

УДК 69.002.5

Мохаммад Жалаль, магистрант (Сирийская Арабская Республика),
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, galaloomohamad83@gmail.com

ВЫБОР БУЛЬДОЗЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ГРУНТА (В УСЛОВИЯХ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ)

Аннотация. В процессе резки грунта, силы на отвал бульдозера являются переменными и сложными, и они снижают производительность и надежность бульдозеров. Важно понимать взаимодействие почвогрунта при исследовании производительности, конструкции и использования рабочих органов бульдозеров. В данной статье сила, воздействующая на отвал бульдозеров, при копании и перемещении грунта по горизонтальной поверхности, рассчитана теоретически с использованием законов и кривых Реесе. Эта статья полезна при выборе лучшего бульдозера и правильной конструкции отвала бульдозера для требуемой работы.

Ключевые слова: бульдозер; отвал бульдозера; S-отвал; грунт категории 3; восстановление Сирии.

Mohammad Jalal, undergraduate (Syrian Arab Republic),
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, galaloomohamad83@gmail.com

THE CHOICE OF BULLDOZER, DEPENDING ON THE CUTTING FORCE OF THE SOIL (IN TERMS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC)

Abstract. In the soil cutting process, the forces on the blade of a bulldozer are variable and complicated, and they decrease the performance of bulldozers. It's significant to understand soil-blade interaction in researching the performance, design and utilization of the primary tools of bulldozers. In this article, the force acting on the blade of bulldozers, when digging and moving soil on a horizontal surface, is calculated theoretically using the laws and curves of Reece. This article is helpful, especially when choosing the best bulldozer and the right design of a bulldozer blade for a required purpose.

Key words: bulldozer; dozer blade; S-blade; category soil 3; Syria recovery.

Введение

Одной из наиболее актуальных задач в Сирии является восстановление разрушенных населенных пунктов и промышленных объектов, чтобы возвращающееся местное население было обеспечено жильем и рабочими местами. Начинать восстановление лучше всего с тех районов, где безопасность более или менее обеспечена. Например, с Дамаска, где под минометными обстрелами годами

деградировала инфраструктура, или с Алеппо, где безопасность также находится на высоком уровне. Почти 8 лет войны оставили большинство сирийских городов в руинах. Война нанесла большой ущерб дорогам, зданиям и общественным объектам. Для удаления образовавшегося мусора требуется интенсивное использование землеройных машин, особенно бульдозеров.

Основная часть

Бульдозер является самоходной землеройно-транспортной машиной циклического действия и предназначен для послойного срезания грунта, перемещения его к месту укладки и разравнивания. Термин бульдозер часто используется для обозначения любого тяжелого машиностроительного транспортного средства, хотя этот термин официально относится к бульдозерному отвалу, установленному на тракторе. Самым распространенным использованием термина бульдозер является обозначение трактора (чаще всего гусеничного), оборудованного отвалом. Гусеницы дают удивительную подвижность машины на земле. Широкие гусеницы помогают распределить вес бульдозера, предотвращая тем самым его погружение в песчаную или грязную почву.

Первые типы бульдозеров были адаптированы с сельскохозяйственных тракторов, которые использовались для вспашки полей. Чтобы рыть каналы, поднимать земляные плотины и участвовать в земляных работах, тракторы были оснащены толстой металлической пластиной спереди. Позже эта толстая металлическая пластина получила название отвала.

Отвал является рабочим органом бульдозера. Он выполнен в виде лобового листа, рабочая часть которого имеет гладкую поверхность, а другая (обратная) усилена ребрами жесткости, к которым приварены кронштейны для крепления отвала к устройству соединения с базовой

машиной. К нижней части листа прикреплены сменные ножи – два крайних и один средний.



Рис. 1. Общий вид бульдозера

Отвал обычно имеет 3 варианта (рис. 2):

1) прямой отвал бульдозера (*S*-отвал) – является коротким и не имеет никакой боковой кривой, используется при разработке широкого диапазона немерзлых грунтов, включая легкие скальные;

2) сферический отвал бульдозера (*U*-отвал) – является высоким и очень кривым, особенно эффективен для перемещения значительных объемов легких грунтов на большие расстояния. Изогнутая в плане форма отвала обеспечивает смещение грунта к середине отвала, обеспечивая при транспортировании минимальные потери материала;

3) полусферический отвал бульдозера (*S-U*-отвал) – среднего размера и искривления, сочетает способности прямого отвала хорошо врезаться в грунт и сферического отвала перемещать большие объемы материала.

Рабочий цикл бульдозера с широким лезвием состоит из двух фаз:

1) короткая фаза проникновения;

2) непрерывная фаза резки и перемещения. Фаза резки и перемещения происходит на определенной длине, перемещая материал с исходного места, и в основном выполняется с постоянной глубиной и скоростью.

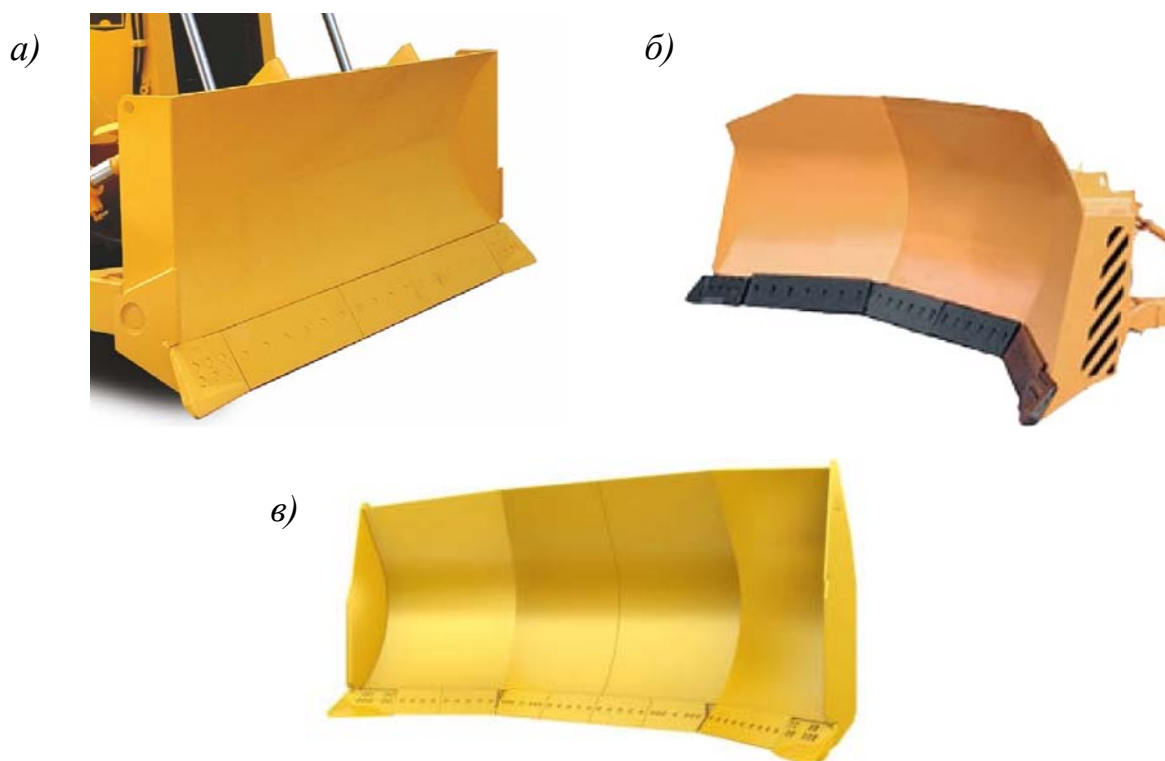


Рис. 2. Виды бульдозерного отвала: а – прямой; б – сферический; в – полусферический

Рассмотрены различные виды поверхностей разрушения такие как линейные, изогнутые и логарифмические. Предположили, что узкие лезвия обычно вызывают трехмерные разрушения в почве. Однако в случае широкого лезвия считается, что побочными эффектами на лезвие (отвал) можно пренебречь, поскольку они оказывают небольшое влияние на общую силу. Поэтому теоретически можно упростить широкое лезвие, чтобы оно включало двумерное разрушения грунта.

Метод логарифмической спирали (рис. 3), который был первоначально разработан для оценки нагрузок на грунт в гражданском строительстве [1], широко использовался и при расчете устойчивости грунта к инструментам для обработки грунта [2].

Предполагается, что грунт перед инструментом и над поверхностью разрушения состоит из двух частей:

- 1) пассивной зоны Ранкина;
- 2) сложной зоны сдвига, которые ограничены частью логарифмической спиральной кривой [3].

Уравнение равновесия поверхностных сил на границах этих двух зон может быть использовано для расчета горизонтальных и вертикальных сил на инструменте.



Рис. 3. Зона логарифмического спирального разрушения

На основе метода логарифмической спирали, Реесе предложил уравнение, которое описывается формулой:

$$P = \gamma \cdot z^2 \cdot s \cdot N_\gamma + c \cdot z \cdot s \cdot N_c + c_a \cdot z \cdot s \cdot N_a + q \cdot z \cdot s \cdot N_q, \quad (1)$$

где P – грунтовая реакция интерфейса (сила грунта), Н; c – связность грунта, Н/м²; c_a – сцепление грунта, Н/м²; N_γ , N_c , N_a , N_q – коэффициенты Реесе определяются по графикам [2]; q – давление наддува на свободную поверхность почвы, Н/м²; z – глубина резания, м; α – передний угол границы раздела, градус; γ – удельный вес грунта, Н/м³; s – ширина инструмента, м.

Таблица 1

Значения сцепление грунта (c_a) и связности грунта (c)

Грунт	Связность c , кПа	Сцепление c_a , кПа
Очень мягкий – кашеобразный связный грунт	0–12	0–12
Мягкий связный грунт	12–24	12–24
Жесткий связный грунт	24–48	24–36
Твердый связный грунт	48–96	36–46

Коэффициенты N_γ , N_c , N_a , N_q зависят от внутреннего угла трения грунта, геометрии инструмента, а также угла сцепления и трения между инструментом и грунтом.

Параметры грунта по классам

№ категория грунта	Виды грунтов	Удельный вес γ , кН/м ³
1	растительный грунт, песок, гравий, щебень	16,55
2	песок, суглинок, супесь, легкая влажная глина	18,47
3	гипс, глинистые сланцы, тяжелый суглинок, суглинок со щебнем или галькой	17,62
4	плотные известняки, плотные сланцы, песчаники, известковый шпат	18,42
5	песчаники, кварцевые породы, полевые шпаты, граниты, базальты и диабазы	19,11

Для простоты в уравнении (1) слагаемое со сцеплением грунта пока будет игнорироваться, поскольку приняли очень гладкое лезвие, так как использовали новый дизайн. Таким образом, в результате будет получено очень простое уравнение:

$$P = \gamma \cdot z^2 \cdot s \cdot N_\gamma + c \cdot z \cdot s \cdot N_c + q \cdot z \cdot s \cdot N_q. \quad (2)$$

Упрощенная схема разрушения грунта для расчета тяги бульдозера показана на рис. 4.

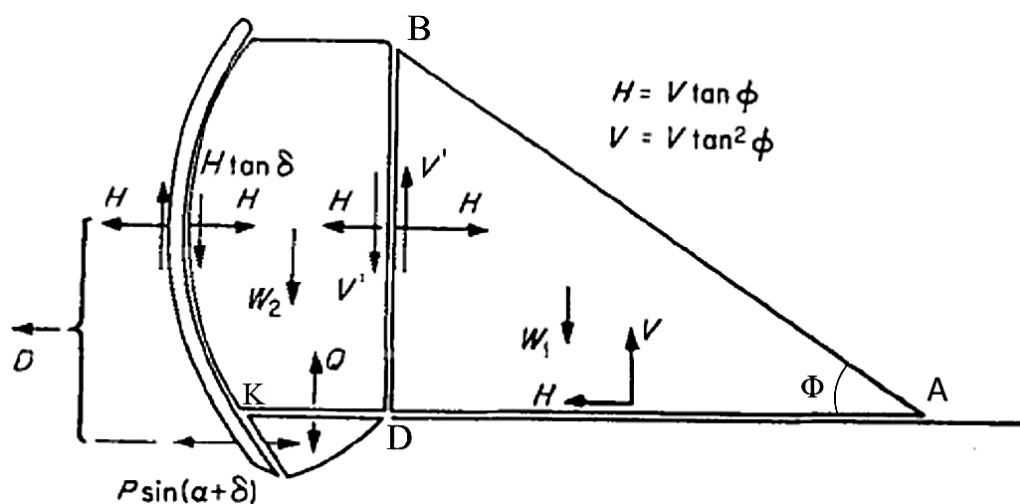


Рис. 4. Упрощенная схема разрушения грунта для расчета тяги бульдозера: KD – расстояние до разрыва, m t – отношение расстояния разрыва к глубине резания соотношение $t = KD/Z$; W_1 – вес треугольника почвы перед бульдозером, H ; W_2 – вес грунта выше расстояния разрыва KD , H ; μ – коэффициент трения между слоями грунта; H – горизонтальная реакция между отвалом и грунтом, H ; V – вертикальная реакция грунтового треугольника, H ; V' – сила трения между треугольником грунта и призмой волочения перед отвалом, H

Рисунки 5а и 5б иллюстрируют силы, действующие на клин грунта и бульдозерный отвал соответственно. Поскольку пассивная сила (P), вес (W) и надбавка (Q) действуют на отвал, результирующая сила (R) развивается на грунтовом клине. Компоненты результирующей силы (R) состоят из компонента нормального напряжения и компонента напряжения сдвига на поверхности разрушения грунта (не показано на рисунках). Пассивная сила (P) состоит из составляющей нормальной силы и составляющей силы сопротивления трения на отвале (не показано на рисунках). Сила адгезионного сопротивления, действующая вдоль отвала, $c_a \cdot L_1$, где L_1 – длина режущей кромки (нож отвала).

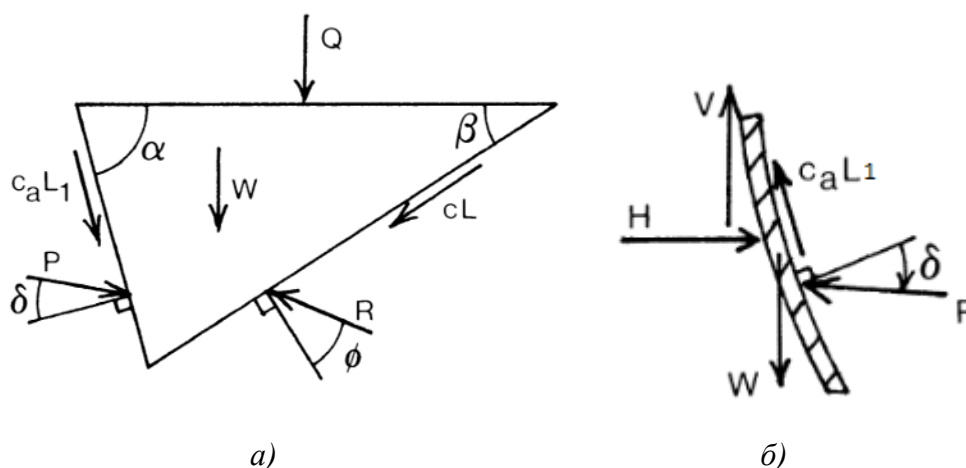


Рис 5. Действующие силы: а – силы, действующие на клин грунта; б – силы, действующие на бульдозерный отвал. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) составляющая сил для перемещения отвала; W – вес грунта, H ; α – угол отвала, градус; β – угол разрушения грунта, градус; δ – угол трения между грунтом и отвалом, градус; D – общая требуемая сила тяги, H

$$D = P \cdot \sin(\alpha + \delta) + V \cdot \tan \varphi. \quad (3)$$

Сила трения = μ · Сила нормальной реакции,

где

$$\mu = \tan \varphi = \frac{H}{V} = \frac{V'}{H},$$

$$W_1 = V + V' = V + H \cdot \tan \varphi = V + V \cdot \tan^2 \varphi = V \cdot (1 + \tan^2 \varphi). \quad (4)$$

Также:

$$W_1 = \text{площадь треугольника } (ADB) \cdot s \cdot \gamma,$$

$$W_2 = \text{расстояние разрыва } (KD) \cdot \text{Высота } (DB) \cdot \gamma.$$

Значения безразмерных факторов Реесе [6] можно рассчитать следующим образом, (φ) представлен семейством кривых, увеличивающихся с шагом от 5° до 45° , и (δ) учитывается только для двух конкретных значений ($\delta = 0$ и $\delta = \varphi$).

Следующее соотношение может быть установлено для требуемого значения соответствующих N -факторов и с использованием кривых N -факторов [6].

$$N_\delta = N_{\delta=0} \left[\frac{N_{\delta=\varphi}}{N_{\delta=0}} \right]^{\delta/\varphi}. \quad (5)$$

Таким образом, интерполяция для δ в диапазоне $0 < \delta < \varphi$ может быть выполнена с достаточной точностью из уравнения (5).

Соотношение (m) рассчитывается

$$m_\delta = m_{\delta=0} \left[\frac{m_{\delta=\varphi}}{m_{\delta=0}} \right]^{\delta/\varphi}. \quad (6)$$

Пример 1.

Мы выбираем грунт категории 3, потому что это самый распространенный грунт в Сирии (рис. 6). Эта категория грунта расположена на обширной территории северо-востока, помимо многих других областей, Халеб, Эр-Ракка, Дайр-эз-Заур, Хомс и Эль-Хасака.

Уравнение (1) может быть использовано для расчета сил (реакция грунта на рабочие органы), связанных с разрушением любой массы грунта, значения N -факторов послужат основой для решения ряда практических задач.

В качестве типичного примера используются следующие значения грунта и отвала.

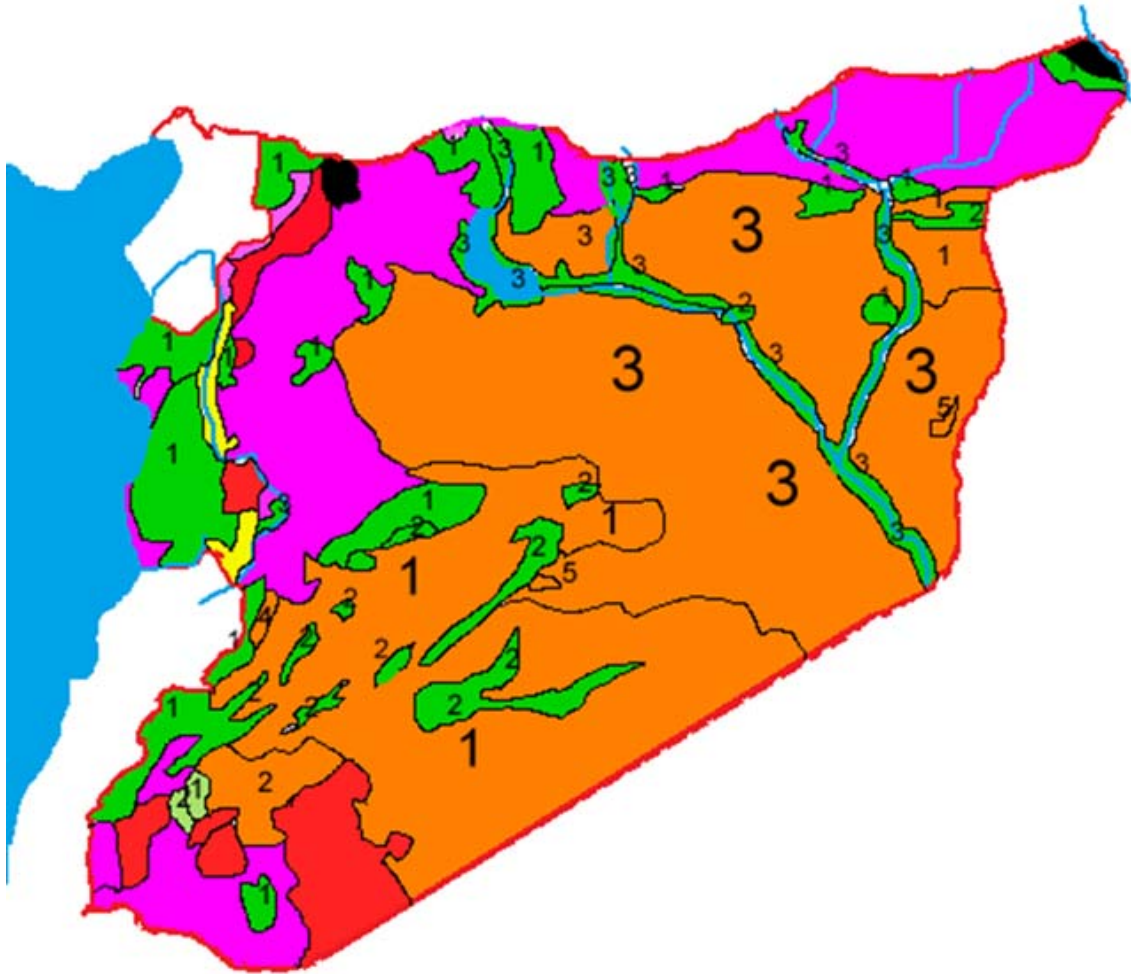


Рис. 6. Классификация грунтов в Сирии

Грунт категории 3:

$$\varphi = 35^\circ, c = 20 \text{ кН/м}^2, \gamma = 17,62 \text{ кН/м}^3, \delta = 17^\circ.$$

Размер отвала: ширина $s = 4,04$ м, высота $B = 1,52$ м, $\alpha = 60^\circ$

(для простоты расчета). Этот отвал установлен на бульдозер САТ D8К, который широко используется в Сирии.

Глубина резания: $z = 0,15$ м.

Найдено по графикам Реесе: $N_\gamma = 1,5$ при $\delta = 0$, и $N_\gamma = 2,5$ при $\delta = \varphi$.

И, как результат, фактическое требуемое значение N_γ , при $\delta = 11$, определяется с использованием уравнения (5)

$$N_\gamma = 1,5 \left[\frac{2,5}{1,5} \right]^{17/35} = 1,92.$$

Найдено графически: $N_c = 2,1$ при $\delta = 0$, и $N_c = 4,5$ при $\delta = \varphi$

$$N_c = 2,1 \left[\frac{4,5}{2,1} \right]^{17/35} = 3.$$

Графически найдено: $N_q = 2,8$ при $\delta = 0$, и $N_q = 5$ при $\delta = \varphi$

$$N_q = 2,8 \left[\frac{5}{2,8} \right]^{17/35} = 3,71.$$

Определено графически: $m = 1,2$ при $\delta = 0$, и $m = 3$ при $\delta = \varphi$

$$m = 1,2 \left[\frac{3}{1,2} \right]^{17/35} = 1,87; \quad m = \frac{KD}{z} \rightarrow KD = m \cdot z = 1,87 \cdot 0,15 = 0,28 \text{ м};$$

$W_1 =$ площадь треугольника $(ADB) \cdot s \cdot \gamma$.

Из рис. 4 определяем:

$$BD = B - z = 1,52 - 0,15 = 1,37 \text{ м};$$

$$AD = \frac{BD}{\tan \varphi} = \frac{1,37}{\tan 35} = 1,96 \text{ м};$$

$$W_1 = \frac{1,96 \cdot 1,37}{2} \cdot 4,04 \cdot 17,62 = 95,6 \text{ кН}.$$

С использованием уравнения (4)

$$V = \frac{W_1}{1 + (\tan \varphi)^2} = \frac{95,6}{1 + (\tan 35)^2} = 64,15 \text{ кН};$$

$$W_2 = KD \cdot DB \cdot \gamma \cdot s = 0,28 \cdot 1,37 \cdot 17,62 \cdot 4,04 = 27,3 \text{ кН};$$

$$q = \frac{W_2 + V' + H \tan \varphi}{KD \cdot s} = \frac{W_2 + V \tan \varphi (\tan \varphi + \tan \delta)}{KD \cdot s};$$

$$q = \frac{27,3 + 64,15 \tan 35 (\tan 35 + \tan 17)}{0,28 \cdot 4,04} = 64 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (2)

$$P = \gamma \cdot z^2 \cdot s \cdot N_\gamma + c \cdot z \cdot s \cdot N_c + q \cdot z \cdot s \cdot N_q = 183,3 \text{ кН}.$$

Итак, требуемая сила тяги

$$D = P \cdot \sin(\alpha + \delta) + V \cdot \tan \varphi = 183,3 \cdot \sin(60 + 17) + 64,15 \cdot \tan 35 = 223,5 \text{ кН}.$$

Если рабочая скорость бульдозера составляет $v = 3$ км/ч, Сирия тогда необходимая мощность для выполнения этой работы:

$$N_e = F(t) \cdot v(t) = D \cdot v = 223,5 \cdot \frac{3000}{3600} = 186,25 \text{ кВт} = 250 \text{ л.с.}$$

Пример 2.

Мы выберем почву категории 5, поскольку она занимает ограниченную территорию Сирии площадью не более 3000 км^2 , которая распространяется в более сухих пустынных районах (долина Евфрата между Дейр-эз-Зуром и Бу-Камалем, и в Пальмире), а также в некоторых горных районах (Джайруд, Джубул в Алеппо).

$$\varphi = 35^\circ, c = 50 \text{ кН/м}^2, \gamma = 20 \text{ кН/м}^3, \delta = 17^\circ.$$

Размер отвала: ширина $s = 4,04$ м, высота $B = 1,52$ м, $\alpha = 60^\circ$.

Глубина резания: $z = 0,15$ м.

$$N_\gamma = 1,92, N_c = 3, N_q = 3,71, m = 1,87;$$

W_1 = площадь треугольника $(ADB) \cdot s \cdot \gamma = 1,34 \cdot 4,04 \cdot 20 = 108,5$ кН;

$$V = \frac{W_1}{1 + (\tan \varphi)^2} = \frac{108,5}{1 + (\tan 35)^2} = 72,8 \text{ кН};$$

$$W_2 = KD \cdot DB \cdot \gamma \cdot s = 0,28 \cdot 1,37 \cdot 20 \cdot 4,04 = 31 \text{ кН};$$

$$q = \frac{W_2 + V \cdot \tan \varphi \cdot (\tan \varphi + \tan \delta)}{KD \cdot s};$$

$$q = \frac{31 + 64,15 \tan 35 \cdot (\tan 35 + \tan 17)}{0,28 \cdot 4,04} = 67,35 \text{ кН};$$

$$P = \gamma \cdot z^2 \cdot s \cdot N_\gamma + c \cdot z \cdot s \cdot N_c + q \cdot z \cdot s \cdot N_q = 246 \text{ кН.}$$

Итак, требуемая сила тяги:

$$D = P \cdot \sin(\alpha + \delta) + V \cdot \tan \varphi = 246 \cdot \sin(60 + 17) + 72,8 \cdot \tan 35 = 290 \text{ кН.}$$

Поскольку $v = 3$ км/ч, необходимая мощность равна:

$$N_e = F(t) \cdot v(t) = D \cdot v = 290 \cdot 0,833 = 241,67 \text{ кВт} = 324 \text{ л.с.}$$

Заключение

Большинство бульдозеров, используемых в Сирии, являются средними и тяжелыми, и их мощность не превышает 300 л.с. (CAT D8K – 300 л.с., D6G – 178 л.с., KOMATSU D41A – 5 95 л.с., KOMATSU D150A-1 – 300 л.с., KOMATSU D85EX-15E0 – 260 л.с.). Таким образом, мы обнаруживаем, что эти бульдозеры не могут обрабатывать все типы грунта в Сирии, но эту проблему можно решить с помощью рыхлителя, прикрепленного к бульдозеру. Покупка сверхтяжелых бульдозеров с большой мощностью (более 300 л.с.) экономически неэффективна, поскольку грунты четвертой и пятой категорий в Сирии очень редки. Кроме того, следует обратить внимание на покупку бульдозеров, где главное их достоинство в том, что они могут применяться в условиях природных катаклизмов, техногенных катастроф и в зонах боевых действий, что немаловажно для нынешней ситуации в Сирии.

Список литературы

1. Терцаги, К. Теоретическая механика грунтов / К. Терцаги. – Нью-Йорк: Чэпмэн-Хол, 1943. – 510 с.
2. Hettiaratchi, D.R.P. Symmetrical three-dimensional soil failure / D.R.P. Hettiaratchi, A.R. Reece // Journal of Terramechanics. – 1967. – Vol. 4; no. 3. – P. 45–67.
3. Magnusson, O. Recoupmnt of soil. Method of calculation and proposal for the division of soil into excavation classes: Report R51 / O. Magnusson. – Stockholm, 1973. – 244 p.
4. Hemami, A. The analysis of the forces in the operation of digging (boot) loader LHD / A. Hemami // International journal of field development. – 1992. – Vol. 6. – P. 151–159.
5. Yong, R.N. Analytical and experimental studies of soil cutting / R.N. Yong, C.K. Chon // Soil mechanics. – 1970. – No. 27.
6. Reece, A.R. Fundamental equation of earthmoving mechanics / A.R. Reece // Proceedings of the institute of machine builders. – 1964. – Vol. 179; no. 6. – P. 16–22.
7. Vaha, P.K. Excavator. Dynamics of soil when digging / P.K. Vaha, A.J. Koivo // 8th international Symposium on automation and robotics in construction: conference proceedings. – 1990. – P. 297–306.
8. Вахрушев, С.И. Исследование спаренной работы бульдозеров при разработке грунтов различных категорий / С.И. Вахрушев, Ю.А. Исакова // Магистерский журнал. – 2016. – № 2. – С. 344–361.

References

1. Tercagi K. *Teoreticheskaya mekhanika gruntov* (Theoretical soil mechanics), New-York, Chehpmehn-Hol, 1943, 510 p.
2. Hettiaratchi D.R.P., Reece A.R. Symmetrical three-dimensional soil failure, *Journal of Terramechanics*, 1967, vol. 4, no. 3, pp. 45–67.
3. Magnusson O. Recoupmnt of soil. Method of calculation and proposal for the division of soil into excavation classes, Report R51, Stockholm, 1973, 244 p.
4. Hemami A. The analysis of the forces in the operation of digging (boot) loader LHD, *International journal of field development*, 1992, vol. 6, pp. 151–159.
5. Yong R.N., Chon C.K., Analytical and experimental studies of soil cutting, *Soil mechanics*, 1970, no. 27.
6. Reece A.R. Fundamental equation of earthmoving mechanics, *Proceedings of the institute of machine builders*, 1964, vol. 179, no. 6, pp. 16–22.
7. Vaha P.K., Koivo A.J. Excavator. Dynamics of soil when digging, 8th international Symposium on automation and robotics in construction: conference proceedings, 1990, pp. 297–306.
8. Vahrushev S.I., Isakova Yu.A. *Magisterskij zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 344–361.