5	32,8	22,3	15,9	12,0
2	19,9	15	11,2	8,3	52,9	36,7	24,2	16,9	12,4
2,5	21,4	15,8	11,6	8,5	59	40,4	26	17,8	12,9
3	23	16,7	12,0	8,8	65,1	44,1	27,8	18,7	13,3
4	25,8	18,3	12,8	9,2	76,8	51,2	31,1	20,3	14,2

Истинное значение предельного давления определяется по формуле:

$$P_{\text{пред.}} = \sigma_z * c + ctg\varphi * c \quad (2)$$

В качестве ширины призмы обрушения считаем рациональным принять такую координату «у» (расстояние от верхнего края откоса до края приложения равномерно распределенной нагрузки), при которой соотношение предельного давления к давлению на опорную поверхность экскаватора будет максимально близким к единице.

Таким образом, ширина призмы обрушения «В», есть функция:

$$B = f(y) \quad (3)$$

при которой:

$$\frac{P_{\text{пред.}}}{P_{\text{оп.пов.экск.}}} = \frac{\sigma_z * c + ctg\varphi * c}{\frac{G_3 * g}{2 * 10 * B_{\Gamma} * (l + 0,35d)}} \approx 1 \quad (4)$$

Таким образом, результаты данного исследования можно использовать в качестве частичного обоснования алгоритмизации информационного моделирования земляных работ. К сожалению, при обзоре существующей литературы не удалось найти примеры отечественного опыта цифровизации земляных работ. В то же время, зарубежные коллеги достигли определенных результатов во внедрении BIM в технологическое проектирование земляных работ. Наиболее ярким примером может являться автоматизация процессов экскавации [8], моделирование динамической взаимосвязи между командами оператора и траекторией, усилиями ведущей машины [9,10].



Литература

1. Абушаев Б.А. Модель вариантного технологического проектирования устройства котлована // Инженерный вестник Дона, 2020, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2020/6354.
2. Павлов В.П., Пенчук В.А. Машины для земляных работ: Синтез технологий, проектирование, эффективность. Красноярск: Сиб.федер.ун-т, 2016. 325 с.
3. Кабанов В.Н. Технический критерий выбора экскаватора для разработки котлована // Инженерный вестник Дона, 2021, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6797.
4. Григорьев А.А., Горбунова Е.В., Девяткина А.Н. Оценка устойчивости бортов карьеров (разрезов) и отвалов: метод. указания. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 37 с.
5. Леханова К.В., Новодзинский А.Л. Сравнение численных и аналитических методов расчета устойчивости грунтовых откосов. // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2011. №1. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2011. С. 45-49. URL: cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-chislennyh-i-analiticheskikh-metodov-rascheta-ustoychivosti-gruntovyh-otkosov.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов. Четвертое издание изд. Москва: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 636 с.
7. Patel B. P., Prajapati J. M. Evaluation of Bucket Capacity, Digging Force Calculations and Static Force Analysis of Mini Hydraulic Backhoe Excavator, Machine Design. 2012. The Journal of Faculty of Technical Sciences, Vol. 4, №. 1, pp. 59-66.



8. Zweiri Y.H., Seneviratne L.D., Althoefer K. Modelling and control of an unmanned excavator vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2003; 217(4): 259-274. Doi: 10.1177/095965180321700402.
9. Ha Q., Yen L., Balaguer C. Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. Automation in Construction, Vol. 107, p. 102934, 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102934.
10. Liu G., Yang L., Wu D., Wu G., Chen H. Development and experimental investigation of an automatic control system for an excavator. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, p. 095440622093630, 2020. DOI: doi.org/10.1177/0954406220936308

References

1. Abushaev B.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2020/6354.
2. Pavlov V.P., Penchuk V.A. Mashiny dlya zemlyanyx rabot: Sintez texnologij, proektirovanie, effektivnost` [Earthmoving machines: Technology synthesis, design, efficiency]. Krasnoyarsk: Sib.feder.un-t, 2016. 325 p.
3. Kabanov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6797.
4. Grigoriev A.A., Gorbunova E.V., Devyatkina A.N. Ocenka ustojchivosti bortov kar`erov (razrezov) i otvalov: metod. ukazaniya [Assessment of the stability of the sides of open pits (sections) and dumps: method. directions]. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2009. 37 p.
5. Lexanova K.V., Novodzinskij A.L. Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arxitektura. 2011. №1. Perm`: Permskij nacional`nyj issledovatel`skij politexnicheskij universitet, 2011. pp. 45-49. URL: cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-chislennyh-i-analiticheskikh-metodov-rascheta-ustoychivosti-gruntovyh-otkosov.



6. Tsytovich N.A. Mexanika gruntov [Soil mechanics]. Chetvertoe izdanie izd. Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury` po stroitel'stvu, arxitekture i stroitel'ny`m materialam, 1963. 636 p.
7. Patel B. P., Prajapati J. M. The Journal of Faculty of Technical Sciences, 2012. Vol. 4, №. 1, pp. 59-66.
8. Zweiri Y.H., Seneviratne L.D., Althoefer K. Journal of Systems and Control Engineering. 2003; 217(4): 259-274. Doi: 10.1177/095965180321700402.
9. Ha Q., Yen L., Balaguer C. Automation in Construction, Vol. 107, p. 102934, 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102934.
10. Liu G., Yang L., Wu D., Wu G., Chen H. Journal of Mechanical Engineering Science, p. 095440622093630, 2020. DOI: doi.org/10.1177/0954406220936308