

ISSN: 2658-5782

Номер 2

Апрель-Июнь 2019

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](http://mfs.uimech.org)





## Элементы теории вынужденного перемешивания нефтей в резервуарах<sup>1</sup>

Шагапов В.Ш.\* , Галиакбарова Э.В.\*\*

\*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

\*\*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Для подготовки к транспортировке на нефтепромыслах смешивают легкие и тяжелые нефти с помощью струйных смесителей, представляющих собой устройства с инжектированием, которые устанавливаются в приемораздаточном патрубке внутри резервуара. В работе рассмотрена простейшая технологическая схема перемешивания. Представлены основные уравнения, описывающие процессы смешения легкой и тяжелой нефтей в смесителе, в котором поток легкой нефти является рабочим потоком, а поток исходной в резервуаре тяжелой нефти – инжектируемым потоком. Получено характеристическое уравнение смесителя. Представлена система уравнений, описывающая траекторию осевой линии струи, изменения состава нефти и средней скорости вдоль струи. Рассмотрен пример смесителя, используемого на практике в резервуаре типа РВС 2000. На основе характеристического уравнения по известным значениям перепада давления рабочего и инжектируемого потоков, а также по соотношению сечений рабочего сопла и выходного сечения камеры смешения найден коэффициент инжекции смесителя. Представлены расчетные графики характеристик турбулентной затопленной струи в нефтепромысловом резервуаре хранения нефти. Из графиков следует: 1) происходит полное выравнивание концентраций инжектируемой смеси нефти и тяжелой нефти, находящейся в резервуаре; 2) скорость струи снижается на расстоянии порядка нескольких метров до значения, превышающего минимальную промышленную скорость известную из практики ликвидации донных отложений. Основная роль смесителя при перемешивании нефтей заключается в том, что за счет инжекции тяжелой нефти из резервуара образуются принудительные циркуляционные потоки, исключающие образование застойных зон, выпадение в осадок твердых малоподвижных отложений.

**Ключевые слова:** струйный смеситель, характеристическое уравнение, затопленная струя

### 1. Введение

Большинство месторождений России находится на поздней стадии разработки, поэтому добываемая из них нефть — низкого качества с большим содержанием солей, кислот, асфальто-смолистых веществ, различных примесей [1]. В процессе сбора и хранения таких нефтей в вертикальных резервуарах происходит выпадение осадков (механические

примеси, кристаллы парафины, песок, глина и т.д.) в виде твердых веществ — нефтешламов. Состав нефтешламов определяется качеством хранимой нефти. Средний уровень отложений нефтешламов составляет 6–18% от рабочего объема вертикальных резервуаров (типа РВС). Отметим, что годовые потери нефти за счет образования донных отложений в резервуарах составляют несколько процентов от добытого объема нефти [2]. Существующие методы очистки резервуаров от отложений на практике представляют собой не только трудоемкую и опасную работу, но также создают дополнительную экологическую нагрузку при хранении этих отложений. В то же время, доставка таких нефтей на нефтеперерабатывающие заводы при соответ-

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Академии наук Республики Башкортостан (гражданско-правовой договор на выполнение научно-исследовательской работы № 0301200057819000040\_104987).

ствующей обработке может дать значительную долю полезного продукта. Поэтому перемешивание тяжелых нефтей с более легкими при их подготовке к транспортировке является актуальной проблемой. Разработаны устройства с инжектированием (струйные смесители) [3–8], позволяющие на практике эффективно проводить перемешивание нефтей в емкостях [9–12].

Задачи газожидкостного течения в различных технических устройствах рассмотрены в ряде работ, например, в работах [13, 14].

В настоящей работе представлена теоретическая модель циркуляционного перемешивания нефтей в емкостях с использованием данных опытно-промышленных испытаний струйных смесителей.

## 2. Перемешивание в струйном смесителе: допущения, основные уравнения

Рассмотрим вертикальный резервуар хранения нефти, оборудованный входным узлом в виде струйного смесителя [3–8] (рис. 1). Смеситель состоит из следующих конструктивных элементов: участок между сечениями 0–2 — рабочая камера, 1 — сечение инжектируемого потока, участок 3–4 — камера смешения.

Предполагается введение во входной патрубке смесителя нефти более легкой, чем нефть, первоначально заполняющая резервуар (тяжелая нефть). В смесителе поток закачиваемой легкой нефти является рабочим потоком, а поток исходной тяжелой нефти в резервуаре — инжектируемым потоком. Обозначим верхними индексами ( $i$ ) параметры инжектируемого потока нефти, ( $a$ ) — параметры рабочего потока нефти. В силу того, что плотности легкой и тяжелой нефтей составляют примерно  $\rho^{(a)} = 840 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho^{(i)} = 910 \text{ кг/м}^3$ , то относительная разница между плотностями таких жидкостей не более 10% ( $(\rho^{(i)} - \rho^{(a)})/\rho^{(i)} \leq 10^{-1}$ ), поэтому для расчетных характеристик смесителя будем пренебрегать этой разницей ( $\rho^{(a)} \approx \rho^{(i)} = \rho$ ).

На рис. 1 смеситель расположен на глубине  $h^{(i)}$  под свободной поверхностью, поэтому статическое давление равно  $p^{(i)} = p_a + \rho g h^{(i)}$ .

Запишем основные уравнения, описывающие динамические процессы при взаимодействии жидкостей в рабочей камере смесителя:

$$\begin{aligned} S_0^{(a)} w_0^{(a)} &= S_2^{(a)} w_2^{(a)}, \\ p_0^{(a)} + \rho \frac{w_0^{(a)2}}{2} &= p_2^{(a)} + \rho \frac{w_2^{(a)2}}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S$  — площадь сечения;  $w$  — скорость смеси;

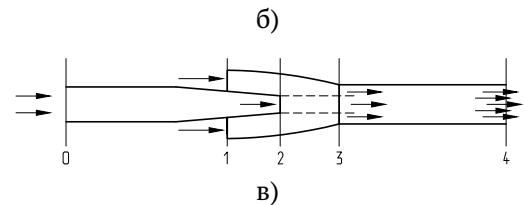
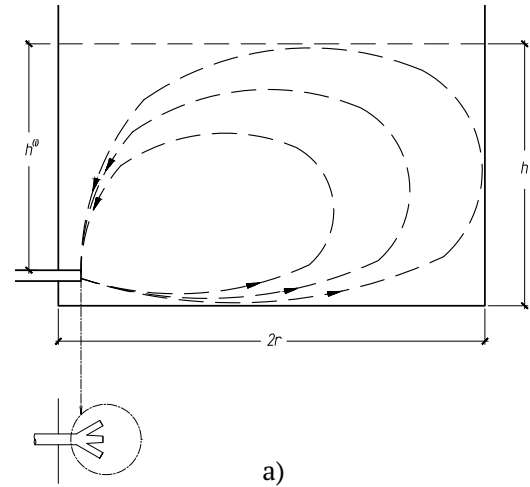


Рис. 1. Струйный смеситель в резервуаре: а) макет работы смесителя; б) монтаж в резервуаре РВС; в) схема смесителя с одним инжекционным устройством

на начальном участке 1–3 камеры смешения:

$$\begin{aligned} S_1^{(i)} w_1^{(i)} &= S_3^{(i)} w_3^{(i)}, \\ p_1^{(i)} + \rho \frac{w_1^{(i)2}}{2} &= p_3^{(i)} + \rho \frac{w_3^{(i)2}}{2}; \end{aligned} \quad (2)$$

в цилиндрической части (3–4) камеры смешения:

$$\begin{aligned} M_2^{(a)} w_2^{(a)} + M_3^{(i)} w_3^{(i)} - (M_2^{(a)} + M_3^{(i)}) w_4^{(i)} &= \\ = (p_4^{(i)} - p_2^{(a)}) S_2^{(a)} + (p_4^{(i)} - p_2^{(i)}) S_1^{(i)} & \\ (M_2^{(a)} = \rho S_2^{(a)} w_2^{(a)}, \quad M_3^{(i)} = \rho S_1^{(i)} w_1^{(i)}, & \\ M_2^{(a)} + M_3^{(i)} = \rho S_4^{(i)} w_4^{(i)}, & \end{aligned} \quad (3)$$

где  $M$  — массовый расход смеси.

После несложных преобразований уравнений (1)–(3) получено уравнение характеристик смесителя

$$\frac{\Delta p^{(i)}}{\Delta p^{(a)}} = 2\varphi_2^{(a)^2} \left( \frac{1}{n-1} + \left( \frac{k}{n-1} \right)^2 - \frac{(1+k)^2}{n(n-1)} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta p^{(a)} = p_0^{(a)} - p_2^{(a)}$  – перепад давления, создаваемый рабочим потоком;  $\Delta p^{(i)} = p_4^{(i)} - p_2^{(i)}$  – перепад давления, создаваемый инжектируемым потоком;  $k = M^{(i)} / M^{(a)}$  – коэффициент инжекции;  $n = S_4^{(i)} / S_2^{(a)}$  – соотношение сечений;  $\varphi_2^{(a)} = 0.95$  – коэффициент скорости по [15].

Коэффициент полезного действия смесителя определяется как доля мощности, потребляемая им на инжекцию

$$\eta = \frac{M^{(i)} \Delta p^{(i)}}{M^{(a)} (\Delta p^{(a)} - \Delta p^{(i)})} = \frac{k \frac{\Delta p^{(i)}}{\Delta p^{(a)}}}{\left( 1 - \frac{\Delta p^{(i)}}{\Delta p^{(a)}} \right)}. \quad (5)$$

### 3. Перемешивание в резервуаре: допущения, основные уравнения

Струя нефти (смесь исходной тяжелой и закачиваемой легкой), поступающая из смесителя в резервуар, перемешивается с окружающей ее тяжелой нефтью и, за счет сил плавучести, происходит подъем осевой линии более легкой струи вверх. Используя гипотезы и аналитические формулы из [16, 17], запишем уравнения, описывающие процесс перемешивания, а также определим траекторию осевой линии струи. Примем зависимость текущего радиуса  $R$  струи от длины  $l$  в соответствии с теорией турбулентных струй [17]:

$$R(l) = 0.22l. \quad (6)$$

Уравнения сохранения масс и импульсов для смеси нефтей в струе следующие:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dl} &= J \quad (M = \rho S w, \quad S = \pi R^2), \\ \frac{d}{dl}(M w P) &= 0, \quad \frac{d}{dl}(M w Q) = (\rho^{(i)} - \rho) S g \\ \left( P = \frac{dx}{dl} = \cos \theta, \quad Q = \frac{dy}{dl} = \sin \theta, \right. \\ &\left. P^2 + Q^2 = 1 \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\rho$  – средняя плотность для сечения струи с координатой  $l$ ;  $J$  – интенсивность поступления нефти в струю через ее границу отнесенная на единицу длины по оси струи;  $\theta$  – угол наклона между касательной к траектории оси струи и осью  $x$ .

На начальном этапе процесса инжекции плотность смешенной нефти равна

$$\rho = \frac{(1+k)\rho^{(i)}}{\rho^{(i)}/\rho^{(a)} + k}, \quad (8)$$

где  $k$  – текущее значение коэффициента инжекции в струе, зависящее от  $l$ .

Для определения состава смеси нефтей можно ввести массовую концентрацию инжектируемой нефти  $c$ , связанную с плотностью смеси следующим выражением:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{c}{\rho^{(i)}} + \frac{(1-c)}{\rho^{(a)}}. \quad (9)$$

При этом  $k$  и  $c$  будут связаны как  $c = k / (1+k)$ .

Для интенсивности  $J$ , согласно решению [18] для радиального потенциального течения внешней жидкости в струю примем выражение

$$J = \pi R \sin(\alpha/2) \rho^{(i)} w, \quad (\sin(\alpha/2) = 0.22). \quad (10)$$

Запишем начальные условия для системы уравнений (6)–(10):

$$\begin{aligned} l &= l^{(l)}, \quad R^{(l)} = 0.22l^{(l)}, \\ k &= k^{(l)}, \quad w = w^{(l)}, \quad x = y = 0, \\ P &= \cos \theta_0^{(l)}, \quad Q = \sin \theta_0^{(l)}, \\ \rho &= \rho^{(l)}, \quad M = M^{(l)} = \rho^{(l)} S^{(l)} w^{(l)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\theta_0^{(l)}$  – угол наклона оси струи от горизонтального направления на выходе из смесителя.

Система уравнений (6)–(10) с начальными условиями (11) представляет собой задачу Коши для функций  $x(l)$ ,  $y(l)$ , определяющих траекторию оси струи, а также для  $k(l)$ ,  $w(l)$  (тем самым и  $c(l)$ ,  $M(l)$ ), описывающих закон изменения состава смеси, средней скорости вдоль струи.

### 4. Пример расчета смесителя

Рассмотрим пример смесителя, используемого в резервуаре типа РВС 2000 [9–12] для смешения легкой нефти (рабочая жидкость) с тяжелой нефтью (инжектируемая жидкость). Геометрические характеристики резервуара РВС 2000 следующие:  $h = 10$  м,  $r \approx 7.5$  м.

На входе в смеситель давление и массовый расход рабочей жидкости равны  $p_0^{(a)} = 3.6 \cdot 10^5$  Па и  $M^{(a)} = 80$  кг/с. Соотношение сечений для смесителя конструкции, представленной на рис. 1, равно  $n = S_4^{(i)} / S_2^{(a)} \approx 7.2$ .

В сечениях «0» и «2» скорости рабочей жидкости найдены по объемному расходу с учетом (1) и равны  $w_0^{(a)} \approx 1.4$  м/с и  $w_2^{(a)} \approx 26$  м/с.

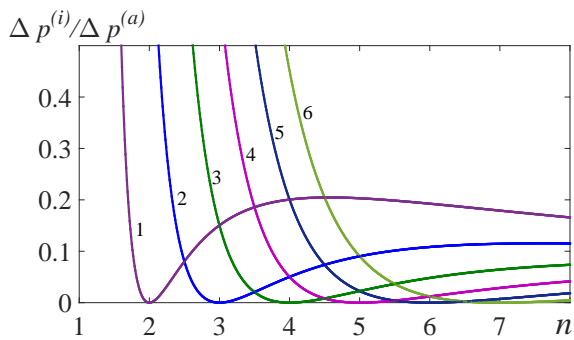


Рис. 2. Зависимость относительного перепада давления  $\Delta p^{(i)}/\Delta p^{(a)}$ , создаваемого струйным смесителем, от соотношения сечений  $n = S_4^{(i)}/S_2^{(a)}$ : кривые 1–6 соответствуют коэффициенту инжекции  $k = \overline{1,6}$

Перепад давления, создаваемый рабочей жидкостью, равен  $\Delta p^{(a)} \simeq 2.6 \cdot 10^5$  Па.

Из характеристического уравнения (4) найдена зависимость относительного перепада давления  $\Delta p^{(i)}/\Delta p^{(a)}$  от величины относительной площади  $n$  (рис. 2). По известному значению относительного перепада давления смесителя равного  $\Delta p^{(i)}/\Delta p^{(a)} \simeq 0.04$  и соотношения сечений равного  $n \simeq 7.2$  по графикам рис. 2 можем определить коэффициент инжекции, который равен  $k = 4$ . По формуле (5) посчитан коэффициент полезного действия  $\eta \simeq 0.2$ .

Плотность смешанной жидкости на начальном этапе инжекции при  $k = 4$  ( $\rho^{(i)} = 910$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho^{(a)} = 840$  кг/м<sup>3</sup>) по формуле (8) равна  $\rho^{(c)} = 895$  кг/м<sup>3</sup>.

Скорость смешанной жидкости на выходе из смесителя в резервуар (сечение «4» рис. 1(в)) равна  $w_4^{(i)} \simeq 10$  м/с.

На рис. 3 представлены траектории осевой линии и структура струи по результатам численного интегрирования системы уравнений (6)–(10) при начальных условиях (11). Для величин параметров, определяющих выходное сечение струи, скорости и состава смеси приняты следующие значения:  $R^{(l)} \simeq 10$  см,  $\theta_0^{(l)} = 0$ ,  $w^{(l)} = 10$  м/с,  $k^{(l)} = 4$ . Из рисунка следует, что искривление траектории из-за сил плавучести незначительно. В турбулентной струе, истекающей из смесителя, происходит полное выравнивание концентраций инжектируемой смеси нефти с концентрацией тяжелой нефти, находящейся в резервуаре. Особо следует отметить, что скорость струи снижается на расстоянии примерно семи метров до значения, превышающего минимальную промышленную скорость, препятствующую выпадению твердых отложений в осадок и

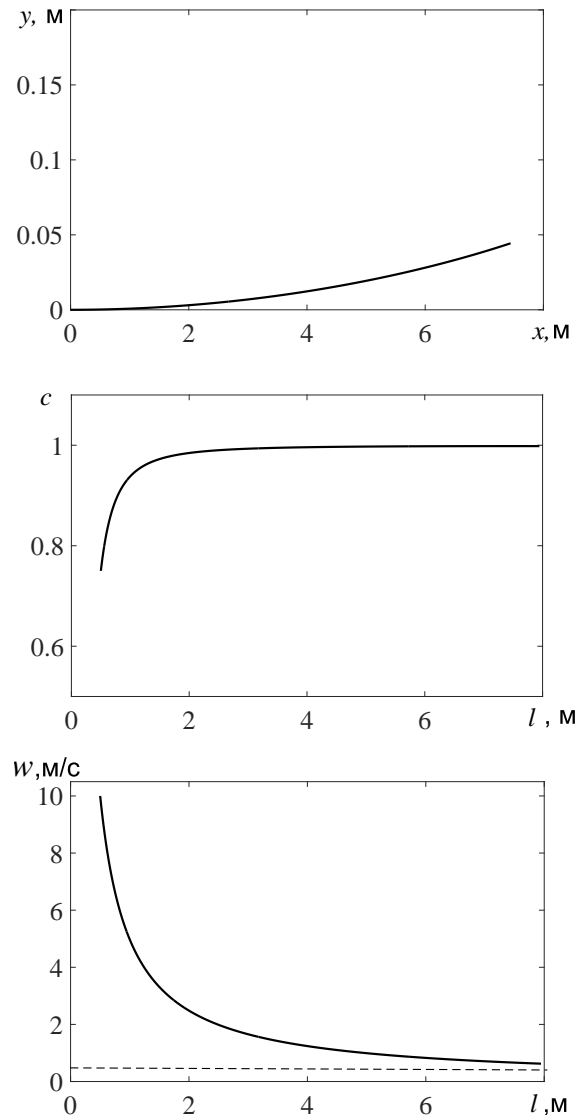


Рис. 3. Траектории и структура турбулентной струи, выходящей из струйного смесителя в резервуар (пример в п. 4). Пунктирная линия соответствует минимальной промышленной скорости (пояснения в тексте)

равную 0.2 м/с (известно из практики ликвидации донных отложений [1, 2]).

## 5. Заключение

Для уменьшения осадконакопления в резервуарах хранения нефти на промыслах, куда поступают тяжелая и легкая нефти, необходимо установить во входной узел резервуара струйный смеситель (устройство с инжектированием). В этом случае смешение происходит в рабочей зоне смесителя и в резервуаре при взаимодействии турбу-

лентных струй с окружающей жидкостью. Также за счет инжекции жидкости из емкости образуются вынужденные циркуляционные потоки, разрушающие застойные зоны. Скорость турбулентной затопленной струи, достигающей противоположной стенки емкости, должна быть не меньше значения минимальной промышленной скорости равной 0.2 м/с, известной из практики борьбы с донными отложениями в резервуарах хранения нефти.

## Список литературы

- [1] Коршунов Е.С., Едигаров С.Г. Промысловый транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [2] Кононов О.В., Мастобаев Б.Н., Галиакбаров В.Ф. Анализ и классификация существующих способов борьбы с отложениями в нефтяных емкостях. Уфа: Реактив, 2010. 40 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19613136>
- [3] Галиакбаров В.Ф., Салихова Ю.Р., Галиакбаров М.Ф., Галиакбаров И.М. Устройство для перемешивания жидкостей в резервуарах. Патент на изобретение 2189852 РФ, В01F 5/04. Оpubл. 27.09.2002. Бюл. № 27. <http://www.fzeepatent.ru/patents/2189852>
- [4] Галиакбаров В.Ф., Галиакбарова Э.В., Яхин Б.А. Смеситель для резервуаров. Патент на полезную модель № 161351 РФ, В01F 5/00. Оpubл. 20.04.2016. Бюл. № 11. [https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016\\_04\\_20/DOC/RUNWU1/000/000/000/161/351/DOCUMENT.PDF](https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016_04_20/DOC/RUNWU1/000/000/000/161/351/DOCUMENT.PDF)
- [5] Галиакбаров В.Ф., Галиакбарова Э.В., Яхин Б.А. Струйный смеситель для резервуаров. Патент на изобретение № 2594023 РФ, В01F 5/00. Оpubл. 10.08.2016. Бюл. № 22. [https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016\\_08\\_10/DOC/RUNWC1/000/000/002/594/023/DOCCLAIM.PDF](https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016_08_10/DOC/RUNWC1/000/000/002/594/023/DOCCLAIM.PDF)
- [6] Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф. Смеситель для резервуаров. Патент на полезную модель № 174231 РФ, В01F 5/00. Оpubл. 09.10.2017. Бюл. № 28. <https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=276159E7-6B71-4D96-8077-7810A7DBA5D0>
- [7] Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф. Смеситель для резервуаров. Патент на полезную модель № 176188 РФ, В01F 5/00. Оpubл. 11.01.2018. Бюл. № 2. <https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=C8AD7E44-4283-4191-B06C-3C86FA1C5F44>
- [8] Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф. Смеситель для резервуаров. Патент на полезную модель № 185847 РФ, В01F 5/00. Оpubл. 19.12.2018. Бюл. № 35. <https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=9052FDEB-A374-4137-875B-1D4705D0B9F3>
- [9] Галиакбарова Э.В., Валявин Г.Г., Галиакбаров В.Ф. Внедрение усовершенствованного струйного гидравлического смесителя для поддержания пожарной безопасности и эффективной работы резервуарных парков // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 5. С. 151–161. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22459745>
- [10] Галиакбарова Э.В., Бахтизин Р.Н., Галиакбаров В.Ф., Надршин А.С. Безопасное и энергетически эффективное исключение осадконакопления при хранении нефти в резервуарных емкостях // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13, № 4. С. 140–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25838012>
- [11] Галиакбарова Э.В., Бахтизин Р.Н., Галиакбаров В.Ф. Использование струйных гидравлических смесителей для интенсификации процессов подготовки нефти к переработке // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 1. С. 145–149. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27203032>
- [12] Галиакбарова Э.В., Бахтизин Р.Н., Галиакбаров В.Ф., Сухарев К.В. Энергетически эффективное снижение количества донных отложений при хранении нефти в резервуарных емкостях // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 2. С. 114–119. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27216418>
- [13] Насибулаев И.Ш., Насибулаева Э.Ш. Течение жидкости через гидросопротивление с динамически изменяемой геометрией // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12, № 1. С. 59–66. DOI: 10.21662/uim2017.1.009
- [14] Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Теоретическая модель накопления углеводородов в куполе с учетом гидратообразования, лимитирующегося теплообменом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 2. С. 167–174. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/117
- [15] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
- [16] Шагапов В.Ш., Гудкова О.С. Распространение парозакапельных струй в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37, № 3. С. 313–321.
- [17] Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука. 1984. 720 с.
- [18] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Физматлит. Т. 6. 2001. 736 с.



## Elements of the theory of forced mixing of oils in tanks

Shagapov V.Sh. \*, Galiakbarova E.V.\*\*

\*Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa

\*\*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

To prepare for transportation at the fields, light and heavy oils are mixed with the help of jet mixers, which are injection devices that are installed in the receiving and distributing nozzle inside the tank. The work considers the simplest technological mixing scheme. The basic equations are presented that describe the processes of mixing light and heavy oils in a mixer, in which the light oil stream is the working stream, and the source stream in the heavy oil tank is the injected stream. The characteristic equation of the mixer is obtained. A system of equations is presented that describes the trajectory of the center line of the jet, changes in oil composition and average velocity along the jet. An example of a mixer, which is used in practice in a reservoir of the PBC 2000 type, is considered. Based on the characteristic equation for the known pressure drop of the working and injected flows, as well as the ratio of the sections of the working nozzle and the output section of the mixing chamber, the mixer injection coefficient is found. The calculated graphs of the characteristics of a turbulent flooded jet in an oil field oil storage tank are presented. From the graphs it follows: 1) there is a complete alignment of the concentration of the injected oil mixture with the concentration of heavy oil in the tank; 2) the speed of the jet decreases at a distance of the order of several meters to a value exceeding the minimum fishing speed known from the practice of liquidating bottom sediments. The main role of the mixer when mixing oils is that due to the injection of heavy oil from the reservoir, forced circulation flows are formed that exclude the formation of stagnant zones and the precipitation of solid inactive deposits.

**Keywords:** jet mixer, characteristic equation, flooded stream

### References

- [1] Korshunov E.S., Edigarov S.G. Oil and gas field transport. M.: Nedra. 1975. 296 p. (in Russian)
- [2] Kononov O.V., Mastobaev B.N., Galiakbarov V.F. Analysis and classification of existing methods of dealing with sediment in oil tanks. Ufa: Reagent. 2010. 40 p. (in Russian)  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=19613136>
- [3] Galiakbarov V.F., Salikhova Yu.R., Galiakbarov M.F., Galiakbarov I.M. A device for mixing liquids in tanks. Patent 2189852 of the Russian Federation, B01F 5/04. Publ. 09/27/2002. Bull. No 27.  
<http://www.freepatent.ru/patents/2189852>
- [4] Galiakbarov V.F., Galiakbarova E.V., Yahin B.A. The mixer for tanks. Patent 161351 of the Russian Federation, B01F 5/00. Publ. 04/20/2016. Bull. No 11.  
<https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.04.20/DOC/RUNWU1/000/000/000/161/351/DOCUMENT.PDF>
- [5] Galiakbarov V.F., Galiakbarova E.V., Yahin B.A. Jet mixer for tanks. Patent 2594023 of the Russian Federation, B01F 5/00. Publ. 08/10/2016. Bull. No 22.  
<https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.08.10/DOC/RUNWC1/000/000/002/594/023/DOCCLAIM.PDF>
- [6] Galiakbarova E.V., Galiakbarov V.F. The mixer for tanks. Patent 174231 of the Russian Federation, B01F 5/00. Publ. 10/09/2017. Bull. No 28.  
<https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=276159E7-6B71-4D96-8077-7810A7DBA5D0>
- [7] Galiakbarova E.V., Galiakbarov V.F. The mixer for tanks. Patent 176188 of the Russian Federation, B01F 5/00. Publ. 01/11/2018. Bull. No 2.  
<https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=C8AD7E44-4283-4191-B06C-3C86FA1C5F44>
- [8] Galiakbarova E.V., Galiakbarov V.F. The mixer for tanks. Patent 185847 of the Russian Federation, B01F 5/00. Publ. 12/19/2018. Bull. No 35.  
<https://new.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=9052FDEB-A374-4137-875B-1D4705D0B9F3>
- [9] Galiakbarova E.V., Valyavin G.G., Galiakbarov V.F. Introduction of an improved jet hydraulic mixer for maintaining fire safety and effective work tank farm // Oil and gas business. 2014. V. 12, No 5. Pp. 151–161. (in Russian)  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=22459745>
- [10] Galiakbarova E.V., Bakhtizin R.N., Galiakbarov V.F., Nadrshin A.S. Safe and energy-efficient accumulation of deposits when storing oil in tanks // Oil and gas business. 2015. V. 13, No 4. Pp.140–146. (in Russian)  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=25838012>

- [11] Galiakbarova E.V., Bakhtizin R.N. Galiakbarov V.F. Use jet hydraulic mixer for intensification of the process preparation of oil to processing // Oil and gas business. 2016. V. 14, No 1. Pp. 145–149. (in Russian)  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=27203032>
- [12] Galiakbarova E.V., Bakhtizin R.N. Galiakbarov V.F., Sukharev K.V. Energetically effective sea floor sediments quantity reduction at oil storage in tanks // Oil and gas business. 2016. V. 14, No 2. Pp. 114–119. (in Russian)  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=27216418>
- [13] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. Fluid flow through the hydraulic resistance with a dynamically variable geometry // Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics. 2017. 12(1). 59–66. (in Russian)  
DOI: 10.21662/uim2017.1.009
- [14] Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Theoretical model for hydrocarbon accumulation in a dome taking into account condensation, limited by heat transfer // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019. V. 330, No 2. Pp. 167–174. (in Russian)  
DOI: 10.18799/24131830/2019/2/117
- [15] Sokolov E.Ya., Singer N.M. Inkjet apparatus. M.: Energoatomizdat. 1989. 352 p. (in Russian)
- [16] Shagapov V.Sh., Gudkova O.S. Spread of vapor-gas-droplet plumes in the atmosphere // Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics. 2001. V. 37, No. 3. Pp. 290–297.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=13377069>
- [17] Abramovich G.N. Theory of turbulent jets. M.: Science. 1984. 720 p. (in Russian)
- [18] Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics. Hydrodynamics. M.: Fizmatlit. T. 6. 2001. 736 p. (in Russian)