

УДК 628.15.075

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-129-134

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА
ОТ ОБЪЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМЕСИ НЕФТЕПРОДУКТОВ
ПРИ ИХ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ
МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКИ ПРЯМЫМ КОНТАКТИРОВАНИЕМ**

**А.Н. ВОРОНИН, А.Д. КОНДРАТЮК, канд. экон. наук, доц. С.В. БОСЛОВЯК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

Проанализировано отношение потребляемой мощности к количеству технологической смеси, образующейся в местах контакта разноименных или разносортных нефтепродуктов при транспортировании по магистральному нефтепродуктопроводу методом последовательной перекачки с использованием скорости перекачки в качестве промежуточного параметра. Расчет предлагается выполнить последовательно в три этапа: 1) определить зависимость объема технологической смеси от скорости движения нефтепродукта, что позволяет оценить возможность раскладки технологической смеси по резервуарам на конечном пункте в соответствии с объемом резервуарного парка; 2) определить зависимость потребляемой мощности от скорости движения нефтепродукта, что создает условия для оценивания энергетических затрат транспортирования нефтепродуктов; 3) определить зависимость потребляемой мощности от объема технологической смеси, что информативно помогает в выборе оптимального баланса между объемом смеси и потребляемой мощностью с возможностью снижения скорости перекачки ниже нормативно рекомендуемых значений. Предложенный подход по определению зависимости потребляемой мощности от количества технологической смеси представляет собой удобный инструмент для одновременного оценивания двух параметров и нахождения оптимального режима перекачки.

Ключевые слова: последовательная перекачка, нефтепродуктопровод, нефтепродукты, смесеобразование, энергопотребление.

Введение. В результате переработки нефти с установок нефтеперерабатывающих заводов одновременно выходит множество видов нефтепродуктов, из которых значительную часть составляют светлые. В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом светлые нефтепродукты транспортируют методом последовательной перекачки прямым контактированием. Сооружение отдельного трубопровода для каждого из выпускаемых светлых нефтепродуктов было бы нерентабельно, поэтому большинство из них перегоняют по одному и тому же трубопроводу один за другим.

На головной станции трубопровода нефтепродукты закачивают из отдельных резервуаров, транспортируют партиями по трубопроводу, раздают по пути промежуточным потребителям, подключенным к магистральному трубопроводу через отводы, а в пунктах приема-сдачи принимают из трубопровода в отдельные резервуары [2]. При этом каждая партия вытесняет предыдущую и в свою очередь вытесняется последующей. Получается так, что нефтепродуктопровод по всей своей протяженности заполнен партиями различных нефтепродуктов, вытянутых в цепочку и контактирующих друг с другом в местах, где заканчивается одна партия и начинается другая [1].

Последовательная перекачка разносортных нефтепродуктов по трубопроводам осуществляется циклами. Каждый цикл состоит из нескольких партий нефтепродуктов, располагающихся в определенной последовательности. Порядок следования партий нефтепродуктов в цикле определяется таким образом, чтобы каждый нефтепродукт контактировал с двумя другими, наиболее близкими к нему по своим свойствам.

При последовательной перекачке нефтепродуктов прямым контактированием в местах контакта партий различных марок образуется смесь исходных нефтепродуктов. Причиной смесеобразования является неравномерное вытеснение одной жидкости другой. Скорость частиц жидкости на оси трубопровода больше, чем у его стенок, поэтому клин позади идущей жидкости внедряется в жидкость, идущую впереди, а процессы турбулентного перемешивания размешивают вытесняющий нефтепродукт по сечению трубопровода. Образование смеси в местах контакта соседних партий органически присуще данному методу транспортировки нефтепродуктов и является основной особенностью последовательной перекачки прямым контактированием. Такая особенность объясняется физическими процессами, сопровождающими вытеснение одной жидкости другой, и не может быть полностью устранена.

В течение всего времени перекачки смесь нефтепродуктов в зоне контакта последовательно движущихся партий постоянно возрастает, образуя плавный переход от одного нефтепродукта к другому. Темпы этого возрастания не одинаковы. Сначала, когда протяженность зоны смеси мала и переход от одного нефтепродукта к другому происходит на небольшом расстоянии, смесь нарастает быстро, но по мере увеличения протяженности смеси, последняя играет роль буфера между нефтепродуктами, и темпы роста смеси замедляются¹.

¹ СО-06-16-АКТНП-003-2004 Стандарт организации. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам системы ОАО «АК «Транснефтепродукт»» методом последовательной перекачки. – М., 2005. – 23 с.

При последовательной перекачке бензинов разных сортов (марок) контактирующие пары подбираются с наименьшей разницей октановых чисел, а также из условия минимальной разности температур вспышки, а при одинаковой разности температур вспышек – из условия минимальной разности содержания серы.

В пунктах приема-сдачи магистрального нефтепродуктопровода с целью восстановления качества перекачиваемых последовательно нефтепродуктов осуществляется равномерное распределение (раскладка) смеси, образовавшейся при транспортировке нефтепродуктов, по партиям этих нефтепродуктов. Сущность раскладки состоит в добавлении некоторого количества смеси к нефтепродуктам, из которых она образовалась, осуществляемой за счет имеющегося у нефтепродуктов запаса качества с обеспечением сохранности в допустимых стандартами пределах показателей качества нефтепродуктов, к которым добавляется смесь.

Для уменьшения смесеобразования при транспортировке нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием необходимо вести ее с максимально высокими скоростями в условиях развитого турбулентного режима при числе Рейнольдса, равным значению 25 000 и выше. В таких режимах распределение скоростей жидкости в сечении трубопровода происходит более равномерно, полнота вытеснения одним нефтепродуктом другого увеличивается, а количество образующейся смеси уменьшается. С целью уменьшения смесеобразования рекомендуется устанавливать режим перекачки нефтепродуктов со скоростью потока не менее $0,75 \text{ м/с}^2$.

Основная часть. При эксплуатации нефтепродуктопровода может возникать необходимость снижения маршрутных объемов партий, транспортируемых по одному трубопроводу методом последовательной перекачки, в связи с изменением спроса на поставку нефтепродуктов на конечном пункте. В таком случае режим транспортирования претерпит изменение, при котором скорость движения партий нефтепродуктов будет находиться ниже значения, рекомендованного техническими нормативными правовыми актами для минимизации объема технологической смеси. Это изменение вызовет увеличение объема технологической смеси в зоне контакта партий нефтепродуктов, что может создать условия для невозможности раскладки всего объема технологической смеси по резервуарам на конечном пункте. В то же время уменьшение производительности нефтепродуктопровода приведет к снижению мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, и, соответственно, снижению финансовых затрат за электроэнергию.

Оператор магистрального нефтепродуктопровода в условиях необходимости транспортирования партий нефтепродуктов ниже рекомендуемых скоростей перекачки может быть заинтересован в нахождении оптимального экономического баланса между объемом технологической смеси и мощностью, потребляемой магистральным насосом. Для нахождения такого баланса необходимо построить графическую зависимость мощности, потребляемой магистральным насосом, от объема технологической смеси. Поскольку не существует готового математического выражения, обобщающего зависимость потребляемой мощности от количества технологической смеси, то с целью удобства реализации получение такой графической зависимости предлагается выполнить последовательно в три этапа, используя скорость транспортирования партий нефтепродуктов в качестве промежуточного параметра.

На первом этапе следует произвести расчет с определением зависимости объема технологической смеси от скорости движения нефтепродукта, что позволит оператору магистрального нефтепродуктопровода оценить возможность раскладки технологической смеси по резервуарам на конечном пункте в соответствии с существующим объемом резервуарного парка.

В рамках первого этапа вначале необходимо пересчитать плотность нефтепродуктов на расчетную температуру t по формуле [3]

$$\rho_t = \rho_{15} - \xi(t - 20), \quad (1)$$

где ρ_t – плотность при температуре t , кг/м^3 ;

ρ_{15} – плотность при $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

ξ – температурная поправка, $\text{кг/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

t – расчетная температура, $^\circ\text{C}$.

При последовательной перекачке скорость движения нефтепродуктов по трубопроводу будет задаваться самым вязким нефтепродуктом, в случае перекачки по трубопроводу с несколькими перекачивающими станциями. При условии осуществления транспортирования дизельных топлив с бензинами наиболее вязким нефтепродуктом является дизельное топливо.

Расчет секундной пропускной способности нефтепродуктопровода для заданных режимов перекачки выполняется как

$$Q_c = \frac{G}{24 \cdot 3600 \cdot \rho}, \quad (2)$$

где G – массовый годовой расход, млн т/год.

² СО-06-16-АКТНП-003-2004 Стандарт организации. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам системы ОАО «АК «Транснефтепродукт»» методом последовательной перекачки. – М., 2005. – 23 с.

Скорость движения нефтепродуктов в трубопроводе определяется по формуле

$$v = \frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot d^2}, \quad (3)$$

где d – внутренний диаметр, м.

Для определения объема смеси при последовательной перекачке методом прямого контактирования продуктов без учета первичной смеси воспользуемся формулой Сьенитцера–Марона [2]

$$V_c = 1000 \cdot (\lambda_1^{1,8} + \lambda_2^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,43} \cdot V_{тр}, \quad (4)$$

где L – протяженность МНПП, м;

λ_1 и λ_2 – коэффициенты гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам контактирующих нефтепродуктов для данной скорости транспортировки v ;

$V_{тр}$ – объем внутренней полости трубопровода, м³, от начального сечения до сечения $x = L$, которое достигла середина зоны смеси.

Для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления необходимо определить режим движения жидкости, для чего следует рассчитать число Рейнольдса режима движения нефтепродуктов по формуле [3]

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

где v – скорость перекачки, м/с;

ν – кинематическая вязкость рассчитываемого нефтепродукта, м²/с.

Движение нефтепродуктов в магистральном трубопроводе обычно происходит в турбулентном режиме в зоне смешанного трения.

Коэффициент гидравлического сопротивления для зоны смешанного трения определяется [3] как

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{d}{d}\right)^{0,25}. \quad (6)$$

Суммарный объем смеси нефтепродуктов состоит из объема первичной смеси и объема смеси, образующейся при движении в трубе. Образование первичной смеси происходит при смене партий перекачиваемых продуктов, во время которой начинает закрываться задвижка резервуара партии первого нефтепродукта и открываться задвижка резервуара партии второго нефтепродукта, в результате чего некоторое время в трубопровод поступают одновременно оба нефтепродукта. Объем первичной смеси можно рассчитать:

$$V_{пс} = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot t, \quad (7)$$

где t – время открытия/закрытия задвижки, с.

Суммарный объем смеси рассчитывается как [1]

$$V_{сс} = \left(V_c^{1,75} + V_{пс}^{1,75}\right)^{0,57}, \quad (8)$$

где V_c – объем смеси образующийся при движении в трубе;

$V_{пс}$ – объем первичной смеси.

На втором этапе необходимо выполнить расчет с определением зависимости мощности, потребляемой насосным агрегатом, от скорости движения нефтепродукта, что для оператора магистрального нефтепродуктопровода создаст условия для оценки финансовых затрат в связи с изменениями производительности трубопровода.

Мощность, потребляемая насосным агрегатом [3]:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_n \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{эл}}, \quad (9)$$

где Q – секундный расход, м³/с;

H – напор, развиваемый насосом, м;

η_n – коэффициент полезного действия насоса;

$\eta_{мех}$ – коэффициент полезного действия механической передачи, принимается равным 0,99 [3];

$\eta_{эл}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Гидравлическую характеристика насоса можно определить как

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 - b \cdot Q^2, \quad (10)$$

где H – напор, создаваемый насосом;
 Q – производительность насоса;
 a, b – коэффициенты аппроксимации;
 n – частота оборотов ротора насоса;
 n_n – номинальная частота оборотов ротора насоса.
 Коэффициент полезного действия электродвигателя [3]

$$\eta_{эл} = \left(1 + \frac{(1-\eta_{ном})}{2 \cdot \eta_{ном} \cdot k_3} \cdot (1 + k_3^2)\right)^{-1}, \quad (11)$$

где $\eta_{ном}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя при номинальной нагрузке, принимается равным 0,96 [4];
 k_3 – коэффициент загрузки электродвигателя [3]

$$k_3 = \frac{N_n}{N_{ном}}, \quad (12)$$

где N_n – мощность на валу электродвигателя.

При уменьшении объемов перекачки ниже проектных номинальных значений коэффициент полезного действия магистральных насосов снижается. В настоящее время в практике эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов для предотвращения снижения коэффициента полезного действия насосов при изменении режима перекачки нашло применение использование частотно-регулируемого привода. Применение частотного преобразователя для регулирования частоты вращения роторов магистральных насосов имеет ряд существенных преимуществ [5]:

- коэффициент полезного действия частотного преобразователя имеет высокие значения в рабочем диапазоне и составляет 96%;
- его использование не приводит к увеличению пусковых токов электродвигателя;
- частотный преобразователь уменьшает нагревание электродвигателя, а также увеличивает срок его службы;
- частотный преобразователь имеет встроенную систему защиты от перегрузок;
- его можно использовать при управлении группой насосов, что снижает затраты на оборудование и его установку.

Обычно коэффициент полезного действия насоса зависит от его подачи, однако, при использовании частотного преобразователя коэффициент полезного действия также зависит от частоты вращения ротора насоса. Зависимость коэффициента полезного действия насоса от этих двух параметров можно уравнением [4]

$$\eta = \eta_n - \left(\frac{Q}{Q_n} - \frac{n}{n_n}\right)^2 \cdot \eta_n \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2, \quad (13)$$

где η_n – максимальное значение коэффициента полезного действия;
 Q – подача насоса;
 Q_n – подача насоса, соответствующая максимальному коэффициенту полезного действия (при $n_{ном} = 3000$ об/мин).

Использование частотного преобразователя позволяет сохранить коэффициент полезного действия на высоком уровне в широком диапазоне перекачки из-за смещения максимального показателя коэффициента полезного действия при изменении частоты вращения ротора насоса. Это позволяет повысить энергоэффективность перекачки и дает ряд преимуществ по сравнению с другими способами регулирования работы магистральных насосов [5].

В качестве примера описанного подхода получения зависимости мощности, потребляемой насосным агрегатом, от количества технологической смеси нефтепродуктов произведем соответствующий расчет для одного перегона между промежуточными перекачивающими станциями длиной 100 км трубопровода диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм, по которому магистральным насосом марки НМ 1250-260 методом последовательной перекачки прямым контактированием транспортируется дизельное топливо зимнее (ДТз) и автомобильный бензин с октановым числом 92 (АИ-92), для оценивания потребляемой мощности и объема смеси при снижении скорости перекачки на 20% меньше минимального рекомендуемого значения (0,75 м/с).

Результат первого этапа расчета определения зависимости объема технологической смеси нефтепродуктов от скорости их движения показан на рисунке 1. Результат второго этапа расчета определения мощности,

потребляемой магистральным насосным агрегатом, от скорости их движения – на рисунке 2. Результат третьего этапа расчета определения мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, от объема технологической смеси нефтепродуктов – на рисунке 3.

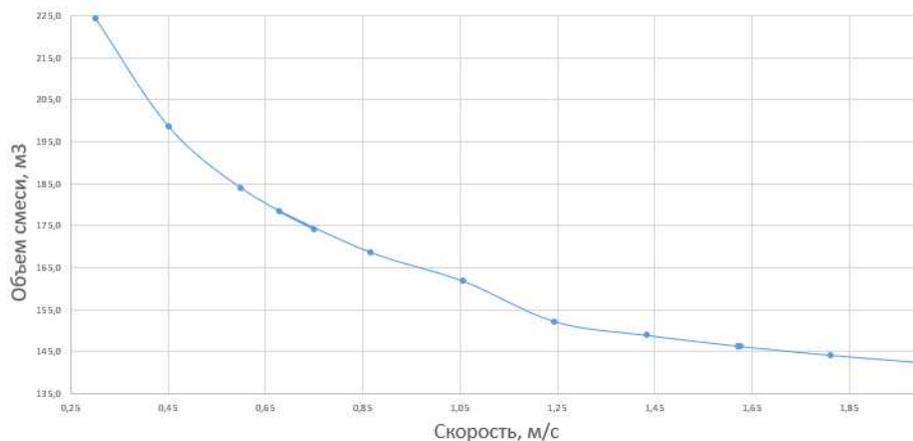


Рисунок 1. – График зависимости объема смеси от скорости при контакте нефтепродуктов

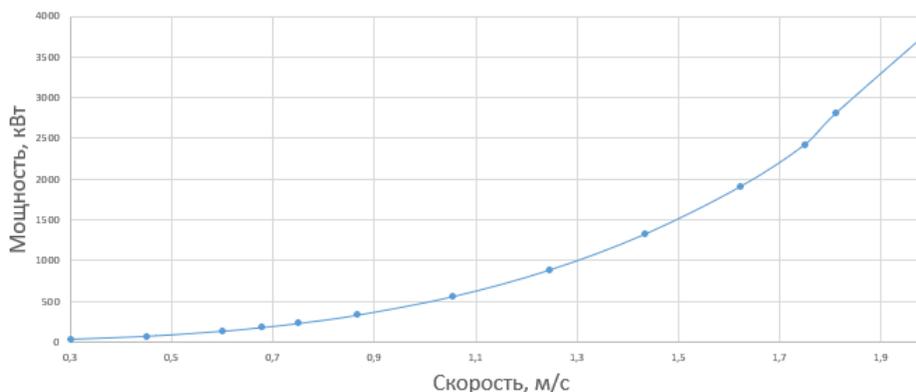


Рисунок 2. – График зависимости мощности, потребляемой насосом, от скорости

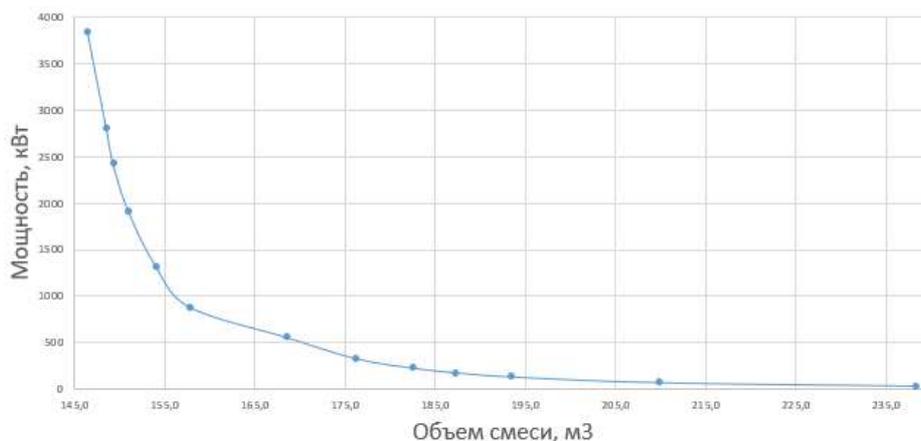


Рисунок 3. – График зависимости мощности, потребляемой насосом, от объема смеси нефтепродуктов

Согласно расчетам снижение минимально рекомендуемой скорости транспортирования нефтепродуктов (0,75 м/с) на 20% до 0,6 м/с приводит к увеличению объема технологической смеси нефтепродуктов на 6% и снижению потребляемой мощности на 42%, что позволяет оператору магистрального нефтепродуктопровода

произвести одновременное оценивание выгоды снижения энергетических затрат и возможности раскладки технологической смеси на конечном пункте при наличии необходимого объема резервуарного парка.

Заключение. При эксплуатации нефтепродуктопровода могут складываться штатные ситуации, при которых необходимо проводить перекачку разноразных или разноименных нефтепродуктов ниже минимально допустимых скоростей, рекомендуемых техническими нормативными правовыми актами во избежание излишнего смесеобразования. Увеличение объема технологической смеси при новом режиме транспортирования может создать условия для невозможности раскладки всего объема смеси по резервуарам на конечном пункте, для чего изначально необходимо проводить оценку целесообразных скоростей перекачки. В то же время уменьшение производительности нефтепродуктопровода приведет к снижению мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, и, соответственно, снижению затрат за электроэнергию. В таком случае предложенный подход по определению зависимости потребляемой мощности от количества технологической смеси представляет собой удобный инструмент для одновременного оценивания двух параметров и нахождения оптимального режима перекачки ниже рекомендуемых скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов: учеб.-практ. пособие по вопросам теории и расчета / И.Т. Ишмухаметов, С.Л. Исаев, М.В. Лурье и др.; под общ. ред. проф. М.В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 1999. – 300 с.
2. Губин В.Е., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепродуктопроводов. – М.: Недра, 1968. – 156 с.
3. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.М. Шаммазов и др. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. – 658 с.
4. Шабанов В.А., Шарипова С.Ф., Ахметгареев А.А. Влияние частоты вращения на КПД магистрального насоса // Электротехн. и информ. комплексы. – 2013. – № 9(4). – С. 13–19.
5. Шарнина Г.С., Щур С.В. Экономическая эффективность применения ЧРП для корректировки давления роторов магистральных насосов нефтеперекачивающих станций // Neftegaz.RU. – 2022 – № 12.

REFERENCES

1. Ishmukhametov, I.T., Isaev, S.L., Lur'e, M.V. & Makarov, S.P. (1999). *Truboprovodnyi transport nefteproduktov: uchebno-prakticheskoe posobie po voprosam teorii i rascheta*. Moscow: Neft' i gaz. (In Russ.)
2. Gubin, V.E., Novoselov, V.F. & Tugunov, P.I. (1968). *Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteproduktoprovodov*. Moscow: Nedra. (In Russ.)
3. Tugunov, P.I., Novoselov, V.F., Shammazov, A.M. & Korshak, A.A. (2002). *Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov*. Ufa: DizainPoligrafServis. (In Russ.)
4. Shabanov, V.A., Sharipova, S.F. & Akhmetgareev, A.A. (2013). Vliyanie chastoty vrashcheniya na kpd magistral'nogo nasosa [Effect of Speed on the Efficiency of the Main Pump]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы [Electrical and data processing facilities and systems]*, 9(4), 13–19. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Shamina, G.S. & Shchur, S.V. (2022). Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya ChRP dlya korrektyrovki davleniya rotorov magistral'nykh nasosov nefteperekachivayushchikh stantsii. *Neftegaz.RU*, (12). (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF POWER CONSUMPTION OF THE MAIN PUMPING UNIT ON THE VOLUME OF TECHNOLOGICAL MIXTURE OF PETROLEUM PRODUCTS DURING THEIR TRANSPORTATION BY THE METHOD OF SEQUENTIAL PUMPING WITH DIRECT CONTACT

A. VORONIN, A. KONDRATUK, S. BOSLOVYAK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article is devoted to identifying the relationship between power consumption and the amount of process mixture formed at the points of contact of different types of petroleum products during transportation through a main petroleum product pipeline using the method of sequential pumping with the fluid speed as an intermediate parameter. At the first stage, it is necessary to determine the dependence of the volume of the process mixture on the speed of movement of the petroleum product, which allows assessing the possibility of distributing the process mixture into tanks at the final point in accordance with the volume of the tank farm. At the second stage, the dependence of power consumption on the speed of movement of the petroleum product is determined, which creates conditions for estimating the energy costs of transporting petroleum products. At the third stage, the dependence of power consumption on the volume of the process mixture is determined, which informatively helps in choosing the optimal balance between the volume of the mixture and power consumption with the possibility of reducing the pumping speed below the normatively recommended values. The proposed approach for determining the dependence of power consumption on the amount of process mixture is a convenient tool for simultaneous assessment of two parameters and finding the optimal pumping mode.

Keywords: sequential pumping, oil pipeline, petroleum products, mixture formation, energy consumption.