

Определение рационального комплекта машин при производстве земляных работ по устройству котлована

*Е.В. Михайлова, Е. В. Ахтанин, А. Н. Железниченко,
Е. С. Леонтьев, А. А. Ремизова*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье изложены результаты расчетов и подбора комплекта строительных машин для разработки грунта в котловане. В ходе работы был произведен сравнительный анализ и выбор наиболее экономически выгодного варианта. По результатам установлено, что параметры выбранной техники могут не совпадать с рекомендуемыми.

Ключевые слова: комплект машин, технико-экономические показатели, организационно-технологическое решение, эффективность, земляные работы, группы грунта, интенсивность производства работ, технологический цикл, продолжительность производства земляных работ, стоимость производства земляных работ.

В настоящее время для повышения эффективности организации строительного производства остро стоит вопрос об оптимизации процесса подбора машин [1-4]. В ходе строительства подбор комплекта землеройных машин является достаточно сложной задачей по причине разнообразия ключевых критериев, таких как: объем котлована, вид грунта, а также экономическая ситуация на рынке.

Данная работа посвящена подбору оптимального комплекта машин с наиболее выгодной стоимостью аренды и высокой скоростью разработки грунта.

Цель статьи - подобрать комплект машин для ведения земляных работ с учетом объема и особенностей работ, определить технико-эксплуатационные показатели (ТЭП) комплекта и его эффективность. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- сформировать систему исходных данных;
- определить технологические решения;



- установить для каждого технологического решения количественные показатели;

- обосновать критерии выбора наиболее эффективных организационно-технологических решений строительства (продолжительность и стоимость производства земляных работ);

- вычислить количественные значения критериев эффективности;

- выполнить сравнение значений установленных критериев.

В качестве исходных данных используются следующие показатели:

- объем земляных работ, выполняемых механизированным способом (объем V , m^3);

- группа грунта по трудности разработки;

- средства механизации для выполнения земляных работ по устройству

котлована:

а) экскаваторы (обратная лопата) емкостью ковша $v_1; v_2; v_3, m^3$;

б) автосамосвалы грузоподъемностью $q_1; q_2; q_3, T$;

- разработка грунта выполняется погрузкой в автосамосвалы, расстояние от места загрузки до места выгрузки грунта устанавливается техническим заданием.

Для формирования всех возможных организационно-технологических решений по устройству котлована необходимо рассмотреть 9 вариантов производства работ:

$1a + 1э; 2a + 1э; 3a + 1э;$

$1a + 2э; 2a + 2э; 3a + 2э;$

$1a + 3э; 2a + 3э; 3a + 3э,$

где a - автосамосвал, $э$ - экскаватор.

Рассмотрим основные показатели, описывающие технологические процессы, составляющие организационно-технологические решения производства земляных работ.

Основным показателем является интенсивность производства работ [5, 6, 7, 8]. К особенностям производства земляных работ относится зависимость землеройной техники от трудности разработки грунта. Физико-механические характеристики грунта определяются по приложению 1.1 ГЭСН 81-02-01-2017 Земляные работы. Принимая это во внимание устанавливаем следующие характеристики грунта:

- плотность (ρ_0);
- коэффициент разрыхления (a).

Величина плотности разрыхленного в процессе разработки грунта вычисляется по формуле:

$$\rho_p = k_p \rho_0 \quad (1),$$

где ρ_0 плотность грунта в природном состоянии; k_p — коэффициент для пересчета плотности грунта в разрыхленном состоянии, вычисляется по формуле:

$$k_p = \frac{100}{100 + a} \quad (2),$$

где a — первоначальное разрыхление грунта после разработки.

Для описания работы экскаваторов используются количественные показатели, принимаемые на основании п. 1.1.4 ГЭСН 81-02-01-2017 Земляные работы:

- продолжительность одного технологического цикла (мин.), t ;
- объем грунта, перемещаемого за один технологический цикл, v_i ;
- вес грунта, перемещаемого за один технологический цикл, q_i ;
- фактическая стоимость аренды экскаватора в смену (руб.).

Продолжительность технологического цикла вычисляется в следующей последовательности:

а) определяется объем грунта в плотном теле, разрабатываемого в единицу времени:

$$W_P = \frac{V_N}{W_N} (\text{м}^3 \text{ в час}) \quad (3),$$

где W_P — расчетное (проектное) значение производительности экскаватора (м^3 в час); V_N — величина единичного объема работ, приведенная в соответствующей таблице ГЭСН 81-02-01-2017 Земляные работы (м^3); W_N — время необходимое экскаватору для выполнения работ объемом V_N , установленное табл. ГЭСН 01-01-018 (маш.-час);

б) определяется количество технологических циклов, выполняемых экскаватором в час:

$$n_t = \frac{W_P}{v} (\text{шт.}) \quad (4),$$

где n_t — количество технологических циклов, выполняемых экскаватором за один час, шт.; v — заданный объем ковша экскаватора, м^3 ;

в) вычисляется продолжительность технологического цикла экскаватора:

$$t = \frac{60}{n_t} (\text{мин.}) \quad (5),$$

где t — продолжительность одного технологического цикла экскаватора, мин.; 60 — количество минут в одном часе.

Объем грунта, перемещаемый (в том числе загружаемый в автомобиль-самосвал) экскаватором за один технологический цикл, вычисляется с учетом коэффициента разрыхления грунта:

$$v_t = \frac{V_N \frac{100+a}{100}}{n_t W_N} (\text{м}^3) \quad (6),$$

где v_t - объем грунта, перемещаемого экскаватором за один технологический цикл, м^3 .

Вес грунта, перемещаемого за один технологический цикл (в том числе загружаемый в автомобиль-самосвал) вычисляется с учетом расчетного значения плотности в разрыхленном состоянии:

$$q_t = v_t \rho_P \text{ (тонн)} \quad (7),$$

где q_t — вес грунта, перемещаемого за один технологический цикл, тонн.

Стоимость экскаватора в смену определялась по фактическим ценам. Фактические цены определялись на основе анализа предложений землеройной техники в аренду на рынке города Москвы.

Показатели, описывающие процесс перевозки грунта автомобилями-самосвалами, отражают стоимость работы 1 смены машины, а также операции технологического цикла (продолжительность технологического цикла, t_a):

- продолжительность загрузки, t_z , мин.;
- продолжительность пробега (груженого и порожнего автомобиля-самосвала), t_p , мин.;
- продолжительность выгрузки грунта автомобилем-самосвалом, t_v , мин.;
- стоимость аренды 1 машино-смены автомобиля-самосвала, руб.

Продолжительность загрузки автосамосвала определяется по весу или по объему. При этом загружаемый вес грунта не должен превышать установленный объем кузова, также как загружаемый объем не должен превышать установленную грузоподъемность автомобиля-самосвала. Для того, чтобы определить фактический вес и объем загрузки автомобиля-самосвала, необходимо сравнить:

$$q_a - v_a \rho_P \begin{cases} < 0 \Rightarrow q_F = q_a \\ > 0 \Rightarrow q_F = v_a \rho_P \end{cases} \quad (8),$$

где q_F — фактический вес загрузки автомобиля-самосвала, тонн;

q_a и v_a — соответственно техническая грузоподъемность и объем кузова автомобиля-самосвала в тоннах и m^3 .

Продолжительность погрузки может быть вычислена при помощи формулы:

$$t_Z = \frac{q_a}{q_t} t \quad (9),$$

где t_Z - продолжительность загрузки экскаватора, мин.;

$\frac{q_a}{q_t}$ - количество ковшей экскаватора, загружаемых в автомобиль-

самосвал, где q_a — техническая грузоподъемность автомобиля-самосвала, т; q_t — вес грунта, перемещаемого экскаватором за один технологический цикл, т; t — продолжительность технологического цикла экскаватора, мин.

Расчетное значение продолжительности загрузки автомобиля-самосвала (или простоя под загрузкой) должно пройти проверку соответствия на требования, установленные Правилами перевозок грузов автомобильным транспортом [9,10]. С этой целью необходимо рассчитать продолжительность загрузки автомобиля-самосвала в соответствии с правилами, приведенными в прил. «Правил перевозок грузов автомобильным транспортом». Для определения нормативного значения продолжительности загрузки используем формулу:

$$t_{ZN} = 3 + (q_a - 1) \quad (10),$$

где t_{ZN} — нормативная продолжительность загрузки автомобиля-самосвала, установленная «Правилами перевозки грузов автомобильным транспортом», мин.; 3 (мин.) — норматив, установленный для загрузки до 1 тонны включительно сыпучих материалов в автомобили-самосвалы в прил. «Правил перевозки грузов автомобильным транспортом», мин.; $(q_a - 1)$ — норматив продолжительности загрузки автомобилей самосвалов свыше 1

тонны за каждую полную или неполную тонну дополнительно до полной загрузки, мин.

Для вычисления продолжительности движения автомобиля от места загрузки к месту выгрузки и обратно расстояние перевозки грунта удваивают и используют формулу:

$$t_P = 2lq_a t_{PN} \quad (11),$$

где t_P — продолжительность движения автомобиля самосвала от места загрузки к месту выгрузки и обратно, мин.; l — расстояние от места загрузки грунта до места его выгрузки, км.; q_a - паспортная (техническая) грузоподъемность автомобиля-самосвала, т; t_{PN} - нормативная продолжительность перевозки грунта, мин.

Значение продолжительности выгрузки грунта из автомобиля-самосвала может быть вычислено по формуле:

$$t_V = q_a t_{PN} \quad (12),$$

где t_V — продолжительность выгрузки автомобиля самосвала, мин.; q_a — паспортная (техническая) грузоподъемность автомобиля-самосвала, т.

Продолжительность технологического цикла автомобиля - самосвала (t_a) представляет собой сумму продолжительности каждой технологической операции (загрузка, перевозка, выгрузка) и может быть вычислен при помощи формулы:

$$t_a = t_Z + t_P + t_V \text{ (мин.)} \quad (13).$$

К числу наиболее широко применяемых количественных критериев, в практике организационно-технологического проектирования, относятся продолжительность и стоимость производства строительно-монтажных работ. Применительно к земляным работам вычисление продолжительности производства работ выполняется для ведущей машины – экскаватора. Действительно время необходимое для устройства котлована целиком и полностью зависит от продолжительности работы основной землеройной

машины. При этом автомобили-самосвалы относятся к вспомогательным средствам механизации, которые обеспечивают бесперебойную работу основной машины технологического процесса (экскаватора).

Для оценки сформированных организационно-технологических решений необходимо определить:

- продолжительность производства земляных работ по значению продолжительности работы основной(ведущей) машины, T , смен;
- стоимость работ всех средств механизации, участвующих в выполнении технологических операций, C , руб.

Продолжительность устройства котлована вычисляется по формуле:

$$T = \frac{V}{8W_P} \text{ (смен)} \quad (14)$$

где T – продолжительность устройства котлована объемом V , смен; W_P — расчетное (проектное) значение производительности экскаватора (м^3 в час); 8(часов) – продолжительность одной смены, час.

Исходные значения для определения расходов, необходимых для оплаты эксплуатации автосамосвалов представляют собой помимо определения стоимости машино-смены, вычисления количества машин, способных обеспечить бесперебойную работу экскаватора. Такое количество машин определяется по формуле:

$$n_a = \frac{t_P + t_V}{t_Z} \text{ (шт.)} \quad (15)$$

Используя данную методику и нормативные документы (СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты; ГЭСН 81-02-01-2017 Земляные работы), были произведены расчеты для различных видов грунтов и объемов котлована, основываясь на которых сформирована сводная таблица результатов с указанием наиболее оптимальных комплектов машин (табл. 1).

Таблица 1

Сводная таблица результатов с указанием наиболее оптимальных комплектов машин.

Объем котлована	Тип грунта	Марка экскаватора	Объем ковша, м ³	Марка автосамосвала	Грузоподъемность, т	Продолжительность, кол-во смен	Стоимость СМР, тыс. руб.
500	Глина	Hyundai R27Z-9	0,08	МАЗ 5551	10	6	169,92
		Komatsu PC45	0,18	КАМАЗ-65115	15	5	182,90
	Гравийно-галечные	Caterpillar 302.5	0,14	МАЗ 5551	10	7	194,11
	Лесс	Hyundai R27Z-9	0,08	МАЗ 5551	10	6	169,92
		Komatsu PC45	0,18	КАМАЗ-65115	15	5	182,90
	Песок	Caterpillar 302.5	0,14	КАМАЗ-65115	15	4	139,24
	Суглинок	Caterpillar 302.5	0,14	КАМАЗ-65115	15	4	139,24
	Супесь	Caterpillar 302.5	0,14	КАМАЗ-65115	15	4	139,24
Торф	Caterpillar 302.5	0,14	МАЗ 5551	10	4	110,92	
1000	Глина	Hyundai R80-7	0,45	КАМАЗ-6520	20	6	226,56
	Гравийно-галечные	Komatsu PC35 MR-2	0,13	КАМАЗ-6520	20	13	306,80
		Hyundai R80-7	0,45	КАМАЗ-55111	13	9	318,60
	Лесс	Hyundai R80-7	0,45	КАМАЗ-6520	20	6	226,56
	Песок	Hyundai R80-7	0,45	КАМАЗ-6520	20	5	188,80
	Суглинок	Hyundai R80-7	0,45	TATRA T815	17	5	247,80
	Супесь	Hyundai R80-7	0,45	TATRA T815	17	5	247,80
	Скальные грунты	-	-	-	-	-	-
Торф	Hyundai R80-7	0,45	КАМАЗ-6520	20	5	188,80	

2000	Глина	Hitachi ZX200	0,8	KAMA3-6520-19	19	7	396,48
	Гравийно-галечные	Hitachi ZX200	0,8	MAN TGS 40.390	25	10	483,80
	Лесс	Hitachi ZX200	0,8	MAN TGS 40.390	25	7	446,04
	Песок	Hitachi ZX200	0,8	MAN TGS 40.390	25	6	382,32
	Суглинок	Hitachi ZX200	0,8	MAN TGS 40.390	25	6	382,32
	Супесь	Hitachi ZX200	0,8	MAN TGS 40.390	25	6	382,32
	Скальные грунты	Hitachi ZX200	0,8	KAMA3-6520-19	19	14	792,96
	Торф	Hyundai R160LC-9S	0,7	MAN TGS 40.390	25	7	330,40
Hitachi ZX200		0,8	MAN TGS 40.390	25	6	382,32	
5000	Глина	Hitachi ZX200	0,8	SCANIA P380	30	33	1596,54
	Гравийно-галечные	Hitachi ZX200	0,8	KAMA3-6520	20	52	2147,60
	Лесс	Hitachi ZX200	0,8	SCANIA P380	30	33	1596,54
	Песок	Hitachi ZX200	0,8	SCANIA P380	30	28	1354,64
	Суглинок	Hitachi ZX160	0,5	SCANIA P380	30	31	1426,62
		Hitachi ZX200	0,8	KAMA3-55111	13	28	1685,04
	Супесь	Hitachi ZX160	0,5	SCANIA P380	30	31	1426,62
		Hitachi ZX200	0,8	KAMA3-6520	20	28	1486,80
	Скальные грунты	Hyundai R145LCR-9	0,52	SCANIA P380	30	70	3221,40
	Торф	Hitachi ZX160	0,5	SCANIA P380	30	31	951,08
Hitachi ZX200		0,8	KAMA3-6520	20	28	1156,40	

Результаты исследования позволили определить оптимальные комплекты машин при различных объёмах котлована и видах грунта. На их основе можно сделать следующий вывод. Самым рациональным вариантом в большинстве случаев выступил комплект машин из экскаватора с самым большим объёмом ковша и автосамосвалом большой грузоподъёмности. Это говорит о том, что они быстро выполняют разработку грунта, но и при этом экономически эффективны.

Литература

1. Хмара Л.А., Кононов С.И. Научное сопровождение машин для земельных работ на этапе их выбора // Вісник ПДАБА. 2010. №7(148). С.53-63.
2. Хмара Л.А., Кононов С.И. Выбор машин для земляных работ по техническим, экономическим и эксплуатационным параметрам // Вісник ПДАБА. 2009. №6-7 (137). С.5-10.
3. Костюченко В.В. Проектирование комплектов машин при системной организации строительного производства // Инженерный вестник Дона. – 2011, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/715
4. Ключникова О.В., Цыбульская А.А., Шаповалова А.Г. Основные принципы выбора типа и количества строительных машин для комплексного производства работ // Инженерный вестник Дона. – 2016, №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_13_Kluchnikova
5. Кабанов В.Н. Оценка надежности в строительстве // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4879.
6. Кабанов В.Н., Михайлова Е.В. Определение организационно-технологической надежности строительной организации // Экономика строительства. 2012. № 4 (17). С. 67-78.
7. Mikhaylova E. Assessment of organizational and technological reliability of the construction company in the construction of foundations // MATEC Web of Conferences, Vol. 265, 07006 (2019) doi.org/10.1051/matecconf/201926507006



8. Ankrah N. A., Ahadzie D. K. Key challenges of managing building adaptation and retrofit projects. *Structural Survey*, 2014, Vol. 32 Issue: 5, doi.org/10.1108/SS-10-2014-0035.

9. Венцель Е. С., Севрюгина Н. С. Методы оценки технической безопасности строительных, дорожных и других машин // Вестник ХНАДУ. 2013. №63. С.56-61.

10. Кузьмина Т.К., Ефимов В.В. Выбор оптимальной землеройно-транспортной машины при вертикальной планировке строительной площадки // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 1 (1001). С. 62-64.

References

1. Hmara L.A., Kononov S.I. *Visnik PDABA*. 2010. №7 (148). С.53-63.
2. Hmara L.A., Kononov S.I. *Visnik PDABA*. 2009. №6-7 (137). С.5-10.
3. Kostjuchenko V.V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2011. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/715
4. Kljuchnikova O.V., Cybul'skaja A.A., Shapovalova A.G. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2016, №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_13_Kluchnikova
5. Kabanov V.N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4879.
6. Kabanov V.N., Mihaylova E.V. *Jekonomika stroitel'stva*. 2012. № 4 (17). pp. 67-78.
7. Mikhaylova E. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 265, 07006 (2019) doi.org/10.1051/matecconf/201926507006
8. Ankrah N. A., Ahadzie D. K. *Structural Survey*, 2014, Vol. 32 Issue: 5, doi.org/10.1108/SS-10-2014-0035.
9. Vencel' E. S., Sevrjugina N. S. *Vestnik HNADU*. 2013. №63. pp. 56-61.
10. Kuz'mina T.K., Efimov V.V. *BST: Bjulleten' stroitel'noj tehniki*. 2018. № 1 (1001). pp. 62-64.