

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-2-133-141

УДК 622.276

**А.А. Паранук** (Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация), **А.В. Бунякин** (Майкопский государственный технологический университет, филиал в пгт Яблоновском, Республика Адыгея, Российская Федерация)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ В ШЛЕЙФАХ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ

**Arambiy A. Paranuk** (Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation), **Aleksey V. Bunyakin** (Maikop State Technological University, Branch in Urban-Type Settlement Yablonovsky, Republic of Adygea, Russian Federation)

### IMPROVMENT THE MATHEMATICAL MODEL FOR THE HYDRATES FORMATION CALCULATING IN THE GAS GATHERING NETWORK

#### Введение

Для большинства газовых месторождений характерны сложные и разветвленные системы сбора и межпромыслового транспорта газа. Отметим, что основными характеристиками газовых месторождений являются кустовое расположение скважин и разветвленная система шлейфов от скважин до установки комплексной подготовки газа (УКПГ) к транспорту, а также сложная сетевая структура межпромыслового коллектора. Такие системы образуют сложную иерархическую структуру, в которой промысловая информация имеет высокую степень неточности, а также зачастую появляется большое количество погрешностей в измерениях технологических параметров, таких как замеры расхода, давления и температуры. В некоторых узлах газосборной сети эти данные вообще не отображаются или не производится измерение соответствующих параметров из-за отсутствия контрольно-измерительных приборов.

#### Background

Most gas fields are characterized by complex and branched systems for collecting and inter-field gas transportation. It should be noted that the main characteristics of gas fields are well cluster location and an extensive plume system from wells to the integrated gas treatment unit (GTU) for transportation, as well as the complex network structure of the inter-field collector. Such systems form a complex hierarchical structure, in which field information has a high degree of inaccuracy, and often there are a large number of errors in the measurements of technological parameters, such as measurements of flow, pressure and temperature. In some nodes of the gas gathering network, these data are not displayed at all or the corresponding parameters are not measured due to the lack of instrumentation.

Все это приводит к повышенному расходу химического реагента метанола.

#### **Цели и задачи**

Для совершенствования газосборных систем и снижения расхода химических реагентов, потребляемых в процессе эксплуатации, необходимо проанализировать существующие математические модели и на основе анализа создать более совершенную математическую модель расчета, которая учитывала бы оптимальное количество факторов, влияющих на процесс образования гидратов в промысловых системах. Особенно данная проблема актуальна в условиях эксплуатации скважин при отрицательных температурах окружающего воздуха, то есть в зимний период или для месторождений Крайнего Севера.

#### **Результаты**

Разработана совершенно новая математическая модель, которая позволяет диагностировать образование гидратов в шлейфах газосборной сети до установки комплексной подготовки газа. Предложена формула для расчета температуры в шлейфах газопроводов, в которой отражены два независимых (имеющих физический смысл) параметра, которые учитывают наличие теплового пограничного слоя, изменение температуры по длине трубопровода. Разработана блок-схема предложенной математической модели, которую можно легко реализовать и получить систему диагностирования и предупреждения образования гидратов для диспетчерских пунктов УКПГ.

All this leads to increased consumption of chemical reagent methanol.

#### **Aims and Objectives**

To improve gas collection systems and reduce the consumption of chemical reagents during operation, it is necessary to analyze existing mathematical models and, based on this analysis, create a more sophisticated mathematical model of calculation that takes into account the optimal number of factors affecting the formation of hydrates in field systems. Especially this problem is relevant in the conditions of operation of wells at negative ambient temperatures, that is, in the winter period or for the fields of the Far North.

#### **Results**

A completely new mathematical model has been developed that allows to diagnose the formation of hydrates in the plumes of the gas gathering network prior to the integrated gas treatment unit. A formula is proposed for calculating the temperature in gas pipelines, which reflects two independent (physically meaningful) parameters that take into account the presence of a thermal boundary layer and the temperature variation along the length of the pipeline. A flowchart of the proposed mathematical model has been developed, which can be easily realized and obtained a system for diagnosing and preventing the formation of hydrates for the control units of the GTU.

---

**Ключевые слова:** установка комплексной подготовки газа; газосборная сеть; гидравлические и тепловой характеристики газосборной сети; температура гидратообразования; диспетчерский пункт

**Key words:** gas complex treatment unit; gas collection network; hydraulic and thermal characteristics of the gas gathering network; hydrate formation temperature; dispatch center

---

Для большинства газовых месторождений характерны сложные и разветвленные системы сбора и межпромыслового транспорта газа. Отметим, что основными характеристиками газовых месторождений являются кустовое расположение скважин и разветвленная система шлейфов от скважин до установки комплексной подготовки газа

(УКПГ) к транспорту, а также сложная сетевая структура межпромыслового коллектора. Такие системы образуют сложную иерархическую структуру, в которой промысловая информация имеет высокую степень неточности, а также зачастую появляется большое количество погрешностей в измерениях технологических параметров, таких как замеры

расхода, давления и температуры. В некоторых узлах газосборной сети (ГСС) эти данные вообще не отображаются или не производится измерение соответствующих параметров из-за отсутствия контрольно-измерительных приборов. Все это приводит к повышенному расходу химического реагента метанола.

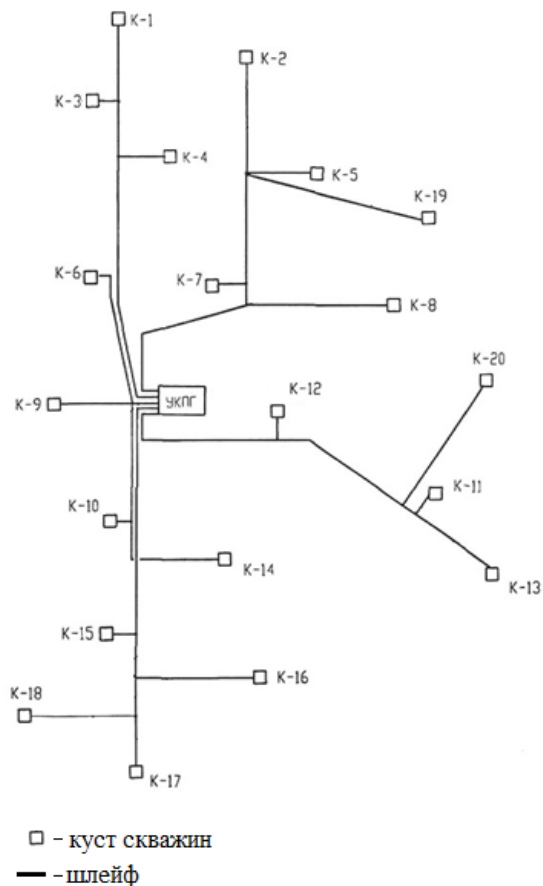
Поэтому для совершенствования газосборных систем и снижения расхода химических реагентов, потребляемых в процессе эксплуатации, необходимо проанализировать существующие математические модели и на основе анализа создать более совершенную математическую модель расчета, которая учитывала бы оптимальное количество факторов, влияющих на процесс образования гидратов в промысловых системах. Особенно данная проблема актуальна в условиях эксплуатации скважин при отрицательных температурах окружающего воздуха, то есть в зимний период или для месторождения Крайнего Севера.

Анализ гидравлической и тепловой характеристики газосборной сети будем строить на примере Кузнецовского месторождения Краснодарского края (рисунок 1).

Данные о топологии месторождения позволяют оценить возможные участки образования гидратных пробок, которые, в свою очередь, зависят от схемы расположения скважин. Поэтому детальное рассмотрение и расчёт подобных систем являются неотъемлемой частью, позволяющей оценить и построить действующую математическую модель образования гидратов в шлейфах газосборной сети.

Для формирования математической модели необходимо принять следующие рассуждения.

При образовании гидратов в шлейфах газосборной сети мы наблюдаем увеличение гидравлического сопротивления в шлейфах от первоначальных значений. Сравнивая эти параметры с усреднёнными значениями коэффициентов гидравлического сопротивления для каждого шлейфа, получим диагностический параметр, который косвенно будет указывать на возможное возникновение в данном шлейфе зародышей кристалла гидратов.



**Рисунок 1.** Газосборная сеть на Кузнецовском месторождении

Для определения коэффициента гидравлических сопротивлений в коллекторе воспользуемся уравнением:

$$\lambda^{гидр} = \pi^2 \cdot d^5 \cdot \frac{|p_1 - p_2|}{16 \cdot Q^2 \cdot L} \cdot (\rho_1 + \rho_2), \quad (1)$$

где  $p_1$  - давление газа в начале шлейфа, МПа;  
 $p_2$  - давление газа на входе УКПГ, МПа;  
 $d$  - диаметр трубопровода, м;  
 $Q$  - массовый расход газа, кг/ч;  
 $L$  - длина участка трубопровода, м;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа, Вт/(К·м);

$\rho_1$  - плотность природного газа в начале шлейфа, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  - плотность природного газа на входе УКПГ, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения плотности природного газа воспользуемся уравнениями:

$$\rho_1 = \frac{P_1 \cdot \mu}{R \cdot Z \cdot T_1}; \quad (2)$$

$$\rho_2 = \frac{P_2 \cdot \mu}{R \cdot Z \cdot T_2}, \quad (3)$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость природного газа, Па·с;

$T_1$  - температура газа в начале шлейфа, К;

$T_2$  - температура газа на входе УКПГ, К;

$R$  - универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль) [1];

$$Z = \left[ 1 + \frac{9}{128} \cdot \frac{P_1}{P_c} \cdot \frac{T_c}{T_1} \left( 1 - 6 \frac{T_c^2}{T_1^2} \right) \right], \quad (4)$$

где  $P_c$  - критическое давление, МПа;

$T_c$  - критическая температура, К; соответственно определяются по формулам:

$$P_c = -3,5 \cdot \rho_{np}^2 + 3,3 \cdot \rho_{np} + 46,25; \quad (5)$$

$$T_c = 180 \cdot \rho_{np} + 90, \quad (6)$$

где  $\rho_{np}$  - приведенная плотность газа по воздуху, кг/ч.

Обозначим ограничение, которое необходимо наложить на разрабатываемую математическую модель. А именно, алгебраические суммы газовых потоков, входящих и выходящих из узловых точек, равны, что справедливо для всех узлов сети газопроводов, тогда для диагностики газосборной сети на предмет образования гидратов справедливо уравнение:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_{i}^{удр} \leq \lambda_{cp}^{удр}, \quad (7)$$

где  $n$  - количество звеньев в одном шлейфе, подходящем к УКПГ.

Для определения температуры образования гидратов с высоким содержанием ме-

тана воспользуемся уравнением Гамершмидта [2]:

$$t_T = 20,68 \cdot P_x^{0,285} - 17,78, \quad (8)$$

где  $t_T$  - температура гидратообразования, °С;

$P_x$  - давление в шлейфе на рассматриваемом участке  $x$ , МПа [3]:

$$P_x = \sqrt{P_1^2 - (P_1^2 - P_2^2) \frac{x}{L}}, \quad (9)$$

где  $P_1$  - начальное давление, МПа;

$P_2$  - конечное давление, МПа;

$x$  - расстояние от начала газопровода до рассматриваемой точки, м;

$L$  - длина шлейфа, м.

Для определения температуры шлейфа воспользуемся разработанной автором моделью, которая учитывает перенос тепла поперек потока и в то же время является одномерной с точки зрения движения газа.

Эта модель, с одной стороны, достаточно проста, легко алгоритмируется и реализуется на компьютере, а с другой стороны, информация о физических свойствах процесса в ней сводится к двум безразмерным параметрам, один из которых (условно) отвечает за теплопередачу от газа к стенке, а другой - за теплоперенос внутри самого газа.

В основу положено понятие существования внутри живого сечения потока газа турбулентного ядра, в котором происходит интенсивный конвекционный поперечный теплообмен, и усредненную по времени температуру можно считать одинаковой во всем сечении. Распределение температуры, в отличие от распределения скоростей, при этом нельзя считать постоянным хотя бы потому, что в отличие от газа, тепло проникает сквозь стенку трубы.

Перепишем уравнение Фурье в цилиндрических системах координат ( $r, \theta, x$ ) - стационарное с конвективным переносом. Для этого используем соотношение, которое связывает декартовые и цилиндрические координаты, и получим [4]

$$\frac{dT}{dt} = \chi \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (10)$$

где  $\chi = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$r$  - координата поперек трубы;

$x$  - координата вдоль трубы;

$T$  - температура газа, К;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа, Вт/(К·м);

$\rho$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

В рассматриваемой системе искомое температурное поле не зависит от угла  $\theta$ , поэтому  $\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0$ , этим слагаемым в уравнении (10) можно пренебречь, и получим уравнение теплопроводности в виде [4]:

$$\frac{dT}{dt} = \chi \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (11)$$

Тогда температуру будем считать зависящей от этих координат  $T(x, r)$ .

Считая, что течение газа стационарно  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ , и при конвективном переносе вдоль трубы  $V_r = 0$ , то тогда  $V_x = V$ :

$$V \frac{\partial T}{\partial x} = \chi \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (12)$$

Для того чтобы придать результатам экспериментального и численного решения обобщенный характер, т.е. сделать решение пригодным не только для одного конкретного месторождения, а для подобных месторождений, необходимо уменьшение числа параметров уравнения (12).

Поэтому для реализации предложенной задачи применим метод обобщенных переменных, заменив в уравнении (12)  $x = RX$ ,  $r = Ry$ , и получим:

$$\frac{V}{R} \frac{\partial T}{\partial X} = \chi \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \frac{1}{R^2} + \frac{1}{Ry} \frac{\partial T}{\partial y} \frac{1}{R} + \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \frac{1}{R^2} \right). \quad (13)$$

Далее делим обе части уравнения (14) на соотношение  $\frac{V}{R}$ :

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\chi}{VR} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right). \quad (14)$$

Исходя из рассуждения, что при быстром течении у стенки трубы практически отсутствует гидравлический пограничный слой, но присутствует тепловой пограничный слой, можно считать, что скорость течения газа характеризуется одним средним значением  $V$ .

Тогда проведем замену переменной  $y = 1 - Y\sqrt{\varepsilon}$  при условии, что  $\varepsilon = \frac{\chi}{VR} = 1$  для масштабирования теплового пограничного слоя.

Получаем уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \varepsilon \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \frac{1}{(\sqrt{\varepsilon})^2} + \frac{1}{1 - Y\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial T}{\partial Y} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right). \quad (15)$$

Отметим, что для промышленного шлейфа Кузнецовского месторождения установлено, что  $\varepsilon \approx 10^{-5}$ .

При оценке порядка величин уравнения (15) принимаем условно, что средняя по сечению температура газа 20 °С, температура грунта минус 5 °С, температура стенки порядка 10 °С и предполагаем, что на расстоянии 1 см от стенки температура равняется средней температуре по сечению. Тогда изменению температуры  $\Delta T = 10$  °С соответствует изменение радиуса  $\Delta r = 1$  см.

Принимая  $R = 10$  см, найдем  $\Delta y = \frac{\Delta r}{R} = 0,1$ ;  $\Delta Y = \frac{\Delta y}{\sqrt{\varepsilon}} = 31,01$ , тогда

$\frac{\Delta T}{\Delta Y} = \frac{10}{31,01} \approx \frac{1}{3}$ , и порядок слагаемого

$\frac{\sqrt{\varepsilon}}{1 - Y\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial T}{\partial Y}$  оценивается как

$$\frac{\sqrt{\varepsilon}}{1 - Y\sqrt{\varepsilon}} \frac{\Delta T}{\Delta Y} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1 - 300 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{3} = 0,01.$$

Таким образом, ошибка при отбрасывании слагаемого  $\frac{\sqrt{\varepsilon}}{1-Y\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial T}{\partial Y}$  в уравнении

(15), считая остальные слагаемые порядка единицы, составляет порядка 1 %, что вполне удовлетворяет условию инженерно-технических расчетов.

Тогда для моделирования изменения температуры в пограничном слое можно рассмотреть одномерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}. \quad (16)$$

Зададим граничные условия  $T(X,0) = T_0$  и  $T(0,Y) = T_{я}$ ; где  $T_0$  - температура на внутренней стенке трубы, К;  $T_{я}$  - температура газа в ядре потока (вдали от стенки), К; по условию  $T_{я} > T_0$ .

Проведя обратную замену переменной масштабированной переменной  $Y$  к переменной  $y = 1 - Y\sqrt{\varepsilon}$ , то есть

$$y = 1 - Y\sqrt{\varepsilon} \Rightarrow dy = -\sqrt{\varepsilon} dY,$$

$$dY = -\frac{dy}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad -\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1} \sqrt{\varepsilon} = -\frac{T_{я} - T_0}{\sqrt{\pi x}},$$

получается равенство  $\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1} = \frac{T_{я} - T_0}{\sqrt{\pi \varepsilon x}}$ , что и требовалось доказать.

Дальнейший переход к физически размерным величинам  $r = Ry$ ,  $x = RX$  дает при  $\varepsilon = \frac{\chi}{VR}$  следующее:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} R = \frac{T_{я} - T_0}{\sqrt{\pi \frac{\chi x}{VR^2}}}.$$

Тогда получим следующее решение:

$$\frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{y=1} = \frac{T_{я} - T_0}{\sqrt{\pi \varepsilon X}}. \quad (17)$$

Дальнейший переход к физически размерным величинам  $r = Ry$ ,  $x = RX$  дает при  $\varepsilon = \frac{\chi}{VR}$  следующее:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} R = \frac{T_{я} - T_0}{\sqrt{\pi \frac{\chi x}{VR^2}}},$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = (T_{я} - T_0) \sqrt{\frac{V}{\pi \chi x}}. \quad (18)$$

Отметим, что при выводе уравнения температуры  $T_0$  и  $T_{я}$  считаем постоянными по всей длине трубопровода, а ниже мы рассмотрим случай, когда температура медленно меняется вдоль трубы. Последнее означает, что изменение этих температур в пределах погрешности математической модели происходит на отрезке трубопровода с длиной намного больше, чем толщина теплового пограничного слоя  $\sqrt{\varepsilon}$ .

Для записи уравнений математической модели течения газа в трубопроводе с теплообменом через стенку, через  $q$  обозначается удельное по длине трубопровода (диаметра  $D = 2R$ ) теплосодержание газа (Вт), а через  $T_{я} = T(x)$  температура газа в ядре потока, зависящая теперь только от координаты вдоль трубопровода [4, 5]. Также обозначается через  $T_{+}(x)$  температура на внешней стенке трубы, включая теплоизоляцию, тогда запишем уравнение теплопередачи от газа к стенке в виде:

$$\frac{dq}{dt} = V \frac{dq}{dx} = \lambda D (T_0 - T) \sqrt{\frac{V\pi}{\chi x}}. \quad (19)$$

С другой стороны, уравнение теплопередачи через стенку трубы (вместе с ее изоляцией) во внешнюю среду, запишется как:

$$\frac{dq}{dt} = V \frac{dT}{dx} \frac{\pi D^2}{4} \rho c = \pi D \Lambda (T_{+} - T_0), \quad (20)$$

где  $\Lambda$  - коэффициент теплопередачи через стенку трубы, Вт/(К·м<sup>2</sup>).

Тогда можно отметить, что значение этого коэффициента теплопередачи через стенку трубы может быть определено посредством задания температуры во входном сечении трубы и нахождения температуры в другом ее сечении (ниже по потоку), а затем подбором (вариацией)  $\Lambda$  можно обеспечить близость последней температуры к ее измеренному значению (в пределах заданной погрешности) [5, 6].

Решение такой (обратной) задачи может быть проведено с учетом наличия тонкого пристеночного слоя, движение газа в котором может быть охарактеризовано лишь скоростью  $V$ , но распределение температур не тривиальное, а подчиняется закону, описанному уравнением (20), что и приводит к постановке задачи уравнения (16).

При этом температура внешней стенки считается не зависящей от температуры газа, а температура внутренней стенки - зависящей (под стенкой трубы понимается не только металл, но и теплоизоляция).

Из уравнения (20) выражается температура внутренней стенки, получим

$$T_0 = T_+ - \frac{DcV\rho}{4\Lambda} \frac{dT}{dx}, \quad (21)$$

подстановкой этой температуры получается уравнение:

$$\frac{\pi D^2}{4} cV\rho \frac{dT}{dx} = \lambda D \left( T_+ - T - \frac{DcV\rho}{4\Lambda} \frac{dT}{dx} \right) \sqrt{\frac{\pi V}{\chi x}}. \quad (22)$$

Или после преобразования

$$\frac{dT}{dx} = \frac{4\lambda}{\rho cVD} \sqrt{\frac{\pi V}{\chi x}} \frac{T_+ - T}{\pi + \frac{\lambda}{\Lambda} \sqrt{\frac{\pi V}{\chi x}}}. \quad (23)$$

Дифференциальное уравнение (23) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{4}{D} \sqrt{\frac{\pi \chi}{V x}} \frac{T_+ - T}{\pi + \frac{\lambda}{\Lambda} \sqrt{\frac{\pi V}{\chi x}}}. \quad (24)$$

Введем коэффициенты  $\alpha = \sqrt{\frac{V}{\pi \chi}} \frac{\lambda}{\Lambda}$  и

$$\beta = \frac{8}{D} \sqrt{\frac{\chi}{\pi V}}$$
 в уравнение (24) и проинтегрируем.

Тогда уравнение принимает вид

$$\ln \frac{T_+ - T_1}{T_+ - T_2} = \beta \left( \sqrt{L} - \alpha \ln \frac{\sqrt{L} + \alpha}{\alpha} \right),$$

преобразуется

$$\frac{T_+ - T_1}{T_+ - T_2} = \left( \frac{\alpha}{\sqrt{L} + \alpha} \right)^{\alpha\beta} \exp(\beta(\sqrt{L})),$$

и к окончательному виду:

$$T_2 = T_+ + (T_1 - T_+) \left( \frac{\sqrt{L} + \alpha}{\alpha} \right)^{\alpha\beta} \exp(-\beta(\sqrt{L})), \quad (25)$$

где  $T_1$  - температура в начале,  $T_2$  - температура в конце участка

Разработана блок-схема предложенной математической модели (рисунок 2) [7].

### Вывод

В данной статье авторами представлена оригинальная математическая модель, которая позволяет диагностировать образование гидратов в шлейфах газосборной сети до УКПГ. Проведен анализ гидравлической и тепловой характеристики газосборной сети Кузнецовского месторождения Краснодарского края. Приведено описание топологии месторождения, позволяющее оценить возможные участки образования гидратных пробок, которые, в свою очередь, зависят от схемы расположения скважин. Разработана блок-схема математической модели, которую можно легко реализовать и получить систему диагностирования и предупреждения образования гидратов для диспетчерских пунктов УКПГ.

Предложена формула для расчета температуры в шлейфах газопроводов, в которой отражены два независимых  $\alpha, \beta$  (имеющих физический смысл) параметра, которые учитывают наличие теплового пограничного слоя и изменение температуры по длине шлейфа.

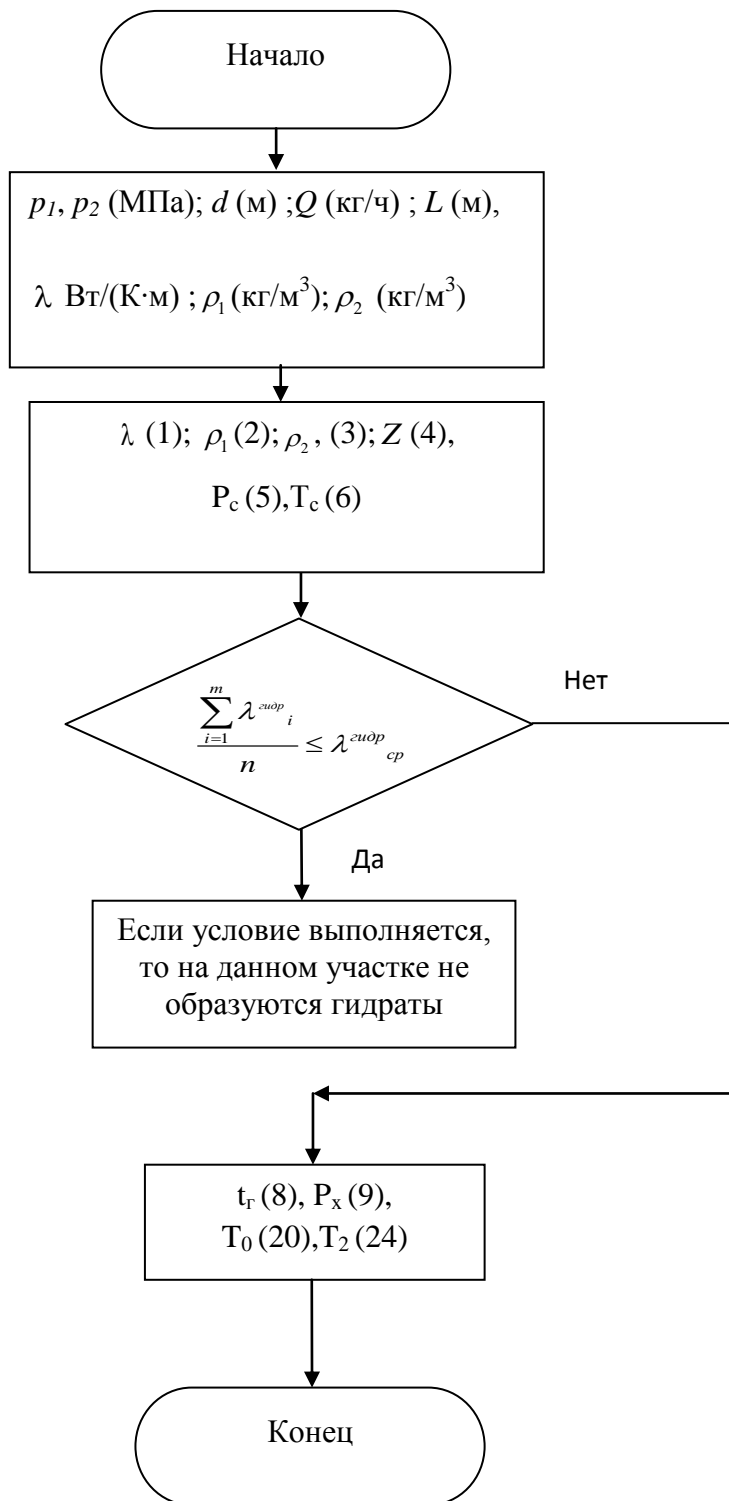


Рисунок 2. Блок-схема разработанной математической модели



**Список литературы**

1. Буц В.В. Математическая модель гидратообразования при движении природного газа в трубопроводах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2010. № 4 (36).
2. Бекиров Т.М. Промысловая и заводская обработка природных и нефтяных газов. М.: Недра, 1980. 293 с.
3. Паранук А.А. Современные системы диагностики и предупреждения гидратообразования в трубопроводных системах // Наука и техника в газовой промышленности. 2017. № 1 (69). С. 100-102.
4. Юдаев Б.Н. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1981. 319 с.
5. Паранук А.А. Косвенный контроль газосборной сети // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 36-40.
6. Паранук А.А. Совершенствование математической модели расчета процесса образования гидратов в газопровод // Технологии нефти и газа. 2018. № 4 (117). С. 61-64.
7. Бунякин А.В., Шорин Н.В. В программный комплекс для управления газосборной сетью // Проблемы развития автоматизации и механизации процессов добычи, переработки и транспорта газа и газового конденсата: матер. науч.-техн. конф. Краснодар: ООО «Издательский дом-Юг», 2008. С. 11-12.

**Авторы**

• Паранук Арамбий Асланович, канд. техн. наук  
Кубанский государственный технологический университет  
Доцент кафедры «Оборудование нефтяных и газовых промыслов»  
Российская Федерация, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2  
e-mail: rambi.paranuk@gmail.com

• Бунякин Алексей Владимирович, канд. физ.-мат. наук  
Майкопский государственный технологический университет, филиал в пос. Яблоновском  
Доцент кафедры «Инженерных дисциплин и таможенного дела»  
Российская Федерация, Республика Адыгея, 385140, Тахтамукайский район, пгт Яблоновский, ул. Связи, 11

**References**

1. Buts V.V. Matematicheskaya model' gidratoobrazovaniya pri dvizhenii prirodnogo gaza v truboprovodakh [Mathematical Model of Hydrate Formation during Natural Gas Flow in Pipelines]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN – News of Kabardino-Balkar Scientific Center of RAS*, 2010, № 4 (36). [in Russian].
2. Bekirov T.M. *Promyslovaya i zavodskaya obrabotka prirodnykh i neftyanykh gazov* [Field and Factory Processing of Natural and Petroleum Gases]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 293 p. [in Russian].
3. Paranuk A.A. Sovremennyye sistemy diagnostiki i preduprezhdeniya gidratoobrazovaniya v truboprovodnykh sistemakh [Modern Systems of Diagnostics and Prevention of Hydrate Formation in Pipeline Systems]. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti – Science and Technology in the Gas Industry*, 2017, No. 1 (69), pp. 100-102. [in Russian].
4. Yudaev B.N. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. Moscow, Higher school, 1981. 319 p. [in Russian].
5. Paranuk A.A. Kosvennyi kontrol' gazosbornoi seti [Indirect Control of the Gas Collection Network]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 1. pp. 36-40. [in Russian].
6. Paranuk A.A. Sovershenstvovanie matematicheskoi modeli rascheta protsesssa obrazovaniya gidratov v gazoprovod [Forecasting the Thermal Interaction of Underground Pipeline with Ice Grounds]. *Tekhnologii nefti i gaza – Oil and Gas Technologies*, 2018, No. 4 (117), pp. 61-64. [in Russian].
7. Bunyakin A.V., Shorin N.V. Programnyi kompleks dlya upravleniya gazosbornoi set'yu [A Software Complex for the Control of Gas Gathering Network]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy razvitiya avtomatizatsii i mekhanizatsii protsessov dobychi, pererabotki i transporta gaza i gazovogo kondensata»* [Materials of Scientific and Technical Conference «Problems of Development of Automation and Mechanization of Processes of Production, Processing and Transport of Gas and Gas Condensate»]. Krasnodar, Publishing House - South, 2008. pp. 11-12. [in Russian].

**The Authors**

• Paranuk Arambiy A., Candidate of Engineering Sciences  
Kuban State Technological University  
Assistant Professor of Equipment for Oil and Gas Fields Department  
2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
e-mail: rambi.paranuk@gmail.com

• Bunyakin Aleksey V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
Maikop State Technological University, Branch in Urban-Type Settlement Yablonovsky  
Assistant Professor of Engineering Disciplines and Customs Department  
11, Svyazi str., Urban-Type Settlement Yablonovsky, Takhtamukaysky District, Republic of Adygea, 385140, Russian Federation