

Кәдірбай Ж., Түсіюпова Б., Абжанова Ш.

Использование ферментных препаратов для мясных продуктов

Резюме. В статье приведена технология полукопченых колбас с применением фермента протепсин.

Ключевые слова: фермент, мясные продукты, аминокислотный состав, добавки.

Kadirbay Zh., Tysypova B., Abzhanova Sh.

Use of enzyme preparations for meat products

Summary. The article shows the technology of semi-smoked sausages using the enzyme protepsin.

Key words: enzyme, meat products, amino acid composition, additives.

УДК 517.977:622.692

Л.А. Нестеренкова, П. А. Нестеренков

(Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Республика Казахстан, stolknier@gmail.com)

ОПТИМИЗАЦИЯ СТОИМОСТИ РАБОТЫ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НЕФТЕПРОВОДА

Аннотация. Транспортировка высоковязких нефтей по магистральным трубопроводам в подогретом состоянии требует значительных топливных и энергетических затрат. Поэтому выбор наиболее дешевых режимов перекачки является весьма актуальным. В работе поставлена и решена задача оптимизации стоимости топливно-энергетических затрат в недогруженном нефтепроводе, когда управлением является скорость неизотермического течения нефти. Задача решена методом множителей Лагранжа с использованием конечно-разностной аппроксимации. Получено оптимальное значение скорости, при котором функционал стоимости достигает минимума. Проведены расчеты перекачки нефти в недогруженном трубопроводе. Данная работа может быть использована при планировании неизотермических режимов работы нефтепроводов.

Ключевые слова: трубопровод, высоковязкая нефть, скорость течения, оптимизация стоимости.

Наиболее распространенным методом транспортировки нефтей и нефтепродуктов на большие расстояния является подземный трубопроводный транспорт. Развитие трубопроводов идет по пути увеличения протяженности, диаметра и рабочего давления [1]. Это в свою очередь ведет к возникновению дополнительных технологических трудностей. Значительные проблемы возникают при транспортировке высоковязких нефтей с высокой температурой застывания. Наибольшее распространение транспортировки таких нефтей получил подземный трубопроводный транспорт нефтей и нефтепродуктов с подогревом. По обычно применяемой технологии перед подачей в магистраль жидкость подогревается до определенной температуры (320-340 К). При этом ее текучесть увеличивается, что ведет к снижению энергетических затрат на транспортировку. Через определенные расстояния по трассе расположены промежуточные тепловые станции, где остывшая в пути нефть вновь подогревается [2, 3]. Величина подогрева нефтей зависит от многих факторов: времени года, количества перекачиваемого сырья и пр. Поскольку на западе Казахстана добываются как раз такие нефти, актуальным является изучение данного процесса и выбор наиболее оптимальных режимов перекачки [1, 4].

Известно, что часть времени магистральные нефтепроводы работают с недогрузкой [5]. При этом имеется возможность варьировать скорость течения в них нефти. Для нефтепроводов, транспортирующих высоковязкую нефть и нефтепродукты в подогретом состоянии, с ростом скорости течения увеличиваются энергетические затраты на перекачку, но уменьшаются затраты на подогрев транспортируемого продукта (уменьшается время нахождения нефти в пути, и следовательно, оно меньше остывает). Отсюда возникает задача такого управления скоростью течения, при котором общая стоимость перекачки была бы минимальной.

Математическая модель описывается уравнением движения, неразрывности, энергии и крайними условиями процесса. Так как длина магистрального трубопровода намного больше его диаметра, совместим ось трубы с осью Ox и будем использовать одномерную математическую модель. Все параметры процесса, а именно температуру нефти $T(t, x)$, давление в трубопроводе $P(t, x)$ и скорость ее течения $W(t)$ усредним по сечению трубы.

При этом математическая модель неизометрического течения нефти по подземному трубопроводу состоит из следующей системы уравнений [2, 3]:

В данной модели для учета передачи тепла от потока нефти в окружающую среду введен полный коэффициент теплопередачи k , который определяется теплопроводностью стенки трубы, теплофизическими характеристиками окружающего трубопровод грунта, режимом течения нефти и т.д. [2, 3].

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g \beta \left(\frac{\pi W}{4} \right)^{2-m} \frac{v^m(T)}{D^{m+1}} - \frac{16\tau_0(T)}{3D}; \\ \frac{\partial W}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + W \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4k}{\rho c D} (T_{OCP} - T) \end{cases} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} T(x, 0) = T_0(x), \quad 0 \leq x \leq L \\ T(0, t) = T_H(t), \quad P(0, t) = P_H(t), \quad t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

где m, β - коэффициенты, зависящие от режима течения, L - длина линейного участка трубопровода.

Коэффициент кинематической вязкости ν и предельное напряжение сдвига τ_0 существенно зависят от температуры. Для их описания используются эмпирические зависимости [2]:

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_1 \exp[-a(T(x) - T_1)]; \\ \tau_0 &= \tau_{01} \exp[-b(T(x) - T_1)]; \end{aligned}$$

где ν_1 и τ_{01} значения коэффициента вязкости и предельного напряжения сдвига при температуре T_1 . Стоимость топливно-энергетических затрат на транспортировку определяется выражением:

$$S = \int_0^T W(t) \cdot (\omega_1 \cdot \Delta T(t) + \omega_2 \cdot \Delta P(t)) dt; \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta T(t) &= T(L, t) - T(0, t); \\ \Delta P(t) &= P(L, t) - P(0, t); \end{aligned}$$

$$\omega_1 = \rho c \frac{\pi D^2}{4} \frac{\sigma_T}{\gamma \eta_T}; \quad \omega_2 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\sigma_H}{\eta_H};$$

σ_T - стоимость единицы объема топлива;

σ_H - стоимость электроэнергии;

γ - теплота сгорания топлива;

η_T - коэффициент полезного действия печей подогрева;

η_H - коэффициент полезного действия насосов.

Ставится задача нахождения такой скорости течения нефти в трубопроводе, при которой стоимость топливно-энергетических затрат (3) была бы оптимальной (минимальной) при соблюдении технологических ограничений на давление, температуру и скорость течения:

$$\begin{cases} P_{min} \leq P \leq P_{max}; \\ W_{min} \leq W \leq W_{max}; \\ T_{min} \leq T \leq T_{max}. \end{cases} \quad (4)$$

Для нахождения необходимых условий оптимальности составим вспомогательный функционал S^* , используя (1) – (3).

$$S^* = s + \int_0^T \int_0^L p_1 \left[\frac{\partial T}{\partial t} + W(t) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{4k}{pcD} (T_{OKP} - T) \right] dx dt + \int_0^T \int_0^L p_2 \left[\frac{\partial P}{\partial t} + A_1 W^{2+m}(t) v^m(T) + A_2 \tau_0(T) \right] dx dt; \quad (5)$$

где p_1 и $p_2 = (x, t)$ – множители Лагранжа.

Найдем вариацию функционала Лагранжа δS^* . Для этого нужно найти вариации слагаемых в правой части (5):

$$\delta S = \int_0^T \delta [W(t)(\omega_1 \Delta T(t) + \omega_2 \Delta P(t))] dt = \int_0^T \delta W(t)(\omega_1 \Delta T(t) + \omega_2 \Delta P(t)) dt - \omega_1 \int_0^T W(t) \delta T(L, t) dt - \omega_2 \int_0^T W(t) \delta P(L, t) dt;$$

$$\delta_1 = \int_0^T \int_0^L p_1 \delta \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_0^T \int_0^L p_1 \frac{\partial \delta T}{\partial t} dx dt = \int_0^L (p_1 \delta T)|_t = T dx - \int_0^T \int_0^L \delta T \frac{\partial p_1}{\partial t} dx dt;$$

$$\delta_2 = \int_0^T \int_0^L p_1 \left(W(t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt = \int_0^T \int_0^L p_1 \frac{\partial T}{\partial x} \delta W(t) dx dt + \int_0^T \int_0^L p_1 W(t) \frac{\partial \delta T}{\partial x} dx dt = \int_0^T \int_0^L p_1 \frac{\partial T}{\partial x} \delta W(t) dx dt + \int_0^T (p_1 W(t) \delta T)|_{x=L} - \int_0^T \int_0^L W(t) \frac{\partial p_1}{\partial x} \delta T dx dt;$$

$$\delta_3 = -\frac{4k}{pcD} \int_0^T \int_0^L p_1 \delta (T_{OKP} - T) dx dt = \frac{4k}{pcD} \int_0^T \int_0^L p_1 \delta T dx dt;$$

$$\delta_4 = \int_0^T \int_0^L p_2 \delta \frac{\partial P}{\partial x} dx dt = \int_0^T \int_0^L p_2 \frac{\partial \delta P}{\partial x} dx dt = \int_0^T (p_2 \delta P)|_{x=L} dt - \int_0^T \int_0^L \delta P \frac{\partial p_2}{\partial x} dx dt;$$

$$\delta_5 = A_1 \int_0^T \int_0^L p_2 \delta (W^{2-m}(t) v^m(T)) dx dt = A_1 (2-m) \int_0^T \int_0^L p_2 v^m(T) W^{1-m} \delta W(t) dx dt + A_1 m \int_0^T \int_0^L p_2 W^{2-m}(t) v^{m-1}(T) \delta v(T) dx dt;$$

$$\delta_6 = A_2 \int_0^T \int_0^L p_2 \delta \tau_0(T) = A_2 \int_0^T \int_0^L p_2 \tau_0' \delta T dx dt;$$

Поскольку в оптимальной точке выполняется условие $\delta S^* = 0$, вариация функционала Лагранжа имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta S^* = & \int_0^T \int_0^L \delta T \left[-\frac{\partial p_1}{\partial t} - W(t) \frac{\partial p_1}{\partial x} + \frac{4k}{pcD} p_1 + m A_1 p_2 W^{2-m} v^{m-1} \bar{v} + A_2 p_2 \tau_0' \right] dx dt \\ & + \int_0^T \int_0^L \delta \left[-\frac{\partial p_2}{\partial x} \right] dx dt + \int_0^T \int_0^L \delta W(t) \left[p_1 \frac{\partial T}{\partial x} + A_1 (2-m) p_2 v^m W^{1-m} \right] dx dt \\ & + \int_0^T \delta W(t) [\omega_1 \Delta T(t) + \omega_2 \Delta P(t)] dt + \int_0^T \delta T|_{x=L} [-\omega_1 W + p_1 W]|_{x=L} dt \\ & + \int_0^T \delta P|_{x=L} [-\omega_2 W + p_2]|_{x=L} dt + \int_0^T \delta T|_{x=T} [p_1]|_{t=T} dt = 0 \end{aligned}$$

Пользуясь произвольностью множителей Лагранжа, приравниваем нулю коэффициенты при вариациях

$$\delta T(x, t), \delta P(x, t), \delta T(L, t), \delta P(x, t), \delta T(x, T);$$

и получим сопряженную задачу с конечными и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_1}{\partial t} + W(t) \frac{\partial p_1}{\partial x} - \frac{4k}{\rho c D} p_1 - m A_1 p_2 W^{2-m} v^{m-1} \bar{v} - A_2 p_1 2 \bar{\tau}_0 = 0 \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = 0 \\ p_1|_{x=L} = \omega_1 \\ p_2 = \omega_1 W \\ p_1|_{t=T} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Введем функцию Гамильтона - Понтрягина:

$$H = W \left[\int_0^L p_1 \frac{\partial T}{\partial x} dx + A_1 (2-m) p_2 W^{1-m} \int_0^L v^m dx + \omega_1 \Delta T + \omega_1 \Delta P \right]$$

$$\frac{\partial H}{\partial W} = \int_0^L p_1 \frac{\partial T}{\partial x} dx + A_1 (2-m)^2 p_2 W^{1-m} \int_0^L v^m dx + \omega_1 \Delta T + \omega_1 \Delta P$$

Приравняв последнее выражение к нулю, получим необходимое условие оптимальности:

$$W = \left(\frac{- \int_0^L p_1 \frac{\partial T}{\partial x} dx - \omega_1 \Delta T - \omega_2 \Delta P}{A_1 (2-m)^2 p_2 \int_0^L v^m dx} \right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (7)$$

Для численного решения задачи введем сетку:

$$Q_{h\tau} = \{(x_n, t_n) = (n * h, k * \tau), \quad n = 0, 1, \dots, N,$$

$$k = \{0, \dots, M; h = \frac{L}{N}, \tau = \frac{T}{M}\}$$

Запишем разностный аналог уравнений (1) – (3), (6), (7) рассматриваемой оптимизационной задачи:

$$\frac{T_n^{k+1} - T_n^k}{\tau} + W^k \frac{T_n^k - T_{n-1}^k - T_{n-1}^k}{h} = a_1 (T_{OKP} - T_n^k),$$

$$\frac{P_n^{k+1} - P_n^{k+1}}{h} = -a_2 (W^{2-m})^{k+1} (v^m(T))_n^{k+1} - a_3 \tau_{0n}^{k+1}(T),$$

$$n = \overline{1, N}, k = \overline{0, M-1},$$

$$T_n^0 = T_0 n, n = \overline{1, N},$$

$$T_0^k = T_H, p_0^k = P_H, k = \overline{0, M},$$

$$\frac{P_{ln}^{k+1} - P_{ln}^k}{\tau} = W^k \frac{P_{ln+1}^{k+1} - P_{ln}^{k+1}}{h} + a_1 P_{ln}^{k+1} + a_2 P_2^{k+1} \bar{\tau}_{0n}^{k+1} + a_1 m P_2^{k+1} (v^{m-1})_n^{k+1} \bar{v}_n^{k+1},$$

$$n = \overline{1, N}, \quad k = \overline{0, M-1}$$

$$P_{1N}^k = \omega_1, \quad k = \overline{0, M}$$

$$P_2^k = \omega_2 W^k, \quad k = \overline{0, M}$$

$$P_{ln}^M = 0, \quad n = \overline{0, N}$$

$$W^k = \begin{cases} W_{max}, & \text{if } W^k \geq W_{max}, \\ W^k, & W_{min} < W^k < W_{max}, \\ W_{min}, & \text{if } W^k \leq W_{min} \end{cases}$$

$$W^k = \left[\frac{-\sum_{i=1}^N P_{ln}^k (T_n^k - T_{n-1}^k) - \omega_1 \Delta T^k}{a_1 (2-m)^2 P_2^k \sum_{i=0}^N (v^m)_n^k h} \right]^{\frac{1}{1-m}}$$

$$I_M = \sum_0^M [W^k (\omega_1 \Delta T^k + \omega_2 \Delta P)] * \tau,$$

где

$$T_n^k = T(x_n, t_k), P_n^k = P(x_n, t_k),$$

$$P_{ln}^k = p_1(x_n, t_k), P_2^k = p_2(t_k), W^k = W(t_k).$$

Численная реализация условий оптимальности осуществлена методом последовательных приближений. Одновременно проведена проверка условия убывания функционала стоимости (см.Рисунок 1). Расчеты проводились на языке Turbo Pascal.

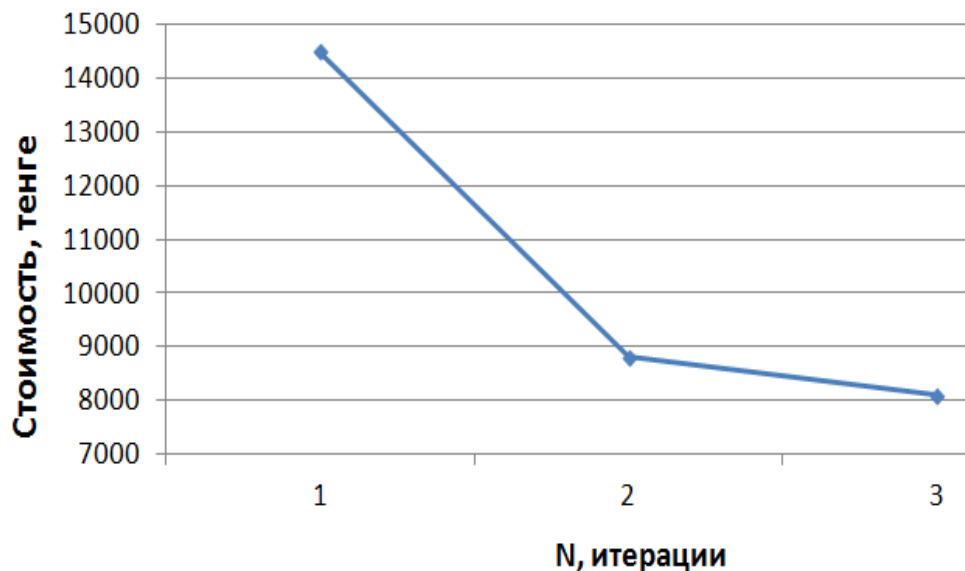


Рис. 1. Изменение стоимости по итерациям

Численные исследования, проводимые для линейного участка горизонтального нефтепровода, протяженность которого 100км, показали, что функционал стоимости достигает минимума при $W_{opt} = 0,3$ м/с.

Результаты расчетов показаны на рисунках 2, 3.

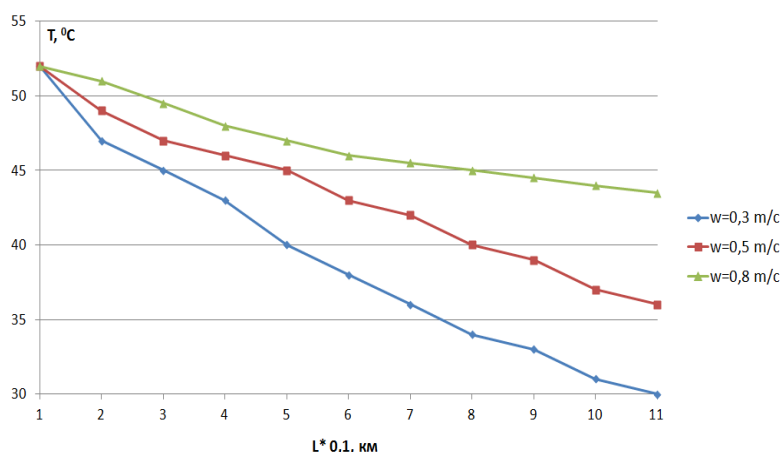


Рис. 2. Распределение температуры вдоль трубопровода при различных скоростях течения нефти

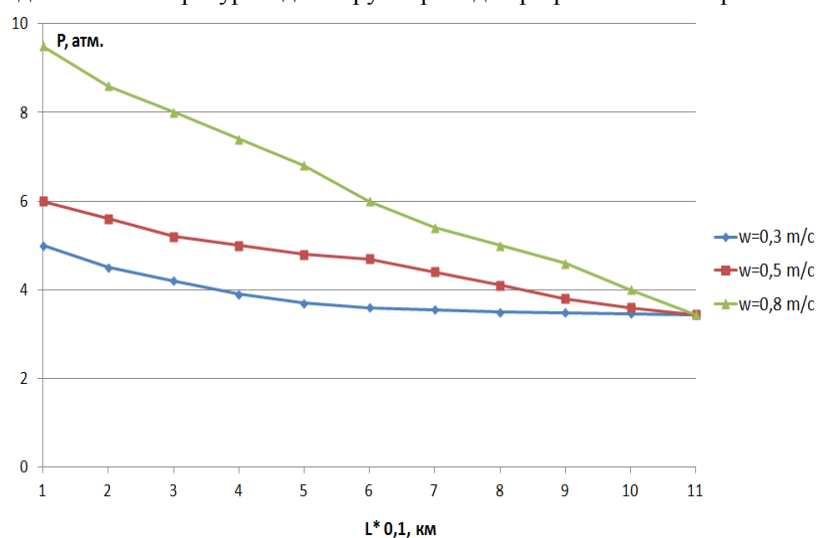


Рис. 3. Распределение давления вдоль трубопровода при различных скоростях течения нефти

Представлены распределения температуры и давления вдоль нефтепровода при различных скоростях течения нефти $W_{ПЛ} = 0,5$ м/с, $W_{ОПТ} = 0,3$ м/с, $W_{цикла} = 0,8$ м/с для фиксированного момента времени. Как видно из графиков, с ростом скорости течения температурный перепад в нефтепроводе уменьшается (см. рис. 2), т.е. нефть быстрее движется и меньше остывает в пути. При этом градиент давления вдоль нефтепровода возрастает (см. рис. 3), т.к. объем перекачиваемой в единицу времени нефти увеличивается.

Замечание. При эксплуатации недогруженного нефтепровода в оптимальном режиме необходимо учитывать плановую производительность перекачки $G_{ПЛ} = \frac{\pi D^2 W_{ПЛ}}{4} \rho$, производительность подачи нефти с промыслов $G_{ПР}$ и объем резервуарного парка $V_{РП}$. В случае, когда $W_{ПЛ} > W_{ОПТ}$, можно применить циклическую перекачку нефти, когда одну часть времени нефтепровод работает в оптимальном режиме, а другую часть – со скоростью $W_{цикла}$, зависящей от $W_{ОПТ}$, $G_{ПЛ}$, $G_{ПР}$, $V_{РП}$. Задача сводится к отысканию скорости цикла, учитывающей плановую производительность нефтепровода, длительность цикла, объем резервуарного парка и т. д. Методика нахождения этой скорости и длительности циклов описана в [5]. В случае, когда $W_{ПЛ} < W_{ОПТ}$, циклическая перекачка нефти рассчитывается аналогично.

На рис. 4 показана диаграмма стоимости работы нефтепровода:

- 1) в плановом режиме $W_{ПЛ} = 0,5$ м/с;
- 2) в циклическом режиме: 6 часть времени с $W_{ОПТ} = 0,3$ м/с и 3) в циклическом режиме: 4 часть времени – с $W_{цикла} = 0,8$ м/с.

Так как в обоих случаях перекачивается одинаковое количество нефти, то, как следует из диаграммы, первый вариант транспортировки по трубопроводу оказался дороже второго на 8%.

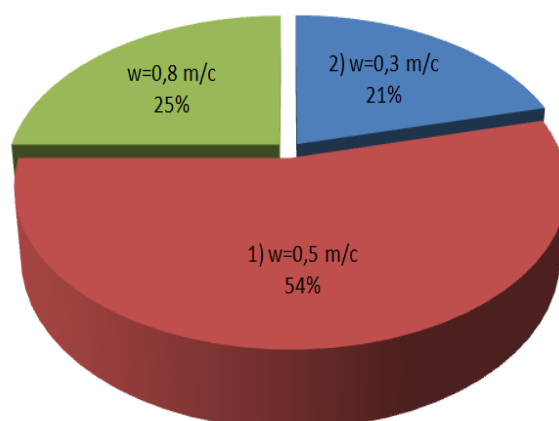


Рис. 4. Стоимость работы нефтепровода при объеме прокачки 28500 тонн.

- 1) весь объем нефти – со скоростью 0.5 м/с;
- 2) 0,6 объема со скоростью 0.3 м/с;
- 3) 0,4 объема со скоростью 0.8 м/с.

Таким образом, перекачка нефти по неизотермическому нефтепроводу в циклическом режиме, когда часть времени нефть движется с оптимальной скоростью, является более дешевой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карымсакова Э.С. Развитие трубопроводного транспорта нефти в Республике Казахстан. - Нефть-газ. Электронная библиотека. 2003. 200 с. – (<http://www.dobi.oglib.ru/bgl/3370.html>)
- [2] Агапкин В.М, Кривошеин В.Л., Юфин В.А. Тепловой и гидравлический расчет трубопровода для нефти и нефтепродуктов. –М.: Недра, 1981. – 256 с.
- [3] Нестеренкова Л.А. Математическое моделирование установившихся течений жидкости по трубопроводам. /Методическое пособие. – Алматы, Казак Университеті, 1998. - 41с.
- [4] Жумагулов Б.Е., Смагулов Ш.С., Евсеева А.У., Нестеренкова Л.А. Трубопроводный транспорт высоковязких и высокозастывающих нефтей. - Алматы: НИЦ Ғылым, 2002. - 140 с.
- [5] Козлова З.Г., Абрамзон Л.С., Тугунов П.И. Выбор режимов перекачки при плановой недогрузке горячего нефтепровода// Нефтяное хозяйство. – 1983. -№ 4. – с.57-58.

Нестеренкова Л.А., Нестеренков П. А.

Изотермиялық емес мұнай құбыры жұмысының бағасын оңтайландыру

Резюме. Міндет - мұнайдың изотермиялық емес ағынымен бақыланатын, жүктелмеген мұнай құбырында отын мен энергия шығындарының құнын оңтайландыру. Мәселе Лигранж көбейткіштері әдісімен шешіледі, бұл соңғы-айырмашылық жақындаған кезде қолданылады. Проблеманың сандық шешімі көлденең құбыр үшін түпкілікті айырмашылық әдісімен жүзеге асырылды. Мәні функционалды ең төменгі деңгейге жеткен жылдамдықтың оңтайлы мәні алынады. Жоспарланған мұнай көлемін тасымалдау болжамын орындау үшін бағдарламада әртүрлі ағындық жылдамдықтарда циклдік сорғы мүмкіндігі қарастырылған: уақыттың бір бөлігі оңтайлы жылдамдықта және сорғы жоспарының орындалуына мүмкіндік беретін жылдамдықта. Циклдік тасымалдаудың жалпы құны жоспарланған мөлшерде біркелкі сорғыға қарағанда, қолайлы болып табылады.

Түйінді сөздер: құбыр, жоғары тұтқырлық май, ағын жылдамдығы, шығындарды оңтайландыру.

Nesterenkova L.A., Nesterenkov P.A.

Optimization of operating costs non-isothermal pipeline

Summary. The task is to optimize the cost of fuel and energy costs in an underloaded oil pipeline, where the speed is controlled by the non-isothermal flow of oil. The problem is solved by the method of Lagrange multipliers using finite-difference approximation. The numerical solution of the problem was carried out for a horizontal pipeline by the method of finite differences. The optimal value of the speed at which the value functional reaches a minimum is obtained. In order to fulfill the forecast of transportation of the planned amount of oil, the program provides for the possibility of cyclic pumping at different flow rates: part of the time is at the optimum speed, and a part at a speed that allows the pumping plan to be executed. The article proposes the justification that the total cost of cyclic transportation is more profitable than the uniform pumping at a planned rate.

Key words: pipeline, high-viscosity oil, flow velocity, cost optimization.