

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 665.455:006.354

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-71-85

О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, А.Е. ЛИТВИНОВА², Н.С. ФИРСАНОВА²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Национальный исследовательский

Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПАРАФИНИСТОГО БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ*

В работе проведено исследование расходных характеристик течения битумного вяжущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрической трубе. Определена зависимость расхода жидкости от перепада давления. Установлено, что с ростом содержания парафинов и смол происходит увеличение предельного напряжения сдвига и консистенции среды, что приводит к уменьшению расходных характеристик при заданном перепаде давления.

Ключевые слова: реология; битумные вяжущие; вязкопластические среды; вязкость; неньютоновские жидкости; модель Балкли – Гершеля.

Для цитирования: Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование расходных характеристик установившегося течения высокопарафинистого битумного вяжущего в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 71–85.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-71-85

O.V. MATVIENKO^{1,2}, A.E. LITVINOVA², N.S. FIRSANOVA²,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²National Research Tomsk State University

STABILIZED FLOW RATE OF HIGH-PARAFFIN ASPHALT CEMENT IN CYLINDRICAL PIPE

The paper studies the flow rate of asphalt cement described by Herschel–Bulkley fluid in a cylindrical pipe. The dependence is suggested for the fluid flow rate and the pressure drop. It is found

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90078.

that with increasing content of paraffins and resins, the yield stress and consistency of the medium increase, thereby leading to a decrease in the flow rate parameters at a given pressure drop.

Keywords: rheology; asphalt cement; viscoplastic media; viscosity; non-Newtonian fluid; Herschel–Bulkley fluid.

For citation: Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanov N.S. Issledovanie raskhodnykh kharakteristik ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinitogo bitumnogo vyazhushchego v tsilindricheskoi trube [Stabilized flow rate of high-paraffin asphalt cement in cylindrical pipe]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 5. Pp. 71–85.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-71-85

Введение

Одним из основных материалов, применяемых в дорожном строительстве, является асфальтобетон [1–3]. Структурообразующим компонентом асфальтобетонной смеси служит битумное вяжущее [4].

Углеводороды, входящие в битумные вяжущие, отличаются сложным составом и структурой [5]. Поскольку элементный состав битумов дает приближенное представление о возможных химических соединениях, входящих в их состав, предложено определять групповой химический состав вяжущих. Разделение различных соединений на группы основано на их избирательном отношении к растворителям и адсорбентам [6]. Из битумов обычно выделяют следующие группы углеводородов: масла, смолы (бензолные и спиртобензолные), асфальтены, реже асфальтогеновые кислоты и их ангидриды, карбены и карбоиды [7].

При использовании битумных вяжущих необходимо учитывать свойства и особенности структуры исходного материала. Течение битумов в диапазоне температур от 30 до 100 °С характеризуется неньютоновскими свойствами [8, 9]. Неньютоновское поведение характеризуется зависящей от скорости деформации сдвиговой вязкостью и происходит вследствие специфической молекулярной структуры битума [10, 11].

Движение макромолекул в жидких битумных вяжущих происходит относительно независимо друг от друга. Поэтому постоянные контакты между макромолекулами отсутствуют. Неньютоновское поведение таких сред обусловлено изменением формы их макромолекул в результате воздействия перепада давления. Увеличение концентрации макромолекул приводит к более частым контактам между макромолекулами и образованию сетки зацеплений, препятствующей сдвиговому течению [12, 13]. Содержание тяжелых углеводородов в битумном вяжущем характеризует показатель консистенции k . Чем больше значение k , тем большая доля тяжелых углеводородов содержится в среде и меньше ее текучесть.

Структуру макромолекул среды характеризует показатель нелинейности n [14]. Для простейшей модели макромолекул в виде упругих шаров показатель нелинейности $n = 1$, что соответствует модели ньютоновской жидкости. С увеличением длины и разветвленности макромолекул показатель нелинейности уменьшается.

Дисперсная фаза в битумном вяжущем в случае высокого содержания парафинов образует непрерывную трехмерную коагуляционную структуру [12, 15]. Эта структура обладает определенной прочностью, характеризуемой предельным напряжением сдвига σ_Y . Увеличение σ_Y повышает сопротивляемость среды сдвигу и уменьшает скорость сдвиговых деформаций.

Для описания деформационного поведения различных структурированных дисперсных сред существует множество реологических моделей, передающих в определенном диапазоне напряжений сдвига отдельные особенности реального течения [16–20].

Для одновременного учета нелинейности кривой течения и наличия предельного напряжения сдвига используется реологическое уравнение Балкли – Гершеля [15, 21, 22], которое представляет собой комбинацию нелинейно-вязкой модели Оствальда – де Вейля [12, 23–26] и вязкопластической модели Шведова – Бингама [20]:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= 2 \left(KU^{n-1} + \frac{\sigma_Y}{U} \right) \dot{\epsilon}_{ij}, & \text{если } \sigma_Y < T, \\ \dot{\epsilon}_{ij} &= 0, & \text{если } T < \sigma_Y. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь τ_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензора напряжений и скоростей деформации;

$T = \sqrt{\tau_{ij}\tau_{ij}} / 2$ – интенсивность сдвиговых напряжений; U – интенсивность скоростей сдвиговых деформаций, которая определяется выражением [27, 28]:

$$U = \sqrt{2\dot{\epsilon}_{ij}^D \dot{\epsilon}_{ji}^D}, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^D = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_{kk}$ – компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

Цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумов в технологических устройствах проведен в работах [29–36]. В работах [29, 30] приведены результаты исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе и инжекторном смесителе. В работе [31] построена модель движения пузырька в закрученном потоке неньютоновской жидкости, что дает возможность оптимизировать процесс вспенивания битума, улучшая его свойства. В работах [32, 33] исследована кавитация в кавитационно-смесительном диспергаторе. В работе [34] разработана физико-математическая модель и выполнен расчет распада струи битума в закрученном потоке водной фазы. Показано, что рост закрутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и, следовательно, способствует более быстрому распаду струи. В работе [35] проведено численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вяжущих. Исследованию смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем посвящена работа [36].

Настоящая работа является продолжением исследований течения высокопарафинистого битумного вяжущего [37]. Целью работы является определение расходных характеристик установившегося течения битумного вяжущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрическом канале.

Математическая модель течения битумного вяжущего

Рассмотрим установившееся осесимметричное течение высокопарафинистого битумного вяжущего в прямой горизонтальной трубе круглого сечения радиусом R . Координату x , отсчитываемую вдоль оси трубы, направим вниз по потоку. При этих условиях уравнение движения может быть записано в виде [38, 39]:

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \tau_{rx}) = 0. \quad (3)$$

После интегрирования этого уравнения получим

$$\tau_{rx} = -\frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r. \quad (4)$$

Характерной особенностью течения вязкопластических сред Балкли – Гершеля является наличие в потоке жестких зон. Если интенсивность сдвиговых напряжений $T = \sqrt{\tau_{ij} \tau_{ij} / 2} = |\tau_{rx}|$, возникающих в среде, не превосходит предела текучести σ_Y , то среда ведет себя как твердое тело. Для возникновения сдвигового течения необходимо выполнение условия $T > \sigma_Y$. В сдвиговой зоне для установившегося течения в трубе реологический закон Балкли – Гершеля можно записать в виде

$$\tau_{rx} = - \left(k \left| \frac{du}{dr} \right|^n + \sigma_Y \right). \quad (5)$$

Из уравнения (4) следует, что в приосевой области $|\tau_{rx}| < \sigma_Y$. Таким образом, вблизи оси формируется жесткая зона, в которой отсутствуют деформации. Радиальная координата границы этой зоны может быть найдена из условия равенства напряжений на этой границе предельному напряжению сдвига:

$$r_Y = 2\sigma_Y \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{-1}. \quad (6)$$

Во внешней части потока происходит сдвиговое течение среды, которое с учетом соотношений (4) и (5) описывается зависимостью

$$k \left| \frac{du}{dr} \right|^n + \sigma_Y = \frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r. \quad (7)$$

Принимая во внимание соотношение (6), уравнение (7) можно записать в виде

$$\frac{du}{dr} = - \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (r - r_Y)^{1/n}. \quad (8)$$

Интегрирование уравнения (8) с учетом условия прилипания на стенке

$$r = R : \quad u = 0 \quad (9)$$

приводит к следующему результату:

$$u = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \left[1 - \left(\frac{r - r_Y}{R - r_Y} \right)^{(n+1)/n} \right]. \quad (10)$$

Во внутренней области течения $r < r_Y$ среда движется как твердое тело с плоским профилем осевой скорости:

$$u = u_Y = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n}. \quad (11)$$

Расход жидкости через поперечное сечение трубы вычисляется по формуле

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr = 2\pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \times \\ \times \left[\frac{1}{2} R^2 + \frac{1}{2n+1} R r_Y + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} r_Y^2 \right], \quad (12)$$

а среднерасходная скорость определяется как

$$\bar{u} = 2 \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\sigma_Y}{kr_Y} \right)^{1/n} (R - r_Y)^{(n+1)/n} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2n+1} \frac{r_Y}{R} + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \frac{r_Y^2}{R^2} \right]. \quad (13)$$

Определим среднерасходную вязкость неньютоновской жидкости $\bar{\mu}$ как вязкость ньютоновской жидкости, движущейся со среднерасходной скоростью \bar{u} в трубе радиусом R под действием перепада давления $|dp/dx|$. Введение среднерасходной вязкости позволяет при проведении гидравлических расчетов вместо неньютоновской среды рассматривать ньютоновскую жидкость с вязкостью $\bar{\mu}$.

Для ньютоновской жидкости связь между перепадом давления и массовым расходом определяется выражением

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\bar{\mu}} \left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (14)$$

Таким образом, среднерасходная вязкость потока $\bar{\mu}$ будет равна

$$\bar{\mu} = \frac{3n+1}{8n} \sigma_Y^{(n-1)/n} k^{1/n} \left(\frac{R}{r_Y} \right)^2 \left(\frac{R}{r_Y} - 1 \right)^{-(n+1)/n} \times \\ \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2n+1} \frac{r_Y}{R} + \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \left(\frac{r_Y}{R} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (15)$$

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. Диапазон изменения параметров был выбран следующим: предельное напряжение сдвига – $\sigma_Y = 0-40$ Па, консистенция изменялась в пределах $k = 5-25$ Па·сⁿ, показатель нелинейности –

$n = 0,375-1$. Выбранный диапазон изменения параметров соответствует свойствам высокопарафинистых битумных вязущих для различных температур [6–8]. Перепад давления варьировался в диапазоне $|dp/dx| = 100-5000$ Па/м. Радиус канала составлял $R = 0,1$ м.

На рис. 1 показана зависимость объемного расхода жидкости Q от перепада давления $|dp/dx|$.

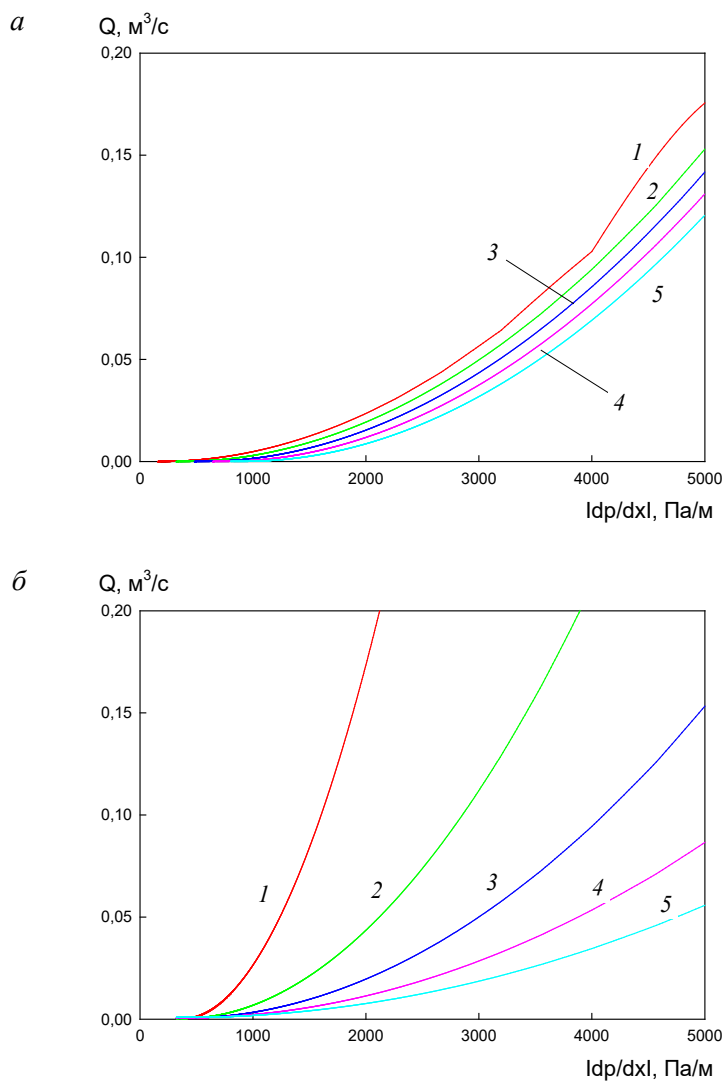


Рис. 1. Зависимость объемного расхода Q от перепада давления $|dp/dx|$, $R = 0,1$ м (окончание см. на с. 77):

$a - k = 15 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$, $n = 0,5$: 1 – $\sigma_Y = 8$ Па; 2 – $\sigma_Y = 16$ Па; 3 – $\sigma_Y = 24$ Па; 4 – $\sigma_Y = 32$ Па; 5 – $\sigma_Y = 40$ Па; $б - \sigma_Y = 16$ Па, $n = 0,5$: 1 – $k = 5 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 2 – $k = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 3 – $k = 15 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 4 – $k = 20 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 5 – $k = 25 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$

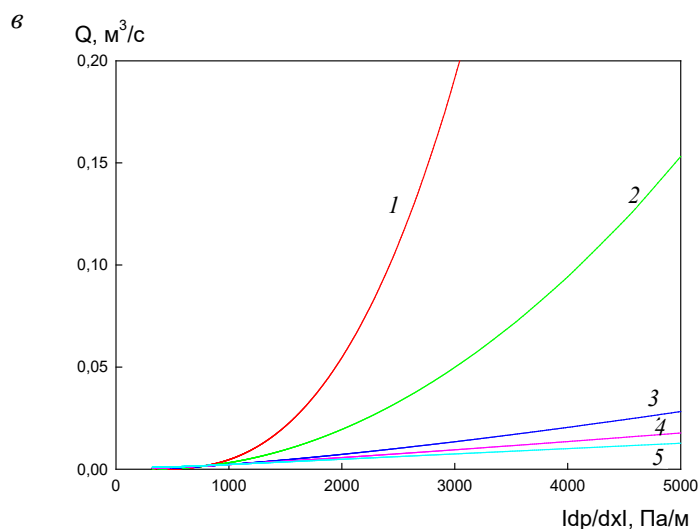


Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 76):

$\sigma_Y = 16$ Па, $k = 15$ Па·с^{*n*}: 1 – $n = 0,375$; 2 – $n = 0,5$; 3 – $n = 0,75$; 4 – $n = 0,875$; 5 – $n = 1$ (жидкость Шведова – Бингама)

Характерной особенностью вязкопластических сред, наиболее заметной при низких температурах, является существование коагуляционной структуры. Эта структура сохраняется при малой величине приложенного напряжения. Течение в канале реализуется при выполнении условия $2\sigma_Y/R < |dp/dx|$, в противном случае происходит запирание канала, и течение становится невозможным. С увеличением перепада давления интенсифицируются процессы разрушения структуры среды, что приводит к росту объемного расхода и среднерасходной скорости потока.

С ростом содержания парафинов происходит увеличение предельного напряжения сдвига σ_Y , при этом увеличивается прочность коагуляционной структуры. В результате этого с ростом σ_Y расходные характеристики уменьшаются (рис. 1, а).

Содержание смол в вязущем определяет величину показателя консистенции k . Поэтому в средах, характеризуемых высокими значениями показателя консистенции, для обеспечения заданного расхода требуется приложить большой перепад давления (рис. 1, б).

Структурная сложность среды характеризуется показателем нелинейности n . С увеличением n содержание высокомолекулярных соединений в вязущем уменьшается, среда становится более подвижной. Поэтому при заданном перепаде давления расходные характеристики увеличиваются (рис. 1, в).

На рис. 2 показана зависимость среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ от перепада давления $|dp/dx|$, рассчитанная для различных значений реологических параметров. Эта зависимость имеет вид гиперболы с вертикальной асимптотой, соответствующей условию запирания потока: $|dp/dx| = 2\sigma_Y/R$. С увеличением

перепада давления жидкость становится более подвижной. В результате этого среднерасходная вязкость потока уменьшается и при $|dp/dx| \rightarrow \infty$ $\bar{\mu} \rightarrow 0$. Такой результат (исчезновение вязкости потока) является нефизичным, связанным с особенностью используемой реологической модели. Однако на практике величина перепада давления всегда ограничена некоторой величиной, обусловленной характеристиками используемого оборудования. Поэтому при правильном определении значений реологических параметров можно использовать полученные зависимости с точностью, необходимой для инженерных расчетов.

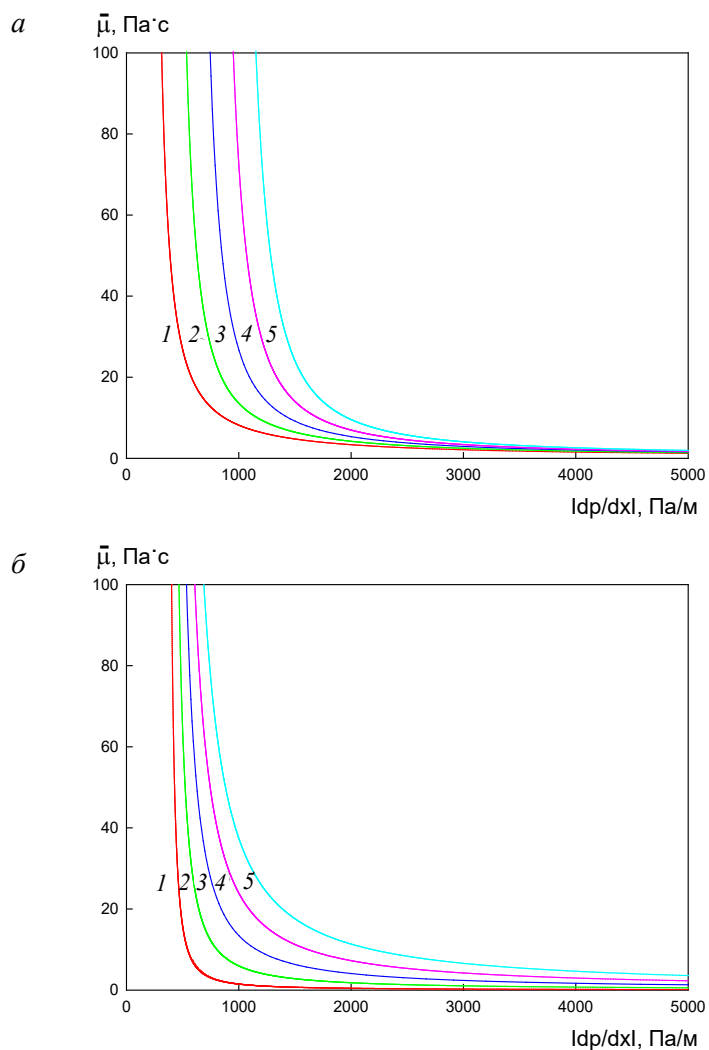


Рис. 2. Зависимость среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ от перепада давления $|dp/dx|$, $R = 0,1$ м (окончание см. на с. 79):

$a - k = 15 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$, $n = 0,5$: 1 – $\sigma_Y = 8 \text{ Па}$; 2 – $\sigma_Y = 16 \text{ Па}$; 3 – $\sigma_Y = 24 \text{ Па}$; 4 – $\sigma_Y = 32 \text{ Па}$; 5 – $\sigma_Y = 40 \text{ Па}$; $b - \sigma_Y = 16 \text{ Па}$, $n = 0,5$: 1 – $k = 5 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 2 – $k = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 3 – $k = 15 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 4 – $k = 20 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$; 5 – $k = 25 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$

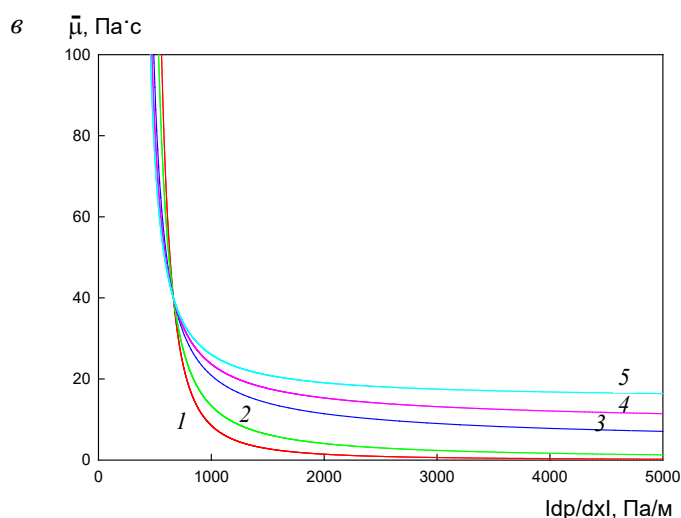


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 78):

$\sigma_Y = 16$ Па, $k = 15$ Па·с ^{n} : 1 — $n = 0,375$; 2 — $n = 0,5$; 3 — $n = 0,75$; 4 — $n = 0,875$; 5 — $n = 1$ (жидкость Шведова – Бингама)

Уменьшение среднерасходной вязкости высокопарафинистых битумных вяжущих с ростом перепада давления объясняется особенностями их внутреннего строения. В неподвижном состоянии дисперсная фаза образует непрерывную структуру, обладающую определенной прочностью. При низких значениях $|dp/dx|$ течение происходит по тонким прослойкам между элементами твердофазной структуры [40, 41]. Гидравлическое сопротивление в этом случае очень велико, что и обуславливает высокие значения вязкости при низких значениях перепада давления. При высоких значениях $|dp/dx|$ происходит разрушение коагуляционной структуры, приводящее к уменьшению вязкости.

С увеличением предельного напряжения сдвига σ_Y вертикальная асимптота зависимости среднерасходной вязкости от перепада давления смещается вправо, при этом крутизна кривых уменьшается (рис. 2, а). Величина среднерасходной вязкости увеличивается с ростом σ_Y . Этот эффект наиболее выражен для низкоскоростных потоков, движущихся при умеренном перепаде давления $2\sigma_Y/R < |dp/dx| < 10\sigma_Y/R$.

Рост значений параметра консистенции приводит к увеличению значений эффективной вязкости. При этом с ростом k зависимость среднерасходной вязкости от перепада давления становится более пологой (рис. 2, б).

Анализ влияния нелинейности на изменение среднерасходной вязкости с ростом перепада давления позволяет сделать следующие выводы. При малых перепадах давления $2\sigma_Y/R < |dp/dx| < 4\sigma_Y/R$ эффективная вязкость растет при уменьшении показателя n . Действительно, в средах с выраженными пластическими свойствами процесс течения сопровождается деформацией макро-

молекул и их ориентацией по потоку, что приводит к дополнительным затратам энергии. При этом рост диссипативных потерь проявляется как увеличение эффективной вязкости. При больших перепадах давления $4\sigma_y/R < |dp/dx|$, когда процессы перестройки течения на микроуровне завершились, пластическая среда становится более подвижной по сравнению с ньютоновской. Это приводит к уменьшению эффективной вязкости в средах с малыми значениями показателя нелинейности (рис. 2, в).

Заключение

В ходе выполнения работы исследована структура течения и гидравлические характеристики высокопарафинистого битумного вяжущего и получены следующие результаты:

С ростом содержания парафинов происходит увеличение предельного напряжения сдвига σ_y , при этом увеличивается прочность коагуляционной структуры, что приводит к уменьшению расходных характеристик при заданном перепаде давления.

Содержание смол в битумном вяжущем определяет величину показателя консистенции k , поэтому в средах, характеризующихся высокими значениями показателя консистенции, для обеспечения заданного расхода требуется приложить большой перепад давления.

С увеличением показателя нелинейности n содержание высокомолекулярных соединений в битумах уменьшается, поэтому при заданном перепаде давления расходные характеристики увеличиваются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Методические рекомендации* по проектированию жестких дорожных одежд. Москва : Информавтодор. 2004.
2. *ТР 134-03*. Технические рекомендации по устройству и приемке в эксплуатацию дорожных покрытий с учетом требований международных стандартов по ровности. Москва : Москва, 2003.
3. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 158–170.
4. Бабак О.Г., Старков Г.Б. Применение модифицированных вяжущих в дорожном строительстве // Дорожная техника и технологии. 2001. № 5. С. 72–75.
5. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. Москва : Химия, 1973. 432 с.
6. Грудников И.Б. Производство нефтяных битумов. Москва : Химия, 1983. 192 с.
7. Галдина В.Д. Модифицированные битумы. Омск : СибАДИ, 2009. 228 с.
8. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
9. Sybilski D. Non-newtonian viscosity of polymer-modified bitumens // Materials and Structures. 1993. V. 26. P. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233
10. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Харьков : ХНАДУ, 2014. 180 с.
11. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К., Смирнова Н.Г., Агафонова М.В. Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (43). С. 80–93.

12. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 560 с.
13. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Москва : Мир, 1964.
14. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запryanov З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. Москва : Бюро Квантум, 1996.
15. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. Москва : Наука, 2005.
16. Матвиенко О.В. Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.
17. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 2. С. 243–252.
18. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel – Bulkley fluids mixing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Ser. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. P. 012034.
19. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока вязкопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1129–1137.
20. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вязжущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.
21. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 1. С. 215–226.
22. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 6. С. 2641–2651.
23. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 3. С. 544–547.
24. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 1. С. 192–199.
25. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Асеева А.Е., Веник В.Н. Течение битумного вязжущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171–192.
26. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование гидравлических характеристик потока водно-песчаной суспензии в трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 129–144.
27. Матвиенко О.В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 99–112.
28. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1974.
29. Базуев В.П., Матвиенко О.В., Вороненко В.Л. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 4. С. 121–128.
30. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Туркасова Н.Г., Байгулова А.И. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 202–213.

31. Матвиенко О.В., Агафонцева М.В., Базуев В.П. Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 144–156.
32. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 231–245.
33. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Экспериментальное исследование процесса кавитации в технологических устройствах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 165–176.
34. Матвиенко О.В., Эфа А.К., Базуев В.П., Евтюшкин Е.В. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке // Известия вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 6. С. 96–107.
35. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязущих // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 132–143.
36. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Смирнова Н.Г., Пушкарева Г.В., Дульзон Н.К. Исследование смещения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 123–134.
37. Матвиенко О.В., Литвинова А.Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 79–99.
38. Матвиенко О.В. Исследование теплообмена и формирования турбулентности во внутреннем закрученном потоке жидкости при низких числах Рейнольдса // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 4. С. 908–918.
39. Матвиенко О.В., Асеева А.Е. Математическое моделирование закрученного потока термовязкой псевдопластической жидкости Сиско в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 4. С. 857–869.
40. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. Москва : Транспорт, 1973. 246 с.
41. Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Кудинов А.В., Нечаев А.Н., Десянников А.С. Взаимосвязь адгезионных свойств нефтяных дорожных битумов и содержания в них высокоплавких парафинов // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 1. С. 36–39.

REFERENCES

1. Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu zhestkih dorozhnyh odezhd [Design recommendations on rigid pavements]. Moscow: Informavtodor. 2004 (rus)
2. Technical Recommendations 134-03 Tehnicheskie rekomendacii po ustrojstvu i priemkev jekspluataciju dorozhnyh pokrytij s uchetom trebovanij mezhdunarodnyh standartov po rovnosti [Technical recommendations for device and acceptance of operation of pavements with respect to international standards of planeness]. Moscow. 2003. (rus)
3. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutyunyan E.R. Matematicheskoye modelirovaniye sdvigoustoychivosti asfal'tobetonnykh pokrytij avtomobil'nykh dorog [Mathematical modelling of road pavement shear-resistance]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 4 (63). Pp. 158–170. (rus)
4. Babak O.G., Starkov G.B. Primeneniye modifitsirovannykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Application of modified binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. Pp. 72–75. (rus)
5. Gun R.P. Neftyanyye bitumy [Petroleum asphalt]. Moscow: Khimia, 1973. 432 p. (rus)
6. Grudnikov I.B. Proizvodstvo neftyanykh bitumov [Production of petroleum asphalt]. Moscow: Khimia, 1983. 192 p. (rus)
7. Galdina V.D. Modifitsirovannyye bitumy [Modified asphalt]. Omsk: SibADI. 2009. 228p. (rus)

8. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manufacturing processes of dispersed bitumen systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
9. Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumen. *Materials and Structures*. 1993. V. 26, Pp. 15–23. DOI: 10.1007/BF02472233. (rus)
10. Zolotarev V.A. Dorozhnyye bitumnyye vyazhushchiye i asfal'tobetony [Road bituminous binders and asphalt concretes]. Kharkiv, 2014. 180 p. (rus)
11. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoye issledovaniye struktury techeniya i teploobmena pri zakruchennom techenii bitumno-dispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh. [Numerical simulation of swirling flow structure and heat transfer of bitumen dispersed systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2 (43). Pp. 80–93. (rus)
12. Malkin A.Y., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: Concepts, methods, applications]. Saint-Petersburg: Professia, 2007. 560 p. (rus)
13. Wilkinson W.L. Nen'yutonovskie zhidkosti [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964. (transl. from Engl.)
14. Kutevov A.M., Polyannin L.D., Zapryanov Z.D. Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoye posobiye [Chemical hydrodynamics. Handbook]. Moscow: Byuro Kvantum, 1996. (rus)
15. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Vyazkoplasticheskiye techeniya: dinamicheskiy khaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Viscoplastic flows: Dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
16. Matvienko O.V. Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale [Numerical simulation of non-Newtonian fluids in cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
17. Matvienko O.V., Evtushkin E.V. Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri ochistke vyazkoplasticheskikh burovnykh rastvorov [Mathematical simulation of dispersed phase separation in hydrocyclone during cleaning of viscoplastic mud]. *Inzhenerno-fizicheskyy zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
18. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel–Bulkley fluid mixing. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering; *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists 'Advanced Materials in Construction and Engineering'*. TSUAB, 2015. 012034. (rus)
19. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskyy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 5. Pp. 1129–1137. (rus)
20. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Sabylina N.R., Aseeva A.E., Surtaeva A.A. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vyazkoplasticheskogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Shvedova – Bingama, v tsilindricheskoi trube [Shvedov-Bingham model of steady flow of visco-plastic bitumen binder in cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturnostroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 20. No. 3. Pp. 158–177. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177. (rus)
21. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskyy zhurnal*. 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
22. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of dilatant Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskyy zhurnal*. 2019. V. 92. No. 6. Pp. 2641–2651. (rus)
23. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskyy zhurnal*. 2011. V. 84. No. 3. Pp. 544–547. (rus)

24. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of dilatant fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 1. Pp. 192–199. (rus)
25. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Techenie bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Ostval'da – de Veilya, v tsilindricheskoi trube [Liquid asphalt binders in cylindrical tube in terms of the Ostwald–de Waele model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 129–144. (rus)
26. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Aseeva A.E. Issledovanie gidravlicheskiy kharakteristik potoka vodno-peschanoy suspensii v trube [Hydraulic properties of sand slurry flow in a pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 171–192. (rus)
27. Matvienko O.V. Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisyvayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube [Steady-state flow of pseudoplastic fluid in cylindrical tube described by the Sisko model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)
28. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of fluids and gas]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
29. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore [Modeling of modifying bitumen in a cavitation mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. P. 121–128. (rus)
30. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsessa modifikatsii bituma v inzhektornom smesitele [Bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
31. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti [Bubble dynamics in swirling flow of nonlinear viscous fluid]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)
32. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoye issledovaniye protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Numerical simulation of cavitation bubbles in a mixing device]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
33. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh [Cavitation process provided by technological devices]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 165–176. (rus)
34. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V. Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke. [Numerical simulation of turbulent jet decay in swirling flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2006. V. 49, No. 6. Pp. 96–107. (rus)
35. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh. [Numerical simulation of transition to the turbulent mode of internal swirl flows of bitumen binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
36. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dulzon N.K. Issledovaniye smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mixing coaxial swirl flows for preparation of dispersed bitumen systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
37. Matvienko O.V., Litvinova A.E. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinitogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Balkli – Gershelya, v tsilindricheskoi trube [Steady flow of high-paraffin bituminous binder in cylindrical tube in terms of Herschel–Bulkley fluid]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 79–99. (rus)

38. *Matvienko O.V.* Issledovaniye teploobmena i formirovaniya turbulentnosti vo vnutrennem zakruchennom potoke zhidkosti pri nizkikh chislakh Reynol'dsa [Heat transfer and turbulence formation in internal swirling fluid flow at low Reynolds numbers]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
39. *Matvienko O.V., Aseeva A.E.* Matematicheskoye modelirovaniye zakruchennogo potoka termovязkoy psevdoplasticheskoy zhidkosti Sisko v tsilindricheskom kanale. [Mathematical simulation of swirling flow of thermal viscous, pseudoplastic Cisco fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2020. T. 93. No. 4. Pp. 827–838. (rus)
40. *Kolbanovskaya A.S., Mikhaylov V.V.* Dorozhnyye bitумы [Road bitumen]. Moscow: Transport, 1973. 246 p. (rus)
41. *Shirkunov A.S., Ryabov V.G., Kudinov A.V., Nechayev A.N., Degtyannikov A.S.* Vzaimosvyaz' adgezionnykh svoystv neftyanykh dorozhnykh bitumov i sodержaniya v nikh vysokoplavkikh parafinov [Relationship between adhesive properties of oil road bitumen and high-melting paraffin content]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2011. No. 1. Pp. 36–39. (rus)

Сведения об авторах

Матвиенко Олег Викторович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Литвинова Алёна Евгеньевна, аспирант, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Фирсанова Наталья Сергеевна, аспирант, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Authors Details

Oleg V. Matvienko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Alyona E. Aseeva, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

Nataliya S. Firsanova, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia