

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 33.69

В.Н. Анферов, С.И. Васильев, В.В. Заморин, С.М. Кузнецов, Л.В. Николаева

Экономико-математическая модель подбора скреперных комплектов

Для формирования скреперных комплектов на строительство автомобильных и железных дорог авторами разработана экономико-математическая модель подбора комплектов. Предложено подбор скреперных комплексов с учетом надежности их работы осуществлять в пять этапов.

На первом этапе рассматриваются все возможные варианты с учетом вида грунта с целью выбора лучшего варианта производства работ. На втором этапе для выбранного варианта определяется организационно-технологическая надежность его работы. На третьем этапе строятся модели показателей работы выбранного варианта. На четвертом этапе осуществляется формирование комплекса для строительства из имеющегося парка машин. Пятый этап – завершающий, на котором прогнозируется организационно-технологическая надежность строительства.

Создана выборка основных показателей работы скреперного комплекта. Для ее обоснования проводилась проверка в два этапа: логическая и математическая. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. С использованием шагового регрессионного метода созданы модели оценки стоимости разработки грунта, нормы времени, часовой и сменной производительностей скреперного комплекта.

В статье рассмотрен пример построения доверительного интервала модели стоимости разработки 1 000 м³ грунта самоходным скреперным комплектом и приведены параметры доверительного интервала.

Предложенные модели работы скреперного комплекта позволяют прогнозировать основные комплексные показатели работы комплекта еще на стадии проектирования технологических процессов при производстве земляных работ. Алгоритм построения моделей для прогнозирования показателей работы скреперного комплекта является универсальным, и его можно использовать для оценки показателей работы любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

Ключевые слова: экономико-математическая модель, земляные работы, скреперный комплект, регрессионные уравнения.

Обоснование подбора скреперных комплектов с учетом надежности их работы состоит из нескольких этапов. На первом этапе рассматриваются все возможные варианты скреперных комплектов при конкретном виде грунта и выбирается лучший из них для производства работ [1]. На втором этапе для лучшего варианта определяется организационно-технологическая надежность его работы [2–4]. На третьем этапе строятся модели показателей работы лучшего варианта [5–7]. На четвертом этапе из имеющегося парка машин осуществляется формирование комплектов для строительства объектов [8–10]. На пятом этапе определяется организационно-технологическая надежность строительства [11–12].

Стоимость производства работ скреперного комплекта определяется по формуле

$$C_k = C_{\text{тг}} p_{\text{стг}} t_{\text{тг}} + \sum_{i=1}^{i=N} C_{\text{ски}} p_{\text{сск}} t_i, \quad (1)$$

где $C_{\text{тг}}$ – стоимость машино-часа трактора-толкача, р.; $p_{\text{стг}}$, $p_{\text{сск}}$ – вероятностная доля отклонения от расчетной стоимости машино-часа

трактора-толкача и скрепера соответственно за K месяцев работы комплекта; $t_{\text{тг}}$ – продолжительность работы трактора-толкача, ч; $C_{\text{ски}}$ – стоимость машино-часа i -го скрепера, р.; t_i – продолжительность работы i -го скрепера, ч.

Вероятностная доля отклонения от расчетной стоимости машино-часа скрепера за K месяцев работы комплекта определяется по формуле

$$p_{\text{сск}} = 1 + \frac{P_{\text{сск}}}{100} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \text{Random}, \quad (2)$$

где $P_{\text{сск}}$ – максимальный процент вероятностного отклонения от расчетной стоимости машино-часа скрепера.

Вероятностная доля отклонения от расчетной стоимости машино-часа трактора-толкача за K месяцев работы комплекта определяется аналогично вероятностной доле отклонения от расчетной стоимости машино-часа скрепера (формула (2)).

Стоимость разработки 1 000 м³ грунта скреперным комплектом определяется по формуле

$$C_1 = \frac{C_k}{V} 1000. \quad (3)$$

Проведенные исследования по анализу подбора скреперных комплектов показали, что рациональным является использование самоходных скреперов с вместимостью ковша до 25 м³ (рис. 1) при дальности перевозки в диапазоне от 50 до 1 500 м для суглинков второй категории с плотностью 1,75 т/м³.

На рис. 2 показана зависимость между часовой производительностью и дальностью возки грунта для скреперов с вместимостью ковша от 4,5 до 25 м³.

По результатам исследования комплектов с минимальной стоимостью разработки грунта на всем диапазоне от 50 до 1 500 м лучшим оказался скреперный комплект со вме-

стимостью ковша 25 м³. Основные технико-экономические показатели скреперных комплектов приведены в табл. 1.

По данным табл. 1 с помощью шагового регрессионного метода построена модель минимальной стоимости разработки 1 000 м³ грунта самоходным скреперным комплектом. Характеристики этой модели приведены в табл. 2. Модель является статистически значимой, так как значение общего *F*-критерия регрессии больше его табличного значения.

Параметры доверительного интервала модели стоимости разработки 1 000 м³ грунта скреперным комплектом приведены в табл. 3, а доверительный интервал – в табл. 4. График доверительного интервала представлен на рис. 3.

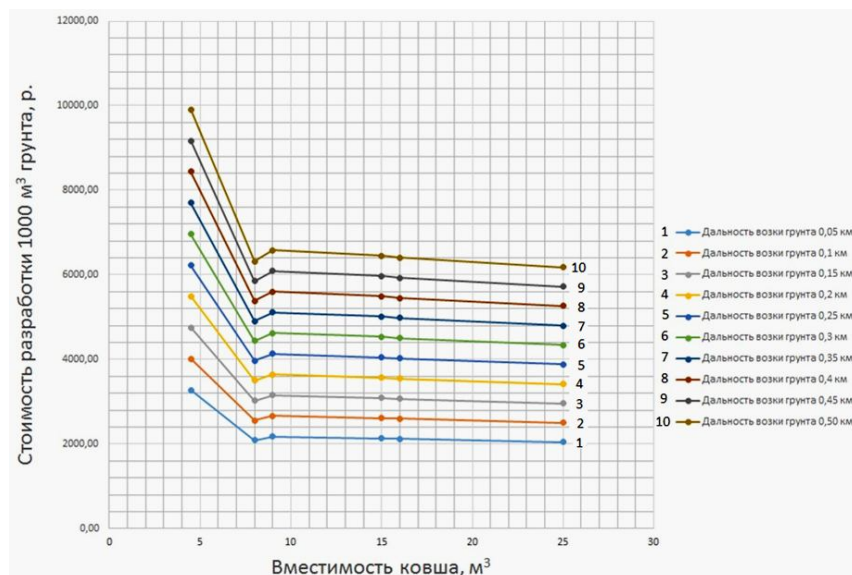


Рис. 1. Зависимость между стоимостью разработки 1 000 м³ грунта и вместимостью ковша скрепера

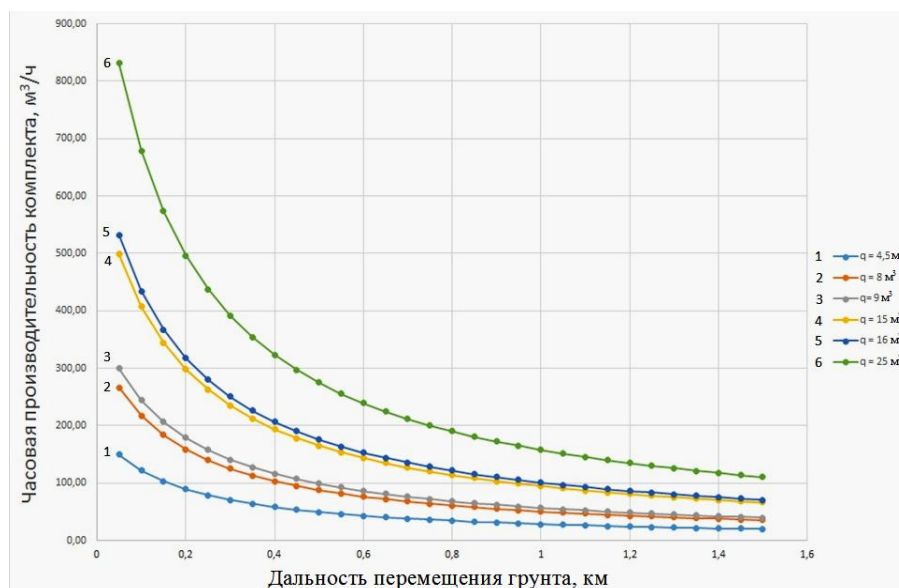


Рис. 2. Зависимость между часовой производительностью и дальностью возки грунта

Таблица 1

Рациональные области применения комплектов

Дальность возки грунта, км	Часовая производительность комплекта, м ³ /ч	Норма времени комплекта на 1 000 м ³ , маш.-ч	Производительность комплекта, м ³ /смену	Стоимость разработки 1 000 м ³ грунта, р.
0,1	678,94	1,47	5 431,5	2 501,96
0,2	496,56	2,01	3 972,5	3 420,85
0,3	391,42	2,55	3 131,4	4 339,74
0,4	323,03	3,10	2 584,2	5 258,63
0,5	274,98	3,64	2 199,8	6 177,52
0,6	239,37	4,18	1 915,0	7 096,41
0,7	211,93	4,72	1 695,4	8 015,30
0,8	190,13	5,26	1 521,1	8 934,20
0,9	172,40	5,80	1 379,2	9 853,09
1	157,69	6,34	1 261,5	10 771,98
1,1	145,30	6,88	1 162,4	11 690,87
1,2	134,71	7,42	1 077,7	12 609,76
1,3	125,56	7,96	1 004,5	13 528,65
1,4	117,58	8,51	940,6	14 447,54
1,5	110,54	9,05	884,4	15 366,43

Таблица 2

Характеристика модели стоимости разработки 1 000 м³ грунта самоходным скреперным комплектом

Показатель	Модель $C_{ед} = +1\,583,07 + 9\,188,91L$
Доля объясненной вариации, %	100,0
Коэффициент множественной корреляции	1,0
Средний отклик	8704,5
Стандартная ошибка в % от среднего отклика	0,00
Стандартная ошибка	0,00006
Общий F -критерий регрессии	$1,26 \cdot 10^{17}$
Табличное значение общего F -критерия	4,22

Таблица 3

Параметры доверительного интервала модели стоимости разработки 1 000 м³ грунта самоходным скреперным комплектом

Наименование показателя	Величина
ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Количество кривых на графике, шт.	3
Уровень риска, %	5
Код расчета	0
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Средняя величина X	0,77500
Средняя величина Y	8704,5
Сумма квадратов регрессии	474 425 293,9
Сумма квадратов SS остатка	0,00000
Сумма квадратов SS общая	474 425 293,9
$t(v, 1 - \alpha / 2)$	2,04746
$F(2, n - 2, 1 - \alpha)$	3,33603
Остаточная дисперсия s^2	0,0
Стандартное отклонение s	0,0

Таблица 4

Модель и ее доверительный интервал

Модель	Доверительный интервал с уровнем риска 5 %
$C_{ед} = +1\,583,07 + 9\,188,91L$	$C_{ед} \pm 0,00001\sqrt{1,033 + 0,178(L - 0,775)}$

Модели часовой производительности $P_{ч}$, нормы времени $H_{в}$, сменной эксплуатационной производительности P_c и стоимости разработки грунта $C_{ед}$ скреперных ком-

плектов в зависимости от массы грунта в ковше $M_{г}$, дальности возки грунта L , грузоподъемности G и вместимости ковша скрепера q приведены в табл. 5–8. Характеристики моделей приведены в табл. 9.

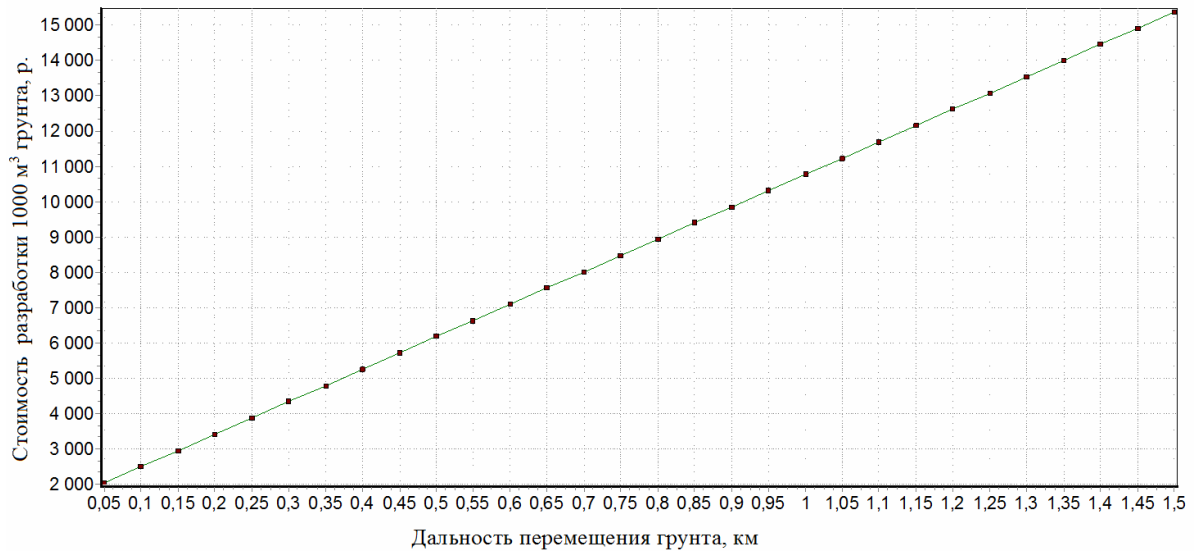


Рис. 3. Доверительный интервал модели минимальной стоимости разработки 1 000 м³ грунта скреперным комплектом

Таблица 5

Модель часовой производительности

Модель	Значимость переменной, %
$P_{\text{ч}} = +92,73$	
$+9,995M_{\text{г}}$	50,36
$-93,385L$	27,67
$-2,761G$	21,97
$-0,751q$	0,00

Таблица 6

Модель нормы времени

Модель	Значимость переменной, %
$H_{\text{в}} = +13,803$	
$+1,065G$	37,31
$-2,336M_{\text{г}}$	51,90
$+11,140L$	10,80
$+0,175q$	0,00

Таблица 7

Модель сменной производительности

Модель	Значимость переменной, %
$P_{\text{с}} = +741,84$	
$-747,082L$	27,67
$-22,085G$	21,97
$+79,960M_{\text{г}}$	50,36
$-6,005E - 9q$	0,00

Таблица 8

Модель стоимости разработки грунта

Модель	Значимость переменной, %
$C_{\text{ед}} = +1810,03$	
$+9499,39L$	69,19
$-60,864G$	16,22
$+86,014M_{\text{г}}$	14,59
$-1,92E - 8q$	0,00

Характеристика моделей

Таблица 9

Показатель	$P_{\text{ч}}$	$H_{\text{в}}$	$P_{\text{с}}$	$C_{\text{ед}}$
Доля объясненной вариации, %	89,95	86,52	89,95	99,85
Коэффициент множественной корреляции	0,9484	0,9302	0,9484	0,9993
Средний отклик	94,87	10,90	758,99	8 998,6
Стандартная ошибка в % от среднего отклика	18,25	22,94	18,25	1,78
Стандартная ошибка	17,31	2,50	138,52	160,51
Общий F -критерий регрессии	331,26	255,11	331,26	24 626,4
Табличное значение общего F -критерия	3,89	3,88	3,89	3,89

Итак, проведенные исследования позволили разработать модель для определения рациональных областей применения самоходных скреперных комплектов с минимальной стоимостью разработки грунта и показа-

ли, что на всем диапазоне от 50 до 1 500 м для суглинков второй категории лучшим оказался скреперный комплект с вместимостью ковша 25 м³.

Библиографический список

1. Кузнецова К.С. Рациональные области использования экскаваторных комплексов // Механизация строительства. 2011. № 1. С. 22–24.
2. Пермяков В.Б., Кузнецов С.М. Оценка организационно-технологической надежности работы строительных машин // Механизация строительства. 2008. № 11. С. 24–29.
3. Кузнецов С.М., Пермяков В.Б., Хабарова П.А. Оценка значимости факторов организационно-технологической надежности работы земснарядов // Экономика ж. д. 2009. № 7. С. 56–61.
4. Кузнецов С.М. Оценка технической надежности работы гидротранспортных систем // Экономика ж. д. 2013. № 10. С. 77–87.
5. Анферов В.Н., Кузнецов С.М., Васильев С.И. Имитационная модель оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 1. С. 70–78.
6. Кузнецов С.М. Повышение эффективности применения машин и механизмов в строительстве. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. 203 с.
7. Кузнецов С.М., Маслов И.А., Щербаков А.В. Моделирование организационно-технологической надежности работы строительных машин // Механизация строительства. 2008. № 8. С. 28–31.
8. Кузнецова К.С., Кузнецов С.М. Формирование ресурсосберегающего парка машин // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 8. С. 11–12.
9. Исаков А.Л., Кузнецова К.С., Кузнецов С.М. Оптимизация работы комплекса машин // Экономика ж. д. 2013. № 1. С. 85–91.
10. Исаков А.Л., Кузнецова К.С., Кузнецов С.М. Формирование ресурсосберегающего комплекса машин для строительства зданий и сооружений // Механизация строительства. 2013. № 9 (831). С. 14–17.
11. Оценка организационно-технологической надежности строительства зданий и сооружений / С.М. Кузнецов, Н.А. Сироткин, О.А. Легостаева, С.Н. Ячменьков // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 2. С. 47–52.
12. Кузнецов С.М. Системотехника ресурсосберегающей технологии строительства зданий и сооружений // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 3. С. 110–117.

V.N. Anferov, S.I. Vasilyev, V.V. Zamorin, S.M. Kuznetsov, L.V. Nikolaeva

The Economic and Mathematical Model of the Scraper Complex Selection

Abstract. The economic and mathematical model of the scraper complex selection was developed in order to form the scraper sets, used for the road and railway construction. It is proposed to carry out the five-stages selection of the scraper complex with the consideration of its reliability. The first stage covers the consideration of all possible options for a particular type of soil in order to choose the most appropriate, suitable for the construction. The second stage is aimed at the identifying of organizational and technological reliability of the selected option. The third stage applies to the development of a model of the selected option performance. At the fourth stage, the formation of a scraper complex for the construction, from the existing fleet is implemented. The final (fifth) stage is devoted to the projecting of the organizational and technological reliability of the construction. A set of key indicators, characterizing the performance of a scraper complex was identified. Its justification was proved by two-phases audit – logical and mathematical. The indicators, identified according to the state standard P 8.736–2011, were studied in terms of their correspondence to the law of normal distribution by Pearson’s chi-squared test. Using the step regression method, the models of the soil excavation costs, time limits, productivity of a scraper complex per hour and shift were developed. The paper describes an example of creating of a confidence interval of the model of identifying the cost of 1 000 m³ soil excavation by a self-moving scraper complex and suggests the parameters of the confidence interval. The proposed models of the scraper complex performance allow to project the main integral indicators of its operation at the stage of the designing of technological processes connected with soil excavation. The algorithm for creating of the models to project the scraper complex performance is universal and can be used to assess the performance of any machine system, components and separate units.

Key words: *economic and mathematical model; soil excavation; scraper complex; regression equations.*

Анферов Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» СГУПС. E-mail: avn43@mail.ru

Васильев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» СФУ. E-mail: s-vasilev1@yandex.ru

Заморин Валерий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС. E-mail: valzam@inbox.ru

Кузнецов Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства» СГУПС. E-mail: ksm56@yandex.ru

Николаева Любовь Васильевна – старший преподаватель кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС. E-mail: lub12345@mail.ru