

УДК 622.691; 69.035.4; 621.642.37
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art15

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
РАЗМЫВАНИЯ ГРУНТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ
ГАЗА НА ОСНОВЕ ЛУЧЕВОГО МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

Вульфсон А.Н., Бородин О.О.
Институт проблем нефти и газа РАН
E-mail: vulfson@ipng.ru, borodin@ipng.ru

Аннотация. Представлен программный комплекс, реализующий описание процесса размывания грунта методом скважинной гидротехнологии. В основу программного комплекса положена математическая модель, использующая лучевой метод геометрической оптики. Созданный программный продукт позволяет разрабатывать различные сценарии построения газохранилища методом гидротехнологии в различных геологических условиях. Комплекс может служить основной частью компьютерного мониторинга процесса создания подземных резервуаров в мерзлых породах, что позволит оптимизировать технологический процесс для различных условий залегания мерзлых грунтов.

Ключевые слова: программный комплекс, лучевой метод, подземный резервуар, газохранилище, многолетнемерзлые грунты.

**SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING THE PROCESS
OF SOIL EROSION IN THE CONSTRUCTION OF UNDERGROUND
GAS STORAGE BASED ON THE METHOD OF GEOMETRIC OPTICS**

Vulfson A.N., Borodin O.O.
Oil and Gas Research Institute RAS
E-mail: vulfson@ipng.ru, borodin@ipng.ru

Abstract. The software package implements the description of the soil erosion process using the borehole hydraulic technology. The application is based on a mathematical model using the ray method of geometric optics. The created software product allows us to develop various scenarios for constructing a gas storage using hydrotechnology method in various geological conditions. The application could serve as the base part of computer monitoring of the process of creating underground reservoirs in frozen rocks. Mathematical modelling permits to increase the efficiency and optimize the technological process for different stratification of frozen soil.

Keywords: software package, ray method of geometric optics, underground reservoir, gas storage, permafrost soils.

Введение

В условиях развития интенсивной газонефтедобычи и промышленной переработки углеводородов строительство подземных резервуаров для хранения газоконденсата является весьма актуальной задачей.

Известны ситуации, когда фактическая добыча газоконденсата значительно превышает проектные показатели. При этом часть газоконденсата сжигается на факельных установках, поскольку парк наземных хранилищ не может вместить добываемый конденсат. Интенсивная газонефтедобыча в районах Крайнего Севера приводит к извлечению большого количества жидких углеводородов. Однако замерзание Северного морского пути не позволяет обеспечивать стабильный вывоз добытых углеводородов. В подобных ситуациях создание резервного парка подземных нефтегазохранилищ является актуальной научно-прикладной задачей.

Метод скважинной гидротехнологии (подробнее об этом см. в [1]) является одним из наиболее эффективных методов создания подземных резервуаров в многолетних мерзлых грунтах. В рамках данного метода в мерзлый грунт устанавливаются две трубы с общей вертикальной осью. По внутренней трубе в мерзлый грунт поступает теплоноситель (горячая вода или пар), который растапливает и размывает замерзший песок. По межтрубному кольцевому пространству образовавшаяся водопесчаная смесь откачивается на поверхность земли. Описанный процесс позволяет конструировать в мерзлом грунте полости с характерными размерами порядка 30–50 м.

Подземные резервуары, созданные с помощью метода гидротехнологии, должны удовлетворять следующим конструктивным требованиям:

- 1) длительная механическая устойчивость полости,
- 2) герметичность,
- 3) отсутствие химического воздействия на нефтепродукты при длительном контакте.

С учетом этого современную скважинную технологию строительства подземных резервуаров в мерзлых грунтах целесообразно дополнить компьютерным мониторингом, включающим различные математические модели. Математическая модель исследования

устойчивости свода построенного резервуара предложена в [2]. Математическая модель процесса размывания грунта, использующая уравнение энергетического теплового баланса, предложена в [3, 4]. Математическая модель процесса размывания грунта, построенная на основе лучевого метода геометрической оптики, предложена в [5, 6]. Численное моделирование обеспечивает эффективную корректировку процесса строительства и предупреждает нежелательные обрушения грунта в полости резервуара.

На основе математического моделирования можно реализовать компьютерный мониторинг процесса строительства подземного резервуара в мерзлых грунтах. Вариант компьютерного мониторинга, построенного на основе оптической аналогии [5, 6] и автомоделных решений [7], предложен в настоящей работе.

Описание геометрического метода построения области размывания

В основу программного комплекса положена численная реализация «оптического» метода размывания грунта, предложенного в [5, 6]. В рамках этого подхода для описания процесса строительства используется понятие о луче размывания грунта, который определяется по аналогии с геометрической оптикой. Поэтому в соответствии с вариационным принципом Ферма луч размывания, соединяющий точки A и B , представляет собой линию, вдоль которой процесс растапливания грунта реализуется за минимальное время.

Будем стилизовать область истечения теплоносителя в грунт по внутренней трубе как точечный источник нагревания, расположенный в точке \vec{r}_0 . Допустим, что из точечного теплового источника исходит пучок всевозможных лучей размывания (экстремалей). Поверхность, точки которой достигаются лучами за одно и то же время, будем называть фронтом размывания. В рамках «оптического» метода [5, 6] фронт размывания соответствует границе подземного резервуара в каждый момент времени.

Пусть $\Gamma_{t_n}(\vec{r}_0)$ – гладкая поверхность фронта размывания, созданная точечным источником \vec{r}_0 в момент времени t_n . Фиксируем произвольную точку \vec{r} на поверхности фронта $W(\vec{r}_0, \vec{r}) = t_n = const$. Тогда $\vec{\nabla}W(t_n)$ – нормаль к поверхности $W(\vec{r}_0, \vec{r}) = t_n = const$.

Допустим, что $v(\vec{r})$ – локально изотропная скорость размывания грунта. Согласно известной теореме геометрической оптики [5, 6], лучи перпендикулярны фронту. Поэтому нормаль к поверхности в точке \vec{r} пропорциональна вектору касательной к лучу, проходящему через точку \vec{r} . Следовательно, если вдоль направления нормали в точке \vec{r}

отложить отрезок длиной $v(\vec{r})\Delta t$, то конец этого отрезка \vec{r}' будет также принадлежать лучу при малых шагах по времени $\Delta t = dt$.

Пусть теперь точка \vec{r} пробегает всю поверхность $W(\vec{r}_0, \vec{r}) = t_n = const$, тогда соответствующие точки \vec{r}' будут формировать некоторую новую поверхность. Очевидно, что все точки этой поверхности достигаются лучами за одно и то же время $t_n + \Delta t$. Следовательно, построенная поверхность является волновым фронтом $W(\vec{r}_0, \vec{r}') = t_n + \Delta t = const$ (рис. 1).

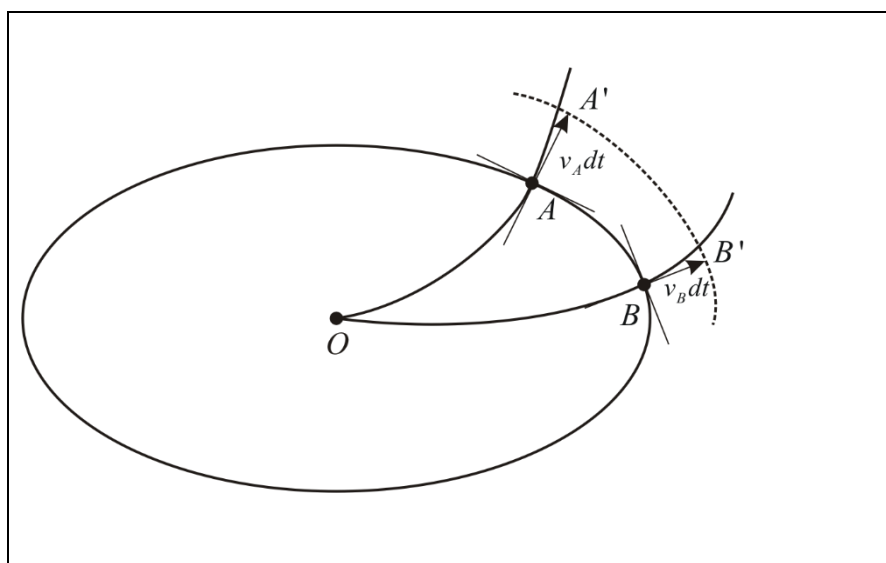


Рис. 1. Иллюстрация геометрического метода построения области размывания. Замкнутый контур AB соответствует фронту размывания в момент времени t . Кривые OA и OB соответствуют лучам размывания, перпендикулярным фронту. Замкнутый контур $A'B'$ соответствует фронту размывания в момент времени $t+dt$

Пошаговая реализация этой процедуры позволяет последовательно рассчитывать эволюцию формы строящегося резервуара.

Описание алгоритма расчета

В рамках предложенной модели процесс размывания грунта предполагается осесимметричным. Использование этой гипотезы позволяет характеризовать поверхность «фронта размывания» контуром, расположенным в вертикальной плоскости с координатами x, z .

Точки подвижного контура $\Gamma_i(\vec{r}_0)$ в различные моменты времени t будем рассматривать как лучи размывания, соответствующие вектор-функциям $\vec{r} = \vec{r}_\alpha(t)$. Здесь t – время; α – внутренний параметр, характеризующий положение точки на контуре.

Заметим, что семейство вектор-функций $\vec{r} = \vec{r}_\alpha(t)$ описывает перемещение контура $\Gamma_i(\vec{r}_0)$. При численной реализации контур $\Gamma_i(\vec{r}_0)$ покрывается узлами основной подвижной сетки S с постоянным числом узлов N . При этом семейство функций $\vec{r} = \vec{r}_\alpha(t)$ с непрерывным параметром α аппроксимируется дискретным набором функций, $\vec{r}_i^c = \vec{r}_i^c(t)$, где $i = 0, 1, 2, \dots, N$, описывающих перемещение основных узлов сетки.

Скорость размывания грунта, зависящая от геологического строения сыпучей среды, учитывает автомодельные результаты [7] и задается растровой матрицей $v = v(\vec{r})$.

Соображения симметрии позволяют вычислять перемещение только половины контура $\Gamma_i(\vec{r}_0)$. Перемещение контура $\Gamma_i(\vec{r}_0)$ рассчитывается с помощью основной сетки S и вспомогательной сетки S' .

На каждом временном шаге алгоритм программы различает движение контура в изотропном и в анизотропном случаях (рис. 2). Изотропный случай соответствует однородному грунту, в котором скорость размывания грунта идентична по всем направлениям и не зависит от направления луча размывания. Анизотропный случай соответствует неоднородному грунту, в котором скорость размывания грунта зависит от направления луча размывания. В последнем случае необходимо скорректировать координаты вычисленного узла контура.

Перемещение точки контура внутри физически однородного и неоднородного слоя изображено на рис. 2, а и рис. 2, б соответственно.

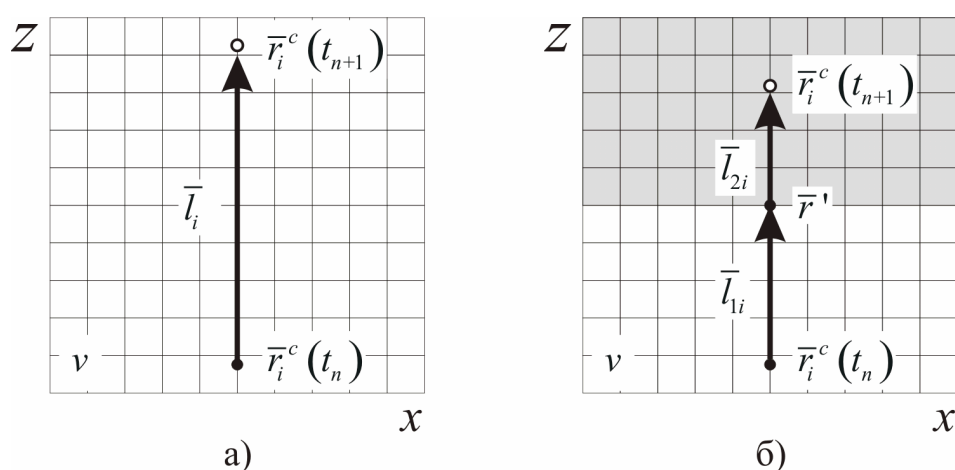


Рис. 2. Движение узла контура в различных средах:
а) – изотропная среда; б) – анизотропная среда

При наличии анизотропии необходимо также предусмотреть процедуру, исключающую самопересечение контура. Такой процедурой может служить решение известной задачи теории графов о нахождении всех внешних граней контура [8].

Далее гранью контура будем называть часть плоскости, ограниченную ребрами этого контура. Грань, имеющая бесконечную площадь, называется внешней. Для выполнения процедуры исключения самопересечений контура необходимо перевести координаты узлов основного контура в граф G с N вершинами.

Реализовать построение планарного графа можно следующим образом. Фиксируем отрезок с первым и вторым узлами. Далее найдем все точки пересечения этого отрезка с остальными гранями графа G . Найденные точки пересечения, а также концы самого отрезка представим в форме вектор-столбца и упорядочим его координаты по возрастанию. Последовательно обходя координаты вектора, будем добавлять ребра между соседними точками в этом векторе. Выполнив этот процесс для всех остальных отрезков, построим соответствующий планарный граф. На рис. 3 наглядно показаны момент формирования самопересечения контура на $n+1$ -ом шаге и результат работы процедуры исключения самопересечений контура.

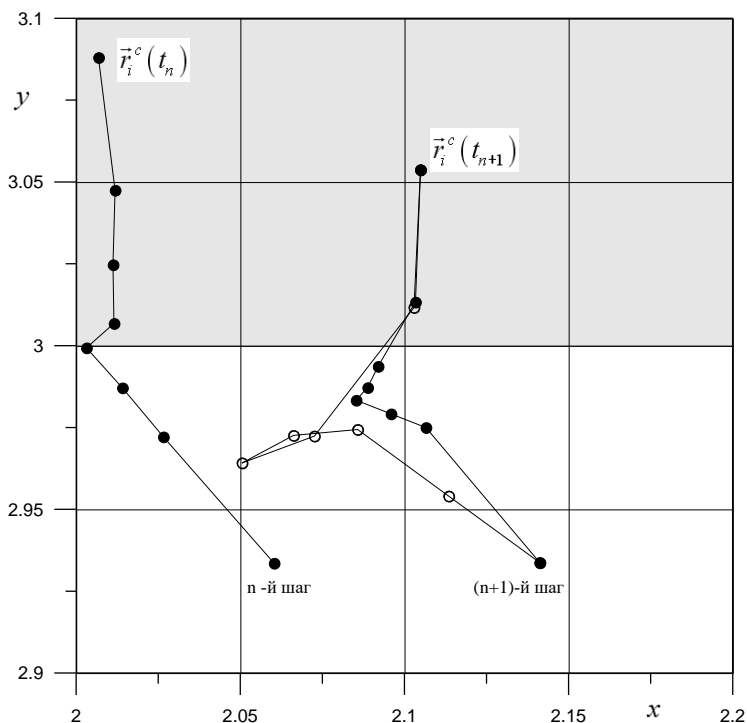


Рис. 3. Последовательное развитие фронта размывания с образованием самопересечений. Светлыми кружками показана работа численного метода при отсутствии процедуры проверки планарности контура. Черными кружками показана работа численного метода с учетом процедуры проверки планарности контура. Серый фон характеризует анизотропию слоя

Алгоритм работы предложенного программного комплекса для визуализации динамики развития подземного резервуара и определения параметров его создания состоит из цикла последовательных шагов и представлен в виде блок-схемы (рис. 4).

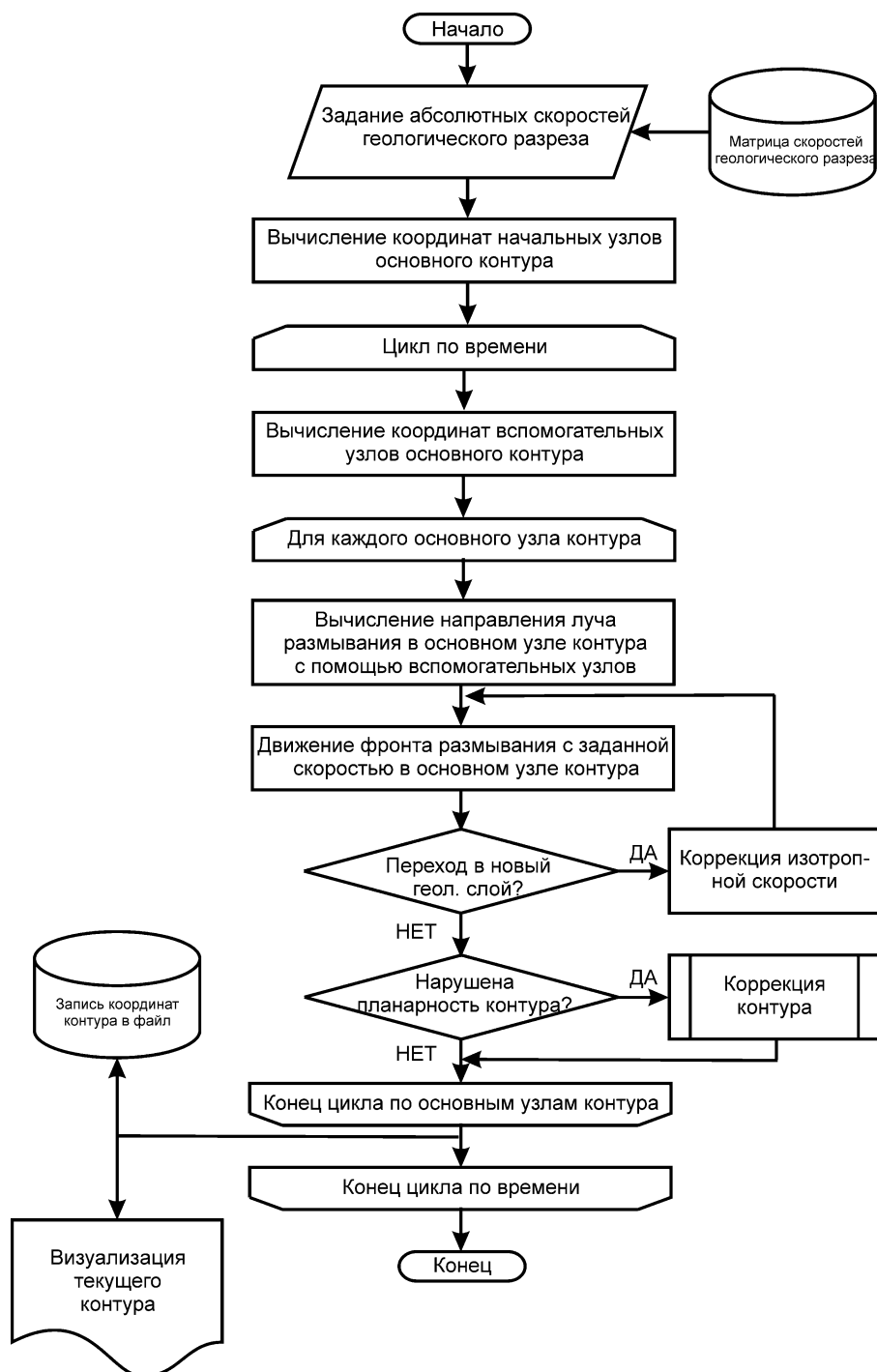


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы программного комплекса

Входными данными для алгоритма расчета внешней границы полости резервуара являются: дата и время начала размыва, продолжительность расчета.

Диалоговые окна ввода начальных данных и динамика расчетов программного комплекса изображены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

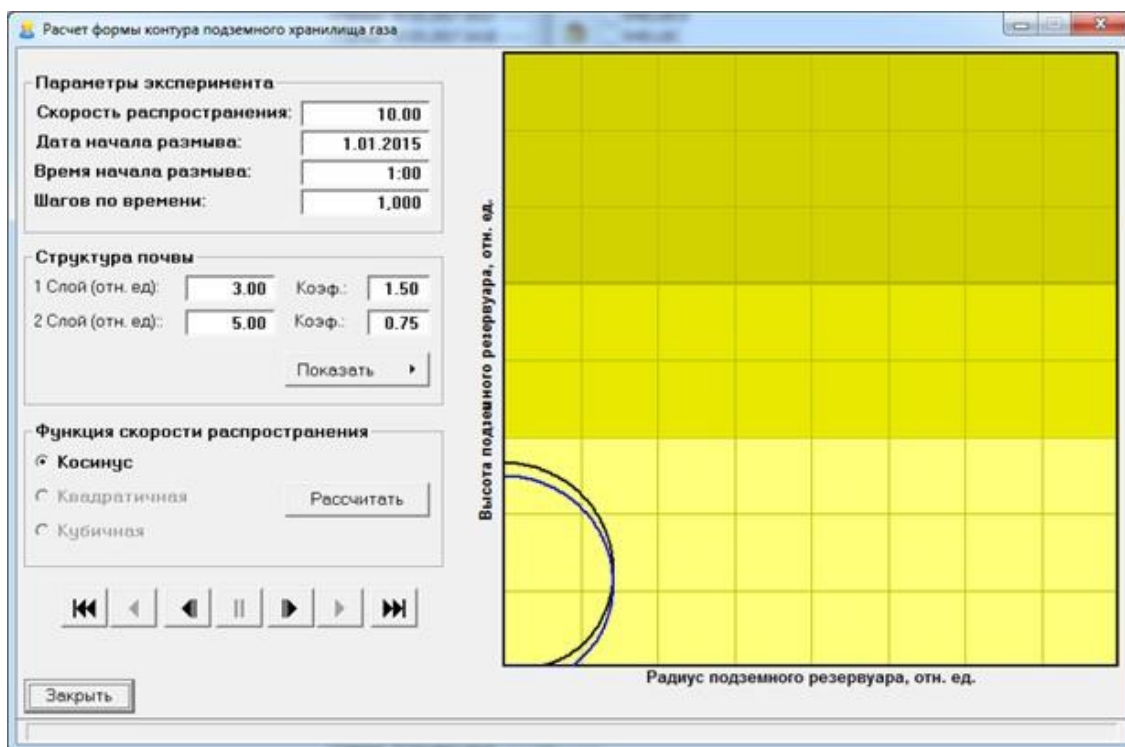


Рис. 5. Диалоговое окно ввода параметров расчета

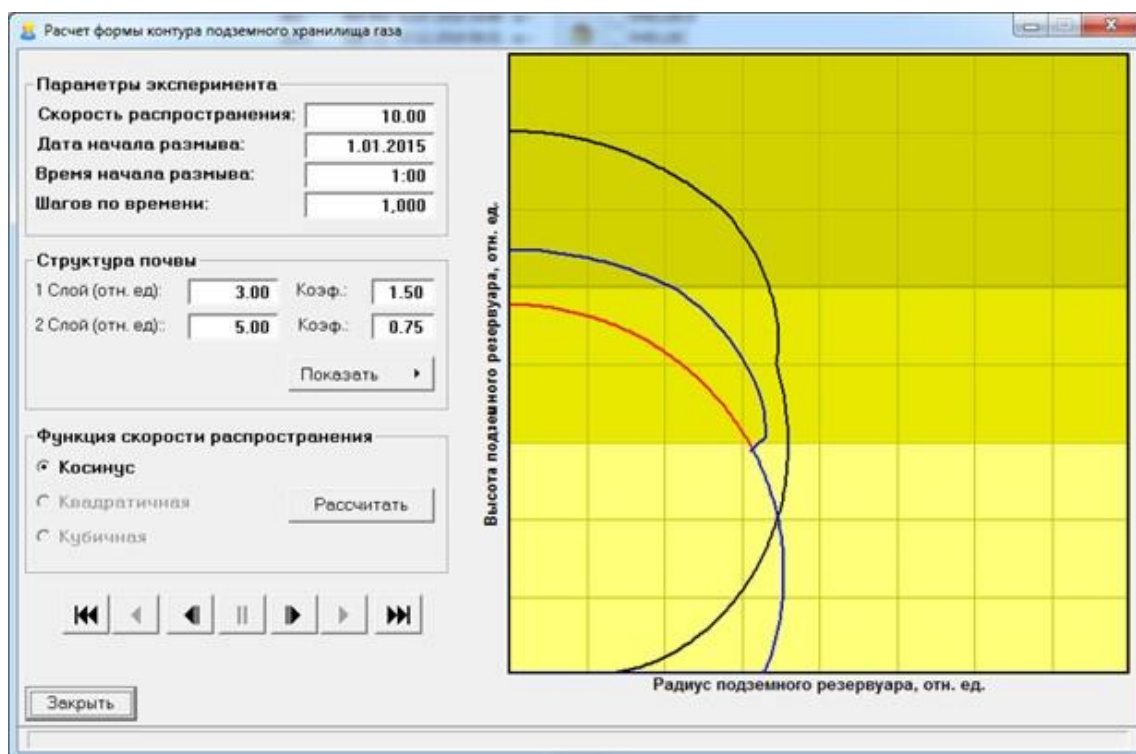


Рис. 6. Диалоговое окно, отображающее результат вычисления

Подробное описание интерфейса работы с программным комплексом изложено в прилагающемся к нему руководстве пользователя.

Заключение

Созданный программный комплекс позволяет разрабатывать различные сценарии построения газохранилища методом гидротехнологии в различных геологических условиях. Программный комплекс реализует компьютерный мониторинг процесса размывания грунта, как до начала строительства, так и после его завершения. Гибкое математическое моделирование позволяет значительно повысить эффективность и оптимизировать технологический процесс построения газохранилища для различных условий залегания грунтов.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксютин О.Е., Казарян В.А., Ишков А.Г., Хлопцов В.Г., Теплов М.К., Хрулев А.С., Савич О.А., Сурин С.Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. М.; Ижевск: Ин-т комп. исслед., 2013. 432 с.
2. Воронова А.В., Тропкин С.Н., Журавлева Т.Ю., Скворцов А.А. Моделирование геомеханического поведения подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах // Международный форум Инженерные системы – 2015», Москва, 6–7 апреля 2015 г.: Тез. и докл. конф. М., 2015. – Режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es15_4.pdf (Дата обращения 28.11.2018).
3. Хрулев А.С., Карпухин А.Н., Сурин С.Д. Обоснование параметров скважинной гидродобычи песка на полуострове Ямал // Горн. информ.-аналит. бюл. 2011. № 8. С. 157–164.
4. Шергин Д.В. Исследование и разработка технологии создания подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах: Дис.... канд. техн. наук. М., 2014.
5. Вульфсон А.Н., Бородин О.О. О возможности использования оптического принципа Гюйгенса для расчета формы резервуара подземного газохранилища в мерзлых грунтах // Актуал. пробл. нефти и газа. 2016. Вып. 3(15). 12 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 28.11.2018).

6. Вульфсон А.Н., Бородин О.О. Лучевой метод геометрической оптики и перемещение фронта размывания при формировании объема подземного резервуара // Актуал. пробл. нефти и газа 2018. Вып. 2(21). 9 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 28.11.2018).

7. Вульфсон А.Н., Бородин О.О. Приложение теории подобия к описанию скорости размывания грунта методом скважинной гидротехнологии и оценка размера резервуара газохранилища при звуковом локационном зондировании // Актуал. пробл. нефти и газа 2018. Вып. 3(22). 9 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 28.11.2018).

8. Оре О. Теория графов. М.: Либроком, 2009. 329 с.