

6. *Ахрамейко, А.А.* Повышение эффективности разработки систем поддержки принятия решений на основе концепции CDPSR-менеджмента / А.А. Ахрамейко, Б.А. Железко // Математическое моделирование экономических процессов переходного периода: материалы I Междунар. науч. конф., Минск, 29–31 окт. 2003 г. / БГЭУ. — Минск, 2003.

7. *Саати, Т.Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: пер. с англ. / Т.Л. Саати; науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. — М.: ЛКИ, 2008.

8. *Савельев, И.В.* Модель принятия решения о внедрении ERP-системы на предприятии: дис ... канд. экон. наук.: 08.00.13 / И.В. Савельев. — М., 2013. — 157 л.

9. *Подгорная, Г.Н.* Многокритериальный анализ информационной инфраструктуры субъектов хозяйствования / Г.Н. Подгорная // Весн. Беларус. дзярж. экан. ўн-та. — 2011. — № 5(88).

*Статья поступила
в редакцию 25.06. 2014 г.*

В.И. УСПАЛЕНКО, Н.С. ЛЕСКОВСКАЯ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Применение и развитие системы управления проектами позволило значительно сократить срок, снизить стоимость, а также повысить качество организации решения сложных задач в различных сферах деятельности, в том числе и в строительной отрасли. В научной литературе [1; 2] и на практике широко используется понятие «инвестиционно-строительный проект», подчеркивающее системное единство строительства и инвестиционной деятельности. Система управления инвестиционно-строительными проектами [2; 3] определяется совокупностью инструментов, моделей, методологий, технических и программных средств для разработки и реализации проектов, в которых цели, сроки завершения и продолжительность фиксированы и определены, а главной целью выступает создание или реновация основных фондов, требующих вложения инвестиций.

Процессы управления проектами считаются успешными, если достигнуты поставленные цели и задачи при соблюдении заданных временных и финансовых рамок. Для инвестиционно-строительного проекта успешность его реализации во многом зависит от эффективности использования строительной техники. При этом земляные работы [4, 356–361] на инвестиционной фазе жизненного цикла проекта являются одними из самых трудоемких и требуют до 15 % стоимости и до 20 % трудоемкости от общего объема строительных работ. На практике при выполнении земляных работ график использования строительной техники подвержен воздействию внешней среды, что приводит к большим отклонениям от графика работы, увеличивает время простоя техники и, как следствие, общее время и стоимость выполнения работ инвестиционно-строительного проекта. Данные факторы определяют актуальность задачи повышения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на инвестиционной фазе при выполнении работ по разработке котлованов.

Виталий Ильич УСПАЛЕНКО, кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой финансов и кредита Харьковского национального университета строительства и архитектуры;

Наталья Сергеевна ЛЕСКОВСКАЯ, аспирантка кафедры финансов и кредита Харьковского национального университета строительства и архитектуры.

Исследованиями в области управления проектами и оптимального распределения и использования ресурсов [1–3; 5, 50–54] занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые: С.Д. Бушуев, Ю.Н. Тесля, Р.Б. Тянь, В.И. Воропаев, М.Л. Разу, В.Н. Бурков, А.Н. Асаул, П.Е. Уваров и многие другие. Вопросам оптимизации использования строительной техники при управлении инвестиционно-строительными проектами посвящены работы В.Л. Баладинского, В.И. Баловнева, Ю.О. Ветрова, Д.П. Волкова, Л.А. Хмары, А.М. Холодова и др. [4, 356–361]. Однако задача повышения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на этапе разработки котлованов не является окончательно решенной, поскольку во многих случаях невозможно однозначно определить воздействие внешней среды на строительство объекта. Задача в общем случае является многокритериальной, дискретной и относится к классу NP-трудных.

Цель работы состоит в определении пути повышения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на этапе разработки котлованов посредством разработки модели, методов, а также компьютерной имитационной модели определения оптимального графика работы строительной техники.

Выполним постановку задачи повышения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на этапе разработки котлованов. Математическая модель задачи представлена в виде множества соотношений, связывающих стратегии (управляющие воздействия) и параметры задачи с выходными переменными. В тех случаях, когда количество строительной техники является строго определенным числом, время работы строительной техники является детерминированной величиной. В работе предлагается использовать методы дискретной оптимизации [6] для определения последовательности выполнения работ по разработке котлована.

Обозначим K как котлован объемом V^K . Комплексная механизация земляных работ предусматривает выполнение всех основных и вспомогательных процессов (рыхление, отрывка, транспортировки, выгрузки, устройство насыпи и др.) машинами, связанными между собой по основным параметрам (производительность, размеры рабочих органов). Разработка котлована ведется экскаватором (e); транспортировка грунта выполняется множеством транспортных средств: самосвалов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, t^{TP} — время, необходимое для перевозки грунта самосвалом на место отвала и возвращения на место погрузки грунта, известно заранее, а $\bar{t}^{погр}$ — среднее время погрузки самосвала срезанным грунтом может быть оценено по результатам геологических изысканий. При разработке грунта встает вопрос о количестве (N) вспомогательных транспортных единиц, которые обслуживают экскаватор. В реальных условиях для расчета потребности в земляных машинах определяют рабочий объем земляных работ с учетом климатических, геологических и гидрогеологических факторов. Указанные факторы определяют взаимодействие машин и их количество. Оптимальное количество самосвалов для выполнения операций по перевозке срезанного грунта (N^*) может быть подсчитано следующим образом:

$$N^* = \frac{t^{TP} + \bar{t}^{погр}}{\bar{t}^{погр}}. \quad (1)$$

Обозначим V^D как объем кузова самосвала, тогда I — количество ходок, которое необходимо выполнить самосвалами для устройства котлована K , можно рассчитать по следующей формуле:

$$I = \frac{V^k}{V^D} \rho, \quad (2)$$

где ρ — коэффициент рыхления грунта, полученный в результате геологических исследований.

С целью решения задач моделирования разделим котлован K на множество частей $W = (w_{1,1,1}, w_{1,1,2}, \dots, w_{x,y,z})$, $x = 1, 2, \dots, X$, $y = 1, 2, \dots, Y$, $z = 1, 2, \dots, Z$ одинакового объема V^u .

Обозначим τ_{xyz} , $x \in 1, 2, \dots, X$, $y \in 1, 2, \dots, Y$, $z \in 1, 2, \dots, Z$ как время, необходимое для разработки и погрузки части w_{xyz} котлована в кузов. Значение τ_{xyz} определяется на основании проектной документации, геологических характеристик грунта котлована, производительности экскаватора при заданных погодных условиях.

Обозначим μ_{xyz}^H , μ_{xyz}^3 как моменты времени начала и завершения работ по разработке и погрузке части w_{xyz} , $x \in 1, 2, \dots, X$, $y \in 1, 2, \dots, Y$, $z \in 1, 2, \dots, Z$. Для заданных значений τ_{xyz} , $x \in 1, 2, \dots, X$, $y \in 1, 2, \dots, Y$, $z \in 1, 2, \dots, Z$ имеет место следующее выражение:

$$\mu_{xyz}^3 = \mu_{xyz}^H + \tau_{xyz}. \quad (3)$$

Определим $G_i = (g_1, g_2, \dots, g_M)$, $g \in W$, $1 < i < I$ множество частей котлована, погруженных в самосвал при выполнении i -й погрузки. В случае проведения непрерывных работ экскаватором время, необходимое для выполнения разработки и погрузки частей котлована, входящих в множество G_i , определяется по следующей формуле:

$$t_i^{\text{погр}} = \sum_{w_{xyz} \in G_i} \tau_{xyz}. \quad (4)$$

Обозначим $t_n^{\text{ож}}$, $n \in 1, 2, \dots, N$ как суммарное время простоя n -го самосвала в очередях на погрузку

$$t_n^{\text{ож}} = \sum_{i=n}^1 t_i^{\text{погр}} + \sum_{l=1}^{I/N} \left[\sum_{k=n}^{n+N} \left(\sum_{j=(l-1)N+k+1}^{(l-1)N+k-1+N} t_j^{\text{погр}} - t_j^{\text{тр}} \right) \right].$$

Тогда общее время простоя транспортных средств можно рассчитать по формуле

$$t^{\text{ож},d} = \sum_{n=1}^N t_n^{\text{ож}}. \quad (5)$$

Определим $Q = (w_{a_1 b_1 c_1}, w_{a_2 b_2 c_2}, w_{a_3 b_3 c_3}, \dots, w_{A,B,C})$ как упорядоченное множество частей w_{xyz} , определяющее последовательность разработки и погрузки элементов котлована.

Обозначим $t^{\text{ож},e}$ как время простоя экскаватора. Тогда при заданных c^e — стоимости машиночаса простоя экскаватора и c^d — стоимости машиночаса простоя транспортного средства затраты по причине простоя строительной техники можно определить следующим образом:

$$C = t^{\text{ож},e} \cdot c^e + t^{\text{ож},d} \cdot c^d. \quad (6)$$

Обозначим $S = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_D\}$ как множество всех вариантов последовательностей разработки фрагментов w_{xyz} ; данное множество является конечным, его мощность определяется согласно формуле

$$\Psi = XYZ. \quad (7)$$

Подрядчик должен выполнить разработку котлована согласно технологическим ограничениям (7–18) в такой последовательности, чтобы суммар-

ные затраты были минимальными. Оптимизационную математическую модель можно представить следующим образом:

$$Q^* = \arg \min_{Q \in S} C(Q), \quad (8)$$

где Q^* — оптимальная последовательность операций по разработке и погрузке элементов котлована; $C(Q)$ — векторный целевой функционал задачи; Θ — множество допустимых решений, которые определяются системой ограничений

$$\Theta: \left\{ \begin{array}{l} t_{d_n}^{\text{ож}} + t_{d_n}^{\text{погр}} + t_{d_n}^{\text{тр}} \leq T_{d_n}^{\text{экспл}}, n = 1, \dots, N, \quad (9) \\ t_e^{\text{ож}} + t_e^{\text{погр}} \leq T_e^{\text{экспл}}, \quad (10) \\ t^F \leq t^{\text{max}}, \quad (11) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x,y,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x,y,z-1} \in W, \quad (12) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x,y-1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x,y-1,z-1} \in W, \quad (13) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x,y+1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x,y+1,z-1} \in W, \quad (14) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x-1,y,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x-1,y,z-1} \in W, \quad (15) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x-1,y-1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x-1,y-1,z-1} \in W, \quad (16) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x-1,y+1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x-1,y+1,z-1} \in W, \quad (17) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x+1,y,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x+1,y,z-1} \in W, \quad (18) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x+1,y-1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x+1,y-1,z-1} \in W, \quad (19) \\ \mu_{x,y,z}^3 < \mu_{x+1,y+1,z-1}^H, \text{ для } \forall \omega_{x+1,y+1,z-1} \in W, \quad (20) \end{array} \right.$$

где система ограничений содержит следующие ограничения: (9) — ограничение по расходу ресурсов времени использования транспортных средств; (10) — ограничение по расходу ресурсов времени использования экскаватора; (11) — ограничение по общей продолжительности выполнения работ по разработке грунта котлована; (12–20) — ограничения, определяющие технологическую последовательность выполнения работ таким образом, что разработка фрагментов более глубоких слоев котлована возможна после выполнения работ над фрагментами верхних слоев.

Рассмотрим особенности математической модели (8–20) задачи исследования:

- задача (8–20) является многомерной оптимизационной задачей;
- множество S вариантов последовательностей разработки котлована задачи (8–28) содержит точки, которые в общем случае представляют точки запрета;
- область допустимых решений Θ задачи является дискретным множеством и определяется системой $9ZY - 9XY - 18ZY + 30Y + 30X + N + 66$ линейных неравенств.

На основании особенностей (1–3) можно сделать следующие выводы:

- задача (8–20) является NP-трудной задачей;
- дискретный характер области допустимых решений определяет необходимость применения методов дискретной оптимизации [6] для определения глобального экстремума задачи;
- поскольку количество локальных экстремумов для задач практической размерности достаточно большое, то может быть найдено только приближение к глобальному экстремуму.

С целью определения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на этапе разработки котлована в данной работе было выполнено построение дерева решений и применено правило отсечения для нахождения глобального экстремума задачи.

Рассмотрим дерево решений задачи оптимизации плана выполнения операции по устройству котлована, в котором дуги определяют операции по разработке частей $\omega_{xyz} \in W$ котлована Ψ . При построении дерева решений перебираются все варианты последовательностей выполнения работ путем изменения первоначального состояния, когда ни один из фрагментов котлована не разработан (рис. 1), и формируется множество вариантов последовательностей $Q_k, k = 1, \dots, K$. Для этого рассматриваются варианты разработки очередного фрагмента котлована.

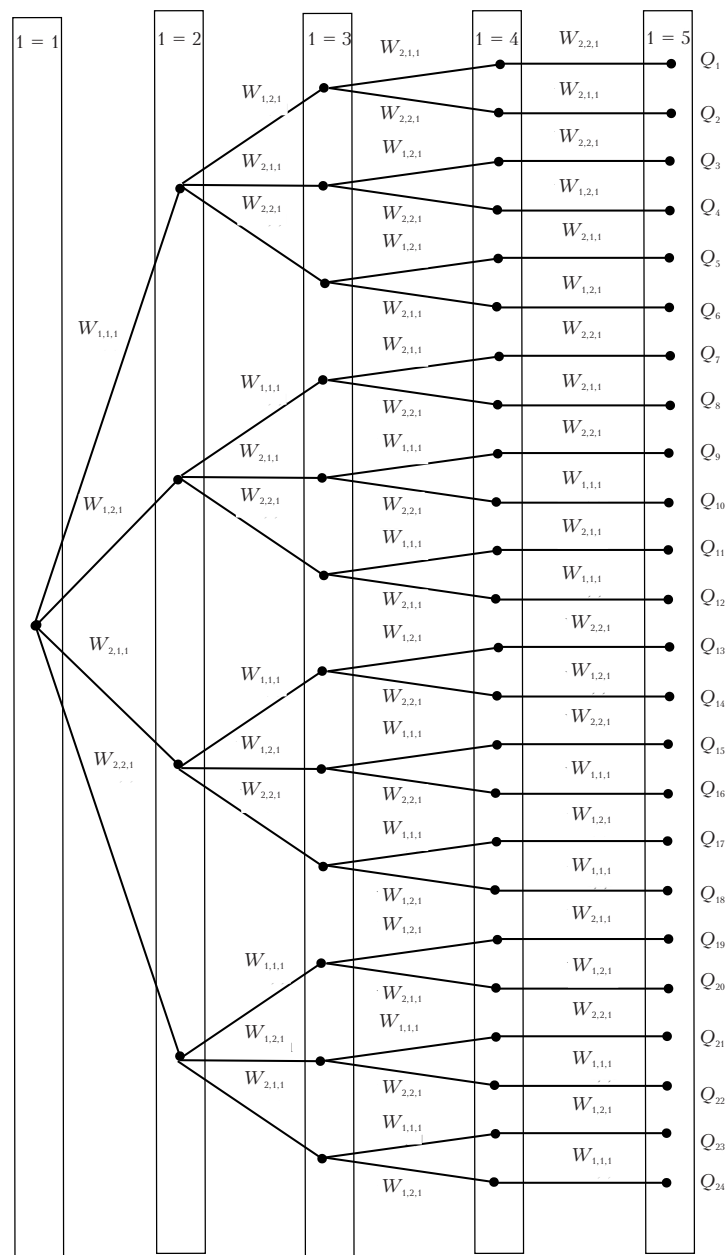


Рис. 1. Дерево решений задачи

Из каждой полученной вершины строится множество новых (дочерних) вершин, где $l \in (1, 2, \dots, XYZ + 1)$ — уровень вершины, определяющей начало работ над очередной операцией по разработке части $\varpi_{xyz} \in W$ котлована Ψ . Формирование новых вершин производится путем разработки очередного фрагмента $\varpi_{xyz} \in W$ котлована, который отвечает условиям (8—20).

Вершины нижнего уровня дерева являются возможными вариантами последовательности операций по разработке котлована и составляют множество S . Применение правил отсечений на основании ограничений (9—20) в процессе формирования дерева решений задачи позволяет существенно сократить размерность множества допустимых решений $W \subset S$ и время поиска оптимального решения.

Математическое моделирование реальных процессов, протекающих в рамках инвестиционно-строительных проектов, может оказаться достаточно сложной задачей и на практике требует учета множества факторов внешней среды, ряд из которых имеет случайный характер. Поэтому дальнейшее изучение и оптимизация графика работы строительной техники при устройстве котлована с учетом множества случайных факторов внешней среды могут быть проведены путем построения компьютерной имитационной модели [7, 66—68] и статистического анализа ее работы в различных условиях и с различными параметрами. Работа имитационной модели задачи исследования представлена на рис. 2. Интерфейс программы представлен в виде системы диалоговых окон, позволяющих выполнять постановку задачи, проводить имитационное моделирование и осуществлять оценку полученных статистических данных.

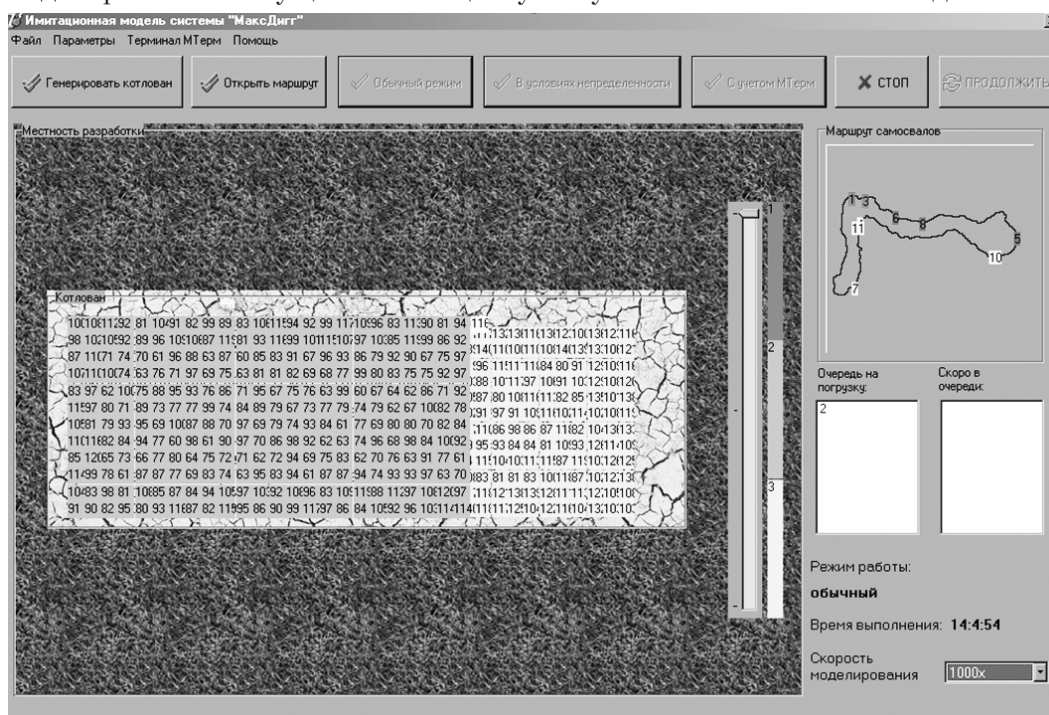


Рис. 2. Имитационное моделирование разработки котлована

В рамках программы разработаны три имитационные модели [7, 66—68]:
 имитационная модель без оптимизации графика работы;
 имитационная модель с оптимизацией графика работы с учетом геологических изысканий и текущей длины очереди транспортных средств на погрузку;
 имитационная модель с оптимизацией графика работы с учетом геологических изысканий и оперативной информации о перемещении транспортных средств.

Для имитационной модели с учетом выбранного уровня абстракции определен ряд параметров, задавая различные уровни которых можно существенно повлиять на результат моделирования. Для анализа работы модели были заданы следующие значения (табл. 1).

Таблица 1. Исходные параметры для анализа работы модели

Параметр котлована	Значение	Параметр самосвала	Значение
Длина, м	35	Рекомендованное количество автосамосвалов, шт.	12
Ширина, м	12	Средняя скорость движения, км/ч	50
Глубина, м	3	Максимальная скорость движения, км/ч	90
Среднее время разработки 1 м ³ грунта, с	40	Минимальная скорость движения, км/ч	5
Отклонение от среднего времени разработки 1 м ³ грунта, с	20	Возможное отклонение от средней скорости, %	0
Среднее дополнительное время разработки 1 м ³ грунта по краям котлована, с	20	Режим скорости	Случайный
Среднее дополнительное время разработки 1 м ³ грунта при увеличении глубины котлована на 1 м, с	20	Стоимость активной работы, ден. ед./ч	200
Коэффициент разрыхления грунта	1,5	Стоимость простоя, ден. ед./ч	200
Расстояние до места отвала грунта, км	60		

В ходе проведения экспериментальных исследований для различных режимов работы экскаватора (режимов разработки котлована) и для рекомендованного количества автосамосвалов (12 машин) получены статистические данные об активной работе и простоях каждого объекта имитационной модели, а также их суммарные значения (табл. 2).

Таблица 2. Результаты моделирования

Объект моделирования	Режим работы		
	Без оптимизации (классический алгоритм)	Оптимизация по длине очереди (в условиях неопределенности)	Оптимизация по данным геолокации
Экскаватор (время работы, ч)	24,1	24,1	24,1
Экскаватор (время простоя, ч)	5,7	5,4	5,1
Самосвал (время работы, ч) (усредненное значение)	25,0	25,0	25,0
Самосвал (время простоя, ч) (усредненное значение)	4,7	4,5	4,1
Самосвал (время работы, ч) (суммарное значение)	300,4	300,4	300,9
Самосвал (время работы, ч) (суммарное значение)	56,5	53,4	49,3
Экскаватор (время простоя / время активной работы), %	19,0	18,3	17,5
Самосвал (время простоя / время активной работы), %	15,8	15,1	14,1
Затраты на разработку, ч	29,7	29,5	29,2
Затраты на разработку, ден. ед.	78 813	78 142	77 321

Применение алгоритма работы экскаватора в условиях неопределенности позволяет на 4,4 % снизить простои в работе экскаватора и на 5,3 % — простои в работе самосвалов, при этом затраты на разработку снизятся на 1 %. Дополнительные эффекты по оптимизации процесса разработки котлована позволяет получить применение алгоритма работы экскаватора с учетом оптимизации по данным геолокации: на 9,9 % снизить простои экскаватора и на 12,8 % — простои автосамосвалов, а затраты на разработку снизятся на 2 %.

В работе была рассмотрена задача повышения эффективности системы управления и использования строительной техники для инвестиционно-строительных проектов на этапе разработки котлованов, построена ее математическая модель, проведен анализ данной модели, использованы методы дискретной оптимизации с построением дерева решений и применением правил отсечений для нахождения оптимального решения задачи, а также методы имитационного моделирования для решения задачи с учетом случайных воздействий внешней среды. Применение предложенных моделей и методов позволяет сократить время и затраты на разработку котлованов и в целом повысить эффективность системы управления проектами.

Литература

1. Асаул, А.Н. Интегративное управление в инвестиционно-строительной сфере / А.Н. Асаул, В.П. Грахов; под ред. А.Н. Асаула. — СПб.: Гуманистика, 2007.
2. Уваров, П.Е. Принципи інтегрованого організаційно-технологічного проектування інвестиційно-будівельної діяльності: автореф. дис ... канд. техн. наук / П.Е. Уваров. — Дніпропетровськ: ПДАБА, 2008.
3. Хэлдман, К. Управление проектами / К. Хэлдман. — М.: ДМК Пресс, 2008.
4. Вакараш В.М. Факторы, определяющие эффективность использования землеройных машин / В.М. Вакараш, В.И. Анин // Технічна естетика і дизайн. — Вип. 6. — Киев: ВИПОЛ, 2009.
5. Структура организационных, методологических и технологических компонентов в современных системах управления проектами / Ю.Н. Тесля, А.А. Белошицкий, П.В. Каюк [и др.] // Вісник ЧДТУ. — № 2. — 2009.
6. Перепелица, В.А. Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределенности данных / В.А. Перепелица, Ф.Б. Тебуева. — М.: Акад. естествознания, 2007.
7. Успенко, В.І. Комп'ютерне імітаційне моделювання задачі оптимізації графіку використання будівельної техніки при розробці котлованів / В.І. Успенко, Н.С. Лєсковська // Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій: зб. праць II Всеукраїнської наук.-практ. конф. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013.

*Статья поступила
в редакцию 31.10. 2013 г.*