

УДК 532.542+622.692.4.053

М.В. Лурье¹, e-mail: lurie254@gubkin.ru; **Н.Н. Голунов¹**, e-mail: golunov.n@gubkin.ru;

А.С. Дидковская¹, e-mail: didal@gubkin.ru

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

Оптимальные концентрации противотурбулентной присадки для увеличения пропускной способности магистрального нефтепровода

В статье рассматривается перекачка нефти с противотурбулентными присадками, увеличивающими пропускную способность магистрального нефтепровода. Поскольку каждый технологический участок такого трубопровода имеет несколько последовательных перегонов, работающих в режиме «из насоса в насос», обладающих различными протяженностями и, в общем случае, диаметрами, ставится вопрос, какими должны быть концентрации присадки на отдельных перегонах, для того чтобы увеличение пропускной способности на заданную величину достигалось при минимальном объеме используемой присадки. Изложено аналитическое решение этой задачи, приведены примеры расчета оптимальных концентраций.

Ключевые слова: нефтепровод, технологический участок, противотурбулентная присадка, гидравлическая эффективность, пропускная способность, баланс напоров, оптимальная концентрация.

.....

M.V. Lurie¹, e-mail: lurie254@gubkin.ru; **N.N. Golunov¹**, e-mail: golunov.n@gubkin.ru;

A.S. Didkovskaya¹, e-mail: didal@gubkin.ru

¹ Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)” (Moscow, Russia).

Optimal Concentrations of a Drug Reducing Agent to Increase the Throughput Capacity of a Main Oil Pipeline

The article deals with oil pumping with drug reducing agents which increase throughput capacity of a main oil pipeline. As each technological section of such pipeline has several successive spans operating in “pump-to-pump” mode, having different lengths and, in general case, diameters, the question is put, what concentrations of the agent on every individual span should be in order to increase throughput capacity by the set value was achieved at minimum volume of used agent. An analytical solution to this problem is presented and examples of optimum concentrations are given.

Keywords: oil pipeline, process section, drug reducing agent, hydraulic efficiency, flow capacity, head balance, optimum concentration.

ВВЕДЕНИЕ

Использование противотурбулентных присадок (ПТП) для уменьшения гидравлического сопротивления течения нефти в трубопроводе стало в России штатной технологией трубопроводного транспорта нефти [1–3]. Во многом этому способствует начало производства отечественных присадок, стоимость которых существенно меньше стоимости зарубежных аналогов.

Основное преимущество противотурбулентных присадок состоит в том, что малые концентрации ПТП, измеряемые

в миллионных долях (ppm) объема транспортируемой нефти, уменьшают коэффициент гидравлического сопротивления на 50–60 %, что позволяет поддерживать объем перекачки при меньших напорах нефтеперекачивающих станций (НПС) или увеличивать этот объем при сохранении напоров на прежнем уровне.

В то же время для транспортировки весьма значительных количеств нефти, а это десятки миллионов тонн в год, требуются существенные объемы присадки, цена которой на сегодняшний день составляет примерно 500 тыс. руб. за тонну.

Причем из-за так называемой деструкции присадки (т. е. разрушения ПТП, происходящего главным образом в насосах промежуточных станций) в большинстве случаев требуется вводить свежую присадку либо на каждой НПС, либо на части из них. И поскольку различные перегоны технологического участка магистрального нефтепровода отличаются друг друга протяженностью и, возможно, диаметром, правомерен вопрос, какими должны быть концентрации присадки на отдельных перегонах, для того чтобы увеличение пропускной способности технологического участка в целом на заданную величину требовало минимального объема используемой присадки. На рис. 1 изображен технологический участок магистрального нефтепровода (ТУ МН) с несколькими промежуточными НПС (НПС₁, ..., НПС_N).

Предполагая, что технологический участок трубопровода на всем протяжении заполнен жидкостью полностью, т. е. в нем отсутствуют самотечные участки, составим уравнения баланса напоров для каждого перегона. Имеем:

$$\begin{cases} [z_1 + h_{n1} + F_1(Q)] - [z_2 + h_{n2}] = 1,02 \cdot \lambda(Q, d_1) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_1^5} \cdot \kappa(\theta_1) l_1, \\ [z_2 + h_{n2} + F_2(Q)] - [z_3 + h_{n3}] = 1,02 \cdot \lambda(Q, d_2) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_2^5} \cdot \kappa(\theta_2) l_2, \\ \dots \dots \dots \\ [z_N + h_{nN} + F_N(Q)] - [z_L + h_L] = 1,02 \cdot \lambda(Q, d_N) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_N^5} \cdot \kappa(\theta_N) l_N \end{cases} \quad (1)$$

где z_s – высотные отметки НПС, м; $F_s(Q) = \Delta H_s$ – дифференциальный напор s -й НПС, м, зависящий от расхода перекачки Q , м³/ч, т. е. $(Q - \Delta H)$ – характеристика НПС; h_{ns} – подпор этой станции, м; l_s, d_s – протяженность и внутренний диаметр трубопровода на s -м перегоне, м, соответственно; $\lambda(Q, d_s, \theta) = \lambda_s(Q, d_s) \cdot \kappa(\theta_s)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\kappa(\theta)$ – коэффициент, учитывающий использование на s -м перегоне ПТП с концентрацией θ_s , млн⁻¹, и составляющий $\kappa(\theta) \equiv \kappa_s, 0 \leq \kappa_s \leq 1$; g – ускорение силы тяжести, м/с². В работах [3–5] было показано, что в общем случае $\lambda = \lambda(Re, \varepsilon, \theta)$, однако в первом приближении можно допустить, что коэффициент гидравлического сопротивления представляется как произведение $\lambda(Re, \varepsilon, \theta) \approx \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \kappa(\theta)$. Здесь число Рейнольдса Re и относительная эквивалентная шероховатость ε рассчитываются по некоторому среднему значению d_{cp} диаметра трубопровода, вычисляемому с помощью уравнения

$$\frac{L}{d_{cp}^5} = \sum_{m=1}^{m=N} \frac{l_m}{d_m^5},$$

где L – протяженность всего технологического участка магистрального нефтепровода, м. Коэффициент $\kappa(\theta)$ выражается через так называемую гидравлическую эффективность $\Xi(\theta) = (\lambda_0 - \lambda(\theta)) / \lambda_0$ используемой присадки формулой $\kappa(\theta) = 1 - \Xi(\theta)$. График $\kappa(\theta)$ представлен на рис. 2.

Ссылка для цитирования (for citation):

Лурье М.В., Голунов Н.Н., Дидковская А.С. Оптимальные концентрации противотурбулентной присадки для увеличения пропускной способности магистрального нефтепровода // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2021. № 9–10. С. 90–95.
Lurie M.V., Golunov N.N., Didkovskaya A.S. Optimal Concentrations of a Drug Reducing Agent to Increase the Throughput Capacity of a Main Oil Pipeline. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2021;(9–10):90–95. (In Russ.)

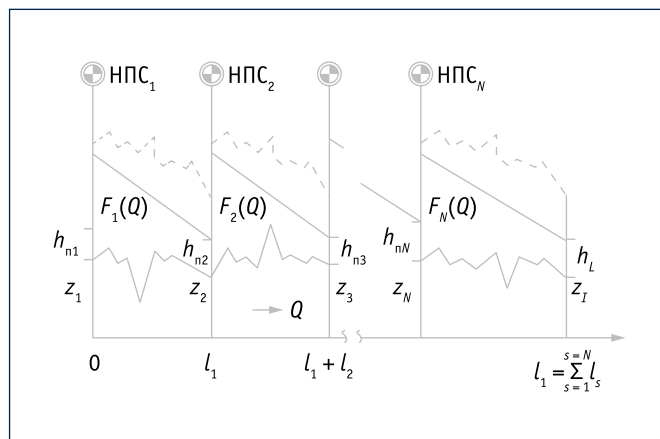


Рис. 1. Участок нефтепровода с промежуточными нефтеперекачивающими станциями: НПС – нефтеперекачивающая станция; z_s – высотные отметки нефтеперекачивающих станций, м; $F_s(Q)$ – дифференциальный напор s -й нефтеперекачивающей станции, м, зависящий от расхода перекачки Q , м³/ч; h_{ns} – подпор этой станции, м; l_s – протяженность трубопровода на s -м перегоне, м; L – протяженность всего технологического участка трубопровода, м

Fig. 1. Oil pipeline section with intermediate oil pumping stations: НПС – oil pumping station; z_s – elevation of oil pumping stations, m; $F_s(Q)$ – differential head of the s -th oil pumping station, m, depending on pumping flow Q , м³/h; h_{ns} – head of this station, m; l_s – length of the pipeline on the s -th run, m; L – length of the whole technological section of the pipeline, m

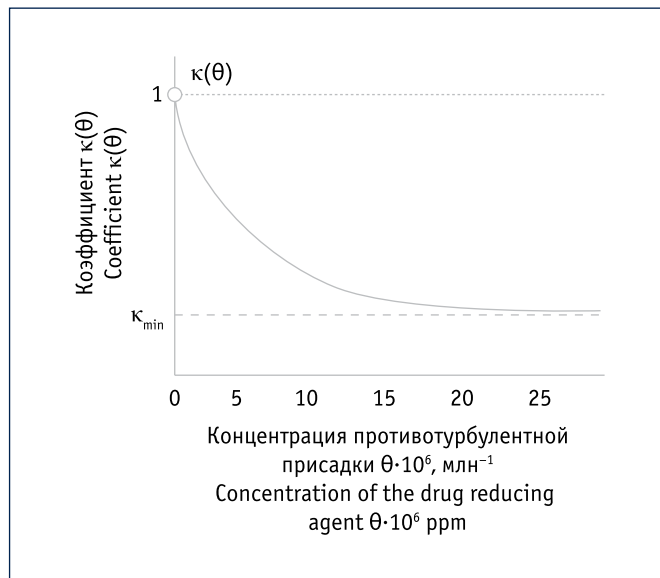


Рис. 2. Зависимость коэффициента $\kappa(\theta)$ от концентрации противотурбулентной присадки
Fig. 2. Dependence of the coefficient $\kappa(\theta)$ on the concentration of the drug reducing agent

Если для всех перегонов $\theta_s = 0$, т.е. присадка не используется, то $\kappa_s(0) = 1$. Тогда решение системы уравнений (1) позволяет определить расход Q_0 перекачки, который назовем номинальным, а также подпоры h_{ns} ($s = 2, 3, \dots, N$) промежуточных станций.

Пусть требуется увеличить расход перекачки до некоторого значения Q , большего или равного Q_0 , путем использования противотурбулентной присадки на одном или нескольких перегонах технологического участка. В этом случае уравнения (1) можно рассматривать как систему $(2N - 1)$ уравнений с таким же числом неизвестных: N концентрациями θ_s присадки и $(N - 1)$ подпорами h_{ns} ($s = 2, 3, \dots, N$) промежуточных НПС, которые заранее неизвестны и подлежат определению [6, 7]. Сложив правые и левые части уравнений системы (1), получим уравнение баланса напоров для технологического участка

$$(z_1 + h_{n1} + \sum_{m=1}^{m=N} F_m(Q)) - (z_L + h_L) = \frac{8,16 Q^2}{\pi^2 g d_{cp}^5} \lambda(Q, d_{cp}) \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{m=N} \kappa(\theta_m) \frac{\bar{l}_m}{d_m^5}$$

или

$$\frac{(z_1 + h_{n1} + \sum_{m=1}^{m=N} F_m(Q)) - (z_L + h_L)}{\lambda(Q, d_{cp}) \cdot \frac{8,16 Q^2 L}{\pi^2 g d_{cp}^5}} = \sum_{m=1}^{m=N} \kappa(\theta_m) \frac{\bar{l}_m}{d_m^5}$$

где $\bar{l}_s = l_s/L$, $\bar{d}_s = d_s/d_{cp}$ – безразмерные протяженности и внутренние диаметры отдельных перегонов. Если ввести безразмерный параметр $a(Q)$, рассчитываемый как

$$a(Q) = \frac{(z_1 + h_{n1} + \sum_{m=1}^{m=N} F_m(Q)) - (z_L + h_L)}{\lambda(Q, d_{cp}) \cdot \frac{8,16 Q^2 L}{\pi^2 g d_{cp}^5}}, \quad (2)$$

и зависящий от того, насколько требуется увеличить расход перекачки, то уравнение баланса напоров для технологического участка нефтепровода можно упростить. Имеем:

$$\sum_{m=1}^{m=N} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5} = a(Q), \quad (3)$$

где $0 < a(Q) \leq 1$.

Однако для работы нефтепровода выполнения одного уравнения (3) недостаточно. Необходимо также, чтобы подпоры h_{ns} на промежуточных НПС удовлетворяли неравенствам $h_{ns} \geq p_y/\rho g + h_{кавс}(Q) = h_{n, \min}$, где p_y – упругость насыщенных паров нефти, Па; ρ – плотность нефти, кг/м³. Эти неравенства требуют, чтобы подпоры всех промежуточных НПС были не меньше некоторого значения $h_{n, \min}$, обеспечивающего так называемый кавитационный запас $h_{кав}$. Сложив почленно первые s уравнений системы (1), получим уравнение

$$(z_1 + h_{n1} + \sum_{m=1}^{m=s} F_m(Q)) - (z_s + h_{ns}) = \frac{8,16 Q^2 L}{\pi^2 g d_{cp}^5} \lambda(Q, d_{cp}) \cdot \sum_{m=1}^{m=s} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5}$$

Отсюда ограничительные неравенства можно записать в виде условий

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{m=s} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5} \leq b_s(Q), \\ b_s(Q) = \frac{h_{n1} - h_{n, \min} + z_1 - z_s + \sum_{m=1}^{m=s} F_m(Q)}{\frac{8,16 Q^2 L}{\pi^2 g d_{cp}^5} \lambda(Q, d_{cp})}, s = 2, 3, \dots, N - 1. \end{cases}$$

Таким образом, приходим к системе, состоящей из одного уравнения и $N - 1$ неравенств:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{m=N} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5} = a(Q), \\ \sum_{m=1}^{m=s} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5} \leq b_s(Q). \end{cases} \quad (4)$$

ФОРМУЛИРОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Оптимизационная задача ставится следующим образом. Пусть заданы все параметры технологического участка магистрального нефтепровода, так что известен номинальный расход Q_0 перекачки в отсутствие противотурбулентной присадки, тогда

$$Q = Q_0, \theta_s = 0, \kappa_s = 1, a = 1, b_s = \sum_{m=1}^{m=s} \frac{\bar{l}_m}{d_m^5}$$

Ставится задача увеличить расход перекачки до некоторого значения $Q > Q_0$ (при этом a будет меньше 1) путем использования ПТП. Если учесть, что суммарный расход ПТП, т.е. объем присадки, вводимой в единицу времени на всем технологическом участке магистрального нефтепровода, равен $Q \cdot (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N)$, то оптимизационную задачу можно сформулировать следующим образом: найти такие концентрации $\theta_1 \geq 0, \theta_2 \geq 0, \dots, \theta_N \geq 0$ ПТП на отдельных перегонах технологического участка магистрального нефтепровода, чтобы выполнялись условия (4) и при этом сумма $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N$ концентраций была минимальной:

$$\sum_{m=1}^{m=N} \theta_m \rightarrow \min. \quad (5)$$

РЕШЕНИЕ

Сформулированная задача относится к классу задач динамического программирования. В данном случае ситуация несколько облегчается тем, что целевая функция (5) линейна, а уравнение в системе (4) образовано монотонно убывающей выпуклой функцией $\kappa(\theta)$.

Задачу будем решать в следующем порядке. Сначала найдем решение первого уравнения системы (4), для которого выполняется критерий

$$C = \sum_{m=1}^{m=N} \theta_m \rightarrow \min,$$

а затем проверим выполнение ограничений на подпоры. Обозначим левую часть уравнения в системе (4) посредством $\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ так, что

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) \equiv \sum_{m=1}^{m=N} \kappa(\theta_m) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5}$$

В N -мерном пространстве переменных $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ функция $\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ определяет выпуклую поверхность, часть которой расположена в первом квадранте $\theta_1 \geq 0, \theta_2 \geq 0, \dots, \theta_N \geq 0$, а целевая функция $C = \sum_{m=1}^{m=N} \theta_m = \text{const}$ – гиперплоскость, перпендикулярную вектору $\nabla C\{1,1,\dots,1\}$ ее градиента (рис. 3). При изменении константы C гиперплоскость перемещается параллельно самой себе, оставаясь перпендикулярной вектору $\{1,1,\dots,1\}$, причем условие $\sum_{m=1}^{m=N} \theta_m \rightarrow \min$ означает, что наименьшее значение суммы концентраций ПТП достигается либо внутри первого квадранта, когда рассматриваемая гиперплоскость касается поверхности $\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) = a(Q)$, либо в точках пересечения поверхности $\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) = a(Q)$ с координатными плоскостями, когда одно или несколько значений θ_s равно 0.

Если наименьшее значение суммы $\sum_{s=1}^{s=N} \theta_s$ достигается во внутренней области первого квадранта, то векторы $\nabla\Phi$ и ∇C коллинеарны друг другу, поэтому имеют место условия

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\theta_s} = \frac{\partial\kappa(\theta_s)}{\partial\theta_s} \cdot \frac{\bar{l}_s}{d_s^5} = -k \cdot 1 \quad (s = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (6)$$

где $k > 0$ – коэффициент пропорциональности (рис. 3).

Выбрав за основу концентрацию ПТП, например, θ_1 на первом перегоне, из условия (6) пропорциональности получаем $(N - 1)$ уравнение, выражающее концентрацию θ_s ПТП на s -м перегоне через концентрацию θ_1 на первом перегоне. Имеем:

$$\frac{\partial\kappa(\theta_s)}{\partial\theta_s} = \frac{\partial\kappa(\theta_1)}{\partial\theta_1} \cdot \frac{\bar{l}_s}{\bar{l}_1} \cdot \frac{d_1^5}{d_s^5}, \quad s = 2, 3, \dots, N. \quad (7)$$

Чтобы найти значения θ_s концентраций, опять используем уравнение в системе (4). Выразив посредством (7) концентрации $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N$ на перегонах технологического участка через концентрацию θ_1 на первом перегоне, получим уравнение

$$\kappa(\theta_1) \cdot \frac{\bar{l}_1}{d_1^5} + \kappa(\theta_2) \cdot \frac{\bar{l}_2}{d_2^5} + \dots + \kappa(\theta_N) \cdot \frac{\bar{l}_N}{d_N^5} = a(Q), \quad (8)$$

в котором $\theta_2 = \theta_2(\theta_1), \theta_3 = \theta_3(\theta_1), \dots, \theta_N = \theta_N(\theta_1)$; $0 < a < 1$. Разрешив это уравнение относительно θ_1 , найдем значения θ_s концентраций ПТП на всех остальных перегонах с помощью равенств (7).

Если же значение θ_1 или какой-либо концентрации θ_s окажется меньше 0, то следует положить это значение равным 0 и повторить процесс оптимизации с меньшим числом неизвестных.

ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Проиллюстрируем изложенный алгоритм на примере конкретной функции $\kappa(\theta)$. С этой целью примем для гидравлической эффективности $\mathcal{E}(\theta)$ ПТП аналитическую аппроксимацию

$$\mathcal{E}(\theta) = \mathcal{E}_{\max} \left(1 - \frac{\beta}{\theta + \beta} \right),$$

хотя и не относящуюся к какой-либо известной ПТП, однако отражающую характерные особенности всех присадок. В частности, $\mathcal{E}(0) = 0$ и $\mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}_{\max}$ при $\theta \rightarrow \infty$. Здесь \mathcal{E}_{\max} и β – коэффициенты аппроксимации экспериментальной зависимости гидравлической эффективности ПТП от концентрации

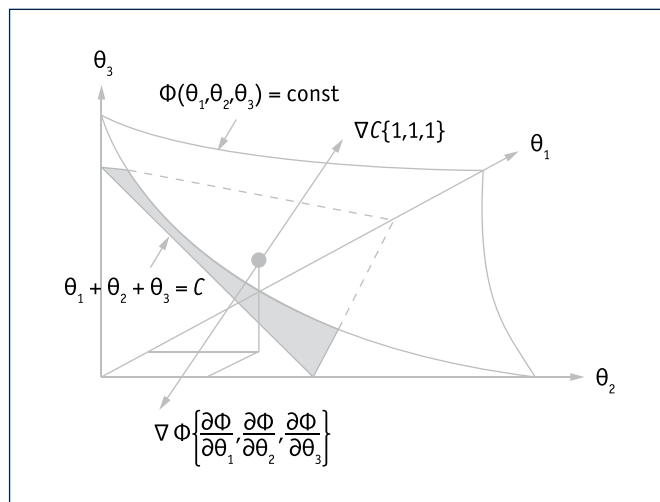


Рис. 3. Случай $\theta_1 \neq 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$:

$\Phi(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ – функция, определяющая выпуклую поверхность; C – функция, определяющая гиперплоскость, перпендикулярную вектору $\nabla C\{1,1,1\}$ ее градиента

Fig. 3. Case $\theta_1 \neq 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$:

$\Phi(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ – function defining the convex surface; C – function defining the hyperplane perpendicular to vector $\nabla C\{1,1,1\}$ of its gradient

присадки. Функция $\kappa(\theta) \equiv 1 - \mathcal{E}(\theta)$, график которой изображен на рис. 2, представляется в виде:

$$\kappa(\theta) = (1 - \mathcal{E}_{\max}) + \frac{\beta \cdot \mathcal{E}_{\max}}{\theta + \beta}.$$

Например, если $\mathcal{E}_{\max} = 0,6$ (т. е. максимальная гидравлическая эффективность присадки составляет 60 %) и $\beta = 10 \text{ млн}^{-1}$, то

$$\kappa(\theta) = 0,4 + \frac{6}{\theta + 10}. \quad (9)$$

Это означает, что $\kappa(0 \text{ млн}^{-1}) = 1,0$; $\kappa(10 \text{ млн}^{-1}) = 0,7$; $\kappa(30 \text{ млн}^{-1}) = 0,55$ и т. д. (рис. 2).

Первое уравнение системы (4) имеет вид:

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) \equiv \sum_{m=1}^{m=N} \left(0,4 + \frac{6}{\theta_m + 10} \right) \cdot \frac{\bar{l}_m}{d_m^5} = a(Q).$$

Далее составляем соотношения (6) пропорциональности. В данном случае они имеют вид:

$$-\frac{6 \cdot \frac{\bar{l}_s}{d_s^5}}{(\theta_s + 10)^2} = -k \Rightarrow \theta_s + 10 = k^{-1} \cdot \frac{\sqrt{\bar{l}_s}}{d_s^{2,5}}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что оптимальные концентрации ПТП, увеличенные на 10 млн^{-1} , на отдельных перегонах технологического участка должны быть пропорциональны корню квадратному из протяженности участка и обратно пропорциональны его диаметру в степени 2,5.

Если θ_1 – концентрация ПТП на первом перегоне, то

$$\frac{\theta_s + 10}{\theta_1 + 10} = \frac{\sqrt{\frac{\bar{l}_s}{\bar{l}_1}}}{\left(\frac{d_s}{d_1}\right)^{2,5}}$$

или

$$\theta_s + 10 = \frac{\sqrt{l_s}}{\left(\frac{d_s}{d_1}\right)^{2,5}} \cdot (\theta_1 + 10). \quad (11)$$

Чтобы найти значения оптимальных концентраций, обратимся к уравнению в системе (4). Имеем:

$$\left(0,4 + \frac{6}{\theta_1 + 10}\right) \cdot \frac{\bar{l}_1}{d_1^5} + \left(0,4 + \frac{6}{\theta_2 + 10}\right) \cdot \frac{\bar{l}_2}{d_2^5} + \dots + \left(0,4 + \frac{6}{\theta_N + 10}\right) \cdot \frac{\bar{l}_N}{d_N^5} = a(Q).$$

Исключив из него концентрации $\theta_s, s = 2, 3, \dots, N$, с помощью равенств (11), получим уравнение для определения неизвестной концентрации θ_1 :

$$\left(0,4 + \frac{6}{\theta_1 + 10}\right) \cdot \frac{\bar{l}_1}{d_1^5} + \left(0,4 + \frac{6 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{2,5}}{\sqrt{l_2}(\theta_1 + 10)}\right) \cdot \frac{\bar{l}_2}{d_2^5} + \dots + \left(0,4 + \frac{6 \left(\frac{d_N}{d_1}\right)^{2,5}}{\sqrt{l_N}(\theta_1 + 10)}\right) \cdot \frac{\bar{l}_N}{d_N^5} = a(Q). \quad (12)$$

Вычислив θ_1 , найдем концентрации θ_s ПТП на всех остальных перегонах технологического участка магистрального нефтепровода с помощью (11). Если же значение θ_1 или какой-либо концентрации θ_s окажется меньше 0, то следует положить это значение равным 0 и повторить процесс оптимизации с меньшим числом неизвестных.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим технологический участок магистрального нефтепровода, состоящий из трех перегонов, обладающих одним и тем же внутренним диаметром $d_s = d = 0,7$ м, но различной протяженностью: $l_1 = 100, l_2 = 150, l_3 = 200$ км, так что $L = 450$ км. Уравнение в системе (4) приобретает вид:

$$100 \left(0,4 + \frac{6}{\theta_1 + 10}\right) + 150 \left(0,4 + \frac{6}{1,225(\theta_1 + 10)}\right) + 200 \left(0,4 + \frac{6}{1,414(\theta_1 + 10)}\right) = 450a(Q).$$

Из этого уравнения находим концентрацию θ_1 . Имеем:

$$\theta_1 = \frac{8,85 - 10a(Q)}{a(Q) - 0,4}.$$

Отсюда следует, что в случае $0,4 < a(Q) < 0,885$ наименьшее значение суммы концентраций достигается внутри области определения (рис. 3).

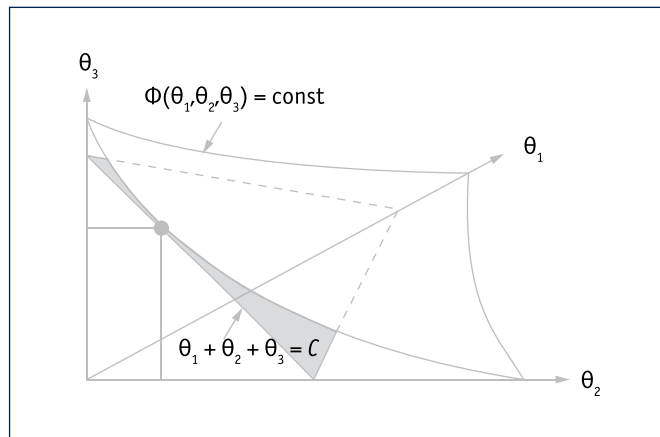


Рис. 4. Случай $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$

Fig. 4. Case $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$

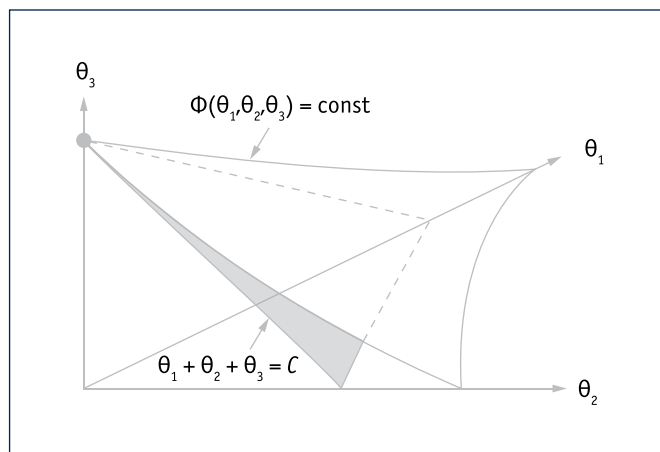


Рис. 5. Случай $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$

Fig. 5. Case $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0, \theta_3 \neq 0$

Например, если расход $Q > Q_0$ таков, что $a(Q) = 0,6 < a(Q_0) = 1$, то

$$\theta_1 = \frac{8,85 - 10 \cdot 0,6}{0,6 - 0,4} = 14,25 \text{ млн}^{-1};$$

$$\theta_2 = 1,225(14,25 + 10) - 10 \approx 19,71 \text{ млн}^{-1};$$

$$\theta_3 = 1,414(14,25 + 10) - 10 \approx 24,29 \text{ млн}^{-1} \Rightarrow \left(\sum_{s=1}^3 \theta_s\right)_{\min} \approx 58,25 \text{ млн}^{-1}.$$

При $a(Q) \leq 0,4$ решений нет, т. е. нельзя увеличить расход перекачки до выбранного значения Q .

Если $0,885 \leq a(Q) < 1$, то $\theta_1 = 0$ и экстремум задачи следует искать в области с меньшим числом неизвестных концентраций, в данном случае со второй и третьей. В рассматриваемом случае $\theta_2 = 1,225(\theta_1 + 10) - 10$ и $\theta_3 = 1,414(\theta_1 + 10) - 10$. Уравнение (4) баланса напоров в этом случае имеет вид:

$$100 + 150 \left(0,4 + \frac{6}{\theta_2 + 10}\right) + 200 \left(0,4 + \frac{6}{1,155(\theta_2 + 10)}\right) = 450a(Q).$$

Из этого уравнения находим концентрацию θ_2 . Имеем:

$$\theta_2 = \frac{4339 - 4500a(Q)}{450a(Q) - 240}.$$



Отсюда следует, что наименьшее значение суммы $\theta_2 + \theta_3$ концентраций достигается на плоскости (θ_2, θ_3) внутри области определения, если $0,885 \leq a(Q) < 0,964$ (рис. 4).

Например, если расход $Q > Q_0$ такой, что $a(Q) = 0,9$, то

$$\theta_1 = 0 \text{ млн}^{-1}; \theta_2 = \frac{4339 - 4500 \cdot 0,9}{450 \cdot 0,9 - 240} \approx 2 \text{ млн}^{-1};$$

$$\theta_3 = 1,155(2 + 10) - 10 \approx 4 \text{ млн}^{-1}.$$

Если $0,964 \leq a(Q) < 1$, то $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = 0$, поэтому уравнение баланса напоров приобретает вид $100 + 150 + 200(0,4 + 6/(\theta_3 + 10)) = 450a(Q)$ и имеет неотрицательное решение

$$\theta_3 = \frac{4500 - 4500a(Q)}{450a(Q) - 330}$$

при всех $0,964 \leq a(Q) < 1$ (рис. 5).

Например, если расход $Q > Q_0$ таков, что $a(Q) = 0,98$, то

$$\theta_1 = 0 \text{ млн}^{-1}; \theta_2 = 0 \text{ млн}^{-1}; \theta_3 = \frac{4500 - 4500 \cdot 0,98}{450 \cdot 0,98 - 330} \approx 1 \text{ млн}^{-1}.$$

ВЫВОДЫ

Для увеличения пропускной способности участка магистрального нефтепровода с помощью противотурбулентных присадок концентрации присадки на отдельных перегонах могут быть различными, однако существует такое сочетание концентраций, при котором их сумма минимальна. При этом соотношение концентраций в оптимальном сочетании определяется длинами и диаметрами перегонов.

В зависимости от того, насколько необходимо увеличить расход Q перекачки по отношению к номинальному значению Q_0 , возможны различные случаи оптимальных концентраций, в т. ч. случаи, когда концентрации θ_3 на всех перегонах технологического участка магистрального нефтепровода отличны от 0, и случаи, когда на некоторых перегонах $\theta_3 = 0$, т. е. ПТП можно не вводить.

Численные расчеты показали, что оптимальное количество используемой присадки не сильно (до 10 %) отличается от варианта, в котором концентрации ПТП на всех перегонах принимаются одинаковыми.

Литература:

1. Белоусов Ю.П. Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей. Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1986. 144 с.
2. Нанотехнологии для снижения гидравлического сопротивления трубопроводов / Р.Н. Бахтизин, М.М. Гареев, Ю.В. Лисин и др. СПб.: Недра, 2018. 352 с.
3. Лурье М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Недра, 2017. 478 с.
4. Голунов Н.Н. Гидродинамическое обоснование использования теории Кармана для расчета гидравлического сопротивления шероховатых трубопроводов в присутствии противотурбулентных добавок // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 10. С. 66–70.
5. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Построение феноменологической теории турбулентности в жидкости с малыми противотурбулентными присадками // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2. С. 148–156.
6. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Выбор оптимального режима эксплуатации технологического участка нефтепровода с применением карт режимов работы // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 12. С. 76–80.
7. Голунов Н.Н., Дидковская А.С., Лурье М.В. Итерационный алгоритм гидравлического расчета взаимосвязанных участков нефтепровода при использовании противотурбулентных добавок // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 4. С. 74–83.

References:

1. Belousov Yu.P. Antiturbulent Additives for Hydrocarbon Liquids. Novosibirsk: Nauka – Siberian Branch; 1986. (In Russ.)
2. Bakhtizin R.N., Gareev M.M., Lisin Yu.V. et al. Nanotechnology to Reduce Hydraulic Resistance of Pipelines. St. Petersburg: Nedra; 2018. (In Russ.)
3. Lurie M.V. Theoretical Foundations of Pipeline Transportation of Oil, Oil Products and Gas. Moscow: Nedra; 2017. (In Russ.)
4. Golunov N.N. Hydrodynamic Justification of the Use of the Karman's Theory for the Calculation of Hydraulic Resistance of Pipelines with Rough Walls in the Presence of Drug Reducing Agents. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2018;(10):66–70. (In Russ.)
5. Golunov N.N., Lurie M.V. The Construction of the Turbulence Phenomenological Theory in a Liquid with Drug Reducing Additives. Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation]. 2020;10(2):148–156. (In Russ.)
6. Golunov N.N., Lurie M.V. Choosing of Optimal Operating Mode of a Technological Section of a Trunk Pipeline with Cards of Pipelines Operating Modes. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2018;(12):76–80. (In Russ.)
7. Golunov N.N., Didkovskaya A.S., Lurie M.V. Iterative Algorithm of Hydraulic Calculation of Interconnected Sections of the Pipeline Using Anti-Turbulent Drug Reducing Agents. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(4):74–83. (In Russ.)