

УДК 622.691.4

А.С. Дидковская<sup>1</sup>, e-mail: didkovskaya.a@gubkin.ru

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

## Новый метод расчета многопродуктовых магистральных трубопроводов

Особенность эксплуатации многопродуктовых трубопроводов или трубопроводов последовательной перекачки состоит в том, что по одной трубе перекачивают несколько продуктов, различающихся по свойствам (составу). Такой метод широко используется для транспортирования по трубам светлых нефтепродуктов, а также некоторых видов газопродуктов, которые перекачиваются в жидком состоянии (например, широкой фракции легких углеводородов). При этом перекачка осуществляется «прямым контактированием»: каждый следующий продукт вытесняет предыдущий и, в свою очередь, вытесняется последующим. В зонах контактирования продуктов происходит их смешение, требующее постоянного контроля: необходимо знать не только протяженность образовавшейся смеси, но и то, как меняется ее состав по длине трубопровода.

В статье представлены новые алгоритмы, позволяющие рассчитать концентрацию отдельных компонентов нефте- и газопродуктов в любом сечении многопродуктового трубопровода. Научная новизна методики состоит в том, что она позволяет рассчитывать смешение многокомпонентных продуктов, используя произвольное начальное распределение концентрации каждого продукта в смеси, а также учитывать множественные путевые подкачки продукта произвольного состава. Приведены окончательные уравнения для расчета многопродуктового трубопровода, подробно изложено, как эти уравнения получены. Кроме того, демонстрируется применение предлагаемой методики расчета на конкретном примере трубопровода, транспортирующего широкую фракцию легких углеводородов, в котором закачиваемый продукт имеет переменный состав, в том числе за счет путевой подкачки. По результатам расчета построены графики, отражающие компонентный состав широкой фракции легких углеводородов в пункте закачки в трубопровод, пункте подкачки и в конечном пункте трубопровода, что позволяет наглядно сравнить изменение состава продукта в процессе перекачки.

**Ключевые слова:** нефтепродукт, нефтепродуктопровод, последовательная перекачка, газопродукт, широкая фракция легких углеводородов, путевые подкачки, смешение, концентрация, компонентный состав, математическое моделирование.

.....

A.S. Didkovskaya<sup>1</sup>, e-mail: didkovskaya.a@gubkin.ru

<sup>1</sup> National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Moscow, Russia).

## Current Analysis of Multi-Product Trunk Pipelines

The feature of multi-product or products pipeline operation is that a single pipe conveys several products different in composition. This technique is widely used for piping of light oil products, as well as some gas products piped in liquid state (e.g. wide light hydrocarbon fraction). Pumping is carried out by "direct contact": each following product displaces a preceding one, and in turn, is displaced by the subsequent. Besides, mixing of products takes place in their contact zones and this process requires monitoring: the spread of the mixture formed is not the only thing one must know, its behavior with changes of pipeline length is also important.

The article presented new algorithms which enable to compute the concentration of some components in oil-and-gas products in any multi-product pipeline passage. The scientific novelty of the procedure is that it allows to compute mixing of multi-component products using random initial distribution of each product concentration in the mixture, as well as to take into account multiple way injections of a product of arbitrary composition. The article gives final equations to design a multi-product pipeline and detailed description of the way these equations were derived. Besides it demonstrates the application of the proposed design procedure by the example of the pipeline for wide light hydrocarbon fraction in which composition of an injected product is variable due to way injections as well. Analytic data were used to construct graphs reflecting blend composition of wide light hydrocarbon fraction at the stations of pumping into the pipeline, and of way injections, as well as at the pipeline terminal enabling to compare product behavior in pumping visually.

**Keywords:** oil product, oil-products pipeline, products pipeline operation, gas product, wide light hydrocarbon fraction, way injections, mixing, concentration, blend composition, mathematical modeling.

Технология последовательной перекачки светлых нефтепродуктов, когда партии разных продуктов перекачиваются по трубе одна за другой, и методика расчета смесеобразования в зоне контакта партий достаточно широко освещались в научной литературе [1–5]. Примером использования многопродуктового трубопровода является транспортировка широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) – продукта первичной переработки попутного нефтяного газа и нефтегазового конденсата, состоящего из различных высших углеводородов. По аналогии с термином «нефтепродукт» для таких продуктов, как ШФЛУ, применим термин «газопродукт», хотя он и не настолько популярен. ШФЛУ транспортируют по магистральным трубопроводам в жидком агрегатном состоянии. На сегодняшний день в России лидером по протяженности и объемам перекачки ШФЛУ является ПАО «СИБУР Холдинг». Несколько меньшие объемы транспортируют ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «Татнефть». Типичная ШФЛУ имеет следующий состав: метан-этановая ( $C_1H_4 - C_2H_6$ ) фракция – 2–5 %, пропан-бутановая ( $C_3H_8 - C_4H_{10}$ ) фракция – 20–40 %, гексановая ( $C_6H_{14}$ ) фракция – 5–30 %, на пентановую ( $C_5H_{12}$ ) фракцию приходится остаток. При этом конкретный состав ШФЛУ может сильно варьироваться в зависимости от состава исходного сырья и метода переработки. Если бы транспортируемая ШФЛУ имела постоянный, т. е. не изменяющийся во времени компонентный состав, то, естественно, продукт, поступающий в пункт приема в конце трубопровода, имел бы тот же самый состав. Однако массовые концентрации компонентов ШФЛУ в пункте закачки в трубопровод постоянно варьируются, и взаимное вытеснение порций ШФЛУ различного состава происходит в условиях непрерывного путевого перемешивания. Кроме того, на трубопроводах ШФЛУ осуществляются путевые подкачки продукта.

Компонентный состав определяет давление упругости насыщенных паров ШФЛУ, которое имеет ключевое значение для выбора безопасных режимов ее перекачки по трубопроводу. Также в зависимости от состава ШФЛУ регулируется технологический процесс ее переработки. Поэтому возникает вопрос, как по данным о компонентном составе продукта в пункте закачки выяснить, как изменится его состав в пункте приема, находящемся зачастую на значительном расстоянии.

### ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Согласно теории продольного перемешивания осредненная по сечению концентрация  $c(x, t)$  любой «пассивной» примеси в потоке жидкости в трубе удовлетворяет одномерному уравнению типа уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $v$  – средняя по сечению скорость перекачки, м/с;  $x$  – координата вдоль оси трубопровода;  $t$  – время, с;  $K$  – эффективный коэффициент продольного перемешивания,  $m^2/s$ .

Решим краевую задачу. Пусть при  $x = 0$  (в начале трубопровода) известно, как изменяется концентрация  $c_0(t)$  любого продукта в смеси с течением времени  $t > 0$ . Граничная функция  $c_0(t)$  может быть задана в виде многоступенчатой функции:

$$c_0(t) = \begin{cases} c_1, & \text{при } 0 < t \leq t_1; \\ c_2, & \text{при } t_1 < t \leq t_2; \\ \dots & \\ c_n, & \text{при } t_{n-1} < t \leq t_n. \end{cases}$$

Требуется найти концентрацию  $c(x, t)$  этого продукта в любом сечении  $x$  по длине трубопровода в любой момент времени, т. е. найти решение уравнения (1) в области  $0 \leq x \leq L$ ,  $t > 0$ . В частности, требуется найти изменение концентрации продукта  $c_L(t)$  с течением времени в конечном сечении  $x = L$  трубопровода. Введем новую функцию  $\theta(x, t)$  согласно равенству:

$$c(x, t) = e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \theta(x, t). \quad (2)$$

Тогда слагаемые уравнения (1) можно записать через функцию  $\theta(x, t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= -\frac{v^2}{4K} \cdot e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \theta(x, t) + e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}, \\ \frac{\partial c}{\partial x} &= \frac{v}{2K} \cdot e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \theta(x, t) + e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}, \\ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} &= \frac{v^2}{4K^2} \cdot e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \theta(x, t) + \\ &+ \frac{v}{K} \cdot e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + e^{\frac{(2vx - v^2t)}{4K}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}. \end{aligned}$$

Подставляя полученные соотношения в (1) и приводя подобные слагаемые, получим для функции  $\theta(x, t)$  уравнение:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Таким образом, наша задача свелась к необходимости найти решение уравнения (3), удовлетворяющее при  $x = 0$  краевому условию:

$$\theta_0(t) = e^{\frac{v^2t}{4K}} \cdot c_0(t). \quad (4)$$

Искомое решение может быть представлено в виде [4]:

$$\begin{aligned} \theta(x, t) &= \frac{K}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{x}{[K \cdot (t - \tau)]^{3/2}} \times \\ &\times e^{-\frac{x^2}{4K(t - \tau)}} \cdot \theta_0(\tau) \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (5)$$

Функция (5) называется интегралом Дюгамеля.

Вернемся к неизвестной функции  $c(x, t)$ . Заменяем в уравнении (5) функцию  $\theta(x, t)$  согласно зависимости (2), а  $\theta_0(t)$  подставим из (4). Получаем:

$$\begin{aligned} c(x, t) &= \frac{K}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{x}{[K \cdot (t - \tau)]^{3/2}} \times \\ &\times e^{-\frac{[x - v(t - \tau)]^2}{4K(t - \tau)}} \cdot c_0(\tau) \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Введем безразмерный параметр Пекле  $Pe = vL/K$  и перейдем к безразмерным координатам  $x_* = x/L$  и времени  $t_* = t/T$  процесса, где  $T = L/v$  – время движения жидкости по трубопроводу, с. Тогда уравнение (6) запишется в безразмерном виде:

Для цитирования (for citation):

Дидковская А.С. Новый метод расчета многопродуктовых магистральных трубопроводов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 9. С. 68–73.  
Didkovskaya A.S. Current Analysis of Multi-Product Trunk Pipelines. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 9, P. 68–73. (In Russ.)

$$c(x_s, t_s) = \frac{\sqrt{Pe}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{t_s} \frac{x_s}{(t_s - \tau)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe}{4} \frac{(x_s - (t_s - \tau))^2}{(t_s - \tau)}} \cdot c_0(\tau) \cdot d\tau. \quad (7)$$

По формуле (7) можно найти распределение концентрации любого из компонентов смеси по длине трубопровода ( $0 \leq x_s \leq 1$ ) в любой момент времени ( $t_s > 0$ ).

Если необходимо найти зависимость  $c_L(t_s)$  концентрации продукта в смеси, приходящей на конечный пункт трубопровода, т. е. в сечении  $x = L$ , от времени, то в формулу (7) нужно подставить  $x_s = 1$ :

$$c_L(t_s) = \frac{\sqrt{Pe}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{t_s} \frac{1}{(t_s - \tau)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe}{4} \frac{(t_s - \tau - 1)^2}{(t_s - \tau)}} \cdot c_0(\tau) \cdot d\tau. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет получить закон  $c_L(t)$  изменения концентрации нефтепродукта в смеси от времени в конце трубопровода в зависимости от закона  $c_0(t)$  изменения концентрации того же нефтепродукта в смеси в начале трубопровода.

Численное решение конкретных задач с использованием формул (7)–(8) может быть найдено путем составления несложных компьютерных программ. Проводилось сравнение результатов расчета смесеобразования по предлагаемому алгоритму и «классическим» формулам. Был осуществлен расчет длины смеси, приходящей на конечный пункт нефтепродуктопровода последовательной перекачки при условии, что в начальном пункте распределение концентрации имеет вид:

$$c_0(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T; \\ 1, & t \geq T. \end{cases}$$

То есть, как это принято в «классической» теории последовательной перекачки, считалось, что переключение резервуаров с одного продукта на другой происходит мгновенно в момент времени  $t = T$ . При этом достигнута очень хорошая сходимость результатов по двум методикам.

В то же время возможности новой методики гораздо шире, чем «классической». Она позволяет рассчитывать смесеобразование при последовательной перекачке при абсолютно любом

начальном распределении  $c_0(t)$ , в том числе пригодна для расчета компонентного состава ШФЛУ, поступающей на приемные пункты трубопроводной сети.

Как указывалось, состав ШФЛУ, закачиваемой в трубопровод, претерпевает изменения. Можно считать, что ее транспортируют по трубопроводу небольшими партиями, отличающимися друг от друга фракционным составом. Таким образом, получаем аналогию с последовательной перекачкой светлых нефтепродуктов. И, как при последовательной перекачке, в результате процессов конвекции и турбулентной диффузии в области контакта партий ШФЛУ возникает смесь. Протяженность этой смеси непрерывно возрастает от начала к концу трубопровода. Естественно, в области смеси фракционный состав ШФЛУ плавно изменяется от состава одной партии к составу другой. Поэтому состав газопродуктов, поступающих на приемные пункты, определяется, как и в случае последовательной перекачки нефтепродуктов, исходным составом партий, протяженностью трубопроводов и режимами перекачки.

На выходе из нефтеперекачивающей станции обычно устанавливается точный хроматограф, регистрирующий компонентный состав ШФЛУ в начальном сечении  $x = 0$  продуктопровода. При этом для определения компонентного состава ШФЛУ принято использовать термин «процентное содержание» (процентное содержание  $p_s(x, t)$   $s$ -го компонента ШФЛУ может быть записано через концентрацию  $c_s(x, t)$  этого компонента как  $p_s(x, t) = c_s(x, t) \cdot 100 \%$ ).

### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Итак, известна функция  $p_{0s}(t)$  изменения процентного содержания  $s$ -го углеводородного компонента ШФЛУ в начальном сечении в зависимости от времени ( $s = 1, 2, 3, \dots, m$ , где  $m$  – число компонентов ШФЛУ). Также известны плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, и кинематическая вязкость  $\nu$  продукта, м<sup>2</sup>/с, диаметр  $d$ , м, и протяженность  $L$ , м, магистрального трубопровода, расход  $Q_0$  перекачки, м<sup>3</sup>/ч. Задача состоит в том, чтобы спрогнозировать процентное содержание

$p_s(x, t)$  каждого компонента ШФЛУ в трубопроводе в зависимости от координаты и момента времени.

Возможно, сечение  $x = L_1$  является промежуточным сечением трубопровода, в котором проводят подкачку с расходом  $Q_1$  ШФЛУ другого состава. Процентное содержание  $k_s(t)$  каждого компонента в подкачиваемом ШФЛУ известно. Как в этом случае определить состав ШФЛУ, поступающей на конечный пункт  $x = L$  трубопровода?

По формуле (8) можно определить процентное содержание  $p_{1s}(t)$  компонентов ШФЛУ, поступающих в пункт смешения  $x = L_1$ :

$$p_{1s}(t_s) = \frac{\sqrt{Pe_0}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{t_s} \frac{1}{(t_s - \tau)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe_0}{4} \frac{(t_s - \tau - 1)^2}{(t_s - \tau)}} \cdot p_{0s}(\tau) \cdot d\tau. \quad (9)$$

Здесь безразмерное время  $t_s = t/T_1$ , где  $T_1 = L_1/\nu_0$  – время прохождения ШФЛУ участка трубопровода от начального пункта до пункта подкачки, с;  $\nu_0 = 4Q_0/(\pi d^2)$  – скорость перекачки ШФЛУ, м/с; а  $Pe_0$  – число Пекле для этого участка. В рассмотрение включаются только моменты времени  $t \geq T_1$ , то есть  $t_s \geq 1$ , поскольку ранее ШФЛУ, закачиваемая в трубопровод в момент  $t = 0$ , не достигнет пункта подкачки.

В пункте подкачки происходит смешение продуктов. Процентное содержание  $q_{1s}$   $s$ -го компонента ШФЛУ в продукте после пункта подкачки (в начале следующего расчетного участка) может быть определено из условия:

$$q_{1s}(t_s) = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_1} p_{1s}(t_s) + \frac{Q_1}{Q_0 + Q_1} k_s(t_s). \quad (10)$$

ШФЛУ измененного в результате подкачки состава поступает в трубопровод начиная с момента времени  $t = T_1$  ( $t_s = 1$ ). Теперь ее скорость движения по трубопроводу равна  $\nu_1 = 4(Q_0 + Q_1)/(\pi d^2)$ , и время прохождения участка от пункта подкачки до конечного пункта  $T_2 = (L - L_1)/\nu_1$ .

Процентное содержание  $p_{Ls}(t)$  компонентов ШФЛУ, поступающих в конечный пункт трубопровода, можно также определить по формуле (8). При этом нужно подставить вместо начального условия процентное содержание  $q_{1s}(t)$  после пункта подкачки:

$$p_{L_1}(t_s) = \frac{\sqrt{Pe_1}}{2\sqrt{\pi}} \int_1^{t_s} \frac{1}{(t_s - \tau)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe_1(t_s - \tau - 1)^2}{4(t_s - \tau)}} \cdot q_{L_1}(\tau) \cdot d\tau, \quad (11)$$

где  $Pe_1$  – число Пекле для участка трубопровода от пункта подкачки до конечного пункта. Теперь нас будут интересовать моменты времени  $t \geq (T_1 + T_2)$ , т. е.

$$t_s \geq \frac{T_1 + T_2}{T_1} = 1 + \frac{(L - L_1) \cdot v_0}{v_1 \cdot L_1}.$$

Таким образом, с помощью уравнений (9)–(11) можно определить компонентный состав ШФЛУ, поступающей на конечный пункт трубопровода после путевой подкачки. Подкачек продукта может быть несколько. В этом случае расчет в соответствии с представленным алгоритмом повторяется нужное количество раз.

### ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим реализацию алгоритма расчета изменения состава продукта при транспортировке по многопродуктовым трубопроводам на конкретном примере. Пусть ШФЛУ, кинематическая вязкость которой  $\nu = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , состоит из восьми углеводородных компонентов: метана, этана, пропана, изобутана, *n*-бутана, изопентана, *n*-пентана и гексана. ШФЛУ перекачивают по участку трубопровода длиной  $L_1 = 400 \text{ км}$  с внутренним диаметром  $d = 700 \text{ мм}$  и абсолютной шероховатостью труб  $\Delta = 0,15 \text{ мм}$ . Расход перекачки  $Q_0 = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Требуется рассчитать компонентный состав ШФЛУ, поступающей в конечный пункт участка трубопровода.

Изменение процентного содержания  $p_{0_s}(t)$  каждого компонента ШФЛУ ( $s = 1, 2, \dots, 8$ ) в процессе закачки в трубопровод известно и для наглядности представлено в виде графика (рис. 1). График построен «с накоплением» и отражает равенство суммы процентных содержаний всех компонентов в любой момент времени 100 %.

Алгоритм предварительного расчета следующий. Рассчитываем:

- скорость перекачки:  $v_0 = 4Q_0/(\pi d^2) = 4 \cdot 500/(\pi \cdot 0,7^2 \cdot 3600) = 0,3609 \text{ м/с}$ ;
- число Рейнольдса:  $Re_0 = v_0 d/\nu = 0,3609 \cdot 0,7/(6 \cdot 10^{-7}) = 421\,050$ ;

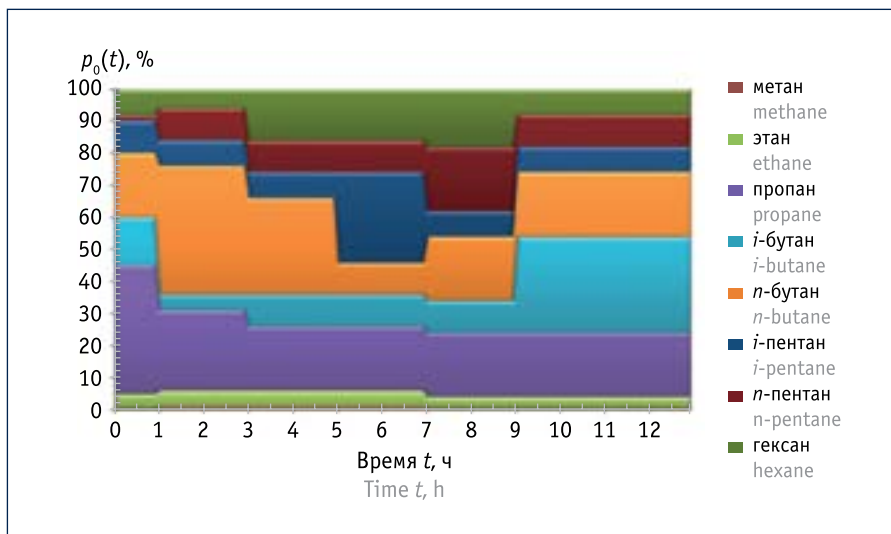


Рис. 1. Компонентный состав  $p_0(t)$  широкой фракции легких углеводородов в процессе закачки в трубопровод

Fig. 1. Blend composition  $p_0(t)$  of wide light hydrocarbon fraction when pumped into the pipeline

- коэффициент гидравлического сопротивления (например, по формуле Альтшуля):  $\lambda_0 = 0,11 \cdot (68/Re_0 + \Delta/d)^{0,25} = 0,11 \cdot (68/421050 + 0,15/700)^{0,25} = 0,01532$ ;
  - коэффициент продольного перемешивания:  $K_0 = 3,211\sqrt{\lambda_0} \cdot v_0 d = 3,211\sqrt{0,01532} \cdot 0,3609 \cdot 0,7 = 0,1004 \text{ м}^2/\text{с}$ ;
  - число Пекле:  $Pe_0 = v_0 L_1/K_0 = 0,3609 \cdot 400 \cdot 10^3/0,1004 = 1,438 \cdot 10^6$ ;
  - время движения ШФЛУ по участку трубопровода:  $T_1 = L_1/v_0 = 400 \cdot 10^3/(0,3609 \cdot 3600) = 307,87 \text{ ч}$ .
- Теперь по формуле (9), заменяя интегрирование суммированием, можно определить процентное содержание  $p_{L_1}(t)$  каждого из компонентов ШФЛУ, поступающих в сечение  $x = L_1$  трубопровода:

$$p_{L_1}(t_s) = \frac{\sqrt{Pe_0}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N-1} \left( \frac{1}{(\tau_N - \tau_j)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe_0(\tau_N - \tau_j - 1)^2}{4(\tau_N - \tau_j)}} \cdot p_{0_s}(\tau) \right) \cdot \Delta\tau_N,$$

где  $N$  – число точек разбиения временного интервала (например,  $N = 1\,000\,000$ ),  $\tau_j = j \cdot \Delta\tau_N$ . Поскольку  $\tau_N \equiv t_s$  и  $\tau_N = N \cdot \Delta\tau_N$  шаг  $\Delta\tau_N$  определяется для каждого момента времени как  $\Delta\tau_N = t_s/N$ . Расчет производится для  $t \geq T_1$ , то есть  $t_s \geq 1$ . Расчетное процентное содержание  $p_{L_1}(t)$  компонентов ШФЛУ в продукте, приходящем в сечение  $x = L_1$  трубопровода, в зависимости от времени демонстрирует график рис. 2.

Как видно из сравнения рис. 1 и рис. 2, в процессе движения по трубопроводу на границах скачкообразного изменения содержания компонентов ШФЛУ образуется область плавного перехода от одного значения содержания к другому. «Ступеньки» сглаживаются аналогично тому, как это происходит на границе контакта партий при последовательной перекачке нефтепродуктов.

Пусть теперь в сечении  $L_1 = 400 \text{ км}$  рассмотренного ранее трубопровода осуществляется подкачка продукта другого состава. Процентное содержание  $k_s(t)$  компонентов подкачиваемой ШФЛУ в зависимости от времени отражено на рис. 3. Расход подкачки  $Q_1 = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Далее полученную смесь транспортируют на расстояние еще 200 км, т. е. общая длина трубопровода  $L$  составляет 600 км. Необходимо рассчитать состав  $p_L(t)$  ШФЛУ, поступающей в конец трубопровода.

Как следует из рис. 1, в пункте подкачки к ШФЛУ добавляются две партии, различающиеся по составу. Первая из них поступает в трубопровод до момента времени  $t = 316 \text{ ч}$ , а вторая закачивается за ней вслед. В пункте подкачки происходит смешивание продуктов. Процентное содержание  $q_{L_1}$  компонентов ШФЛУ после пункта подкачки в каждый момент времени определяется по формуле (10).

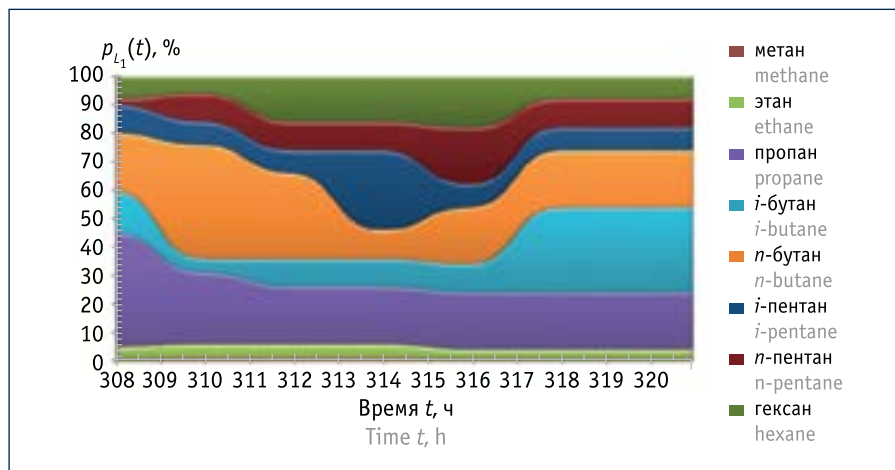


Рис. 2. Компонентный состав  $p_{L_1}(t)$  широкой фракции легких углеводородов в конце  $L_1 = 400$  км участка трубопровода

Fig. 2. Blend composition  $p_{L_1}(t)$  of wide light hydrocarbon fraction at the end of  $L_1 = 400$  km of pipeline section

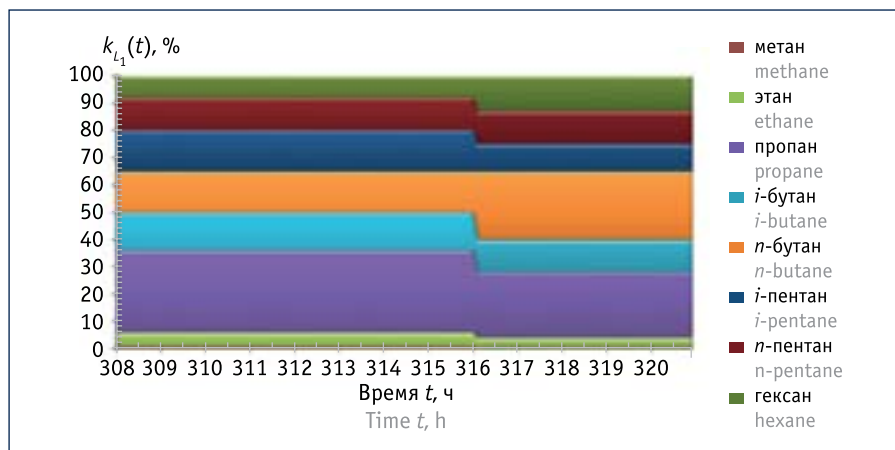


Рис. 3. Компонентный состав  $k_{L_1}(t)$  широкой фракции легких углеводородов подкачки

Fig. 3. Blend composition  $k_{L_1}(t)$  of wide light hydrocarbon fraction injected on the way

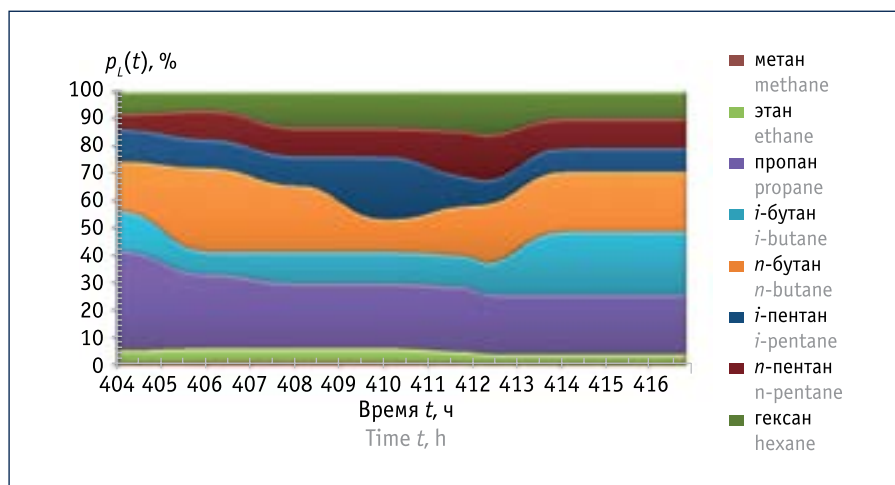


Рис. 4. Компонентный состав  $p_L(t)$  широкой фракции легких углеводородов в конечном пункте  $L = 600$  км трубопровода

Fig. 4. Blend composition  $p_L(t)$  of wide light hydrocarbon fraction at the terminal of  $L = 600$  km of pipeline

Для участка трубопровода от пункта подкачки до конца участка можно рассчитать:

- скорость перекачки:  $v_1 = 4(Q_0 + Q_1)/(\pi d^2) = 4 \cdot (500 + 300)/(\pi \cdot 0,7^2 \cdot 3600) = 0,5774$  м/с;
- число Рейнольдса:  $Re_1 = v_1 d / \nu = 0,5774 \cdot 0,7 / (6 \cdot 10^{-7}) = 673633$ ;
- коэффициент гидравлического сопротивления по формуле Альтшуля:  $\lambda_1 = 0,11 \cdot (68/Re_1 + \Delta/d)^{0,25} = 0,11 \times (68/673633 + 0,15/700)^{0,25} = 0,01466$ ;
- коэффициент продольного перемешивания:  $K_1 = 3,211 \sqrt{\lambda_1} \cdot v_1 d = 3,211 \sqrt{0,01466} \cdot 0,5774 \cdot 0,7 = 0,1571$  м<sup>2</sup>/с;
- число Пекле:  $Pe_1 = v_1(L - L_1)/K_1 = 0,5774 \cdot 200 \cdot 10^3 / 0,1571 = 0,735 \cdot 10^6$ ;
- время движения ШФЛУ по участку трубопровода:  $T_2 = (L - L_1)/v_1 = 200 \cdot 10^3 / (0,5774 \cdot 3600) = 96,22$  ч.

Получаем, что ШФЛУ достигнет конечного пункта в момент  $t = T_1 + T_2 = 307,87 + 96,22 = 404,09$  ч ( $t_* = t/T_1 = 404,09/307,87 = 1,313$ ).

Процентное содержание  $p_{L_s}(t)$  компонентов ШФЛУ, поступающих в конечный пункт трубопровода, определяется по формуле (11), заменяя для компьютерного расчета интегрирование суммированием:

$$p_{L_s}(t_*) = \frac{\sqrt{Pe_1} \sum_{j=0}^{N-1} \left( \frac{1}{(\tau_N - \tau_j)^{3/2}} \times e^{-\frac{Pe_1(\tau_N - \tau_j - 1)^2}{4(\tau_N - \tau_j)}} \cdot q_{L_s}(\tau) \right) \cdot \Delta\tau_N$$

где  $N$  – число точек разбиения временного интервала (например,  $N = 1\,000\,000$ ),  $\tau_j = 1 + j \cdot \Delta\tau_N$ . Поскольку  $\tau_N \equiv t_*$  и  $\tau_N = 1 + N \cdot \Delta\tau_N$ , шаг  $\Delta\tau_N$  определяется для каждого момента времени как  $\Delta\tau_N = (t_* - 1)/N$ . Расчет производится для  $t_* \geq 1,313$ .

На рис. 4 отражен результат расчета компонентного состава  $p_{L_s}(t)$  ШФЛУ, приходящей в конечный пункт  $x = L$  трубопровода.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, новый универсальный алгоритм расчета смесеобразования позволяет определять концентрацию (или процентное содержание) различных компонентов нефте- и газопродуктов в процессе их последовательной перекачки по трубам. Концентрация каждого компонента в конце трубопровода

определяется как функция от времени через известную функцию от времени концентрации этого же компонента в начале трубопровода. Сопоставле-

ние графиков рис. 1–4, построенных по результатам расчета, позволяет наглядно продемонстрировать изменение компонентного состава ШФЛУ при его

движении по трубопроводу за счет конвективной и турбулентной диффузии, а также в результате подкачки ШФЛУ другого состава.

### Литература:

1. Голунов Н.Н. Параметры последовательной перекачки нефтепродуктов с использованием малых противотурбулентных добавок для уменьшения объема образующейся смеси // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 5. С. 68–72.
2. Думболов Д.У., Дроздов Д.А. Основные подходы к определению объема смеси и новый метод ее идентификации при последовательной перекачке нефтепродуктов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2012. № 8. С. 92–98.
3. Ишмухаметов И.Т., Исаев С. Л., Лурье М.В., Макаров С.П. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов. М.: Нефть и газ, 1999. 300 с.
4. Лурье М.В., Марон В.И., Мацкин Л.А. и др. Оптимизация последовательной перекачки. М.: Недра, 1979. 256 с.
5. Яблонский В.С., Юфин В.А., Бударов И.П. Последовательная перекачка нефтепродуктов и нефтей по магистральным трубопроводам. М.: Гостоптехиздат, 1959. 148 с.
6. Лурье М.В., Дидковская А.С. Изменение состава ШФЛУ при транспортировке по магистральному трубопроводу // Газовая промышленность. 2012. № 12 (683). С. 48–50.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1976. 735 с.

### References:

1. Golunov N.N. Parameters of the Oil Products Batching by Using Drag Reducing Agents to Decrease an Amount of Interface. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2018, No. 5, P. 68–72. (In Russian)
2. Dumbolov D.U., Drozdov D.A. Main Approaches to Mixture Volume Determination and the New Method of Its Identification in Products Pipeline Operation. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2012, No. 8, P. 92–98. (In Russian)
3. Ishmukhametov I.T., Isayev S. L., Lurie M.V., Makarov S.P. Pipeline Bulk Oil Transportation. Moscow, Neft' i gaz [Oil and Gas], 1999, 300 p. (In Russian)
4. Lurie M.V., Maron V.I., Matskin L.A., et al. Optimization of Products Pipeline Operation. Moscow, Nedra, 1979, 256 p. (In Russian)
5. Yablonskiy V.S., Yufin V.A., Budarov I.P. Oil-Refined Products Trunk Pipeline Operation. Moscow, Gostoptekhizdat, 1959, 148 p. (In Russian)
6. Lurie M.V., Didkovskaya A.S. Change of Wide Light Hydrocarbon Fraction Composition in Trunk Pipeline Transportation. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2012, No. 12 (683), P. 48–50. (In Russian)
7. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Equations of Mathematical Physics. Moscow, Nauka [Science], 1976, 735 p. (In Russian)

