

УДК 624.1

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ФУНДАМЕНТОВ СПОСОБОМ «СТЕНА В ГРУНТЕ»

*А.С. Кадыров, Б.К. Курмашева, И.В. Георгиади*

*Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда,  
Республика Казахстан*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена разработке экономико-математической модели технологического процесса строительства фундаментов способом «стена в грунте», показатели которой связаны с параметрами машин, грунтовыми условиями и условиями строительства.

**Материалы и методы.** В качестве критерия оптимальности выбрана удельная энергоёмкость процесса, которая входит в показатели модели. Были установлены зависимости, определяющие соотношения экономических показателей процесса проходки скважин (стоимость машины, заработная плата рабочих, нормативные стоимостные показатели) и основных параметров машин, а именно мощности и скорости.

**Результаты.** В результате экспериментов на полноразмерном стенде и опытном образце машины подтверждены теоретические зависимости, выявлены минимум удельной энергоёмкости и приведенных затрат в зависимости от скорости проходки и затрачиваемой мощности.

**Заключение.** Разработанная методика может быть применена для оптимизации параметров и других строительных и дорожных машин, то есть не ограничивается целью настоящих исследований. Методика основана на определении оптимальных значений скорости проходки и затрачиваемой мощности, соответствующих минимальным приведенным затратам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экономико-математическое моделирование, фундамент «стена в грунте», рабочий орган землеройной машины, приведенные затраты, удельная энергоёмкость.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство в условиях городской застройки характеризуется стесненными условиями, при которых строительство подземной части сооружений необходимо проводить рядом со стоящими зданиями, наличием грунтовых вод и агрессивной грунтовой среды. В этих условиях экономически эффективным и зачастую единственно возможным решением является устройство подземных сооружений способом «стена в грунте» или строительство щелевых фундаментов.

Технология «стена в грунте» доступна в двух вариантах выполнения: буросекущая и разработка траншеи. По первому варианту выполняются буровые сваи на расстоянии, меньше их диаметра, и таким образом они входят в зацепление, «секут» друг друга, в итоге формируя цельное ограждение достаточной прочности. Метод буросекущих свай предоставляет возможность выполнить ограждение строительной площадки, подпорную стену, водопонижение или противодиффузионную завесу [1, 2].

Во втором случае технологический процесс строительства состоит из следующих операций: отрывки пионерной траншеи, устройства форшахты, заполнения пионерной траншеи глинистым раствором, разработкой траншеи до проектной отметки с одновременным заполнением глинистым раствором, установки межсекционных разграничителей для выделения захваток бетонирования, зачистки дна траншеи от хлама, установки арматурных каркасов с последующим закреплением их на форшахте, укладки бетонной смеси [3, 4].

Основным звеном любого из описанных технологических процессов является разработка в грунте траншей, скважин или выемок другой конфигурации. Ведущей машиной технологического процесса строительства такого фундамента является землеройная машина.

Функция землеройной машины определяется рабочим органом, в связи с этим, чтобы изменить или создать новую технологию строительства фундаментов, необходимо применять тот или иной рабочий орган, существующий или гипотетический. При разра-

ботке новых конструкций нужно сравнивать конструкцию с конструкцией, между тем при таком сравнении возможны ошибки, поскольку часть вариантов будет характеризоваться тем, что параметры ведущей машины не будут совпадать с параметрами машин, используемых в других операциях. Поэтому необходимо сравнивать технологический процесс с технологическим процессом, и исходя из этого определять показатели назначения новой или существующей машины.

Определение параметров оптимальных конструкций и режима работы рабочих органов должно производиться с учетом влияния на них характеристик технологического процесса [5, 6 7, 8, 9, 10, 11]. Это влияние может учитываться следующим образом: входные и выходные параметры инженерной методики расчета рабочих органов оптимальны для технологического процесса в целом, а ведущая машина с рассчитанным рабочим органом работает в оптимальном нормокомплекте оборудования.

В связи с этим выделим две задачи: определение оптимальных входных данных в инженерную методику и определение оптимального нормокомплекта оборудования и технологической схемы устройства фундаментов способом «стена в грунте». Обе эти задачи сводятся к выбору и определению экстремального значения критерия оптимальности [12, 13].

Критерий оптимальности указывает на эффективный способ достижения поставленной цели. Для упрощения решения таких задач целесообразно принимать один критерий оптимальности, который обобщает все по возможности свойства рассматриваемой системы. В некоторых случаях система оценивается по нескольким критериям. Решение многокритериальных задач возможно следующими методами: выделяется главный критерий, а остальные рассматриваются как ограничения; всем критериям придаются весовости и осуществляется свертывание их в один синтетический критерий; несколько критериев применяются параллельно или последовательно [14].

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Цель, критерий, ограничения (условия) экономико-математической модели (ЭММ) могут быть выражены в виде математической функции. Специфика исследуемой системы требует проведения углубленного технико-экономического анализа для обоснования конкретного вида критерия оптимальности.

Анализируя возможность применения того или иного критерия оптимальности, направленного на интенсификацию строительства фундаментов путем предпроектного проектирования машин, разработки технического задания и карты уровня качества можно прийти к выводу, что поставленная цель достигается в несколько этапов и на каждом этапе необходимо применять различные критерии, одним из этапов является выбор оптимального варианта конструкции и режима работы рабочего органа землеройного оборудования. Математическое моделирование позволяет определить оптимальные параметры режима по критерию «удельная энергоемкость процесса разработки грунта». Однако этот показатель не может в общем случае характеризовать оптимальный технологический процесс и соответствующий ему оптимальный механизм [14, 15, 16, 17].

Произведем анализ параметров, рассматриваемых в качестве критериев оптимальности более высокого ранга, чем удельная энергоемкость [18, 19, 20, 21]. Ранг этих критериев определяется в частности тем, что удельная энергоемкость входит в них как составляющая.

Этим требованиям отвечает критерий «приведенные затраты на объем механизированных работ»:

$$P_{zo} = C_0 + E_n \cdot K, \quad (1)$$

где  $C_0$  – себестоимость работ при рассматриваемом варианте машин, руб;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности, равный 0,15;

$K$  – капитальные вложения, затраченные на создание одной машины, руб. [22].

Используя этот критерий можно определить оптимальные значения производительности разработки грунта и реализуемой при этом мощности привода.

Первым этапом моделирования является выбор оптимальной технологии. Эта задача является комплексной, так как охватывает вопросы технологии, организации и механизации строительного процесса, и оценка по одному из критериев будет необъективной. Кроме того, в различных условиях строительства предпочтение отдается тому или иному критерию оптимальности, позволяющий всесторонне оценивать каждый из сравниваемых вариантов.

В качестве такого комплекса критериев предлагается следующее: доход, приведен-

ные затраты на объем механизированных работ, трудоемкость и срок строительства:

$$\begin{cases} D \rightarrow \max \\ T_3 \rightarrow \min \\ T_c \rightarrow \min \\ \Pi_{30} \rightarrow \min \end{cases}, \quad (2)$$

где  $D$  – доходы предприятия;

$T_3$  – трудозатраты;

$T_c$  – срок строительства;

$\Pi_{30}$  – приведенные затраты.

Применение именно этих показателей в качестве критериев оптимальности обусловлено следующими причинами:

– доход показывает, насколько тот или иной вариант технологии устройства фундаментов выгоден для отрасли строительства и для строительных предприятий, применяющих эту технологию;

– критерий «минимальная трудоемкость» применяется в тех случаях, когда трудовые ресурсы ограничены и этот критерий является наиболее предпочтительным;

– критерий «минимальная продолжительность строительства» применяется в случаях, когда строительство необходимо закончить в минимальные сроки;

– приведенные затраты учитывают наряду с себестоимостью эффективность использования машин, участвующих в технологическом процессе, устанавливают взаимосвязь между основными показателями машин и позволяют выбрать оптимальный вариант с учетом этих показателей.

Эффективность применения того или иного варианта определяется при сравнении вариантов по принятым в данной работе критериям оптимальности.

В зависимости от условий строительства и требований заказчика выбирается основной критерий, определяются варианты, соответствующие минимуму данного критерия. Затем из этого множества выделяется подмножество, соответствующее минимуму второго критерия, из этого подмножества – экстремальное значение третьего критерия. Из полученного подмножества выбирается вариант, соответствующий максимальному доходу.

Экономические показатели, указанные выше, связаны с производительностью машины и энергоемкостью их работы. Эти показатели в свою очередь являются функцией режима и конструкции рабочего оборудования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экономико-математическая модель (далее ЭММ) представляет собой целевую функцию (или несколько целевых функций) с накладываемыми на нее ограничениями, сужающими область возможных решений. Часть граничных условий принимается на стадии формирования исходных данных, которые производятся на основании инженерно-геологических изысканий, условий строительства, расчетов, выполненных проектировщиками при определении несущей способности конструкций, отчетов и пояснительных записок.

Задача решается в два этапа и на каждом этапе представляется отдельная ЭММ.

На первом этапе ЭММ исследована функция приведенных затрат на объем механизированных работ при выполнении операции разработки грунта:

1 этап:

$$\Pi_{30} = C_0 + E_n \cdot K \rightarrow \min; \quad (3)$$

2 этап:

$$\begin{cases} \Pi_{30} = \sum_{i=1}^4 C_i + E_n \sum_{i=1}^4 K_i n \rightarrow \min; \\ T = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{n \Pi_{qi}} \rightarrow \min; \\ T_p = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{\Pi_{qi}} (B + B) \rightarrow \min; \\ \begin{cases} \mathcal{E}_0 = 0,05 k_n \cdot C \left( 1 - \frac{T_{cp}}{T_3} \right) + 0,6 (T_{p3} - T_{pcp}) + 0,15 (3_3 - 3_{cp}) + \\ (C_{03} + E_n \cdot K_3 n) - (C_{0cp} + E_n \cdot K_{cp} n) \rightarrow \max, \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

## РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

где  $n$  – количество технологических потоков;

$C_i$  – себестоимость выполнения работ по  $i$ - операции технологического процесса;

$Q_i$  – объем механизированных работ;

$\Pi_{чi}$  – производительность  $i$ -й машины;

$B$  – число рабочих, занятых управлением машины;

$V$  – число рабочих, занятых в технологическом процессе, за исключением членов экипажа;

$\Xi_0$  – экономический эффект;

$K_n$  – норма накладных расходов;

$T_{сп}$ ,  $T_э$  – трудоемкость работ по сравниваемому и эталонному вариантам;

$Z_э$ ,  $Z_{сп}$  – заработная плата рабочих по эталонному и сравниваемому вариантам;

$C_{оэ}$ ,  $C_{осп}$  – себестоимость по эталонному и сравниваемому вариантам.

ЭММ должно дополняться сводом условий существования землеройных машин.

Исследование экономико-математической модели системы «рабочий орган землеройной машины – технологический процесс» включает в себя математическую постановку задачи, разработку блок-схемы расчета и анализ результатов расчета. Реализация любой ЭММ предполагает определение среди множества рассматриваемых вариантов одного наиболее выгодного в конкретных условиях строительства. Выбор того или иного показателя на втором этапе моделирования полностью зависит от цели оптимизации.

В начале ЭММ определяются оптимальные с позиции технологического процесса показатели назначения ведущих машин, затем производится расчет параметров конструкций и режима работы рабочего органа, устанавливается оптимальный вариант по конструкции машины для заданных условий строительства, подбирается комплект вспомогательного оборудования и сравниваются нормокомплекты оборудования по критериям, затем подсчитывается экономический эффект.

В результате вычислений для оптимального рабочего органа землеройной машины может быть установлена оптимальная технологическая схема устройства фундаментов при заданных условиях строительства. В связи с

этим основной задачей является установление показателей назначения оптимального рабочего органа землеройной машины.

Выбор приведенных затрат в качестве критерия оптимальности обусловлен тем, что, во-первых, разность приведенных затрат составляет экономический эффект; во-вторых, сравнительно легко определяются математические зависимости между факторами, которые рассматриваются в исследовании, и приведенными затратами. В то же время приведенные затраты по своей структуре являются сложным показателем и зависят от ряда факторов, каждый из которых может быть принят в качестве критерия на том или ином этапе исследования.

Рассмотрев зависимость приведенных затрат, мы представили ее в виде выражения (5), в котором коэффициент  $a$  характеризует условно-постоянную часть приведенных затрат на объем работ. Величина  $b/V$ , где  $V$  – скорость проходки траншей, определяет изменение приведенных затрат в зависимости от стоимостного выражения скорости проходки, а величина  $cN/V$  определяет влияние приведенных затрат от удельной энергоемкости. Величины  $a$ ,  $b$  и  $c$  учитывают все экономические показатели, определяющие стоимость работ [4].

В результате математических преобразований функция приведенных затрат была представлена в виде

$$\Pi_{з.о.} = a + \frac{b}{V} + \frac{cN}{V}, \quad (5)$$

где  $a$  – параметр, характеризующий условно-постоянную часть приведенных затрат на объем работ;

$b$  – величина, определяющая изменение приведенных затрат в зависимости от стоимостного выражения скорости проходки;

$c$  – параметр, характеризующий влияние удельной энергоемкости на приведенные затраты.

Значения параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются по следующим формулам:

$$a = ([S + (L_m - L_n)S_{оэ}]K_{нз} + [\Pi_о + (L_m - L_n)\Pi_э]K_{нм})n^2 + \frac{K(A_{не} + A_{кр})nK_{нм}}{100T_{ф}} + E_n K_n; \quad (6)$$

$$b = \frac{1}{L_3 S_{mp} K_{pz}} \left( \frac{K_{nn} Q K (A_{nb} + A_{kp}) n}{100} \cdot \frac{1}{t_{cm} K_{cm}} + \frac{D_p}{T_\phi} + \right. \\ \left. + Q \left( (K_{nz} + K_{nn} K_{zp}) \frac{\lambda_p C_p \sum_{j=1}^k a_j m_j K_{ob} K_{dm}}{T_\phi} + K_{nz} \left( \lambda K_p \sum_{\mu=1}^6 C_{T\mu} + \lambda_1 \sum_{\mu=1}^6 C_{Tj} \right) \right) \right); \quad (7)$$

$$c = \frac{Q}{L_3 S_{mp} K_{pz}} \left( (1 + \varepsilon) K_{nn} \sum \Pi_{mk} 1,03 \cdot 10^{-3} \times \right. \\ \left. \times q_{en} K_N K_{ob} K_{dm} + (\Pi_{эл} + V) K_{nn} 0,1 K_c \right), \quad (8)$$

где  $S$  – затраты на заработную плату при нормативном расстоянии перевозки, тг;

$L_T$  – расстояние перевозки, км;

$L_n$  – нормативное расстояние перевозки, км;

$S_{дв}$  – дополнительные затраты на заработную плату на каждый последующий километр сверх нормативного, тг/м;

$K_{nz}$  – коэффициент накладных расходов на затраты на заработную плату;

$\Pi_o$  – норматив затрат на перевозку при нормативном расстоянии перевозки, тг;

$\Pi_d$  – норматив дополнительных затрат на каждый последующий километр, тг/км;

$K_{np}$  – коэффициент накладных расходов на затраты по эксплуатации машин;

$p$  – количество потоков;

$A_{nb}$  – норматив амортизационных отчислений на полное восстановление, %;

$A_{kp}$  – норматив амортизационных отчислений на капитальный ремонт, %;

$V$  – скорость подачи РО, м/с;

$L_3$  – длина захватки траншеи, м;

$S_{тр}$  – ширина траншеи, м;

$K_{pz}$  – коэффициент разрыхления;

$t_{cm}$  – средняя продолжительность смены, маш-ч;

$K_{cm}$  – коэффициент сменности работы техники;

$D_p$  – простои во всех видах технического обслуживания и ремонта (ТР, КР), дн-маш-ч;

$T_\phi$  – годовой фонд рабочего времени техники, дн;

$K_{zp}$  – коэффициент перехода от заработной платы к затратам на ТО и ТР;

$\lambda_p$  – коэффициент, учитывающий премии ремонтным рабочим;

$C_p$  – средняя тарифная ставка работы по ремонту машин, тг;

$a_j$  – количество j-го вида ТО и ТР;

$m_j$  – трудоемкость j-го вида ТО и ТР;

$K_{дв}$  – коэффициент использования двигателя по времени;

$K_{дм}$  – коэффициент использования двигателя по мощности;

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий премии рабочим;

$K_p$  – поправочный коэффициент к тарифной ставке;

$C_{T\mu}$  – годовая тарифная ставка рабочего  $\mu$ -го разряда;

$N_{en}$  – номинальная мощность двигателя;

$k$  – количество видов ТО и ТР;

$\varepsilon$  – коэффициент перехода от затрат на топливо к затратам на смазочные и обтирочные материалы;

$\Pi_{тк}$  – цена k-го вида топлива, тг/т;

$q_{en}$  – удельный расход топлива при номинальной мощности;

$K_n$  – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зависимости от степени использования двигателя по мощности;

$N_{эл}$  – мощность электродвигателя;

$\Pi_{эл}$  – тариф на 10 кВтч расходуемой электроэнергии;

$K_c$  – коэффициент спроса электродвигателя;

$S$  – стоимость смазочных и вспомогательных материалов на 10 кВт расходуемой электроэнергии;

$\lambda_1$  – коэффициент перехода от тарифного фонда к общему фонду заработной платы, учитывающий дополнительную заработную плату и начисления в фонд социального страхования.

На этапе оптимизации гипотетических (или проектируемых) рабочих органов, для которых затруднительно определить капиталовложения в базовую машину, критерий «приведенные затраты» снижается до части себестоимости, не зависящей от капиталовложений.

Определение этих параметров трудоемкая задача, поэтому в приложении Microsoft Excel составлена таблица исходных данных для определения величин с учетом всех затрат на выполнение работ. Определены зависимости и рассчитаны величины  $a$ ,  $b$  и  $c$  для конкретных машин.

На первом этапе исследования ЭММ были установлены зависимости, позволяющие определить оптимальные параметры ведущей операции процесса устройства набивных свай – проходки скважин. Зависимости характеризуют соотношения экономических показателей процесса проходки скважин (стоимость базовой машины и навесного оборудования, заработная плата рабочих, нормативные стоимостные показатели) и основных параметров машин  $N$  и  $V$ .

Экономические показатели, указанные выше, связаны с производительностью машины и энергоемкостью их работы. Эти показатели в свою очередь являются функцией режима и конструкции рабочего оборудования.

Были проведены экспериментальные исследования, которые доказали существования минимума приведенных затрат как функции двух переменных затрачиваемой мощности и скорости проходки.

Экспериментальное исследование проводилось на полноразмерном стенде СПУ-1 (рисунок 1).

Так как условно-постоянная часть приведенных затрат на одной и той же машине или стенде неизменна, то эксперимент сводился к определению минимальной энергоемкости разработки скважины.

Эксперимент проводился для рабочих органов, имеющих не менее двух элементарных траекторий движения, поскольку при одной траектории зависимость приведенных затрат от мощности и скорости проходки линейная.

Рабочими органами стенда СПУ-1 производилось бурение и фрезерование грунта в специально открытых приямках, в которых путем засыпки уплотненного и увлажненного грунта создавались грунтовые условия, соответствующие плотным увлажненным пескам, суглинкам без включений в состоянии среднего увлажнения и глине средней крепости разрыхленной. При проведении эксперимен-

тальных исследований на стенде СПУ-1 фиксировались показатели усилия подачи, крутящего момента, толщины срезаемой стружки и время, за которое осуществляется один оборот.

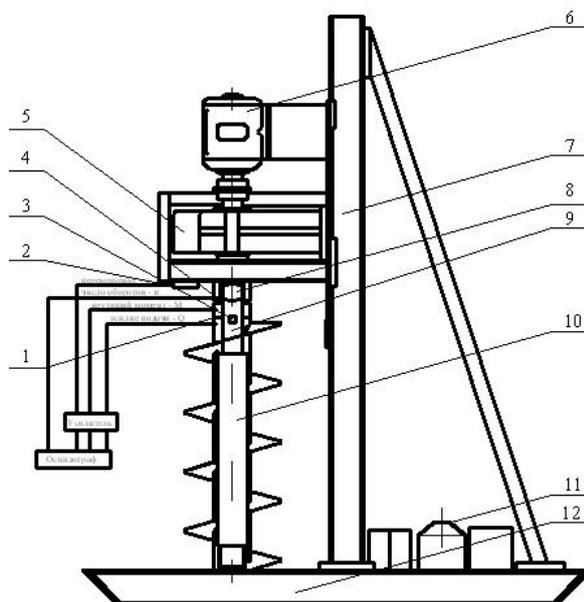


Рисунок 1 – Схема стенда СПУ-1  
1 – тензодатчики, 2 – тросик датчика перемещения, 3, 9 – гидроцилиндры, 4 – постоянный магнит, 5 – редуктор, 6 – каретка с гидродвигателем, 7 – колонна, 8 – шарнирная муфта, 10 – испытываемые рабочие органы, 11 – масляная станция (СПУ-5), 12 – платформа

Figure 1 – Scheme of the SPU-1:  
1 – strain gauges, 2 – rope of the displacement sensor, 3, 9 – hydraulic cylinders, 4 – permanent magnet, 5 – reducer, 6 – carriage with hydraulic motor, 7 – column, 8 – articulated coupling, 10 – tested working bodies, 11 – oil station (SPU-5), 12 – platform

Аналогично исследованиям на стенде СПУ-1 проводились эксперименты на установке БУК-600. Отличие состояло в том, что крутящий момент определялся по мощности, записываемый самопишущим ваттметром. Усилие подачи определялось электродинамометром, фиксация одного оборота постоянным магнитом-герконом.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований позволили выявить минимум удельной энергоемкости в зависимости от скорости проходки и затрачиваемой мощности при бурении и фрезеровании (10):

$$E = (QV + M\omega) / \Pi, \text{кВт}\cdot\text{ч/м}, \quad (9)$$

где  $Q$  – усилие подачи, Н;

$V$  – скорость проходки, м/с;

$M$  – крутящий момент, Н·м;

$\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>.

На рисунке 2 представлена зависимость

удельной энергоёмкости фрезерования от скорости проходки. А также были определены приведенные затраты в зависимости от соотношения мощности и скорости (рисунок 3).

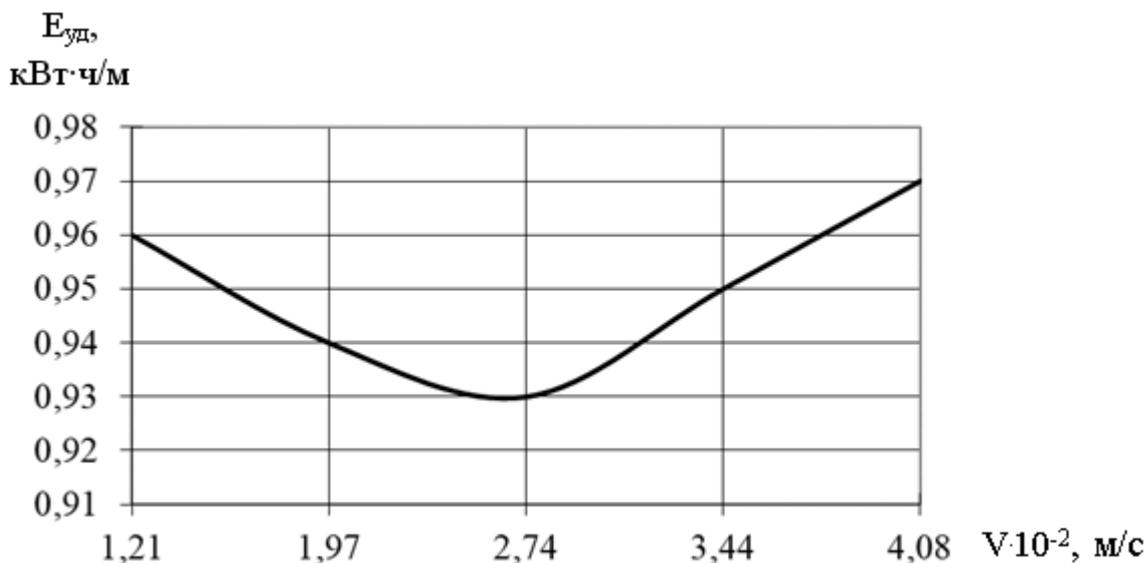


Рисунок 2 – Зависимость удельной энергоёмкости при фрезеровании от скорости проходки  
Figure 2 – Dependence of the specific energy intensity during milling on the penetration speed

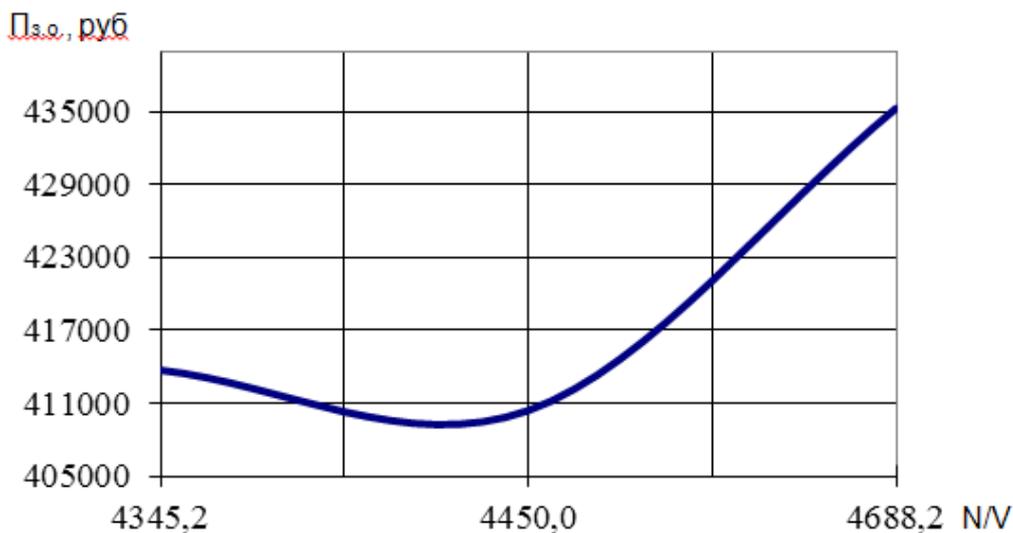


Рисунок 3 – Зависимость приведенных затрат от соотношения мощности  $N$  и скорости  $V$   
Figure 3 – Dependence of the reduced costs on the power  $N$  and the speed  $V$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из графика, минимум приведенных затрат при соотношении скорости и мощности существует, что доказывают аналитические исследования. Используя экономико-математическое моделирование при решении задач строительных и дорожных машин получена формула приведенных затрат, которая позволяет связать данные затраты со скоростью проходки и мощностью. Скорость проходки и мощность связаны затем с конструкцией машины и режимом работы землеройных машин.

В дальнейшем использование этих показателей даст возможность определения оптимальных показателей назначения землеройных машин.

Применение экономико-математического моделирования при определении параметров рабочего органа землеройной машины является новым подходом, при котором возможно для достижения цели исследования сравнивать технологический процесс с технологическим процессом, а не машину с машиной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадыров, А.С. Теоретические основы проектирования и расчета буровых и фрезерных землеройных машин / А.С. Кадыров, З.А. Мулдагалиев, А.С. Нурмаганбетов, Б.К. Курмашева, Ж.Ж. Жунусбекова. Караганда: Издательство Болашак-Баспа, 2010. 220 с.
2. Gong W., Dai G., Zhang H. Experimental study on pile-end post-grouting piles for superlarge bridge pile foundations // Journal Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2009. Vol.3, Iss.2. P. 228-233.
3. Кадыров А.С., Коркин А.А. Альбом универсальных технологических карт устройства набивных свай. ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, Экспресс-информация. Вып. 4. 1985. С. 19–22.
4. Далматов Б.И. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2001. 440 с.
5. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. М.: Машиностроение, 1971, 359 с.
6. Pai-Chi Chang, Fu-Shou Wang, Jia-Huei Hwang, Wei-Fang Chen. Research on the design and manufacturing of an outer cycloid slotting cutter //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology/2005, Volume 27, Issue 3-4, pp 248-253.
7. Dragoslav Janosevic, Rosen Mitrev, Boban Andjelkovic, Plamen Petrov. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency // Journal of Zhejiang University SCIENCE A/2012, Volume 13. Issue 12. pp 926-942.
8. Недорезов И.А., Савельев А.Г. Машины строительного производства. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 119 с.
9. Грузин В.В. Строительные машины и оборудование для подготовки оснований и устройства свайных фундаментов. Астана: Фолиант, 2003. 280 с.
10. Кузнецова В.Н. Решение задачи оптимизации параметров рабочих органов землеройных машин для разработки мерзлых грунтов // Вестник СибАДИ. 2010. №4(18). С. 10–14.
11. Св-во о гос. рег. прав на объект авторского права 1337 РК. Методика расчета винтовых рабочих органов большого диаметра и реализация результатов исследования / А.С. Кадыров, З.А. Мулдагалиев, Б.К. Курмашева, Ж.Ж. Жунусбекова; опублик. 01.07.15, Бюл. №002113. 8 с.
12. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
13. Кадыров А.С., Бойко Н.В., Коркин А.А. Экономико-математическое моделирование технологии устройства набивных свай/Организация, механизация и экономика строительства в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1982. С. 82–88.
14. Кадыров А.С., Хайбуллин Р.Р., Курмашева Б.К. Фрезерные и буровые машины. Теория и расчет. Караганда: Изд-во ТОО «Санат-Полиграфия», 2007. 214 с.
15. Бестембек Е.С. Нагружение фрезерного рабочего органа для проходки траншей в грунтах: дис...канд. техн. наук: Караганда, КарГТУ, дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.04: защищена 10.05.07: утв. 21.12.07 /Е.С. Бестембек; науч. рук. проф. А.С. Кадыров; КарГТУ. Караганда, 2007. 123 с.
16. Хайбуллин, Р.Р. Разработка и расчет двухфрезерного рабочего органа для строительства фундаментов типа «стена в грунте» / Р.Р. Хайбуллин. Караганда : Санат, 2006. 115 с.
17. Экономико-математическое моделирование технологического процесса строительства подземных сооружений. Курмашева Б.К. 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Новые технологии и информатизации общества». Караганды: Болашак-Баспа, 2007. С. 41–42.
18. Тогибаева Б.Б. Научное обоснование выбора технологических показателей работы горно-транспортного оборудования: дис. ... докт.техн. наук: 05.05.06. Караганда, 2010. 201 с.
19. Joseph E. Yukich. Probability Theory of Classical Euclidean Optimization Problems // Progress in Mathematics. 1972. Vol.13. P. 149-150.
20. Курмашева Б.К. Экспериментальное исследование вращения фрезерных рабочих органов в глинистом растворе. Республиканский журнал «Технология производства металлов и вторичных материалов», № 2(16), г. Темиртау, КарГИУ, 2009. С. 286–290.
21. Кадыров А.С., Курмашева Б.К., Нурмаганбетов А.С. Экономико-математическое моделирование технологии устройства набивных свай. Материалы V Международной научно-практической конференции «Aktualnivymox-enostivedi – 2009», 27-05 cervencu 2009 roku. Dil 3.Ekonomichkevedi.Praha.Education and science, 2009. С. 49-52.
22. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.

## ECONOMIC-MATHEMATICAL MODELING OF FOUNDATION CONSTRUCTION TECHNOLOGY BY THE “WALL IN THE GROUND” METHOD

*A.S. Kadyrov, B. K. Kurmasheva, I.V. Georgiadi*

### ABSTRACT

**Introduction.** The article is devoted to the development of the economic-mathematical model of the technological process of the trench foundations' construction, the indicators of which are related to the machine parameters, ground conditions and construction conditions.

**Materials and methods.** As a criterion of optimality, the specific energy intensity of the process, which is included in the system indicators, is chosen. Dependencies are established in the research, which determine the correlation of the economic parameters of the drilling process (the cost of the machine, the wages of workers, the standard cost parameters) and the main parameters of the machines, namely power and speed.

**Results.** As a result of experiments on the full-size test bench and the experimental model of the machine, theoretical dependences are confirmed, namely, the minimum specific energy intensity and the resulted costs, which are determined depending on the speed of penetration and the power used.

**Discussion and conclusion.** The developed technique could be used to optimize parameters and other constructions and road machinery, which are not limited to the purpose of the present research. The technique is based on determining the optimal values of the penetration rate and the amount of consumed power, corresponding to the minimum given costs.

**KEYWORDS:** economic-mathematical modeling, «wall in soil» foundation, earth-moving machine tool, reduced costs, specific energy intensity.

### REFERENCES

1. Kadyrov A.S., Muldagaliyev Z.A., Nurmaganbetov A.S., Kurmasheva B.K., Zhunusbekova ZH.ZH. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya i rascheta buril'nykh i frezernykh zemleroynykh mashin* [Theoretical foundations of design and calculation of drilling and milling excavation machines]. Karaganda, Izdatel'stvo Bolashak-Baspa, 2010. 220 p.
2. Gong W., Dai G., Zhang H. Experimental study on pile-end post-grouting piles for superlarge bridge pile foundations. *Journal Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. China, 2009, Vol.3. Iss.2, pp. 228-233.
3. Kadyrov A.S., Korin A.A. Al'bom universal'nykh tekhnologicheskikh kart ustroystva nabivnykh svay [Album of universal technological maps of the device of ramming piles]. TSBNTI *Minmontazhspetsstroya SSSR, Ekspres-informatsiya*, 1985, Vyp. 4, pp. 19–22.
4. Dalmatov B.I. *Proyektirovaniye fundamentov zdaniy podzemnykh sooruzheniy* [Design of foundations of buildings and underground structures]. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2001. 440 p.
5. Vetrov, YU.A. *Rezaniye gruntov zemleroynymi mashinami* [Soil cutting with digging machines]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1971. 359 p.
6. Pai-Chi Chang, Fu-Shou Wang, Jia-Huei Hwang, Wei-Fang Chen. Research on the design and manufacturing of an outer cycloid slotting cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, Volume 27, Issue 3-4, pp. 248-253.
7. Dragoslav Janosevic, Rosen Mitrev, Boban Andjelkovic, Plamen Petrov. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2012, Volume 13, Issue 12, pp 926-942.
8. Nedorezov I.A., Savel'yev A.G. *Mashiny stroitel'nogo proizvodstva* [Machines for building production]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2010. 119 p.
9. Gruzin V.V. *Stroitel'nyye mashiny i oborudovaniye dlya podgotovki osnovaniy i ustroystva svaynykh fundamentov* [Construction machines and equipment for foundation preparation and pile foundations]. Astana, Foliant, 2003. 280 p.
10. Kuznetsova V.N. Resheniye zadachi optimizatsii parametrov rabochnykh organov zemleroynykh mashin dlya razrabotki merzlykh gruntov [Solution of the problem of optimizing the parameters of the working bodies of digging machines for the development of frozen soils]. *Vestnik SibADI*, 2010, no. 4 (18), pp. 10-14.
11. Kadyrov A.S., Muldagaliyev Z.A., Kurmasheva B.K., Zhunusbekova ZH.ZH. *Metodika rascheta vintovykh rabochnykh organov bol'shogo diametra i realizatsiya rezul'tatov issledovaniya* [Method for calculating helical working bodies of large diameter and realization of the results of the research] Certificate of state. reg. rights to the object of copyright 1337 RK. opubl. 01.07.15, Byul.№002113, 8 p.
12. Batischev D.I. *Metody optimal'nogo proektirovaniya* [Optimal design methods]. Moscow, Radio i svyaz', 1984. 248 p.
13. Kadyrov A.S., Boyko N.V., Korin A.A. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye tekhnologii ustroystva nabivnykh svay [Economic-mathematical modeling of the technology of ramming piles]. *Organizatsiya, mekhanizatsiya i ekonomika stroitel'stva v rayonakh Vostochnoy Sibiri i Krasnoy Severa*. Krasnoyarsk, 1982. pp. 82-88.
14. Kadyrov A.S., Khaibullin R.R., Kurmasheva B.K. *Frezernyye i buril'nyye mashiny. Teoriya i raschet*. [Milling and drilling machines. Theory and calculation]. Karaganda, Publishing house of Sanat-Polygraphy LLP, 2007. 214 p.
15. BestembekYe.S. *Nagruzheniye frezernogo rabocheho organa dlya prokhodki transhey v gruntakh* [Loading of the milling tool for trenching in the ground]: dis. kand. tekhn. nauk. Karaganda, 2007. 123 p.
16. Khaibullin, R.R. *Razrabotka i raschet dvukhfrezernogo rabocheho organa dlya stroitel'stva fundamentov tipa «stena v grunte»* [Development and calculation of a two-mill-

