

УДК 624.132:622.276

## Показатели эффективности технологий утепления грунта на стадии освоения и рекультивации нефтегазовых месторождений

С.И. Васильев<sup>а</sup>, А.С. Ортман<sup>б</sup>

Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный 82, Красноярск, Россия

<sup>а</sup>S-vasilev1@yandex.ru, <sup>б</sup>ortman123mail.ru

Статья получена 10.12.2012, принята 15.04.2013

*Рассматривается применение качественных технико-экономических показателей с выбором оптимального решения при подготовке утепления грунта в зимних условиях планирования буровой площадки на стадии освоения нефтегазовых месторождений и восстановления ландшафта на стадии завершения работы месторождения при рекультивации земель. Необходимость решения подобных проблем связана со значительным повышением требований к методологии и практике определения затрат на реализацию инвестиционно-строительных проектов и программ и возникает при реализации крупномасштабных высокотехнологичных инвестиционных проектов в труднодоступных и малонаселенных регионах, в которых ощущается недостаток рабочей силы, преобладают природно-климатические и другие условия осуществления строительства. Это особенно относится к сооружению, освоению и обустройству объектов нефтегазовой промышленности на территории Восточно-Сибирского региона. При проектировании нефтегазовых месторождений, внедрении новых технологий и новых методов качество проекта зависит от уровня расчетов и оценок, определяющих в итоге экономическую эффективность проекта по освоению месторождения. Выбор оптимального решения при предварительном нанесении карбамидного поропласта на грунт с применением качественных технико-экономических расчетов, определяющих время нанесения поропласта, позволяет управлять капитальными вложениями и текущими расходами. Данное исследование вносит определенный вклад в решение проблем повышения эффективности расчетов инвестиционных и сметных затрат при строительстве объектов нефтегазовой промышленности, в том числе по ценообразованию, сметным нормам и нормативам, методикам определения прямых затрат и накладных расходов при сооружении, освоении и обустройстве нефтегазовых месторождений.*

**Ключевые слова:** экономическая эффективность, мерзлый грунт, нефтегазовое месторождение, технология подготовки грунтов, карбамидный поропласт.

## Efficiency indices for soil warming technologies at the stage of oil and gas fields development and remediation

S. I. Vasil'yev<sup>а</sup>, A. S. Ortman<sup>б</sup>

Siberian Federal University, 82 Svobodny av., Krasnoyarsk, Russia

<sup>а</sup>S-vasilev1@yandex.ru, <sup>б</sup>ortman123mail.ru

Received 10.12.2012, accepted 15.04.2013

*The article considers the use of qualitative technical-and-economic indices based the optimum choice decision while preparing soil warming in winter conditions of a drill-site planning at the stage of oil-and-gas field development, and the landscape restoration at the stage of work completion on the field while restoring soil. The need for solving such problems is connected with significant increase in requirements to the methodology and practice of assessment of costs on the investment construction projects and programs implementation. It arises in the course of realization of large-scale high-tech investment projects in remote and sparsely populated regions where one can face a shortage of labor and where the climatic and natural and some other conditions to carry out construction work prevail. This especially refers to the construction, development and provision of the necessary oil and gas industry facilities in the East Siberian region. When designing oil and gas fields, introducing new technologies and new methods, the quality of the project depends on the level of calculations and estimations determining the economic efficiency of the project to develop the oil and gas field. The optimum choice decision at pre-application of carbamide cellular plastic on soil using high-quality technical and economic evaluation determining the cellular plastic application time, allows managing capital investments and operating expenses. This study contributes to the solution of the problems of increasing calculation efficiency of the investment and budgeted costs in construction of oil and gas industry facilities. It also helps solve the problems of price formation, estimate norms and standards, methods of determining direct and overhead costs in construction, development and provision of the necessary oil and gas field facilities.*

**Keywords:** economic efficiency, frozen soil, oil and gas field, soil preparation technology, carbamide cellular plastic.

Энергетической стратегией России предусмотрено рассредоточение добычи углеводородов из Западной Сибири по другим регионам страны, в числе которых приоритетным является Восточная Сибирь. Особенно-

стью пространственно-климатического положения территории Восточной Сибири являются наличие пересеченной местности, а также значительный период воздействия низких температур в течение года и повышен-

ная жесткость погодных условий, вызывающие необходимость изменения технологий выполнения землеройно-транспортных работ и повышающие требования к эффективности землеройно-транспортных машин, разрабатывающих грунт на начальной стадии подготовки освоения нефтегазовых месторождений [1, 2].

Открытие и освоение месторождений полезных ископаемых на территории Восточно-Сибирского региона связаны с выполнением большого объема строительных работ, которые в основном ведутся в зонах расположения сезонно-мерзлых грунтов. В этих условиях производительность землеройных машин в значительной степени зависит от прочности, глубины промерзания, гранулометрического состава и других характеристик мерзлых грунтов. Суровые климатические условия Сибири (продолжительная зима, низкая температура воздуха, малая высота снежного покрова) приводят к тому, что грунт находится в мерзлом состоянии в течение шести и более месяцев в году и промерзает на большую глубину (до 2-3 м и более) [3, 4]. Высокая механическая прочность мерзлых грунтов, по сравнению с талыми, приводит к значительному снижению производительности землеройных машин и увеличению стоимости разработки грунтов.

Климат северной части Восточной Сибири резко континентальный, переходный к климату субарктической зоны, с продолжительной зимой и коротким жарким летом. Наиболее холодный месяц – январь, средняя температура –30,4 °С. Наиболее теплый месяц – июль со средней температурой +16,7 °С. Среднегодовая температура –4,0 °С. Резкая континентальность климата подчеркивается значительными суточными амплитудами колебания температур, достигающими летом 15 °С. Снег выпадает в конце сентября и сохраняется до конца мая – начала июня. Среднегодовое количество осадков 518 мм. Ледостав на реках начинается в конце сентября – начале октября, вскрытие – в конце мая.

В соответствии с Земельным кодексом РФ предприятия, учреждения и организации при разработке полезных ископаемых, проведении геологоразведочных, строительных и других работ обязаны после окончания работ привести нарушенные земли и занимаемые земельные участки в состояние, пригодное для дальнейшего использования по назначению. Настоящая работа выполнена в соответствии с требованиями следующих документов: Приказ Минприроды РФ и Роскомзема от 22 декабря 1995 г. № 525/67 «Об утверждении основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы»; ГОСТ 17.5.3.04-83 «Охрана природы. Общие требования к рекультивации земель»; ГОСТ 17.5.1.02-85 «Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации»; ГОСТ 17.4.3.02-85 «Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ»; РД 51-1-96 «Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на суше на месторождениях углеводородов поликомпонентного состава, в том числе сероводородсодержащих» [1].

Одной из наиболее острых и актуальных проблем в области экономики России является проблема энергосбережения при проведении рекультивации нарушен-

ных земель. В условиях коротких сроков, отводимых на землеустроительные работы, в качестве подхода к решению научной проблемы предлагается использовать технологию утепления грунта от сезонного промерзания. В частности, применение утепления грунта позволяет уменьшить энергетические расходы и эксплуатационные затраты за счет накопленного в летнее время тепла, снизить себестоимость добычи нефти, а также упростить технологию подготовки грунта на стадии освоения нефтегазового месторождения. Физико-механические характеристики утепленного грунта близки к летним характеристикам, а производительность землеройных машин примерно соответствует уровню летних условий разработки грунта. Эти параметры повышают эффективность разработки месторождений и позволяют предприятиям нефтедобычи развиваться за счет высвободившихся внутренних финансовых резервов. Преимуществами этого способа являются возможность прогнозирования физико-механических характеристик грунта в период его разработки, времени сохранения грунта в талом состоянии для каждого из расчетных зимних месяцев; сокращение длительности цикла стадии освоения нефтегазовых месторождений; снижение потребности в финансовых ресурсах при внедрении новой технологии [3, 4].

Эффективная эксплуатация землеройных машин в условиях Восточной Сибири невозможна без детального изучения физико-механических свойств сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с каменистыми включениями с учетом зоны распространения сезонного промерзания и температурных профилей промерзания грунтов. В большой степени это объясняется своеобразием грунтовых условий, сложными пространственно-климатическими условиями, характеризующимися широким распространением мерзлых грунтов и грунтов с каменистыми включениями, недостаточной изученностью характеристик грунта, процесса резания, а также параметров, влияющих на производительность. Вследствие этого широко применяемые ныне землеройные машины не в состоянии разработать грунт зимой без предварительной подготовки, если толщина слоя мерзлого грунта превышает определенную величину.

В инженерной методике для расчета необходимой толщины пены-утеплителя на карбамидной основе для предохранения грунта от сезонного промерзания по среднестатистическим метеорологическим данными месячных температур, высоты снежного покрова, плотности снежного покрова и количества суточных градусо-часов отрицательных температур используется формула [1]:

$$h = K_y \cdot L_y \cdot (K_p \cdot K_w \cdot R_o - R_c), \quad (1)$$

где  $K_y$  – коэффициент усадки пены-утеплителя;  $L_y$  – коэффициент теплопроводности утеплителя,  $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°С})$ ;  $K_p$  – коэффициент влияния плотности грунта;  $K_w$  – коэффициент влияния влажности грунта;  $R_o$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}/\text{ккал}$ ;  $R_c$  – термическое сопротивление снега,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}/\text{ккал}$ . Коэффициент влияния объемной плотности ( $K_p$ ) зависит от типа грунта и его гранулометрического состава. Для

практических расчетов рекомендуется принимать значение  $K_p = 1,00$  для грунтов плотностью от 1500 до 1700 кг/м<sup>3</sup> и  $K_p = 0,85$  – для грунтов плотностью от 1700 кг/м<sup>3</sup> и более. Значение коэффициента влияния влажности грунта ( $K_w$ ) рекомендуется принимать при влажности грунта от 8 % до 20 % равным 1,35, а при влажности грунта более 20 % – 0,71.

Тепловые потери грунта под покрытием пены-утеплителя определялись по формуле:

$$Q = H \cdot (G \cdot L + 0,5t_m \cdot C), \text{ ккал/м}^2, \quad (2)$$

где  $H$  – допустимая глубина сезонного промерзания грунта, м;  $G$  – содержания льда в мерзлом грунте, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – удельная теплота плавления льда, ккал/кг;  $t_m$  – температура мерзлого грунта, °C;  $C$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м<sup>3</sup>°C).

Влияние теплоизоляции на глубину промерзания утепленного грунта можно проследить по известному уравнению В.С. Лукьянова [3]:

$$h = \sqrt{\frac{4\lambda_r \Delta t \tau}{2Q + C_r \Delta t}} + S^2 - S, \quad (3)$$

где  $h$  – глубина промерзания грунта, м;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°C);  $\Delta t$  – разность температуры промерзания грунта и средней температуры воздуха за зимний сезон, °C;  $\tau$  – продолжительность промерзания грунта, с;  $Q$  – скрытая теплота замерзания влаги грунта, Дж/м;  $C_r$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $S$  – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению слоя изоляции поверхности грунта и сопротивлению теплоотдачи с поверхности, м.

При утеплении грунта толщина слоя грунта определялась по формуле:

$$S = \lambda_r (R_\alpha + R_o). \quad (4)$$

Уравнение (4) подтверждает, что глубина промерзания утепленного грунта будет тем больше, чем больше коэффициент теплопроводности грунта, разность температур  $\Delta t$  промерзающего грунта и воздуха, а также продолжительность промерзания. На увеличение глубины промерзания одинаково влияют как температура воздуха в течение короткого промежутка времени, так и более высокая температура воздуха в течение продолжительного времени. Следовательно, влияние температуры воздуха и продолжительности процесса на промерзание утепленного грунта можно учитывать как произведение количества градусо-часов отрицательной температуры и количества часов промерзания грунта. Выявленное влияние температуры грунта в момент нанесения утеплителя (т. е. начальных условий) на продолжительность предохранения грунта от промерзания позволило существенно уточнить инженерную методику расчета толщины карбамидного поропласта, используемого для предохранения грунта от сезонного промерзания.

При различных начальных условиях для промерзания грунта за одно и то же время на определенную глубину требуется разное общее термическое сопротивление. В этом случае темпы промерзания грунтов сильно

отличаются. Различие требуемого термического сопротивления при разных начальных условиях вычислялось через коэффициент влияния срока нанесения утеплителя, показывающий, насколько изменяется требуемое общее термическое сопротивление при нанесении утеплителя в различные сроки по отношению к требуемому термическому сопротивлению, когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта:

$$K_\tau = \frac{R_t}{R_o}, \quad (5)$$

где  $K_\tau$  – коэффициент влияния срока нанесения утеплителя;  $R_t$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в различные сроки, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;  $R_o$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в начале промерзания грунта, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт. Считалось, что высокая температура грунта в момент нанесения утеплителя содействует более продолжительному предохранению от промерзания и при одинаковой продолжительности предохранения от промерзания потребуется меньшее общее термическое сопротивление. Отсюда требуемое сопротивление в случае нанесения утеплителя до начала промерзания грунта будет меньше, чем когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта, а коэффициент  $K_\tau$  – меньше единицы. Если карбамидный поропласт наносится после начала промерзания, то  $K_\tau$  будет больше единицы. Его величина будет тем больше, чем больше период времени после начала промерзания грунта.

Как правило, использование графических зависимостей дает хорошую наглядность (рис. 1, 2), но для инженерной методики они трудноприменимы, тогда как уравнения регрессии позволяют произвести вычисления поправочных коэффициентов, представленных в таблице 1. Уравнения регрессии (таблица 1) действительны в пределах изменения срока нанесения поропласта (Т) от 30 дней до начала промерзания глинистого грунта до 15 дней после начала промерзания.

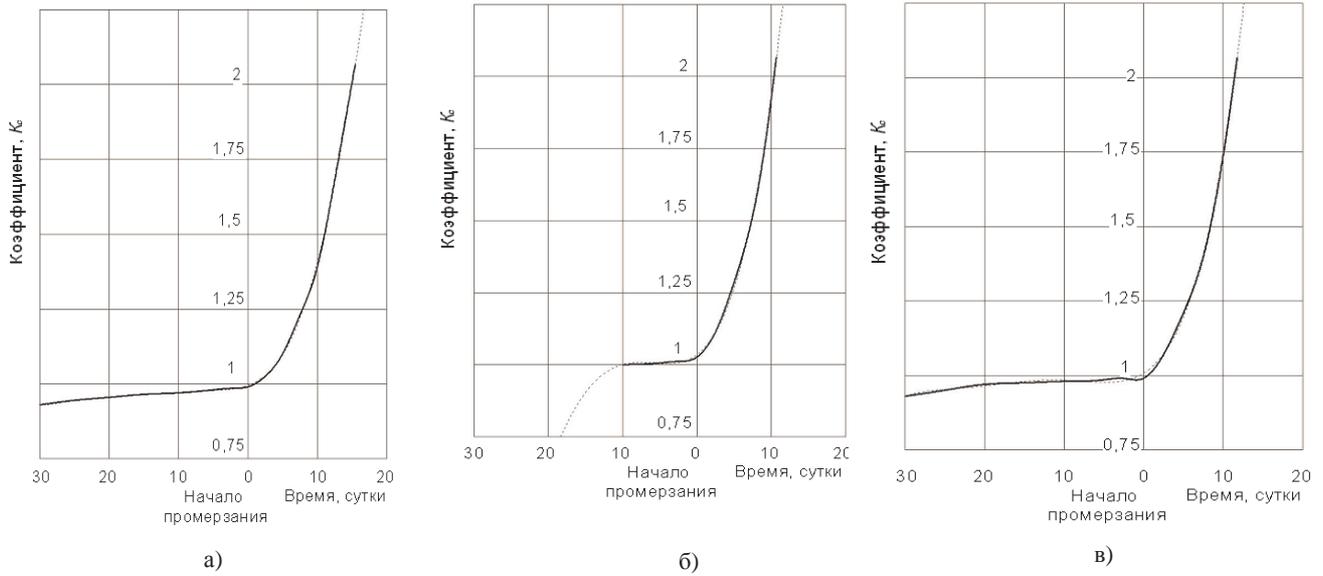
Учитывая среднестатистические данные северной зоны Красноярского края при утеплении грунта, работы по утеплению грунта карбамидным поропластом рекомендуется проводить, начиная с октября месяца, до наступления промерзания грунта.

Существенная зависимость коэффициента влияния от своевременности нанесения поропласта на утепляемый грунт приводит к необходимости внесения изменений в формулу (1), в этой связи предлагается необходимую толщину поропласта определять по формуле:

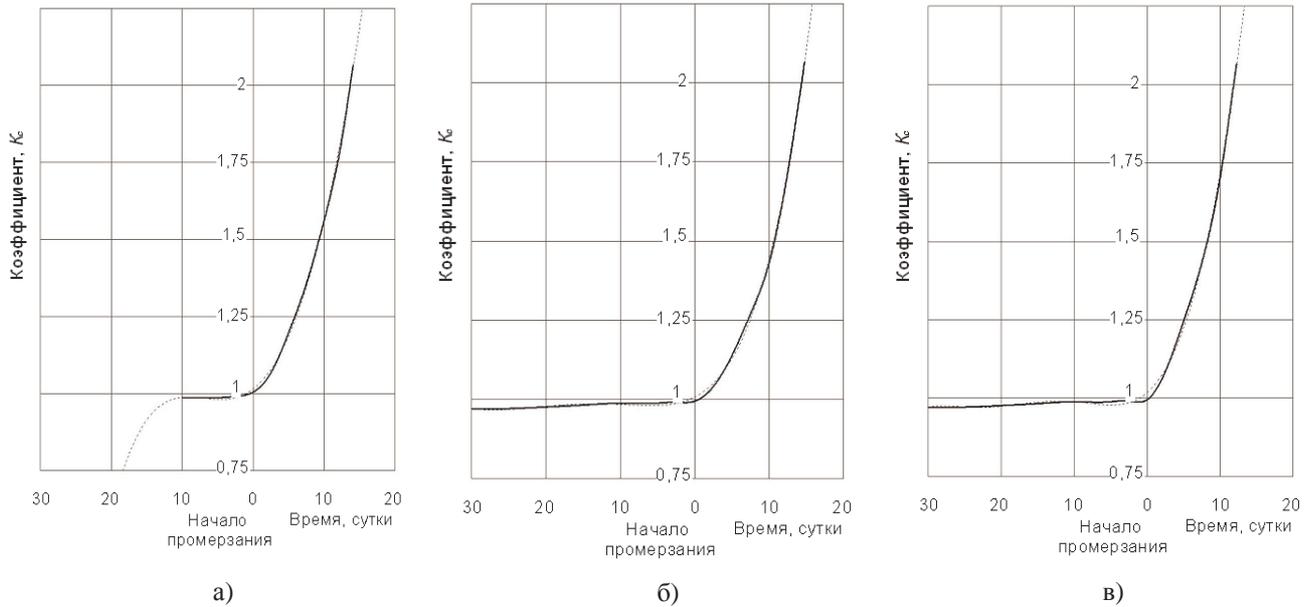
$$h = K_y \cdot L_y \cdot (K_p \cdot K_\tau \cdot K_w \cdot R_o - R_c). \quad (6)$$

Плотность и влажность грунта влияют не только на продолжительность периода предохранения грунта от промерзания, но и на общее термическое сопротивление карбамидного поропласта и снежного покрова. При известных общем термическом сопротивлении и термическом сопротивлении снега можно определить требуемое термическое сопротивление утеплителя, а затем и толщину. Сопротивление резания утепленных от промерзания грунтов зависят от влажности и не зависят от их гранулометрического состава.





**Рис. 1.** Изменения коэффициента влияния времени нанесения поропласта: а – глинистый грунт; б – песчаный грунт; в – гравийно-галечниковый грунт



**Рис. 2.** Изменения коэффициента влияния времени нанесения поропласта: а – суглинок с гравием; б – суглинок; в – супесь

Таблица 1

*Распределения коэффициента влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта*

Тип грунта	Изменение коэффициента влияния срока нанесения поропласта	Коэффициент корреляции
Глинистый грунт	$K_{\tau} = -1,204 \cdot 10^{-10} \cdot T^7 - 8,107 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 9,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 4,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,008 \cdot T + 0,995$	0,97
Суглинок	$K_{\tau} = 2,138 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 2,627 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,07 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,012 \cdot T + 1,008$	0,98
Супесь	$K_{\tau} = -3,09 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 1,515 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 + 1,318 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,803 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,017$	0,99
Песчаный грунт	$K_{\tau} = -9,411 \cdot 10^{-10} \cdot T^6 + 1,694 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 5,558 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 2,10 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,017 \cdot T + 1,008$	0,98
Суглинок с гравием	$K_{\tau} = -1,741 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,018 \cdot T + 1,015$	0,99
Гравийно-галечниковый грунт	$K_{\tau} = 3,46 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 2,653 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,004 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,035$	0,98

Приведенные удельные затраты на разработку подготовленных (утепленных) однородных грунтов траншейными экскаваторами снижаются на 10-15 %, а удельные затраты на разработку подготовленных грунтов с гравийно-каменистыми включениями, в первую очередь зависящие от гранулометрического состава и процентного содержания фракций в разрабатываемых грунтах, в отдельных случаях могут снижаться на 20 % [4, 5].

Натурные исследования подтвердили, что для одинаковых сроков до начала промерзания глинистых и песчаных грунтов поправочный коэффициент толщины поропласта существенно уменьшается, в частности, если наносить поропласт через 10 дней после начала промерзания глинистых грунтов (значение коэффициента равно 1,37, а для песчаных составит 1,72). Если произвести нанесение поропласта за 10 дней до начала промерзания, то эти коэффициенты принимают значения 0,82 и 0,85. Таким образом, своевременное нанесение на глинистый грунт карбамидного поропласта позволяет уменьшить толщину слоя в 1,67 раза, а для песчаных грунтов – в 2,02 раза. Основываясь на данных расчета [6], при сравнительной экономической эффективности с использованием метода подготовки грунта к экскавации с применением карбамидного поропласта и данных, рассчитанных с применением этого метода, уточнение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта при усредненном коэффициенте для разных грунтов дает возможность предприятию получить годовой эффект при производстве работ по экскавации мерзлого грунта в размере более 450000 руб.

При проектировании нефтегазовых месторождений, внедрении новых технологий и новых методов качество проекта зависит от степени достоверной информации, уровня совершенствования расчетов и оценок, определяющих в итоге экономическую эффективность предприятия. Таким образом, предварительное нанесение карбамидного поропласта на грунт при применении качественных технико-экономических расчетов с выбором оптимального решения, определяющих время нанесения пенного утеплителя, позволяет управлять капитальными вложениями и текущими расходами. Динамика исходной информации капитальных затрат и эксплуатационных расходов на примере данного исследования рекомендована к использованию как основа экономической оценки, по своему содержанию и величинам зависящей от природно-климатических экологических условий, горно-геологических и технико-технологических факторов, от производственно-

финансовых особенностей, что в итоге находит отражение в экономических нормативах, нормах, затратах и налогах.

### Литература

1. Земельный кодекс Российской Федерации: федер. закон от 25.10.2001 г. N 136-ФЗ [Электронный ресурс] (принят ГД ФС РФ 28.09.2001) (действующая редакция). Доступ из справ.-правовой системы Консультант Плюс, 1992-2013.
2. Основные положения о рекультивации земель, снятии сохранения и рациональном использовании плодородного слоя почвы. М.: Минприрода России и Роскомзем, 1995.
3. Тяжелов Б.П., Шпинко Е.В. Земляные работы в зимних условиях М., Госстройиздат, 1956 165 с.
4. Мелкозеров В.М., Васильев С.И., Вельп А.А. Технические условия. Поропласты композиционные: ТУ 2254-001-02067876-2009 (введ. 28.12.2009).
5. Васильев С.И. Побочное влияние карбамидных поропластов на акварионты при утеплении грунтов Сибири // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. Вып. 9. С.42-47.
6. Ортман А.С. Прогнозирование эффективности землеустроительных работ на ранних стадиях подготовки нефтегазовых месторождений [Электронный ресурс] // Молодёжь и наука: сб. материалов VII всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 50-летию первого полета человека в космос. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/section02.html>, свободный (дата обращения: 29.11.2012).
7. Васильев С.И., Анферов В.Н., Мелкозеров В.М. Технология подготовки грунтов к разработке в зимний период при освоении полезных ископаемых Восточно-Сибирского региона: моногр. Красноярск: СФУ, 2012. 152 с.

### Reference

1. Land Code of the Russian Federation: feder. zakon ot 25. 10. 2001. № 136-FZ.
2. The fundamental provisions of the reclamation, conservation and sustainable use of fertile land. М.: Minpriroda Rossii and Roskomzem, 1995.
3. Tyazhelov B.P., Shpinko E.V. Winter excavation. М.: Gosstroyizdat 1956. 165 s.
4. Melkozerov V.M., Vasil'yev S.I., Vel'p A.Y. Specifications. Composite porous foams: TU 2254-001-02067876-2009 (vved. 28.12.2009).
5. Vasil'yev S.I. The side effect of carbamide cellular plastics on water organisms when warmth-keeping soils of Siberia // Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. 2012. Vyp. 9 S. 42-47.
6. Ortman A.S. Forecasting the economic efficiency of the land-use planning at the early stage of oil and gas fields development // Molodezh' i nauka: sb. Materialov VII vseros. Nauch.-tekh. Konf. Studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2011.
7. Vasil'yev S.I., Anferov V.N., Melkozerov V.M. The technology of soil preparation for digging under winter conditions while developing the mineral resources of the East-Siberian region: monogr. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2012. 152 s.