

T. L. Kachanova, B. F. Fomin, O. B. Fomin  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## INFORMATION RESOURCE OF KNOWLEDGE ON OPEN SYSTEMS (AN ANALYTICAL REVIEW)

*Open systems are given by empirical descriptions gathered from huge amount of multimodal heterogeneous data. A system with hundreds and thousands of indicators is initially represented as a «system in data» as well as a «system in relations». Thus, the system represented in such formats can be characterized in details by its empirical, statistical, and structural portraits. Both system representations («in data» and «in relations») and empirical, statistical, and structural portraits, taken all together, form an initial empirical context of the system. The physics of systems, on the basis of empirical context, implements the process of cognition, scientific understanding, and rational explanation of ontology of open system. Correctness, fullness, and completeness of ontological knowledge are assessed as a result of exploring its axiology as well as creating resources of knowledge about the system. Information resource of knowledge describes the system as empirical fact that has gained shape. Intellectual, cognitive, and technological resources of knowledge characterize the system as a sense that has gained shape, was understood and embodied, and simultaneously, they assess the extent to which ontology of the system had been scientifically understood and rationally explained. This article is devoted to the information resource, its role and significance in the processes of cognition, understanding and explanation of ontology, is aimed to analyze value of obtained knowledge (correctness, fullness, and completeness) about the system's ontology, as well as indicates the importance of requiring fullness and representativeness for initial empirical context of the system.*

**Physics of open systems, resources of system knowledge, knowledge about systems ontology, cognition of systems ontology, scientific understanding of systems ontology, rational explanation of systems ontology, value of knowledge about systems ontology**

УДК 681.5

И. М. Новожилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. Н. Ильюшина

Санкт-Петербургский технический колледж управления и коммерции

М.-А. М. Асадулаги, В. В. Антропова, Т. В. Кухарова

Санкт-Петербургский горный университет

## Разработка пространственно распределенной математической модели пласта сложной формы

*Работа посвящена построению пространственно распределенной математической модели пласта сложной формы. Цель статьи заключается в разработке математического обоснования, построении пространственно распределенной математической модели пласта в месторождениях сложной формы. Модель представляет собой 3D-график, отображающий изменение температуры пласта в различных его точках с течением времени. Рассмотрен объект моделирования и его свойства. Проанализированы уже имеющиеся математические модели месторождений. В качестве объектов исследования рассматриваются месторождения, содержащие сырье, имеющее реологические свойства (нефть, минеральная и артезианская вода). Разработан программно-аппаратный комплекс, осуществляющий непосредственное измерение текущего состояния температурного поля. Сопоставлены экспериментальные и аналитические данные. На основе исследования, описанного в данной статье, можно сделать вывод о необходимости моделирования месторождений, поскольку оно снижает затраты на бурение и строительство скважин за счет оптимизации технологических операций при строительстве, уменьшает количество аварий, остановок во время бурения, сокращает количество непродуваемого времени и стоимости бурения, а также позволяет увеличивать отдачу пластов.*

**Месторождение, математическая модель, системный анализ, моделирование, управление, датчики**

В настоящее время добыча минеральных ресурсов значима не только для благосостояния

Российской Федерации, но и играет важную роль в мировой экономике. От развития минерально-

сырьевого комплекса зависит экономическая и политическая ситуация в мире. Одним из основных видов извлекаемого сырья является сырье, обладающее реологическими свойствами – нефть, легкая и тяжелая, водные ресурсы, в том числе минеральные и артезианские, и др. Однако добыча из таких месторождений осложнена огромным количеством факторов, влияющих на состояние пласта. В частности, погодные явления действуют на пластовое давление, а наличие химикатов на поверхности может влиять на реологические свойства извлекаемого сырья. Хаотичность возникновения внешних факторов и их интенсивность оказывает существенное воздействие на невозможность составления прогнозных моделей поведения пласта.

**Постановка задачи.** Для решения данных вопросов разрабатываются математические модели, внедряются системы автоматического управления (САУ), помогающие обеспечивать необходимое качество технологического процесса (ТП), и многое другое.

Математическое моделирование – это один из относительно универсальных способов наглядно представить то, что происходит в пласте до его разработки, т. е. в состоянии покоя или в начальном состоянии, а также в период его эксплуатации. Целью математического моделирования месторождения служит визуализация всех процессов, а так как наиболее простой способ восприятия информации человеком – зрительный, то, следовательно, математическая модель пласта способна отчасти упростить разработку и эксплуатацию месторождения. Построить универсальную математическую модель пласта невозможно, так как каждое месторождение уникально, однако можно построить математическую модель, которая была бы адаптивной и обладала бы способностью к эволюции. Именно такая модель и есть качественный результат моделирования в широком масштабе.

Адаптивную модель выигрышно использовать при разработке любого пласта. Меняются несколько параметров, и математическая модель становится наглядной и адекватной для нового месторождения.

Пространственно распределенная математическая модель более наглядна, так как именно такие модели отражают изменение определенного параметра не только в пространстве, но и во времени.

**Анализ пласта как объекта моделирования.** Рассмотрим месторождение как объект моделирования. Для начала отметим, что залежь представляет собой сочетание одного из типов ловушек с одной из разновидностей структур. Структура площади, которая содержит залежь, определяется типами составляющих ее структур. Форма и конфигурация пласта зависит от типа ловушки. Некоторые сложные залежи образованы ловушками нескольких типов. Выделяют следующие типы ловушек:

– выпуклый пласт, находящийся в водяном бассейне;

– проницаемые породы, оконтуренные на периферии с одной стороны краевой водой, с другой – непроницаемыми породами; в отдельных случаях ловушка может быть полностью изолирована непроницаемой границей;

– выклинивающийся пласт;

– пласт, нарушенный сбросом;

– пористый коллектор.

Типы структур:

– купол или антиклиналь;

– структурный выступ как погребенный рельеф;

– структурная терраса;

– флексуара на моноклинали;

– погружающаяся синклинали;

– контролирующие структурные условия отсутствуют [1].

В исследовании рассматривается залежь, у которой тип ловушки – это выпуклый пласт, а тип структуры – купол (антиклиналь).

Температура, давление, проницаемость, фильтрационно-емкостные свойства пород и т. д. – это все параметры, которые позволяют оценивать состояние месторождения в данный момент времени, а также прогнозировать его состояние через определенный промежуток времени. Температура и давление – основные параметры движения жидкости в пласте. С изменением температуры происходит изменение давления, а следовательно, меняется движение жидкости в пласте и скважине. В исследовании моделирование осуществляется по температуре.

**Анализ существующих пространственно распределенных математических моделей пластов.** Будем считать, что пласт – это идеальный трехмерный объект, вид которого представлен на рис. 1, где  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  – геометрические параметры

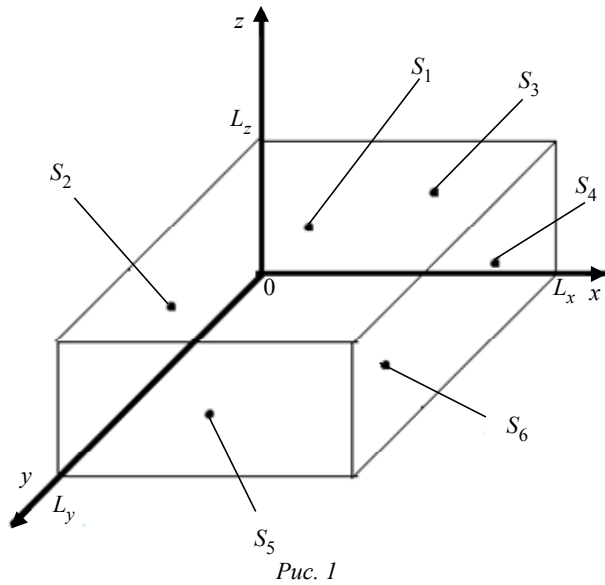


Рис. 1

объекта;  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  – идентификаторы граней. Начальные условия:  $L_x = L_y = L_z = 0.06$  м. Будем считать, что температура на контуре питания остается постоянной, т. е. граничные условия со всех сторон являются граничными условиями 1-го рода и обозначаются «0», а временной интервал (шаг по времени)  $d\tau = 1$  с. Исходные данные представлены в табл. 1.

$L_x, \text{ м}$	$L_y, \text{ м}$	$L_z, \text{ м}$	$\partial\tau, \text{ с}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
0.03	0.03	0.01	1	0	0	0	0	0	0

Математическая модель пласта как распределенного объекта представлена следующими уравнениями [2]:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z < L_z, \quad t > 0.$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\partial t$  – шаг дискретизации по времени;  $\partial x, \partial y, \partial z$  – шаги дискретизации по координатам  $x, y$  и  $z$  соответственно;  $t$  – время;  $\tau$  – шаг по времени,  $T(x, y, z, t)$  – температура в каждой точке тела в момент времени  $t$ .

Граничные условия, при которых следует решать (1), запишем в виде отношений граней плоскостей  $P$ :

$$\begin{cases} S_1 : P(x, y, L_z) = 0; \quad 0 < x < L_x; \quad 0 < y < L_y; \quad t > 0; \\ S_2 : P(0, y, z) = 0; \quad 0 < y < L_y; \quad 0 < z < L_z; \quad t > 0; \\ S_3 : P(x, 0, z) = 0; \quad 0 < x < L_x; \quad 0 < z < L_z; \quad t > 0; \\ S_4 : P(L_x, y, z) = 0; \quad 0 < y < L_y; \quad 0 < z < L_z; \quad t > 0; \\ S_5 : P(x, L_y, z) = 0; \quad 0 < x < L_x; \quad 0 < z < L_z; \quad t > 0; \\ S_6 : P(x, y, 0) = 0; \quad 0 < x < L_x; \quad 0 < y < L_y; \quad t > 0. \end{cases}$$

Это – один из вариантов представления пространственно распределенной математической модели пласта. В (1) остается найти  $a$  – коэффициент температуропроводности. Решать уравнение (1) можно методом конечных разностей [3]. Преобразуя, получим:

$$\frac{T_{i,j,k,l} - T_{i,j,k,l-1}}{\Delta t} = a \left( \frac{T_{i-1,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i+1,j,k,l-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j+1,k,l-1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k-1,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k+1,l-1}}{\Delta z^2} \right). \quad (2)$$

Таблица 1

Один из вариантов – при подключении датчиков рассчитать коэффициенты. Выразим из (2) коэффициент  $a$ :

$$a = \frac{T_{i,j,k,l} - T_{i,j,k,l-1}}{\Delta t} \left/ \left[ \left( T_{i-1,j,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i+1,j,k,l-1} \right) / \Delta x^2 + \frac{T_{i,j-1,k,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j+1,k,l-1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k-1,l-1} - 2T_{i,j,k,l-1} + T_{i,j,k+1,l-1}}{\Delta z^2} \right] \right.,$$

$$1 < i < N_x = 3, \quad 1 < j < N_y = 3, \quad 1 < k < N_z = 3, \quad t > 1,$$

где  $i, j, k, l$  – номера точек дискретизации по  $x, y, z$  и по времени соответственно;  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – шаги дискретизации по осям  $x, y, z$ ;  $N_x, N_y, N_z$  – число точек дискретизации по осям  $x, y$  и  $z$  соответственно.

Пусть  $n$  – число точек дискретизации по  $x$ ;  $m$  – число точек дискретизации по  $y$ ;  $r$  – число точек дискретизации по  $z$ , тогда

$$\Delta x = \frac{L_x}{n} = \frac{0.03}{3} = 0.01;$$

$$\Delta y = \frac{L_y}{m} = \frac{0.03}{3} = 0.01;$$

$$\Delta z = \frac{L_z}{r} = \frac{0.01}{3} = 0.003.$$

Таким образом, можно произвести математическое моделирование объекта сложной формы. Проведем экспериментальные исследования.

**Разработка макета «пласт» и подключение датчиков.** Для исследования разрабатываем макет «пласт». Создаем макет пласта. В емкость, диаметром 14 см слоями помещаем песок с ископаемыми (небольшие камни), воду, глину, нефть. Макет представлен на рис. 2.

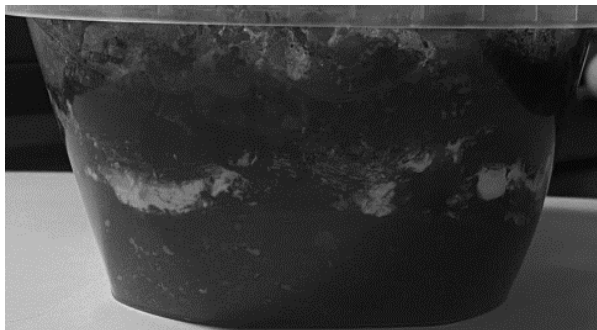


Рис. 2

На первом этапе разработки необходимо определиться с датчиками, которые будут использоваться. Так как измеряемый параметр пласта в исследовании – температура, выбран цифровой датчик температуры DS18B20, который удовлетворяет всем требованиям, т. е. это полноценный термометр, который способен измерять температуру в диапазоне от  $-55$  до  $+125$  °С. Каждому датчику присвоен уникальный 64-битный адрес, что позволит точно определять, из какой точки пласта отправлено значение температуры. Датчик DS18B20 работает с точностью  $\pm 0.5$  °С. Подход подключения датчиков позволяет подключать датчики группами, вплоть до 264, к одной линии [4]–[8].

В исследовании используется девять датчиков температуры DS18B20. На рис. 3 изображена собранная схема подключения девяти датчиков, используются кабели (мама-папа), которые позволяют легко перемещать датчики в пространстве независимо от монтажной платы.

После физического подключения датчиков для работы с ними понадобится программное обеспечение Arduino IDE, а также библиотеки

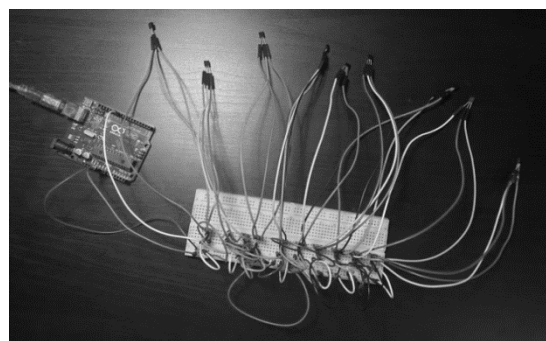


Рис. 3

OneWire и DallasTemperature. Пропишем алгоритм получения информации о температуре в скетче. Однако перед определением температуры указывают, какое значение какой датчик будет показывать, т. е. необходимо определить адрес каждого датчика и его расположение в схеме, чтобы информация о температуре каждой точки была верной.

Следующий этап – это разработка программного модуля, который записывает данные о температуре и ее изменениях в базу данных (БД), а также строит пространственно распределенную математическую модель в виде 3D-графика.

Предполагается, что все данные о температуре будут записываться в базу данных. Это даст возможность анализировать происходящее по значениям, рассматривать изменения, которые происходили за какой-то промежуток времени. В целом, база данных будет хранить время измерения и значения температур (в градусах Цельсия) в девяти точках в этот момент времени.

Базу данных будем создавать при помощи Microsoft Office Access, она будет содержать одну таблицу «Temperature».

Тип указанных температур – числовой (размер поля – двойное с плавающей точкой), так как для того, чтобы пронаблюдать за изменением температуры, достаточно сотых долей.

При этом каждая температура обозначена как  $T_{xy}$ . Такие обозначения присваиваются, чтобы знать, где именно данная точка располагается в слое ( $x$  отвечает за расположение точки по координате  $x$ ,  $y$  – по координате  $y$ ). Также данные обозначения будут удобны для дальнейшего построения графика. Отметим тот факт, что для температур не используется координата  $z$ , поскольку рассматривается один слой нефтяного пласта. Для созданного макета рассмотрения одного слоя

достаточно, а в дальнейшем можно добавлять датчики и слои, совершенствуя модель.

Таким образом запрограммирована плата Arduino Uno. Создана БД, предназначенная для хранения данных о времени измерения и значениях температуры в заданных точках в данный момент времени. Необходимо разработать программный модуль, который позволит принимать, поступающую через COM-порт информацию с датчиков, обрабатывать ее, записывать показания в БД и строить в режиме реального времени 3D-график значения температуры в точках пласта.

Язык и среда программирования, выбранные согласно ТЗ, – это, соответственно, Delphi и Embarcadero RAD Studio.

Изначально необходимо принять данные из COM-порта. Задача решается с помощью стандартных компонентов ComPortDriver, Memo, двух кнопок Button, при нажатии на которые связь с COM-портом будет либо осуществляться, т.е. выполняться подключение, либо, наоборот, прерываться (отключаться). Дополнительными компонентами являются Timer и Edit (9 штук). Также добавим DBGrid для отображения таблицы «Temperature»; DBNavigator, позволяющий управлять записями таблицы; ADOConnection для связи с БД; ADOQuery для того, чтобы указать, какую таблицу необходимо отображать, и DataSource. Проведем необходимую наладку.

Поскольку для непосредственной обработки необходимо время и чтобы избежать сбоев из-за временных рассогласований, добавим компонент Timer, который будет отвечать за заполнение таблицы «Temperature». Чтобы исключить неверное заполнение таблицы, пропишем условие, которое пропускает пустой Edit, на случай, если произойдут неполадки в работе COM-порта. В процедуре выполняется заполнение таблицы «Temperature» данными, которые передаются с датчиков через COM-порт. Каждому столбцу соответствует свой датчик, а значит, и свой Edit.

Код данного модуля представлен далее:

```
procedure TForm2.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
  Form2.ADOQuery1.Insert;
  if (Form2.Edit1.Text="") or (Form2.Edit2.Text=")
or (Form2.Edit3.Text=")
```

```
or (Form2.Edit4.Text=") or
(Form2.Edit5.Text=")or (Form2.Edit6.Text=")
or (Form2.Edit7.Text=") or
(Form2.Edit8.Text=")
or (Form2.Edit9.Text=") then
begin
end
else
begin
  Form2.ADOQuery1["Time"]:=DateTimeToStr(
Now);
  Form2.ADOQuery1["T11"]:=Form2.Edit1.Text;
  Form2.ADOQuery1["T12"]:=Form2.Edit2.Text;
  Form2.ADOQuery1["T13"]:=Form2.Edit3.Text;
  Form2.ADOQuery1["T21"]:=Form2.Edit4.Text;
  Form2.ADOQuery1["T22"]:=Form2.Edit5.Text;
  Form2.ADOQuery1["T23"]:=Form2.Edit6.Text;
  Form2.ADOQuery1["T31"]:=Form2.Edit7.Text;
  Form2.ADOQuery1["T32"]:=Form2.Edit8.Text;
  Form2.ADOQuery1["T33"]:=Form2.Edit9.Text;
  Form2.ADOQuery1.Post;
end;
end;
```

Основная задача при разработке данного программного модуля состоит в построении пространственно распределенной математической модели пласта в виде 3D-графика. Осуществляем это при помощи бесплатного компонента Plot3D, который находится в свободном доступе, – в нем нет прямой связи с БД, поэтому данную связь прописывают в коде программы.

Программный код процедуры построения графика выглядит следующим образом:

```
procedure TForm1.Timer1Timer(Sender:
TObject);
var
  i,j: integer;
begin
  if (Form2.Edit1.Text=") or
(Form2.Edit2.Text=") or (Form2.Edit3.Text=")
or (Form2.Edit4.Text=") or
(Form2.Edit5.Text=")or (Form2.Edit6.Text=")
or (Form2.Edit7.Text=") or
(Form2.Edit8.Text=")
or (Form2.Edit9.Text=") then
begin
end
else
begin
  Plot3D1.GridMat.Resize (XRes,YRes);
```

```

for i:=1 to XRes do
  for j:=1 to YRes do
    Plot3D1.GridMat.Elem[1,1] :=
StrToFloat(Form2.Edit1.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[1,2] :=
StrToFloat(Form2.Edit4.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[1,3] :=
StrToFloat(Form2.Edit7.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[2,1] :=
StrToFloat(Form2.Edit2.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[2,2] :=
StrToFloat(Form2.Edit5.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[2,3] :=
StrToFloat(Form2.Edit8.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[3,1] :=
StrToFloat(Form2.Edit3.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[3,2] :=
StrToFloat(Form2.Edit6.Text);
    Plot3D1.GridMat.Elem[3,3] :=
StrToFloat(Form2.Edit9.Text);
  end;
end;

```

Дешборд программы, а следовательно, пространственно распределенная математическая модель пласта сложной формы, представлен на графике температуры нефтяного пласта в определенный момент времени (рис. 4). Изменения пластовой температуры не происходят до момента начала разработки данной залежи, что видно в окне «Таблица значений температуры пласта (показания датчиков)».

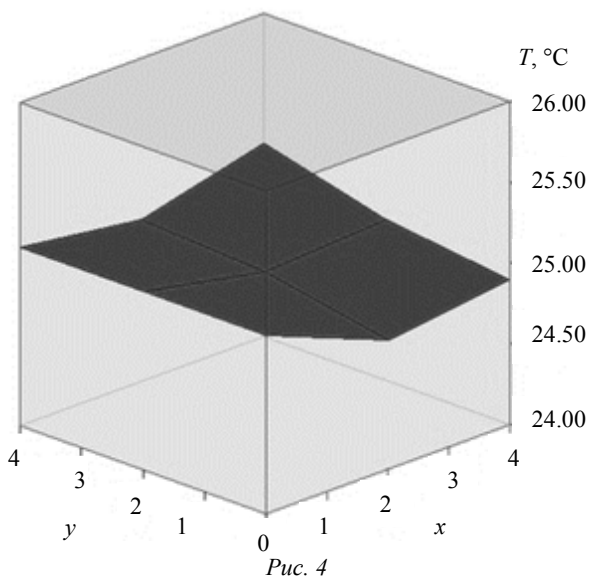


Рис. 4

Разработанная модель соответствует указанным требованиям – адекватности, наглядности, адаптивности, способности к эволюции.

Математическая модель адекватна, так как построена по значениям датчиков, которые измеряют температуру в точках реальной модели. Она наглядна, поскольку все изменения отображаются таким образом, что человек их видит и способен осуществлять анализ на их основании. Модель адаптивна. Данную модель, а точнее программный модуль, осуществляющий ее вывод, можно использовать не только в пределах конкретного макета. Разработанная программа, осуществляющая построение 3D-графика, способна к эволюции, как и модель. В данном случае рассматривалась история с девятью подключенными датчиками, которые находятся в пределах одного слоя. Одним из вариантов эволюции может служить подключение большего количества датчиков и их расположение на нескольких слоях. Также есть возможность подключить датчики, которые измеряют не температуру, а какой-либо другой параметр – например, давление, о котором шла речь ранее, и тогда математическая модель претерпит изменения.

В настоящее время возрастает число месторождений, находящихся на стадии падения добычи. В связи с этим встает вопрос о необходимости разработки месторождений, на которых в данный момент добыча ископаемых не осуществляется, а также об увеличении отдачи на действующих месторождениях. В данной статье проанализирована существующая проблема и предложено решение, которое заключается в разработке пространственно распределенной математической модели пласта сложной формы, которая позволит мониторить состояние пласта в настоящий момент времени, а также прогнозировать его через определенные временные промежутки. К основным выводам данной работы следует отнести следующее:

1. Получена пространственно распределенная математическая модель пласта сложной формы, которая соответствует всем предъявляемым требованиям.

2. Разработана программа, осуществляющая построение математической модели на основании полученных с датчиков значений температур в виде 3D-графика.

Данное исследование и полученная в ходе него математическая модель являются промежуточными, поскольку предполагается усовершенствование модели за счет увеличения числа датчиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2003.
2. Моделирование систем. Подходы и методы / В. Н. Волкова, Г. В. Горелова, В. Н. Козлов и др.; Санкт-Петербургский политех. ун-т Петра Великого. СПб., 2013.
3. Петин В. А., Биняковский А. А. Практическая энциклопедия Arduino. М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2017.
4. Василевский В. Н., Петров А. И. Исследование нефтяных пластов и скважин. М.: Недра, 1973.
5. Василевский В. Н., Петров А. И. Техника и технология определения параметров скважин и пластов. М.: Недра, 1989.
6. Пономаренко В. И., Караваев А. С. Использование платформы Arduino в измерениях и физическом эксперименте // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. Т. 22, № 4. 2014. С. 77–90.
7. Лысенко В. Д. Инновационная разработка нефтяных месторождений. М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2000.
8. Закиев Б. Ф. Исследование и обоснование методов регулирования режимов работы скважин на поздней стадии разработки нефтяного месторождения: дис. ... канд. техн. наук / Татарский науч.-исслед. и проектный институт нефти (ТатНИПИнефть). Уфа, 2015.

I. M. Novozhilov

*Saint Petersburg Electrotechnical University*

A. N. Ilyushina

*Saint Petersburg Technical College of Management and Commerce*

M.-A. M. Asadulaghi, V. V. Antropova, T. V. Kuharova

*Saint Petersburg Mining University*

#### DEVELOPMENT OF A SPATIALLY DISTRIBUTED MATHEMATICAL MODEL OF A FORMATION OF COMPLEX SHAPE

*The work is devoted to the construction of a spatially distributed mathematical model of a complex-shaped reservoir. The purpose of the work is to develop a mathematical justification, building a spatially distributed mathematical model of a reservoir in fields of complex shape, which is a 3D-graph that displays the change in reservoir temperature at its various points over time. The article considers the object of modeling and its properties. The existing mathematical models of deposits have been analyzed. Deposits containing raw materials with rheological properties (oil, mineral and artesian water) are considered as objects of research. A software and hardware complex has been developed that directly measures the current state of the temperature field. Comparison of experimental and analytical data has been made. Based on the research described in this article, it can be concluded that it is necessary to model fields, since it reduces the cost of drilling and construction of wells by optimizing technological operations during construction, reduces the number of accidents, stops during drilling, and reduces the amount of non-productive time and cost. drilling, and also allows you to increase the recovery of formations.*

**Field, mathematical model, system analysis, modeling, management, sensors**