

Технические науки

УДК 622.692.4

Середюк Мария Дмитриевна

*доктор технических наук, профессор кафедры
газонефтепроводов и газонефтехранилищ*

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Середюк Марія Дмитрівна

*доктор технічних наук, професор кафедри
газонафтопроводів та газонафтосховищ*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Serediuk Mariia

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

Григорский Станислав Ярославович

*кандидат технических наук, доцент кафедры
газонефтепроводов и газонефтехранилищ*

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Григорський Станіслав Ярославович

*кандидат технічних наук, доцент кафедри
газонафтопроводів та газонафтосховищ*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Grygorskyi Stanislav

*PhD, Associate Professor of the
Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

**РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ
ПЕРЕКАЧКИ РАЗНОСОРТНЫХ НЕФТЕЙ ИЗМЕНЕНИЕМ
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ
РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ПОСЛІДОВНОГО ПЕРЕКАЧУВАННЯ
РІЗНОСОРТНИХ НАФТ ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ ОБЕРТІВ ВАЛА
НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ
REGULATION OF THE SEQUENTIAL TRANSPORTATION MODE
DIFFERENT SORTS OF OIL AT CHANGE OF ROTATIONAL
FREQUENCY OF OIL PUMPING UNITS**

Аннотация. На основании результатов математического моделирования гидродинамических процессов совместной работы центробежных насосных агрегатов и трубопровода установлены закономерности изменения пропускной способности нефтепровода и удельных затрат электроэнергии при последовательной перекачке разнородных нефтей. Доказана технологическая и экономическая целесообразность применения насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом для обеспечения постоянного расхода нефти при вытеснении одного сорта нефти другим.

Ключевые слова: центробежный насос, теория подобия центробежных машин, энергоэффективность, регулируемый привод, пропускная способность.

Анотація. На основі результатів математичного моделювання гідродинамічних процесів спільної роботи відцентрових насосних агрегатів та трубопроводу встановлені закономірності зміни пропускної здатності нафтопроводу і питомих витрат електроенергії при послідовному перекачуванні різносортих нафт. Доведена технологічна та економічна доцільність застосування насосних агрегатів з частотно-

регульованим приводом для забезпечення постійної витрати нафти при витісненні одного сорту нафти іншим.

Ключові слова: *відцентровий насос, теорія подібності відцентрових машин, енергоефективність, регульований привід, пропускна здатність.*

Summary. *Were established regularities at changes of flow capacity of the oil pipeline and the unit costs of electricity during the sequential pumping of different-grade oils. It was based on the results of mathematical modeling of the hydrodynamic processes of the joint operation of centrifugal pumping units and the pipeline. The technological and economic feasibility of the use of pumping units with a frequency-controlled drive to ensure a constant volume flow of oil during the displacement of one type of oil by another was proved.*

Key words: *centrifugal pump, centrifugal machines similarity theory, energy efficiency, regulated drive, flow capacity.*

Введение. В мировой практике широкое применение получила прогрессивная технология последовательной перекачки разнородных нефтепродуктов на магистральных нефтепродуктопроводах и нефтей различных сортов на магистральных нефтепроводах. В восьмидесятые-девяностые годы прошлого века эта технология использовалась при трубопроводном транспорте светлых нефтепродуктов на магистральных нефтепродуктопроводах Украины. В последние годы имели место случаи применения технологии последовательной перекачки нефтей различных сортов в системе магистральных нефтепроводов “Дружба”.

Сущность технологии последовательной перекачки заключается в том, что в трубопровод последовательно закачивают партии разнородных жидкостей, которые после транспортирования в конечном пункте принимают в отдельные резервуарные емкости. Применение этой технологии позволяет значительно увеличить загрузку и повысить

энергоэффективность трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов [1–3].

Решение проблемы диверсификации поступления нефти из альтернативных источников для ее переработки в Украине или дальнейшего транзита в Европу повышает актуальность вопросов, связанных с практической реализацией процесса последовательной перекачки разнородных углеводородов по трубопроводам.

Технология последовательной перекачки – это специальная технология, которая по гидродинамическим параметрам и процессам массопереноса значительно сложнее в реализации, по сравнению с традиционной технологией транспортировки одного сорта жидкости. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию закономерностей режимов последовательной перекачки жидких углеводородов в трубопроводах, некоторые аспекты практической реализации указанной технологии не нашли полного решения. Некоторые из них стали предметом исследований в данной работе.

Цель исследований. Исследование эффективности использования насосных агрегатов с регулируемым приводом для регулирования режима последовательной перекачки различных сортов нефти.

Указанная цель реализуется через решение следующих задач:

- разработка метода и программного обеспечения для математического моделирования совместной работы нефтеперекачивающей станции (НПС) и линейной части нефтепровода при последовательной перекачке нефтей различных сортов;
- исследование особенностей гидродинамического процесса последовательной перекачки нефтей различных сортов в магистральном трубопроводе с учетом характеристик нефтяных насосов при постоянной частоте вращения вала;

- исследование влияния изменения частоты вращения вала насосных агрегатов на режимные и энергетические параметры последовательной перекачки нефтей различных сортов.

Расчет режима работы нефтепровода при последовательной перекачке разносортных нефтей и его регулирования путем изменения частоты вращения ротора насосов. Процесс последовательной перекачки разносортных нефтей – это циклический процесс. В течение цикла осуществляется закачка в линейную часть трубопровода всего ассортимента транспортируемых нефтей.

Рассмотрим наиболее распространенный случай, при котором по нефтепроводу последовательно транспортируются два сорта нефти, физические свойства которых различны. Сначала весь нефтепровод заполнен нефтью, параметрам которой присваиваем индекс “1”. В определенный момент времени с помощью насосов НПС в нефтепровод начинают закачивать второй сорт нефти, параметрам которого присваиваем индекс “2”. Условная зона контакта двух сортов нефтей будет перемещаться по нефтепроводу со скоростью, определяемой мгновенным расходом нефтей. Поскольку перекачиваемые нефти заметно отличаются по вязкости и плотности, то любое перемещение зоны их контакта вызывает изменение гидравлического сопротивления линейной части нефтепровода. Это в свою очередь влияет на динамику совместной работы системы НПС-трубопровод, а следовательно, и на пропускную способность и энергоэффективность магистрального нефтепровода. По этой причине расход нефти в нефтепроводе в процессе последовательной перекачки будет все время меняться в соответствии с перемещением зоны контакта нефтей различных сортов. В этом главное отличие подхода, реализованного в данной работе, от существующих методов расчета параметров последовательной перекачки, основанных на постоянстве расхода в процессе замещения одной жидкости другой в трубопроводе.

Процесс замещения одного сорта нефти другим в нефтепроводе является нестационарным гидродинамическим процессом, однако при проведении инженерных расчетов его можно рассматривать как последовательность квазистационарных состояний, каждый из которых соответствует определенному положению зоны контакта двух жидкостей в трубопроводе [4-5].

Потери энергии (давления) при последовательной перекачке разносортных нефтей зависят от коэффициента гидравлического сопротивления, который в свою очередь определяется режимом движения в нефтепроводе. При этом из-за существенного различия вязкости последовательно транспортируемых нефтей их движение по нефтепроводу может происходить в различных зонах гидравлического трения турбулентного режима.

Это определяет важность правильного выбора математических моделей для коэффициента гидравлического сопротивления для всех этапов замещения одной жидкости другой в трубопроводе.

Как показано в работах [6-7], при эксплуатации магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов при турбулентном режиме в широком диапазоне чисел Рейнольдса для расчета коэффициента гидравлического сопротивления предпочтение следует отдавать универсальной формуле Колбрука, которая получила широкое применение в мировой практике при расчетах трубопроводов различного назначения.

В работах [6-7] нами разработан метод гидравлического расчета нефтепровода, который базируется на использовании модифицированной формулы Колбрука для всех зон трения турбулентного режима. Указанный метод расчета прошел промышленную апробацию на действующих нефтепроводах Украины [8].

Считаем целесообразным применение данного метода для расчета параметров гидродинамического процесса замещения одной нефти другой в процессе их последовательной перекачки по нефтепроводу.

Для произвольного положения зоны контакта двух разных сортов нефти в нефтепроводе математическое выражение для общих потерь давления имеет вид

$$P_{общ_x} = 1,02 \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{Q_x^2}{D^5} \cdot [\lambda_{2_x} \cdot x \cdot \rho_2 + \lambda_{1_x} \cdot (l - x) \cdot \rho_1] + (z_x - z_n) \cdot \rho_2 \cdot g + (z_k - z_x) \cdot \rho_1 \cdot g, \quad (1)$$

где x - линейная координата - расстояние от начала нефтепровода до зоны контакта двух сортов нефти;

Q_x - расход нефти в нефтепроводе, соответствующий координате зоны контакта двух сортов нефти x ;

D - внутренний диаметр нефтепровода;

$\lambda_{1_x}, \lambda_{2_x}$ - коэффициенты гидравлического сопротивления для частей нефтепровода, заполненных первым и вторым сортами нефти, соответствующие координате зоны контакта двух сортов нефти x ;

l - длина участка нефтепровода;

ρ_1, ρ_2 - расчетная плотность первого и второго сортов нефти;

z_x - геодезическая отметка, соответствующая зоне контакта двух сортов нефти x ;

z_n, z_k - геодезическая отметка начала и конца участка нефтепровода;

g - ускорение силы тяжести.

Нами разработанный вычислительный алгоритм и компьютерная программа, позволяющие определить пропускную способность и энергоэффективность магистрального нефтепровода при реализации последовательной перекачки нефтей различных сортов. Методика включает элементы, которые приведены ниже.

Блок гидравлического расчета линейной части нефтепровода с учетом перемещения зоны контакта двух сортов нефти основан на применении формулы (1) для общих потерь давления на участке нефтепровода и модифицированной формулы Колбрука для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления.

Давление, создаваемое насосами НПС, при вытеснении с нефтепровода первого сорта нефти вторым в момент нахождения зоны их контакта на расстоянии x определяется по формуле

$$P_{нпс} = (A_{нпс} - B_{нпс} \cdot Q_x^2) \cdot \rho_2 \cdot g, \quad (2)$$

где $A_{нпс}, B_{нпс}$ - коэффициенты математической модели суммарной напорной характеристики насосов, задействованных на НПС при реализации последовательной перекачки нефтей различных сортов.

Блок расчета режима работы НПС базируется на предложенных нами математических моделях напорной характеристики и характеристики коэффициента полезного действия (КПД) нефтяных насосов для произвольного значения частоты вращения вала насоса n [9, 10]

$$H = \gamma^2 \cdot a - b \cdot Q^2, \quad (3)$$

$$\eta = c_1 + c_2 \cdot Q_k + c_3 \cdot Q_k^2, \quad (4)$$

где γ - относительная частота вращения вала насоса;

$$\gamma = n/n_n, \quad (5)$$

n_n - номинальное значение частоты вращения;

a, b - коэффициенты математической модели напорной характеристики при номинальном значении частоты вращения вала насоса;

c_1, c_2, c_3 - коэффициенты математической модели характеристики КПД насоса при номинальном значении частоты вращения вала насоса;

Q_k - скорректированное значение подачи насоса, учитывающее смещение кривой КПД при относительной частоте вращения вала γ

$$Q_k = Q/\gamma. \quad (6)$$

Алгоритм расчета учитывает тот факт, что при уменьшении частоты вращения вала насоса имеет место некоторое снижение коэффициента полезного действия вследствие уменьшения числа Рейнольдса и роста влияния механических потерь энергии в подшипниках. Предусмотрена корректировка КПД насоса в соответствии с формулой фирмы Sulzer

$$\eta' = \frac{\eta}{\eta + (1 - \eta) \cdot \gamma^{-0,17}}. \quad (7)$$

Все остальные блоки вычислительного алгоритма и компьютерной программы подробно охарактеризованы в работах [3–8].

В качестве модельного нефтепровода выбран участок действующего магистрального нефтепровода длиной 100 км с внутренним диаметром 0,702 м. Нефтеперекачивающая станция оборудована магистральными насосами марки НМ 3600-230 с различными роторами. Предусмотрена работа одного или двух последовательно соединенных магистральных насосов. Исследованы гидродинамические параметры последовательной перекачки по нефтепроводу двух сортов нефти с такими расчетными свойствами:

- для первого сорта: плотность $\rho_1 = 870 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость $\nu_1 = 50 \text{ сСт}$;
- для второго сорта: плотность $\rho_2 = 850 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость $\nu_2 = 10 \text{ сСт}$.

Сначала рассмотрен гидродинамический процесс вытеснения первого сорта нефти вторым при использовании насосных агрегатов с постоянной номинальной частотой вращения.

По результатам многовариантных расчетов для различных положений зоны контакта двух сортов нефти в нефтепроводе, полученным с помощью компьютерной программы, построены графические

зависимости пропускной способности и удельных расходов электроэнергии на реализацию последовательной перекачки двух сортов нефти по нефтепроводу (рисунки 1, 2).

Рисунок 1 показывает, что перемещение зоны контакта двух сортов нефти модельным нефтепроводом вызывает заметное изменение его пропускной способности от значения 1987 м³/ч до значения 2421 м³/ч. Зависимость пропускной способности от положения зоны контакта нефтей близка к линейной. Для рассматриваемого случая зависимость между расходом нефти (м³/ч) и координатой зоны контакта нефтей (км) адекватно описывается такими математическими моделями:

$$Q = 4,885 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 3,876 \cdot x + 1987, \quad (8)$$

или

$$Q = 4,252 \cdot x + 1987. \quad (9)$$

Рисунок 2 свидетельствует о том, что перемещение зоны контакта двух сортов нефти по нефтепроводу сопровождается заметным изменением удельных затрат электроэнергии от значения 21,19 (кВт·ч)/(тыс.т·км) до значения 18,96 (кВт·ч)/(тыс.т·км). Для рассматриваемого случая зависимость между удельными затратами электроэнергии и координатой зоны контакта нефтей адекватно описывается такими математическими моделями:

$$H_e = 1,868 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 2,430 \cdot 10^{-2} \cdot x + 21,19, \quad (10)$$

или

$$H_e = -2,287 \cdot 10^{-2} \cdot x + 21,19. \quad (11)$$

Имея расход для каждого положения зоны контакта разносортных нефтей, пропорциональный скорости, переходим от линейной координаты x к координате времени τ , отсчитываемой от начала закачки партии второго сорта нефти в линейную часть нефтепровода.

На рисунке 3 приведена зависимость пропускной способности модельного нефтепровода Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) от времени замещения первого сорта нефти другим τ (мин).

Полученные математические модели имеют вид

$$Q = 8,117 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 + 0,3248 \cdot \tau + 1987, \quad (12)$$

или

$$Q = 3,915 \cdot \tau + 1987. \quad (13)$$

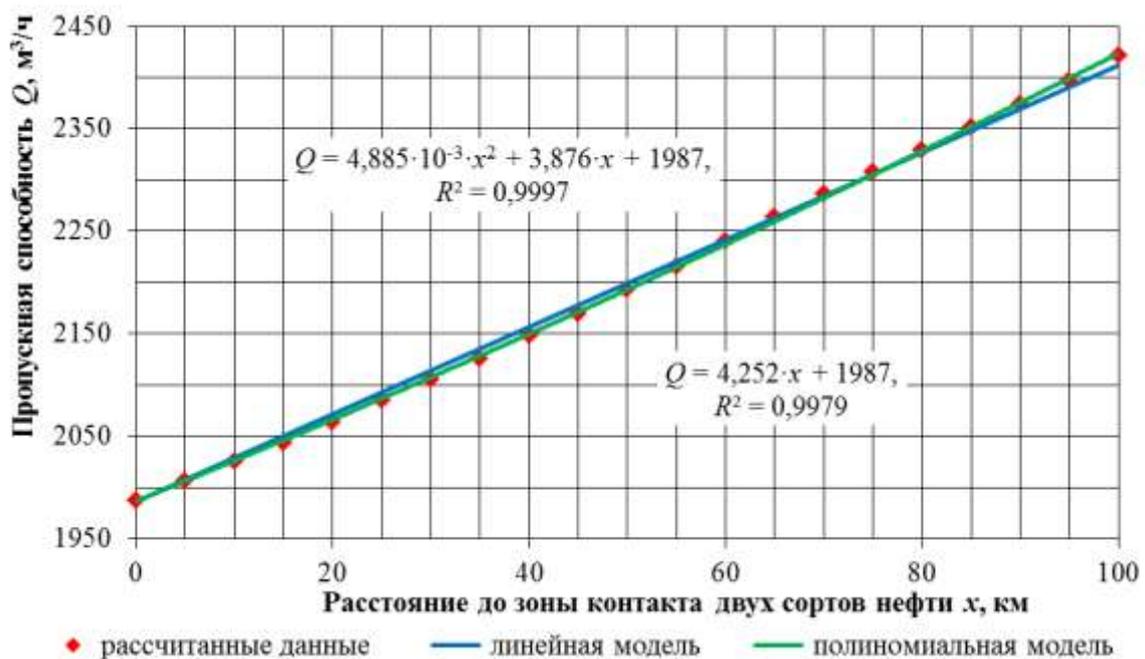


Рис. 1. Динамика изменения пропускной способности нефтепровода от расстояния до зоны контакта разносортных нефтей

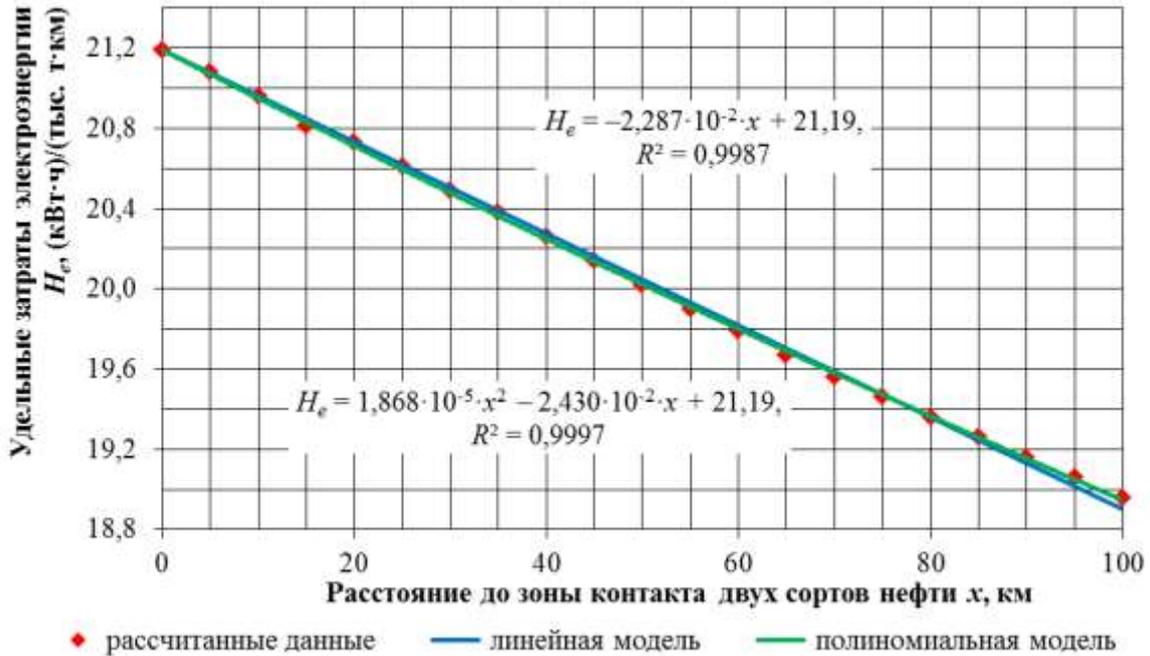


Рис. 2. Динамика изменения удельных затрат электроэнергии от расстояния до зоны контакта разнородных нефтей

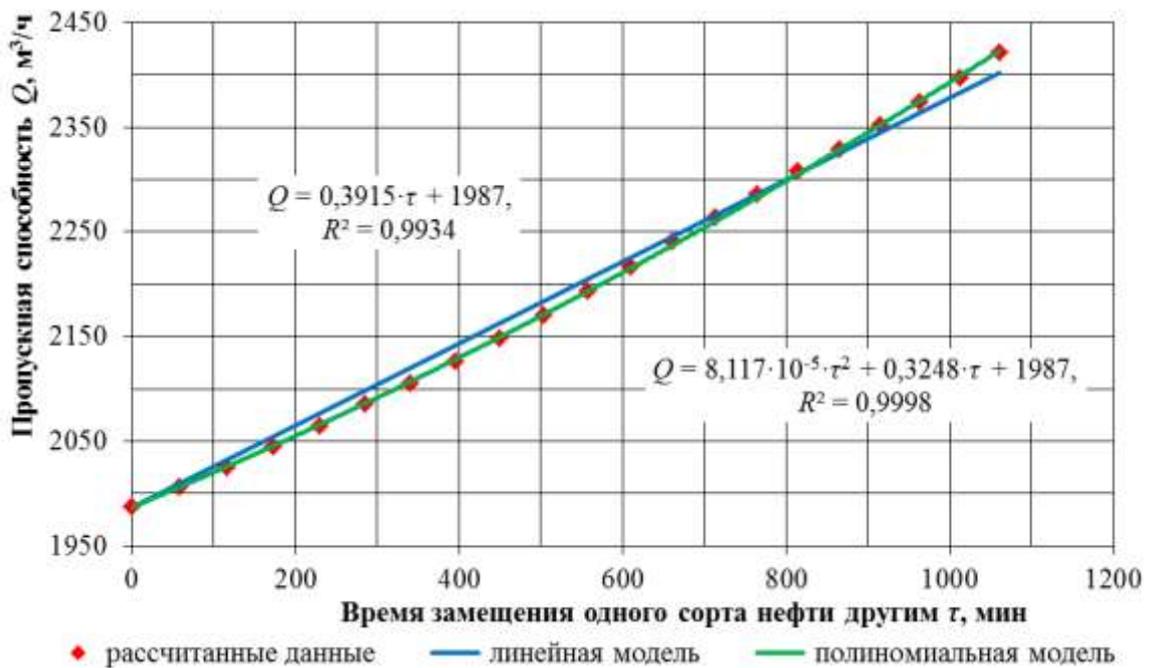


Рис. 3. Динамика изменения пропускной способности нефтепровода от времени замещения первого сорта нефти другим

Проведенные исследования показали, что в процессе последовательной перекачки пропускная способность нефтепровода и энергоэффективность его эксплуатации не являются постоянными

величинами, а заметно изменяются при перемещении зоны контакта разнородных нефтей по длине трубопровода.

При эксплуатации магистральных нефтепроводов нередко ставятся условия обеспечения постоянных объемов перекачки транспортируемых продуктов. Выполнение указанного условия упрощает процессы приемки каждого сорта нефти в конечном пункте нефтепровода, обеспечивает раскладку смеси нефтей в резервуары, позволяет равномерно подавать принятые нефти на нефтеперерабатывающие заводы.

Чтобы добиться постоянного расхода нефти в процессе замещения одного сорта другим при традиционной технологии последовательной перекачки необходимо предусмотреть дросселирование, при этом регулирующее устройство должен изменять настройки по определенному закону. Такая технология связана со значительными непродуктивными потерями энергии на транспортировку нефти.

Альтернативой может быть применение на НПС насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом. Изменением частоты вращения вала насоса может так скорректировать его напорную характеристику, что обеспечится постоянный расход в нефтепроводе в процессе замещения одного сорта нефти другим и исчезнет необходимость в вынужденном дросселировании. Это повысит энергоэффективность процесса последовательной перекачки разнородных нефтей.

Для доказательства этого положения нами смоделирован процесс вытеснения первого сорта нефти вторым с модельного нефтепровода в случае оснащения одного из насосов НПС частотно-регулируемым приводом. Все остальные исходные данные аналогичны приведенным выше.

Для каждого положения зоны контакта разнородных нефтей с помощью компьютерной программы методом последовательных приближений определяли частоту вращения вала насоса, обеспечивающую постоянное значение расхода нефти в нефтепроводе $1987 \text{ м}^3/\text{ч}$. После этого

вычисляли удельные затраты электроэнергии на транспортирование нефтей.

По результатам исследований оформлены рисунки 4 и 5. Рисунок 4 иллюстрирует зависимость частоты вращения вала насоса, оснащенного соответствующими устройствами, от времени замещения первого сорта нефти вторым в нефтепроводе. В рассматриваемом случае для обеспечения постоянного расхода при последовательном перекачке двух сортов нефтей необходимо уменьшать во времени (мин) частоту вращения вала насоса (об/мин) по такому закону

$$n = 2918 - 0,5358 \cdot \tau - 1,753 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^2. \quad (14)$$

Уменьшение частоты вращения вала насоса не только обеспечит постоянный расход нефти в нефтепроводе, но и исключит вынужденное дросселирование, а также уменьшит затраты электроэнергии на транспортировку нефти. Рисунок 5 демонстрирует динамику изменения удельных затрат электроэнергии на последовательную перекачку нефтей по модельному нефтепроводу.

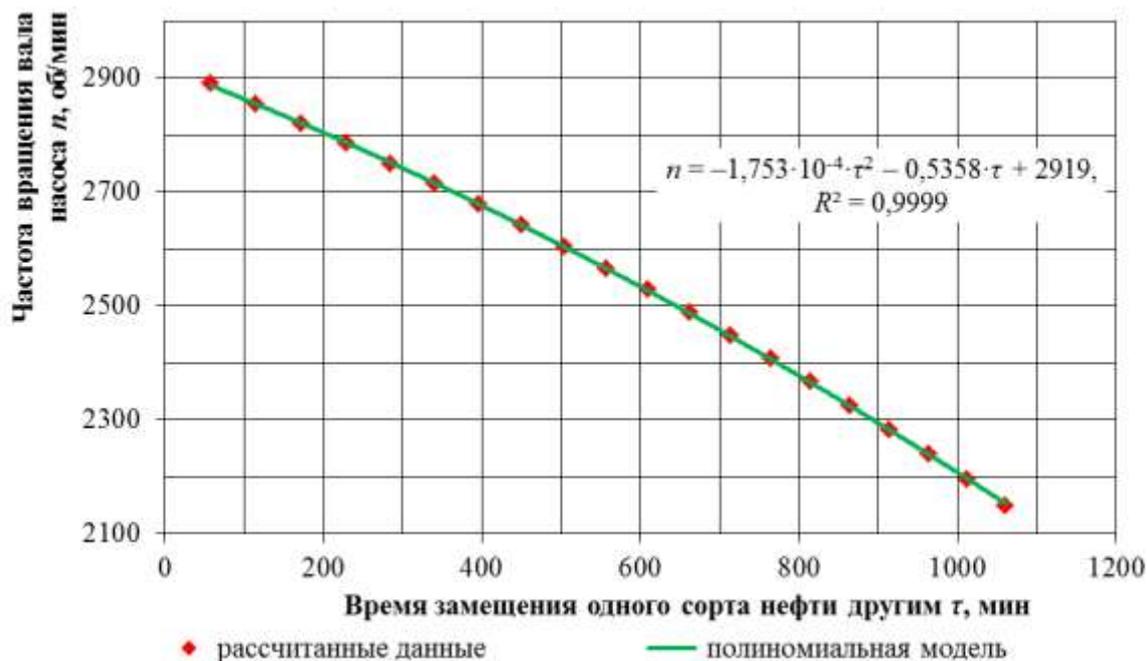


Рис. 4. Динамика изменения частоты вращения вала насоса от времени замещения первого сорта нефти другим

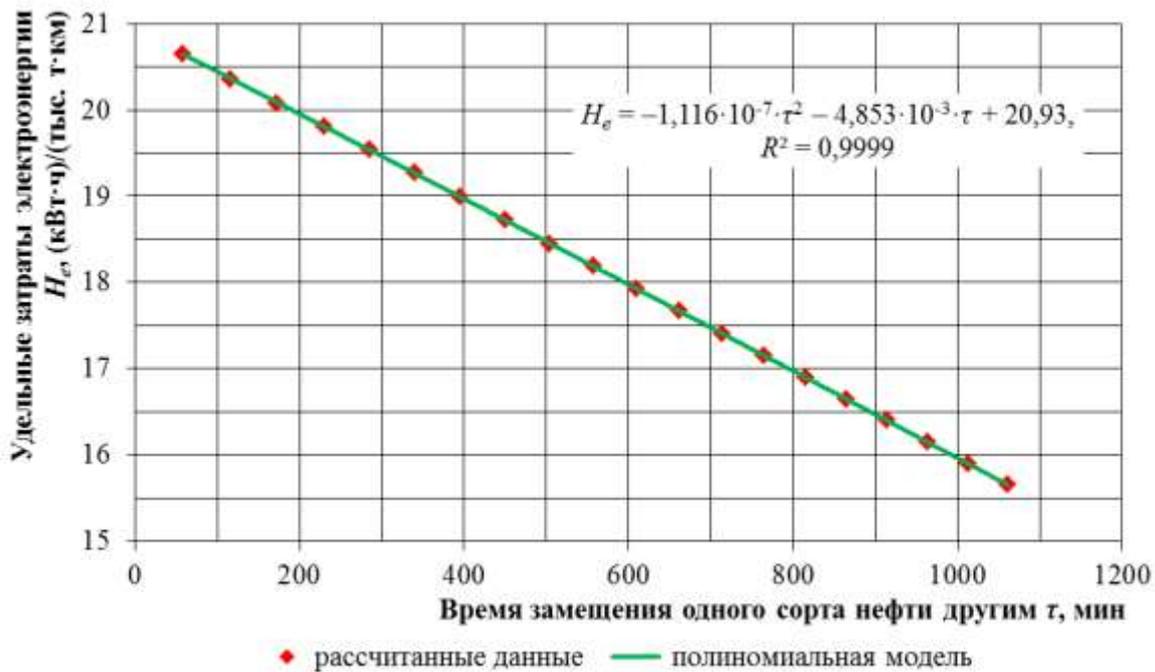


Рис. 5. Динамика изменения удельных затрат электроэнергии от времени замещения первого сорта нефти другим

Определим экономический эффект от внедрения насосного агрегата с регулируемым приводом при последовательной перекачке двух сортов нефти по модельному нефтепроводу. При применении традиционной технологии усредненные, по времени замещения в трубопроводе первого сорта нефти вторым, удельные затраты электроэнергии составляют $H_{e_1} = 20,04$ (кВт·ч)/(тыс.т·км), продолжительность процесса $\tau = 17,68$ ч, масса транспортируемой нефти за этот период $M_1 = 33,40$ тыс.т, затраты электроэнергии на транспортировку нефтей $W_1 = 66930$ кВт·ч. В случае применения на НПС насосного агрегата с регулируемым приводом усредненные, по времени замещения в трубопроводе первого сорта нефти вторым, удельные затраты электроэнергии $H_{e_2} = 18,24$ (кВт·ч)/(тыс.т·км), масса транспортируемой нефти за этот период $M_2 = 30,21$ тыс. т, расход электроэнергии на транспортировку нефтей $W_2 = 55110$ кВт·ч. Экономия затрат электроэнергии за один цикл последовательной перекачки двух сортов нефти, приведенная к объему транспортировки $M_2 = 30,21$ тыс. т

составит величину, равную $\Delta W = 10730$ кВт·ч. При стоимости электроэнергии 2 грн/(кВт·ч) экономия за цикл составит 21,45 тыс. грн. При числе циклов последовательной перекачки нефтей различных сортов $C = 50$ экономия средств может достичь 1,070 млн. грн/год.

Выводы. Методом математического моделирования установившегося гидродинамического процесса совместной работы системы НПС-трубопровод установлено, что перемещения зоны контакта двух сортов нефти по нефтепроводу вызывает существенное, до 20 %, изменение его пропускной способности. Зависимость пропускной способности нефтепровода от положения зона контакта последовательно перекачиваемых нефтей близка к линейной.

Перемещение зоны контакта двух сортов нефти по нефтепроводу сопровождается заметным, до 10 %, изменением удельных затрат электроэнергии на их транспортировку. Зависимость энергоемкости от положения зоны контакта нефтей также близка к линейной.

Аналогичный характер имеют полученные зависимости пропускной способности нефтепровода и энергоемкости от времени замещения, отсчитываемого от начала закачки партии второго сорта нефти в линейную часть нефтепровода.

Показано, что изменение вращающейся частоты вала насоса по определенному закону способно обеспечить постоянный расход нефти в нефтепроводе в процессе замещения одного сорта нефти другим, при этом исчезнет необходимость в дросселировании потока нефти.

Зависимость необходимой частоты вращения вала насоса от времени замещения двух сортов нефти в нефтепроводе адекватно описывается полиномом второй степени.

Применение насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом при последовательной перекачке нефтей разных сортов способно на

10-15 % снизят затраты электроэнергии, что повысит энергоэффективность трубопроводного транспорта нефти.

Литература

1. Середюк М. Д. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов / М. Д. Середюк, Й. В. Якимів, В. П. Лісафін: [підручник для ВНЗ]. Івано-Франківськ. 2002. 517 с.
2. Коршак А. А. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа / А. А. Коршак, А. М. Нечваль: [учебник для вузов]. Уфа: ДизайнПолиграфСервис. 2005. 515 с.
3. Середюк М. Д. Яновський Вибір енергоефективних режимів експлуатації нафтотранспортних систем України за їх неповного завантаження // Нафтогазова галузь України. 2017. № 3. С. 29-33.
4. Люта Н. В., Середюк М. Д. Дослідження впливу нестационарності на пропускну здатність нафтопроводу при послідовному перекачуванні різносортих нафт // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2001. № 1. С.53-58.
5. Середюк М. Д, Івоняк А. С. Гідравлічні розрахунки процесу витіснення нафти з першої нитки нафтопроводу Лисичанськ-Тихорецьк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2003. № 3(8). С.103-108.
6. Середюк М. Д. Івоняк А. С. Методика розрахунку режимних та енергетичних параметрів роботи магістральних // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2002. № 1(2). С. 50-54.
7. Середюк М. Д. Методика нормування витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2002. № 2(3). С. 57-60.

8. СТП 320.001.148429.003-2002. Методика нормування питомих витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами ДАТ «ПДММН» /М. Д. Середюк, В. П. Лісафін, Й. В. Якимів та ін. [Чинний від 01.01.2002]. К.: Укртранснафта. 2001. 51 с.
9. Григорський С. Я., Середюк М. Д. Математичне моделювання характеристик нафтових насосів за зміни обертової частоти // Міжнародний науковий журнал. 2017. Т.1, № 1 (23). С. 99-104.
10. Середюк М. Д, Григорський С. Я. Енергоефективність застосування насосів з регульованим приводом за неповного завантаження нафтопроводу // Міжнародний науковий журнал. 2017. Т.1, № 2 (24). С. 165-172.