

УДК 622.691.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4736
Шифр специальности ВАК: 2.8.5
Научная статья

Сравнительный анализ методов расчета смеси при последовательной перекачке нефти и нефтепродуктов с учетом влияния первичной технологической смеси

И.М. Ванчугов¹, К.С. Резанов¹, Р.А. Шестаков²✉

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва

² Калининградский Государственный Технический Университет, Россия, г. Калининград

✉ roman.shestakov@klgtu.ru

Аннотация. Актуальность. Последовательная перекачка является главным методом транспортировки больших объемов нефтепродуктов, что является ее главным преимуществом, так как отпадает необходимость в строительстве отдельных нефтепродуктопроводов. Однако у данного метода существует один серьезный недостаток – образование смеси нефтепродуктов в зоне прямого контакта, что является трудно прогнозируемым процессом. Объем и длину смеси необходимо понимать для последующих действий по их раскладке, чтобы обеспечивать необходимое товарное качество нефтепродуктов, так как это будет влиять на их полезное использование, например, в качестве моторных топлив. **Цель:** исследование различных отечественных и иностранных методик и подходов к оценке объема первичной смеси, оценка преимуществ и недостатков того или иного метода, проверка точности расчетных объемов смеси с реальными данными, вывод эмпирической зависимости для реальных данных, сравнение результатов расчета и рекомендации по оценке объема первичной смеси. **Методы:** математическое моделирование процесса смесеобразования по различным методикам, сравнительный анализ полученных данных, экстраполирование функции по реальным данным с технологического трубопровода Самара–Брянск. **Результаты.** Проведен анализ существующих подходов и методик оценки объема образующейся смеси нефтепродуктов, проведено сравнительное математическое моделирование. Для оценки эффективности различных методик было проведено сравнение с реальными данными трубопровода Самара–Брянск. В рамках исследования было проведено сравнение по трем моделям процесса смесеобразования: без учета первичной технологической смеси, с учетом первичной технологической смеси, с учетом первичного объема технологической смеси через метод эквивалентных длин.

Ключевые слова: последовательная перекачка нефтепродуктов, смесеобразование, объем первичной смеси, первичная смесь, математическое моделирование

Для цитирования: Ванчугов И.М., Резанов К.С., Шестаков Р.А. Сравнительный анализ методов расчета смеси при последовательной перекачке нефти и нефтепродуктов с учетом влияния первичной технологической смеси // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 96–108. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4736

UDC 622.691.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4736
Scientific paper

Comparative analysis of methods for mixture calculating during sequential pumping of oil and petroleum products taken into account the primary technological mixture impact

I.M. Vanchugov¹, K.S. Rezanov¹, R.A. Shestakov^{2✉}

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

² Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

✉ roman.shestakov@klgtu.ru

Abstract. Relevance. Sequential pumping is the main method of transportation of large volumes of oil products, which is its main advantage, as there is no need to build separate oil product pipelines. However, this method has one serious disadvantage – the formation of a mixture of petroleum products in the zone of direct contact, which is a difficult to predict process. The volume and length of the mixture must be understood for subsequent actions on their distribution to ensure the required marketable quality of petroleum products, as this will affect their beneficial use, for example, as motor fuels. **Aim.** To study various domestic and foreign methods and approaches to estimate primary mixture volume, evaluate the advantages and disadvantages of this or that method, verify the accuracy of calculated mixture volumes with real data, derive empirical dependence for real data, compare the calculation results and recommendations for estimation of primary mixture volume. **Methods.** Mathematical modeling of mixing using different methods, comparative analysis of the obtained data, extrapolation of the function using real data from the Samara–Bryansk technological pipeline. **Results.** The work analyzes existing approaches and methods for estimating the volume of the resulting mixture of petroleum products, and conducts comparative mathematical modeling. To evaluate the effectiveness of various methods, a comparison was made with the real data from the Samara–Bryansk pipeline. As part of the study, a comparison was made using three models of the mixture formation: without taking into account the primary technological mixture, taking into account the primary technological mixture, taking into account the primary volume of the technological mixture through the method of equivalent lengths.

Keywords: sequential pumping of petroleum products, mixture formation, volume of primary mixture, primary mixture, mathematical modeling

For citation: Vanchugov I.M., Rezanov K.S., Shestakov R.A. Comparative analysis of methods for mixture calculating during sequential pumping of oil and petroleum products taken into account the primary technological mixture impact. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 96–108. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4736

Введение

Перекачка нефтепродуктов по трубопроводам имеет отличия от транспортировки нефти в силу разных технологических процессов [1, 2]. Если нефть в основном транспортируют одним сплошным потоком жидкости, то транспорт нефтепродуктов в основном осуществляется при помощи последовательной перекачки с прямым контактом, которая включает несколько партий разных по физико-химическим свойствам жидкостей, закачиваемых в трубопровод в определенных последовательностях и в таком виде транспортируемых до места их разделения. При этом масса одной партии нефтепродукта может составлять несколько тысяч тонн.

Каждая партия нефтепродукта вытесняет идущую перед ней и вытесняется предыдущей. Необходимо отметить, что данная технология имеет по-

всеместное использование в силу своих преимуществ: относительной простоты технологических процессов, отсутствия необходимости строительства отдельных трубопроводов под каждый нефтепродукт, существенного опыта эксплуатации и т. д. Однако стоит учесть один серьезный недостаток: из-за непосредственного контакта нефтепродуктов между собой происходит образование их смеси, которая является некондиционной, а следовательно, данный объем смеси относят к потерям. Однако для решения данной проблемы была разработана методика раскладки смеси по резервуарам с чистыми нефтепродуктами, которые имеют заводской запас по качеству. Но стоит отметить, что при этом снижается качество нефтепродуктов в конечной точке их разделения по отдельным резервуарам [3, 4]. Данная проблема имеет довольно острый характер, так как, например, качество транспорти-

руемых моторных топлив (бензин, керосин), используемых в двигателях внутреннего сгорания, регламентируется достаточно жесткими требованиями, поэтому отклонение от них чревато выводом партии нефтепродукта из обращения из-за некачественных характеристик [5, 6]. Здесь также важно отметить, что смесеобразование схожих по физико-химическим свойствам нефтепродуктов представляет меньшую угрозу по сравнению с получением смеси значительно отличных друг от друга нефтепродуктов. В связи с этим последовательно расположенные партии должны формироваться с пониманием неизбежного последующего смесеобразования и необходимостью снижения последствий от него [2].

Процесс образования смеси в области контакта перекачиваемых нефтепродуктов при вытеснении одного из них другим обусловлен физическими процессами взаимодействия различных потоков в трубопроводе, так как скорости жидкости в различных точках сечения трубопровода не одинаковы (у стенок трубы они приближаются к нулю, на оси максимальны), поэтому вытеснение впереди идущего нефтепродукта последующим происходит более интенсивно в центре трубы, чем у ее внутренней поверхности. Данный процесс называется конвекцией, или конвективной диффузией, с перемещающимися друг относительно друга слоями жидкости [7].

Также существует другой не менее важный фактор смесеобразования – турбулентная диффузия, обусловленная перекачкой в турбулентном режиме, при котором частицы жидкости движутся в трубе не параллельно его стенкам, а совершают хаотические турбулентные движения, что увеличивает объем образующейся смеси [8].

Основной задачей при последовательной перекачке является прогнозирование объема образующейся смеси, так как этого процесса избежать не удастся. Понимание длины смеси и ее свойств позволяет принять наиболее правильное решение при раскладке данной смеси и отнесении ее к тому или иному нефтепродукту без значительной потери свойств, а также точнее смоделировать ее влияние на технологически параметры перекачки [9, 10].

Методы

Понимание объема образующейся смеси может быть получено на основе решения математической задачи, результатами чего послужат расчеты длины и объема области образующейся смеси.

Обозначения основных параметров, используемых при составлении математической модели и непосредственно участвующих в процессе определения объема образующейся смеси при последовательной перекачке.

- объем смеси j -го и $j-1$ -го продуктов без учета первичной технологической смеси $V_{m(j,j-1)}$, где $j = 1..m$, м³;
- объем первичной технологической смеси j -го и $j-1$ -го продуктов $V_{\text{первич}(j,j-1)}$, где $j = 1..m$, м³;
- средняя площадь поперечного сечения трубопровода S , м²;
- средний внутренний диаметр сечения трубопровода d , м;
- кинематическая вязкость j -го продукта ν_j , где $j = 0..m$, сСт;
- плотность j -го продукта $\rho(x) = \rho_j$, где $j = 0..m$, кг/м³;
- средняя скорость жидкости в поперечном сечении трубопровода v , м/с;
- эквивалентный (абсолютный) коэффициент шероховатости Δ_3 , м;
- средний коэффициент гидравлического сопротивления j -й жидкости λ_j , где $j = 0..m$;
- среднее число Рейнольдса j -й жидкости в сечении трубопровода Re_j , где $j = 0..m$;
- среднее касательное напряжение стенки в сечении трубопровода τ_0 , Па;
- среднее эффективный коэффициент осевой диффузии в сечении трубопровода D_{axial} , м²/с;
- коэффициент концентрации нефтей/нефтепродуктов z .

Базовый гидравлический алгоритм, единый для различных методик, для расчета объема смеси выглядит следующим образом [9, 10]:

1. Расчет скорости в сечении трубопровода с координатой x :

$$v = \frac{Q}{S}. \quad (1)$$

2. Расчет числа Рейнольдса в сечении трубопровода с координатой x :

$$Re_j = \frac{d \cdot v}{\nu_j}. \quad (2)$$

3. Расчет коэффициента потерь на трение по длине в сечении трубопровода с координатой x :

$$\lambda_j(x) = \begin{cases} \lambda_j = \frac{64}{Re}, Re < 2320 \\ \lambda_j = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, 4000 < Re < 10 \cdot \frac{d}{\Delta_3} \\ \lambda_j = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re_j} \right)^{0,25}, 10 \frac{d}{\Delta_3} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_3} \\ \lambda_j = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}, 560 \cdot \frac{d}{\Delta_3} > Re. \end{cases} \quad (3)$$

4. Для расчета коэффициента концентрации нефти/нефтепродукта необходимо использовать формулы (4)–(9). Расчет касательного напряжения стенки (Па):

$$\tau_0 = 0,125 \cdot \lambda_{cp} \cdot \rho_{cp} \cdot v^2. \quad (4)$$

5. Эффективный коэффициент осевой диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$):

$$D_{axial} = 5,05 \cdot d \cdot \sqrt{\tau_0 / \rho_j}, \quad (5)$$

где ρ_{cp} – усредненная плотность нефти/нефтепродуктов, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_{бензин} + \rho_{дизель}}{2} = \frac{\rho_{продукт1} + \rho_{продукт2}}{2}; \quad (6)$$

λ_{cp} – усредненный коэффициент потерь на трение:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{бензин} + \lambda_{дизель}}{2} = \frac{\lambda_{продукт1} + \lambda_{продукт2}}{2}. \quad (7)$$

6. Коэффициент концентрации нефтей/нефтепродуктов:

$$z = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{axial} \cdot t}} \quad (8)$$

где x – осевое расстояние от начала трубы до места контакта продуктов, м ; t – время контакта или прохождения расстояния x , с .

При этом:

$$z = \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot c_{**}), \quad (9)$$

где c_{**} – некоторые пределы концентрации и соответственно при $c_{**} = 0,01$ или $c_{**} = 0,99$, $z(0,01) = 1,645$ или $z(0,99) = -1,645$.

То есть z существует в пределах $[-1,645; 1,645]$, исходя из анализа дальнейших функций для нахождения объемов смеси берем наихудший сценарий, то есть когда функция объема смеси будет максимальной – $z = 1,645$.

Далее рассчитываются непосредственно объемы смеси по формулам (10)–(22), приведенным ниже:

Формула Остина и Пэлфри [11]:

$$\frac{V_m}{V_p} = \begin{cases} 18384 \cdot \sqrt{\frac{d}{L}} \cdot Re_{cp}^{-0,9} \cdot e^{2,18 \cdot \sqrt{d}}, & Re < Re_j \\ 11,75 \cdot \sqrt{\frac{d}{L}} \cdot Re_{cp}^{-0,1}, & Re > Re_j \end{cases}. \quad (10)$$

Формула Бриджа Эдвина [12]:

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{1,4042}{d^{2,471}} \right). \quad (11)$$

Формула Фоулера и Брауна [13]

$$\frac{V_m}{V_p} = 4 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,4} \cdot \alpha_1(N_{Re}, C) = 4 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,4}, \quad (12)$$

где $\alpha_1(N_{Re}, C)$ – экспериментальная константа Фоулера–Брауна $\alpha_1(N_{Re}, C) \approx 0,319$.

Формула Смита и Шульце [14]

$$\begin{aligned} \frac{V_m}{V_p} &= 4 \cdot \left(\frac{1}{L} \right)^{0,38} \cdot \left(\frac{268,75 \cdot Re_{cp}^{0,13} + 0,1375 \cdot Re_{cp}}{Re_{cp}} \right) = \\ &= 4 \cdot \left(\frac{1}{L} \right)^{0,38} \cdot \left(0,55 + \frac{1075}{Re_{cp}^{0,87}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Формула Тейлора [15]

$$\begin{aligned} \frac{V_m}{V_p} &= 4 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1}{Re_{cp}} \right)^{0,0625} \cdot Z = \\ &= 6,59998 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1}{Re_{cp}} \right)^{0,0625}. \end{aligned} \quad (14)$$

Формула Яблонского [16]

$$\begin{aligned} \frac{V_m}{V_p} &= 4 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{(3000 + 60,7 \cdot Re^{0,545})}{Re} \right)^{0,5} \cdot Z = \\ &= 6,59998 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{(3000 + 60,7 \cdot Re^{0,545})}{Re} \right)^{0,5}. \end{aligned} \quad (15)$$

Формула Съенитцера [17]

$$\begin{aligned} \frac{V_m}{V_p} &= 4 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{37,8}{Re_{cp}^{0,45}} \right) \cdot Z = \\ &= 245,999 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,43} \cdot \frac{1}{Re_{cp}^{0,45}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Формула Съенитцера–Марона [18]

$$\frac{V_m}{V_p} = 1000 \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0,43} \cdot (\lambda_{продукт1}^{1,8} + \lambda_{продукт2}^{1,8}). \quad (17)$$

Формула Ситтеля и др. [19]

$$\frac{V_m}{V_p} = 0,0314 \cdot \left(\frac{Re_1 + Re_2}{2} \right)^{-0,382} \cdot \sqrt{\frac{L}{v}} \cdot d^2. \quad (18)$$

Формула Ауницкого [20, 21]

$$\frac{V_m}{V_p} = 0,0314 \cdot \left(\frac{Re_1 + Re_2}{2} \right)^{-0,382} \cdot \sqrt{\frac{L}{v}} \cdot d^2. \quad (19)$$

Формула Удоотока и Нгуена [22]

$$\frac{V_m}{V_p} = 0,0314 \cdot \left(\frac{Re_1 + Re_2}{2} \right)^{-0,382} \cdot \sqrt{\frac{L}{v}} \cdot d^2. \quad (20)$$

Формула Юфина [23]

$$\frac{V_m}{V_p} = 4 \cdot \left(v \cdot \frac{L}{d} \right)^{-0,5} \cdot Z = 6,58 \cdot \left(v \cdot \frac{L}{d} \right)^{-0,5}. \quad (21)$$

Стоит отметить, что данные методики не учитывают изменение температуры перекачиваемого продукта и изменение профиля внутреннего диаметра по длине линейной части трубопровода, а берут лишь усредненные значения, что может повлечь несколько неверное представление о потенциальном объеме смеси при решении диспетчерских многокритериальных задач и предварительном их расчете, что будет рассмотрено в будущих работах авторов.

Далее для нахождения непосредственного объема первичной технологической смеси воспользуемся формулой эквивалентных длин в следующей форме [24, 25]:

$$V_{смеси} = V_m \cdot \left(1 + \left(\frac{V_{первич}}{V_m} \right)^{0,57} \right)^{0,57}. \quad (22)$$

Таким образом мы получаем:

$$V_{\text{первич}} = V_m \cdot \left(\left(\frac{V_{\text{смеси}}}{V_m} \right)^{\frac{100}{57}} - 1 \right)^{0,57}. \quad (23)$$

Положим, что суммарный вклад начальной смеси даст $k\%$ от объема смеси в конце трубопровода, образованной без учета первичной смеси, в результате получаем две схемы отображения (учета) влияния первичной смеси:

- 1) увеличение объема смеси, образующейся без учета первичной смеси на $k\%$ по длине

$$V_{\text{смеси}} = \left(1 + \frac{k}{100} \right) \cdot V_m(x). \quad (24)$$

- 2) в силу того, что большая часть объема первичной смеси образуется в процессе закачки в трубопровод, эту самую большую часть можно учесть в начале пути смеси, а оставшуюся часть разложить по всей длине по формуле (23).

Результаты и обсуждения

При проведении расчетов авторами было создано программное обеспечение, позволяющее моделировать работу нефтепродуктопровода и процессы смесеобразования по различным методикам. Исходные данные для численного моделирования приведены ниже:

- общий расход $Q = 0,43 \text{ м}^3/\text{с}$;
- внутренний диаметр $d = 0,5 \text{ м}$;
- внутренняя площадь $S = 0,1963 \text{ м}^2$;
- плотность первого продукта $\rho_2(\text{Бензин}) = 730 \text{ кг/м}^3$;
- плотность второго продукта $\rho_2(\text{ДТ}) = 840 \text{ кг/м}^3$;
- число Нуссельта для бензина $Nu(\text{Бензин}) = 0,63 \cdot 10^{-6}$;
- число Нуссельта для ДТ $Nu(\text{ДТ}) = 0,6 \cdot 10^{-5}$;
- длина линейного участка $L_1 = 70000 \text{ м}$;
- длина технологического участка $L_2 = 1000000 \text{ м}$;
- относительная шероховатость труб $\Delta z(\Delta r) = 0,00047 \text{ м}$.

По итогам данного моделирования были получены зависимости объемов смеси от длины прохождения поверхности контакта по трубопроводу, результаты представлены на рис. 1–4. Также в ходе исследования авторы сравнили данные методики с данными, полученными на нефтепродуктопроводах Уфа–Челябинск. После экстраполирования полученных данных с участка нефтепродуктопровода получена следующая зависимость объема смеси от длины пути по трубопроводу [26]:

$$V_{\text{смеси}} = 3,21 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,02 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 1,18 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,00615 \cdot x^2 + 1,90 \cdot x + 119,53. \quad (25)$$

Далее на основании функции (25) были получены следующие зависимости:

- общий объем смеси $V_{\text{смеси}} = 679,534 \text{ м}^3$;
- объем первичной смеси $V_{\text{первич}} = 119,532 \text{ м}^3$.

На основании функции (23) был рассчитан объем смеси через метод эквивалентных длин на аналогичном линейном участке трубопровода $V_{\text{смеси}}(\text{э}) = 671,818 \text{ м}^3$.

Были получены зависимости объемов смеси без учета первичной смеси методов эквивалентных длин (23) и прямой разницей (26) между объемом первичной технологической смеси и объемом смеси, образовавшейся к данному моменту (участку) времени:

$$V_m = V_{\text{смеси}} - V_{\text{первич}}, \text{ м}^3. \quad (26)$$

В зависимостях, представленных ниже, имеют место следующие способы учета первичной смеси:

- $V_{\text{смеси}} = V_m \cdot k = 1,0115 \cdot V_m, \text{ м}^3$;
- учет первичной смеси из [26] ($V_{\text{первич}} = 119,532 \text{ м}^3$) через метод эквивалентных длин (23);
- учет первичной смеси через метод эквивалентных длин как

$$V_{\text{первич}} = V_m(L_2) \cdot p = V_m \cdot 0,1779, \text{ м}^3.$$

На основании вышеизложенных зависимостей были получены следующие зависимости:

- V смеси без первичной

$$\begin{aligned} V_m &= (1) - (3) = V_{\text{смеси}} - V_{\text{первич}} = \\ &= V_m \cdot k - V_m(L_2) \cdot p = 1,0115 \cdot V_m - 0,1779 \cdot V_m = \\ &= 0,8316 \cdot V_m = 559,998 \text{ м}^3; \end{aligned}$$

- отношение общего объема смеси с учетом первичной смеси к общему объему смеси без учета первичной смеси $k = \frac{V_{\text{смеси}}}{V_{\text{смеси}}(\text{э})} = 1,0115$;
- отношение первичного объема смеси к общему объему смеси без учета первичной смеси $p = \frac{V_{\text{первич}}}{V_{\text{смеси}}(\text{э})} = 0,1779$.

На рис. 1, 2 изображены зависимости объема смеси, рассчитанные различными методиками, представленными выше, от длины пути контакта продуктов без учета первичной технологической смеси [26–28].

На рис. 3, 4 изображены зависимости объема смеси, рассчитанные различными методиками, представленными выше, от длины пути контакта продуктов с учетом первичной технологической смеси распределенной равномерно по всему пути смеси (первый способ учета первичной смеси с коэффициентом k).

На рис. 5, 6 изображены зависимости объема смеси, рассчитанные различными методиками, представленными выше, от длины пути контакта продуктов с учетом первичной технологической смеси, взятой из графика с экспериментальными данными ($V_{\text{первич}} = 119,532 \text{ м}^3$) (второй способ учета первичной смеси).

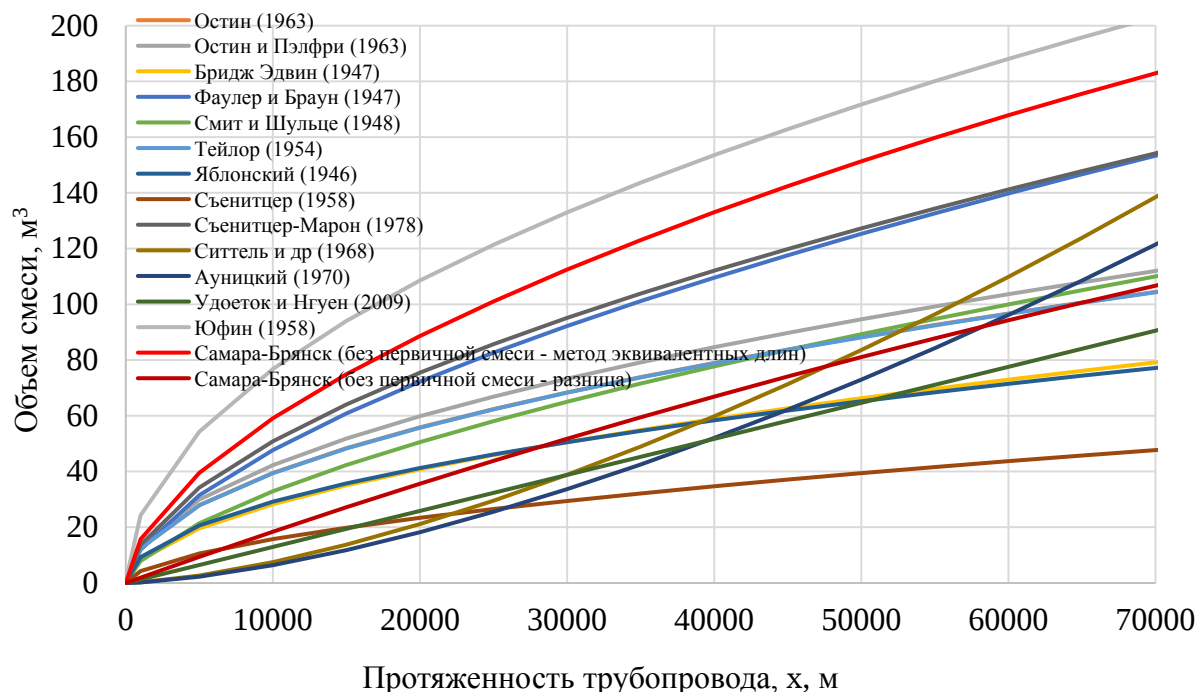


Рис. 1. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов без учета первичной технологической смеси на участке L₁

Fig. 1. Comparative analysis of methodologies for calculating the volume of oil and oil product mixture without taking into account the primary process mixture at section L₁

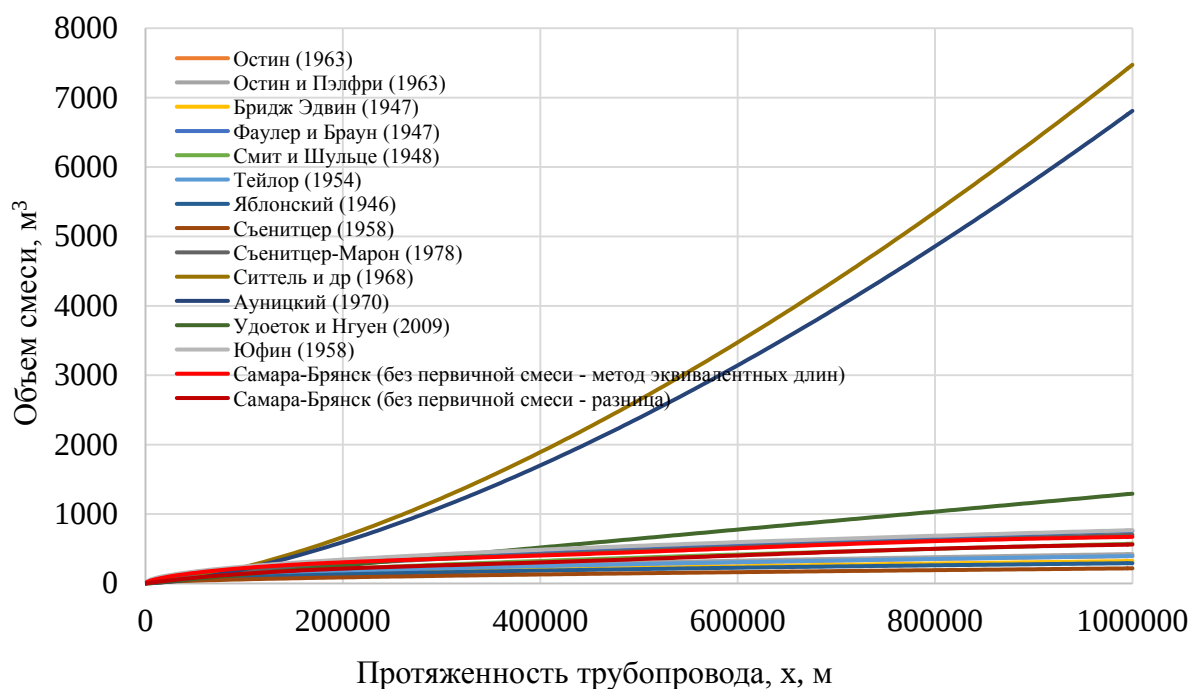


Рис. 2. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов без учета первичной технологической смеси на участке L₂

Fig. 2. Comparative analysis of methodologies for calculating the volume of oil and oil product mixture without taking into account the primary process mixture at section L₂

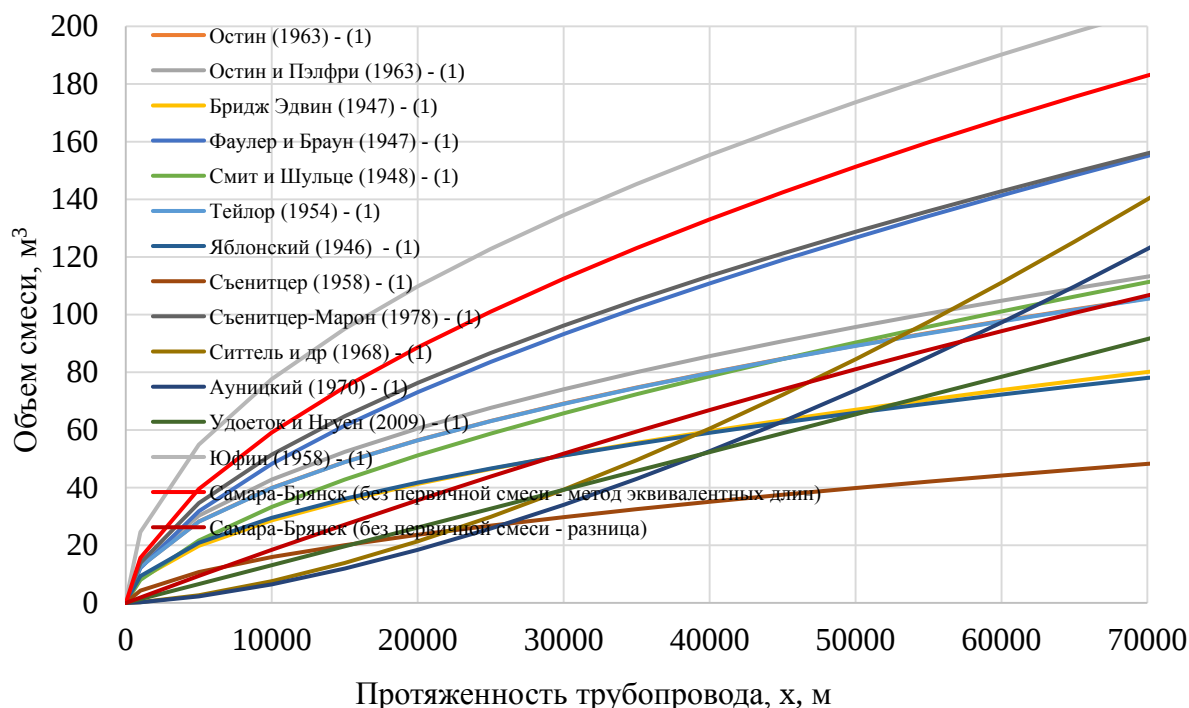


Рис. 3. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом первичной технологической смеси по длине трубопровода на участке L₁

Fig. 3. Comparative analysis of methodologies for calculating the volume of oil and oil product mixture taking into account the primary process mixture along the length of the pipeline at the section L₁

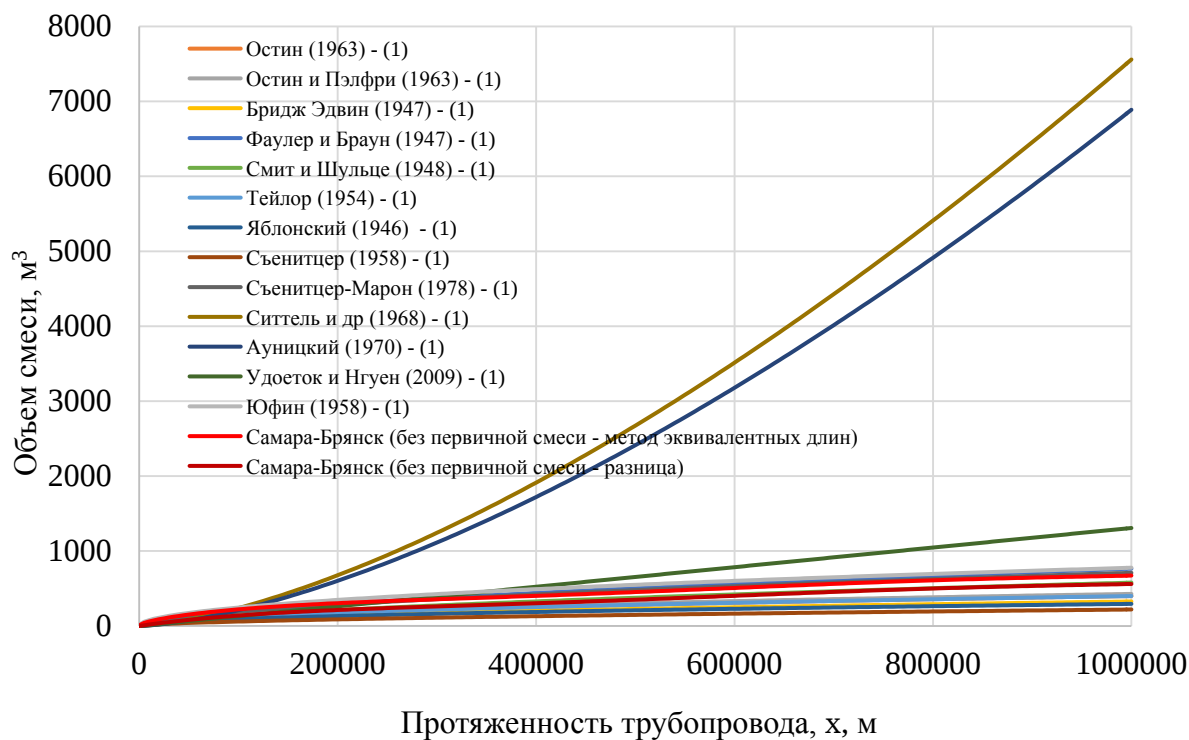


Рис. 4. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом первичной технологической смеси по длине трубопровода на участке L₂

Fig. 4. Comparative analysis of methodologies for calculating the volume of oil and oil product mixture taking into account the primary process mixture along the length of the pipeline at the section L₂

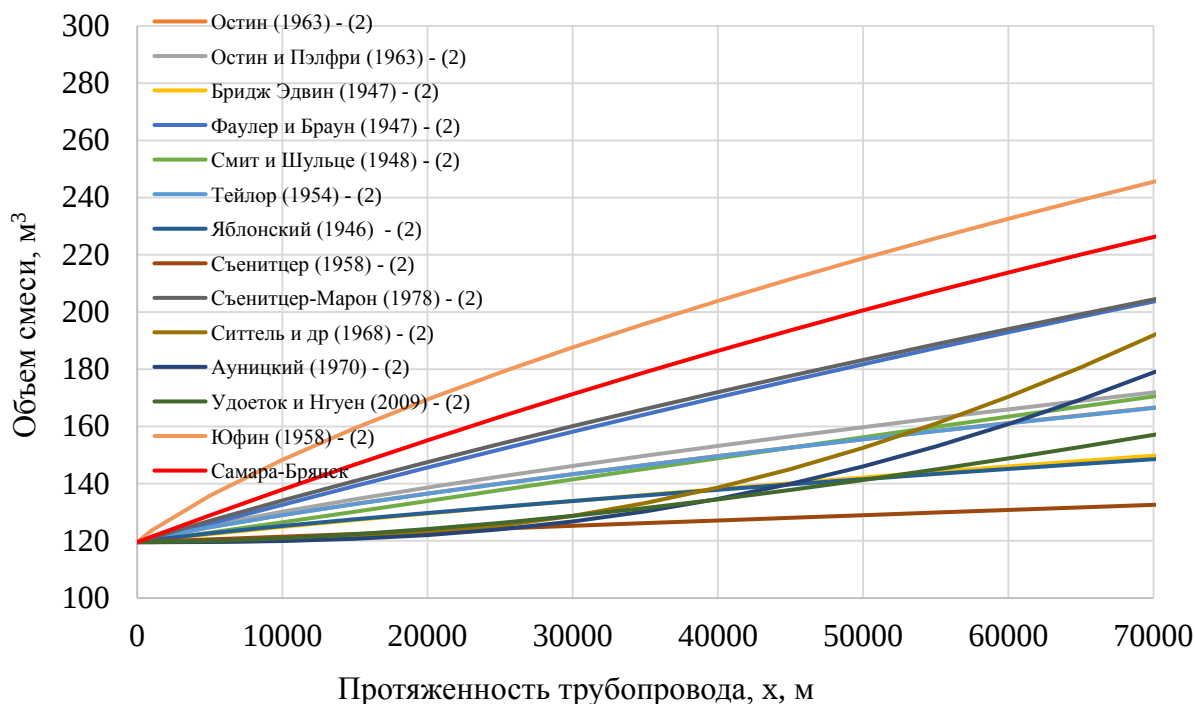


Рис. 5. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом первичной технологической смеси с реальным распределением по длине трубопровода на участке L_1

Fig. 5. Comparative analysis of methods for calculating the volume of oil and oil products mixture taking into account the primary technological mixture with real distribution along the pipeline length at the section L_1

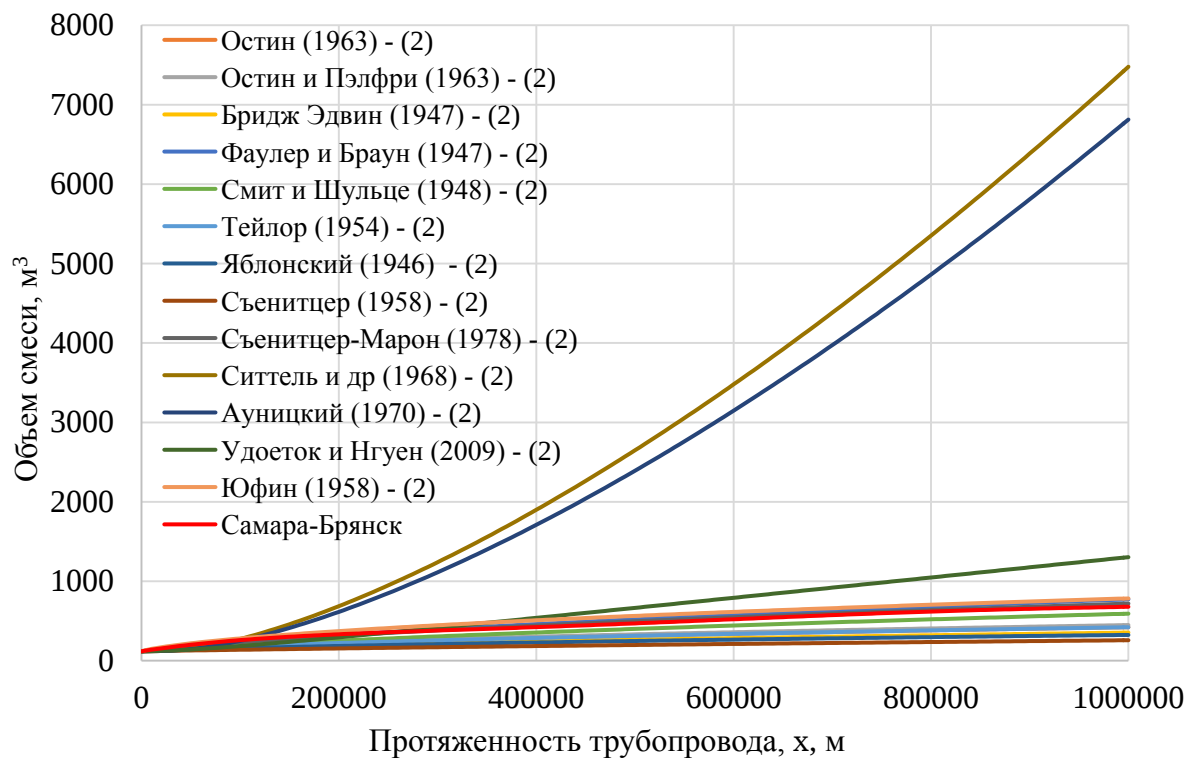


Рис. 6. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом первичной технологической смеси с реальным распределением по длине трубопровода на участке L_2

Fig. 6. Comparative analysis of methods for calculating the volume of oil and oil products mixture taking into account the primary technological mixture with real distribution along the pipeline length at the section L_2

На рис. 7, 8 изображены зависимости объема смеси, рассчитанные различными методиками, представленными выше, от длины пути контакта продуктов с учетом первичной технологической

смеси, величина которой рассчитана через метод эквивалентных длин, то есть через коэффициент p (третий способ учета первичной смеси).

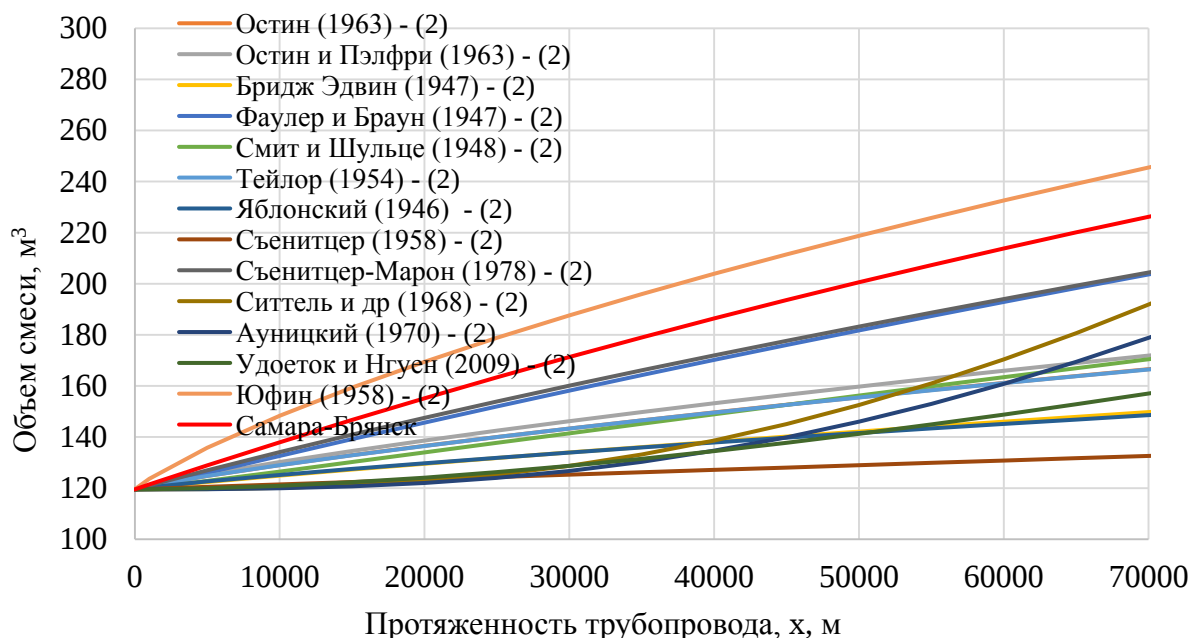


Рис. 7. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом рассчитанной первичной технологической смеси с реальным распределением по длине трубопровода на участке L_1

Fig. 7. Comparative analysis of methods for calculating the volume of oil and oil products mixture taking into account the calculated primary technological mixture with the real distribution along the pipeline length at the section L_1

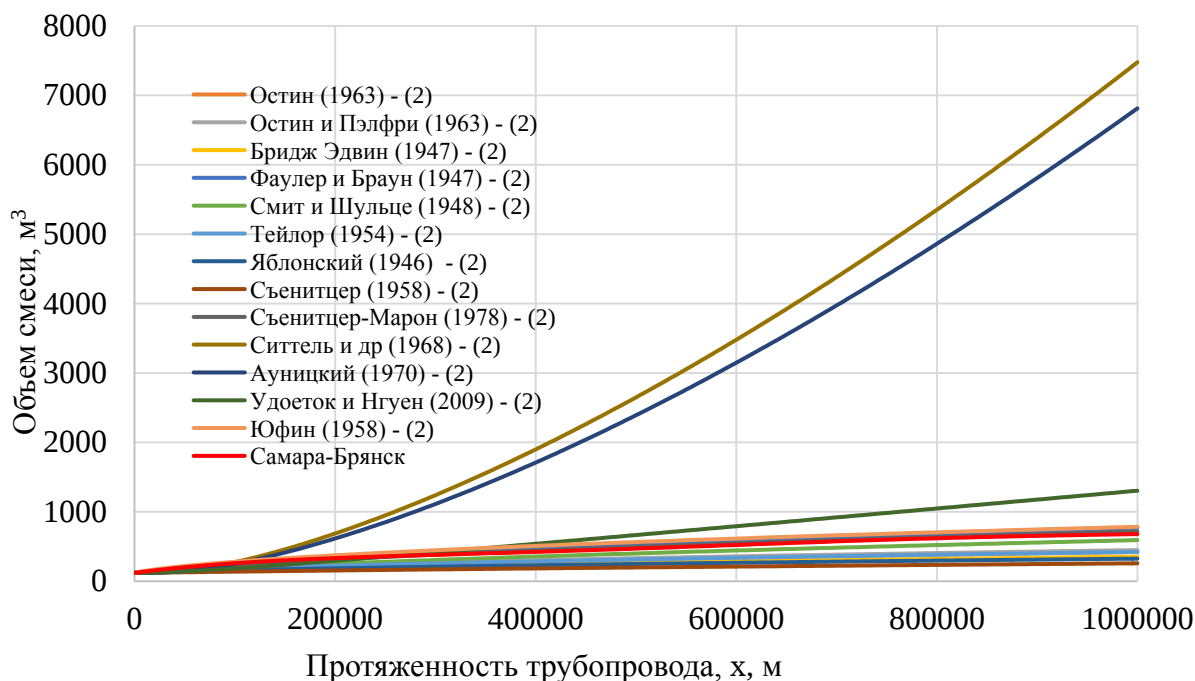


Рис. 8. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефтей и нефтепродуктов с учетом рассчитанной первичной технологической смеси с реальным распределением по длине трубопровода на участке L_2

Fig. 8. Comparative analysis of methods for calculating the volume of oil and oil products mixture taking into account the calculated primary technological mixture with the real distribution along the pipeline length at the section L_2

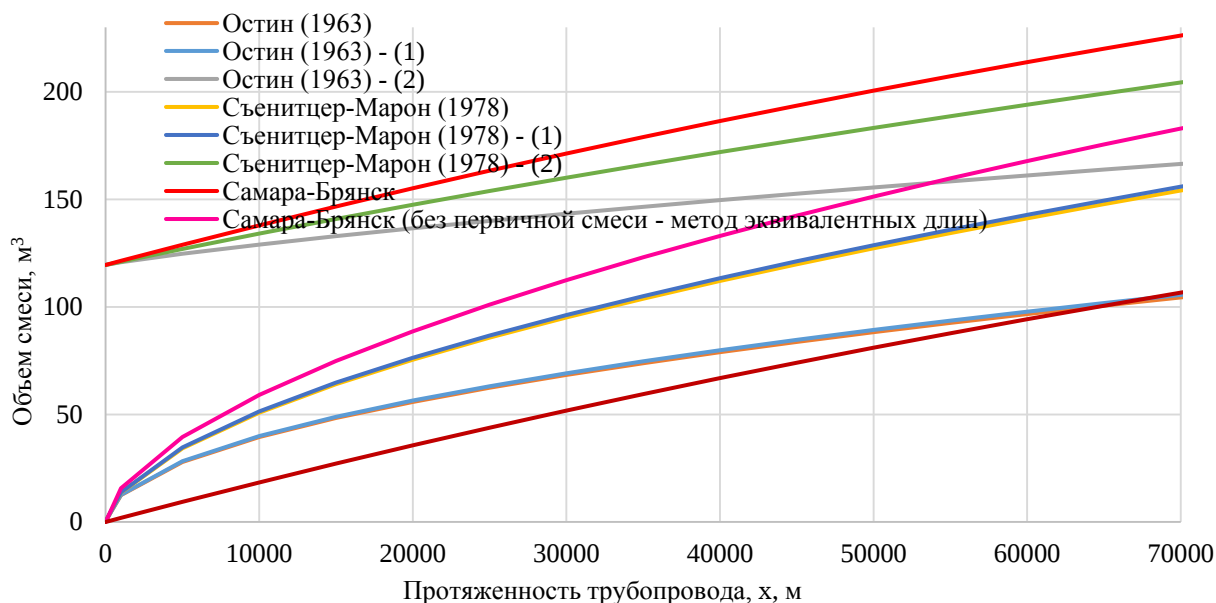


Рис. 9. Сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефти и нефтепродуктов Остина и Съенитцера–Маруна
Fig. 9. Comparative analysis of Austin and Sjenitzer–Maroon oil and oil product mixture volume calculation methodologies

На рис. 9 изображены зависимости объема смеси, рассчитанные по методикам Остина и Съенитцера–Маруна, представленным выше, от длины пути контакта продуктов с учетом и без учета первичной технологической смеси, через все три способа учета первичной технологической смеси, описанные выше.

Выводы

Был проведен сравнительный анализ методов расчета смеси при последовательной перекачке нефти и нефтепродуктов с учетом влияния первичной технологической смеси. Были рассмотрены следующие методы смесеобразования: Остина и Пэлфри, Бриджа Эдвина, Фаулера и Брауна, Смита и Шульца, Тейлора, Яблонского, Съенитцера, Съенитцера–Марона, Ситтеля и др., Ауницкого и Удоев и Нгуена [11–23]. Для сравнения данных методик были рассмотрены три модели процессов смесеобразования внутри трубопровода через сравнение с данными реального трубопровода Самара–Брянск [26, 27]:

- 1) сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефти и нефтепродуктов без учета первичной технологической смеси на участке (расчет по формулам (10)–(21));
- 2) сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефти и нефтепродуктов с учетом первичной технологической смеси по длине трубопровода на участке (расчет общего объема через формулы (10)–(21) и учет первичного объема

смеси через равномерное распределение данного объема по всей длине – формула (24));

- 3) сравнительный анализ методик расчета объема смеси нефти и нефтепродуктов с учетом первичного объема технологической смеси с реальным распределением по длине трубопровода на участке через метод эквивалентных длин (формула (21)).

В каждом сравнительном анализе было проведено сравнение самих методов и их сравнение с реальными данными в трех видах:

- 1) общего объема смеси, замеренного на участке;
- 2) объема смеси, замеренного на участке без учета первичного объема смеси;
- 3) объема смеси с учетом первичной смеси, равномерно распределенной по всей длине участка.

В ходе анализа было выявлено, что на длинных расстояниях методики Ауницкого [20, 21] и Ситтеля [19] неприменимы, так как дают большую ошибку. На коротких расстояниях при наличии исходных данных об объеме первичной смеси наиболее приоритетным методом при применении метода эквивалентных длин является метод Съенитцера–Маруна [17, 18] как при учете в виде скачка, так и при равномерном распределении по длине. Однако при отсутствии данных об объеме первичной смеси и наличии только конечного объема при попытке обратного расчета первичной смеси и ее учете в виде скачка, то есть реального распределения, наиболее близкие к эталонным значениям результаты дают методики, представленные в [11, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Становление технологии последовательной перекачки разнотипных нефтепродуктов по одному трубопроводу / А.В. Токаренко, Р.Р. Ташбулатов, Б.Н. Мастобаев, О.А. Макаренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 174–183. DOI: 10.28999/2541-9595-2023-13-2-174-183
2. Методология формирования товарных партий разнотипных нефтей и их смесей для последовательной перекачки по технологическому участку магистрального нефтепровода / Р.Р. Ташбулатов, Р.М. Каримов, А.В. Токаренко, Р.З. Сунагатуллин, Б.Н. Мастобаев // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 10. – С. 98–103. DOI 10.24887/0028-2448-2022-10-98-103.
3. Короленок А.М., Лурье М.В., Тимофеев Ф.В. Расширение ассортимента светлых нефтепродуктов, транспортируемых по трубопроводам методом последовательной перекачки // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4 (8). – С. 40–43.
4. Лурье М.В., Тимофеев Ф.В., Середа С.В. Раскладка смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 42–47.
5. Короленок А.М., Зоря Е.И., Лощенкова О.В. Система обеспечения и контроля качества нефтепродуктов при приеме, хранении и отпуске в организациях нефтепродуктообеспечения. – М.: ООО «МАКС Пресс», 2019. – 244 с.
6. Современные проблемы транспорта жидких углеводородов / Ю.Д. Земенков, В.В. Голик, М.Ю. Земенкова, Е.Л. Чижевская, И.А. Чекардовская, С.Ю. Подорожников, М.А. Александров, К.С. Воронин, С.М. Дудин, С.В. Якубовская. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – 345 с.
7. Токаренко А.В. Валеев А.Р., Мастобаев Б.Н. Развитие трубопроводного транспорта нефтепродуктов методом последовательной перекачки // История и педагогика естествознания. – 2021. – № 1–2. – С. 45–48. DOI: 10.24411/0131-4270-2021-1-2-45-48.
8. Проектирование и эксплуатация нефтепроводов / М.В. Лурье, Б.Н. Мастобаев, П.А. Ревель-Муроз, А.Е. Сощенко. – М.: Изд-во «Недра», 2019. – 434 с.
9. Shestakov R.A., Vanchugov I.M. Influence of multiproduct pipeline telescopicity design on the process of mixing during sequential pumping // Journal of King Saud University. Engineering Sciences. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.05.002.
10. Vanchugov I.M., Shestakov R.A. Influence of accounting for thermodynamic processes on the processes of mixture formation during sequential pumping of petroleum products // Oil and Gas Science and Technology. – 2021. – Vol. 76. – P. 76. DOI: 10.2516/ogst/2020100.
11. Austin J.E., Palfrey J.R. Mixing of miscible but dissimilar liquids in serial flow in a pipeline // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. – 1963. – № 1. – P. 377–395. DOI: <https://doi.org/10.1177/002034836317800160>.
12. Chintala S. Computational study of interfacial mixing in pipelines, logistics and diverse models to predict the interface length: Dr. Diss. – Oklahoma, 2014. – 70 p.
13. Fowler F.C., Brown G.G. Contamination by successive flow in pipe lines. – New York, NY, USA: American Institute of Chemical Engineers, 1943. – 98 p.
14. Smith S.S., Schulze R.K. Interfacial mixing characteristics of products in products pipe line-Part 1 // The Petroleum Engineer. – 1948. – № 8. – P. 330–337.
15. Taylor G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe // Proc. of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1954. – № 115. – P. 446–468.
16. Shahandeh H., Li Z. Modeling and optimization of the upgrading and blending operations of oil sands bitumen // Energy and Fuels. – 2016. – № 7. – P. 5202–5213. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00037>, 2-s2.0-84979530183.
17. Sjenitzer F. How much do products mix in a pipeline; here is how to calculate the extent of contamination when two different liquids are pumped in succession // Pipeline Engineer. – 1958. – № 30. – P. 31–34.
18. Maron V.I. Longitudinal diffusion in a flow through a tube // International Journal of Multiphase Flow. – 1978. – Vol. 4. – P. 339–355. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(78\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(78)90006-X).
19. Sittel C.N., Threadgill W.D., Schnelle K.B. Longitudinal dispersion for turbulent flow in pipes // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1968. – № 7 (1). – P. 173–174. DOI: 10.1021/I160025A007
20. Aunicky Z. The longitudinal mixing of liquids in bends // Can. J. Chem. Eng. – 1968. – Vol. 46. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450460105>
21. Aunicky Z. The longitudinal mixing of liquids flowing successively in pipelines // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1970. – № 48 (1). – P. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450480103>.
22. Udoetok E.S., Nguyen A.N. A disc pig model for estimating the mixing volumes between product batches in multi-product pipelines // Journal of Pipeline Engineering. – 2009. – № 3. – P. 195–204.
23. Яблонский В.С., Юфин В.А., Бударов И.П. Последовательная перекачка нефтей и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. – М.: Гостехиздат, 1959. – 148 с.
24. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов / М.В. Лурье, В.И. Марон, Л.А. Мацкин, В.А. Юфин. – М.: Недра, 1979. – 256 с.
25. The influence of primary and technological mixtures on the parameters of the sequential pumping mode / I.M. Vanchugov, D.I. Daudi, K.S. Rezanov, R.A. Shestakov, V.V. Barakov // AIP Conference Proceedings. – Krasnoyarsk, 29–31 July 2021. DOI: 10.1063/5.0092531.
26. Думболов Д.У., Дроздов Д.А. Основные подходы к определению объема смеси и новый метод ее идентификации при последовательной перекачке // Территория Нефтегаз. – 2012. – № 8. – С. 92–99.
27. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS / Chao Chen, Changjun Li, Genserik Reniers, Fuqiang Yang // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 279. – P. 100–123.
28. Kazemzadeh H., Amani H., Kariminezhad H. Evaluation of pipeline networks to predict an increase in crude oil flow rate // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2021. – Vol. 197. – P. 325–348.

Информация об авторах

Иван Михайлович Ванчугов, ассистент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. imvanchugov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7668-6550>

Константин Сергеевич Резанов, аспирант кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. rezanov_ks@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9098-1735>

Роман Алексеевич Шестаков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительства Калининградского Государственного Технического Университета, Россия, 236022, г. Калининград, Советский пр., 1. roman.shestakov@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Поступила в редакцию: 18.06.2024

Поступила после рецензирования: 22.10.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

REFERENCES

1. Tokarenko A. V., Tashbulatov R. R., Mastobaev B. N., Makarenko O. A. Formation of technology for sequential pumping of different types of petroleum products through one pipeline. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2023, T. 13, no. 2, pp. 174–183. (In Russ.) DOI 10.28999/2541-9595-2023-13-2-174-183.
2. Tashbulatov R.R., Karimov R.M., Tokarenko A.V., Sunagatullin R.Z., Mastobaev B.N. Б.Н. Methodology for the formation of commodity batches of different types of oils and their mixtures for sequential pumping along the technological section of the main oil pipeline. *Oil industry*, 2022, no. 10, pp. 98–103. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-98-103.
3. Korolenok A.M., Lurie M.V., Timofeev F.V. Expanding the range of light petroleum products transported through pipelines using the method of sequential pumping. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2012, no. 4 (8), pp. 40–43. (In Russ.)
4. Lurie M.V., Timofeev F.V., Sereda S.V. Mixture layout during sequential pumping of petroleum products. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 42–47. (In Russ.)
5. Korolenok A.M., Zorya E.I., Loschenkova O.V. *System for ensuring and monitoring the quality of petroleum products during receipt, storage and release in oil product supply organizations*. Moscow, MAKS Press LLC Publ., 2019. 244 p. (In Russ.)
6. Zemenkov Yu.D., Golik V.V., Zemenkova M.Yu., Chizhevskaya E.L., Chekardovskaya I.A., Podorozhnikov S.Y., Alexandrov M.A., Voronin K.S., Dudin S.M., Yakubovskaya S.V. *Modern problems of transport of liquid hydrocarbons*. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2019. 345 p. (In Russ.)
7. Tokarenko A.V., Valeev A.R., Mastobaev B.N. Development of pipeline transport of petroleum products by the method of sequential pumping. *History and pedagogy of natural science*, 2021, no. 1–2, pp. 45–48. (In Russ.) DOI: 10.24411/0131-4270-2021-1-2-45-48.
8. Lurie M.V., Mastobaev B.N., Revel-Muroz P.A., Soshchenko A.E. *Design and operation of oil pipelines*. Moscow, Nedra Publ. House, 2019. 434 p. (In Russ.)
9. Shestakov R.A., Vanchugov I.M. Influence of multiproduct pipeline telescopicity design on the process of mixing during sequential pumping. *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.05.002.
10. Vanchugov I.M., Shestakov R.A. Influence of accounting for thermodynamic processes on the processes of mixture formation during sequential pumping of petroleum products. *Oil and Gas Science and Technology*, 2021, vol. 76, pp. 76. DOI: 10.2516/ogst/2020100.
11. Austin J.E., Palfrey J.R. Mixing of miscible but dis-similar liquids in serial flow in a pipeline. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, vol. 178, no. 1, pp. 377–395.
12. Chintala S. *Computational study of interfacial mixing in pipelines, logistics and diverse models to predict the interface length*. Dr. Diss. Oklahoma, Stillwater, OK, USA, 2014. 69 p.
13. Fowler F.C., Brown G.G. *Contamination by successive flow in pipe lines*. New York, NY, USA, American Institute of Chemical Engineers, 1943. 98 p.
14. Smith S.S., Schulze R K. Interfacial mixing characteristics of products in products pipe line. Part 1. *The Petroleum Engineer*, 1948, vol. 20, no. 8, pp. 330–337.
15. Taylor G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1954, vol. 223, no. 1155, pp. 446–468.
16. Shahandeh H., Li Z. Modeling and optimization of the upgrading and blending operations of oil sands bitumen. *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 7, pp. 5202–5213.
17. Sjenitzer F. How much do products mix in a pipeline; here is how to calculate the extent of contamination when two different liquids are pumped in succession. *Pipeline Engineer*, 1958, vol. 30, pp. 31–34.
18. Maron V.I. Longitudinal diffusion in a flow through a tube. *International Journal of Multiphase Flow* 4, 1978, vol. 4, pp. 339–355.
19. Sittel C.N., Threadgi W.D., Schnelle K.B. Longitudinal dispersion for turbulent flow in pipes. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1968, no. 7 (1), pp. 39–43.
20. Aunicky Z. The longitudinal mixing of liquids in bends. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1968, no. 46, pp. 27–31.
21. Aunicky Z. The longitudinal mixing of liquids flowing successively in pipelines. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1970, no. 48, pp. 12–16.
22. Udoetok E.S., Nguyen A.N. A disc pig model for estimating the mixing volumes between product batches in multi-product pipelines. *Journal of Pipeline Engineering*, 2009, no. 8, pp. 195–201.

23. Yablonsky V.S., Yufin V.A., Budarov I.P. *Sequential pumping of oils and petroleum products through main pipelines*. Moscow, Gostoptehizdat Publ., 1959. 148 p. (In Russ.)
24. Lurie M.V., Maron V.I., Matskin L.A., Yufin V.A. *Optimization of sequential pumping of petroleum products*. Moscow, Nedra Publ., 1979. 256 p. (In Russ.)
25. Vanchugov I.M., Daudi D.I., Rezanov K.S., Shestakov R.A., Barakov V.V. The influence of primary and technological mixtures on the parameters of the sequential pumping mode. *AIP Conference Proceedings*. Krasnoyarsk, July 29–31, 2021. DOI: 10.1063/5.0092531.
26. Dumbolov D.U., Drozdov D.A. Basic approaches to determining the volume of a mixture and a new method of its identification during sequential pumping of petroleum products. *Territory Neftegaz*, 2012, no. 8, pp. 92–99. (In Russ.)
27. Chen C., Li C., Reniers G., Yang F. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 279, pp. 100–123.
28. Kazemzadeh H., Amani H., Kariminezhad H. Evaluation of pipeline networks to predict an increase in crude oil flow rate. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 197, pp. 325–348.

Information about the authors

Ivan M. Vanchugov, Assistant, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. imvanchugov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7668-6550>

Konstantin S. Rezanov, Postgraduate Student, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. rezanov_ks@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9098-1735>

Roman A. Shestakov, Cand. Sc., Head of the Construction Department, Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetsky avenue, Kaliningrad, 236022, Russian Federation. roman.shestakov@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Received: 18.06.2024

Revised: 22.10.2024

Accepted: 08.04.2025