

УДК 621.927

## Моделирование процесса пропарки емкостей для хранения тяжелых нефтепродуктов<sup>1</sup>

Н.Н. Елин<sup>1</sup>, В.Е. Мизонов<sup>2</sup>, А.Ф. Макарычев,<sup>1</sup> Б.В. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУВПО Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: yelinnn@mail.ru; mizonov46@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** На предприятиях, производящих или использующих тяжелые нефтепродукты, необходимо периодически очищать емкости, в которых они хранятся. Процесс очистки таких емкостей путем их пропарки является весьма энергоемким. Использование результатов достоверного математического моделирования этого процесса может позволить выбирать рациональные режимы пропарки, соответствующие минимальному энергопотреблению при заданной степени очистки. Однако построение достоверных моделей на основе линейного описания гидродинамики и теплопереноса невозможно, так как теплофизические свойства нефтепродуктов и паровоздушной смеси внутри емкости существенно меняются в процессе пропарки. В связи с этим необходима разработка нелинейных моделей, учитывающих эти изменения, и последующее включение таких моделей в общее описание процессов.

**Материалы и методы:** Используется метод математического моделирования, основанный на ячейных моделях процессов гидродинамики и теплопереноса. Особенностью подхода является введение зависимости расходных и теплофизических свойств нефтепродукта и паровоздушной смеси от их текущего состояния, а также коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности от параметров теплоносителя.

**Результаты:** Предлагается один из возможных подходов к моделированию нелинейных моделей гидродинамики и теплопереноса. Построена нелинейная ячейная модель эволюции толщины пленки в процессе пропарки емкости, позволяющая проводить численные эксперименты по выбору рациональной организации процесса.

**Выводы:** Учет нелинейных явлений в процессе стекания пленки и ее теплообмена с паровоздушной смесью позволяет более адекватно описывать процесс пропарки емкости и подбирать его рациональные параметры.

**Ключевые слова:** пропарка емкости, толщина пленки, паровоздушная смесь, теплоперенос, тяжелые нефтепродукты, вектор состояния, переходная матрица.

## Modeling of the process of steaming of storage tanks for heavy petroleum products

N.N. Yelin<sup>1</sup>, V.E. Mizonov<sup>2</sup>, A.F. Makarychev<sup>1</sup>, B.V. Zhukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: yelinnn@mail.ru; mizonov46@mail.ru

### Abstract

**Background:** At the plants producing or using heavy petroleum products periodical cleaning of storage tanks is required. Cleaning of such tanks by means of their steaming is an energy consuming process. Using of adequate mathematical models of the process can allow choosing rational regimes of steaming corresponding to minimal energy supply at a given degree of cleaning. However, building of such models based on linear description of hydrodynamics and heat and mass transfer is impossible because thermos-physical properties of petroleum products and steam-gas mixtures change considerably during the process. Thus, it is necessary to develop non-linear models that take into account these changes and to include these models into general process description.

**Materials and methods:** The method of mathematical modeling based on the cell models of hydrodynamics and heat and mass transfer is used. A feature of the model is introduction the dependence of thermos-physical properties of petroleum products and steam-gas mixtures on their current state, and dependence of coefficients of heat and mass transfer on heat carrier parameters.

**Results:** One of approaches to model non-linear hydrodynamics and heat and mass transfer is proposed in the paper. A non-linear model of the film width evolution during steaming of a tank is proposed. It allows conducting numerical experiments to choose the rational parameters of the process.

**Conclusions:** Taking into account the non-linear phenomena in the process of film draining and its heat exchange with gas-steam mixture allows more adequate describing the process of tanks steaming and choosing the rational parameters of the process.

**Key words:** steaming, film width, gas-steam mixture, heat and mass transfer, state vector, transition matrix.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.052-057

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-08-01684)

В настоящее время полностью отсутствуют рекомендации по режимным параметрам процесса пропарки емкостей, использующихся для хранения нефтепродуктов, водяным паром<sup>2</sup>. На практике каждый пользователь таких емкостей рекомендует расход пара и время процесса исходя из своего опыта [1]. Такая практика приводит к завышенным расходам пара на собственные нужды<sup>3</sup>. Поэтому для предприятий, имеющих большой объем таких емкостей (например, нефтеперерабатывающих заводов), выбор рациональных режимов организации процесса является актуальным [2, 3].

Будем рассматривать нефтепродукты, реология которых описывается уравнением Бингама [4]

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dw}{dy}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – напряжение сдвига;  $\mu = \rho_1 v_1$  – динамическая вязкость жидкости. Оба эти параметра зависят от температуры.

Толщина неподвижной пленки нефтепродукта на внутренней поверхности резервуара определяется по формуле

$$\delta_s(t) = \tau_0(t)/\rho_1(t). \quad (2)$$

Зависимости напряжения сдвига, кинематической вязкости и плотности от температуры для нефти и нефтепродуктов представлены в [4, 5].

Повышение температуры влажного воздуха внутри резервуара вследствие подачи в него пара приводит к тому, что пленка нефтепродукта нагревается и ее внешняя часть начинает стекать вниз. Зависимость толщины пленки вязкой жидкости, стекающей по вертикальной поверхности, от расхода представлена в монографии С.С. Кутателадзе и В.Е. Накорякова [6]. Решая эти уравнения относительно скорости стекания пленки, получим:

- при ламинарном режиме

$$w_l = \frac{g \delta_l^2 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{3v_1}; \quad (3)$$

- при турбулентном режиме

$$w_t = \frac{\delta_l^{\frac{5}{7}} \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{12}{21}}}{0,049v_1^{\frac{1}{7}}}. \quad (4)$$

Скорость стекания пленки равна меньшей из рассчитанных величин.

Минимально возможная толщина пленки, при которой ее сплошность нарушается и образуются отдельные капли, определяется условием [6]

$$Re_1 > \frac{4 \left[ \frac{\sigma(1 - \cos \theta)}{\delta \rho_1} \right]^{\frac{3}{5}}}{(g v_1)^{\frac{2}{5}}}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение «нефтепродукт–воздух»;  $\theta$  – угол смачивания нефтепродукта на поверхности стенки;  $Re = q/v_1$ .

Так как движение пленки с минимальными толщинами происходит при ламинарном режиме течения, то получим выражение для минимально возможной толщины пленки:

$$\delta_{\min} = \frac{0,82 \left[ \frac{\sigma(1 - \cos \theta)}{\rho_1} \right]^{\frac{1}{6}} v_1^{\frac{4}{9}}}{\left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{5}{18}}}. \quad (6)$$

Так как скорость стекания пленки зависит от толщины ее подвижной (жидкой) части, изменяющейся по высоте стенки, то и сама скорость стекания изменяется по высоте стенки. Если мысленно разбить высоту резервуара на  $m$  участков высотой  $h = H/m$  каждый, то совокупность толщин подвижной части пленки нефтепродукта для каждого участка можно представить в виде вектора-столбца

$$\delta_l = \begin{bmatrix} \delta_{l1} \\ \delta_{l2} \\ \dots \\ \delta_{l(m-1)} \\ \delta_m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Эволюция этого вектора рассчитывается с помощью матричного рекуррентного уравнения [7]

$$\delta_l^{k+1} = P_v * \delta_l^k, \quad (8)$$

где  $P_v$  – переходная матрица:

$$P_v = \begin{bmatrix} 1 - v_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v_1 & 1 - v_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 - v_{m-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & v_{m-1} & 1 - v_m \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Каждый столбец данной матрицы относится к соответствующему участку, на которые мысленно разбита высота емкости. Компоненты матрицы, расположенные на ее главной диагонали, равны долям массы подвижной части пленки мазута, оставшейся на данном участке после одного временного перехода продолжительностью  $\Delta t$ , а на диагонали, примыкающей к ней снизу, – долям массы, перешедшим на соседний нижний участок. Величины  $v_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) представляют собой безразмерную скорость стекания подвижной части пленки:

$$v_i = w \Delta t / h, \quad (10)$$

где  $w$  рассчитывается по формулам (3),(4).

Повышение температуры влажного воздуха в емкости от  $t_0$  до  $t$  находится из уравне-

<sup>2</sup> ГОСТ 1510-84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение [12.03.15].

<sup>3</sup> Там же.

ния баланса тепловой энергии. Если часть вводимого пара конденсируется, то

$$M_{ad} c_{p_a} t_0 + M_s i_s(t_0) + \Delta M_s i_s(t_s) = M_{ad} c_{p_a} t + [M_s + (\Delta M_s - M_c)] i_s(t) + M_c c_w t + kF(t - t_{out}), \quad (11)$$

в противном случае

$$M_{ad} c_a t_0 + M_s i_s(t_0) + \Delta M_s i_s(t_s) = M_{ad} c_a t + (M_s + \Delta M_s) i_s(t) + kF(t - t_{out}), \quad (12)$$

где  $M_{ad}$  и  $M_s$  – массы сухого воздуха и водяного пара в емкости;  $\Delta M_s$  – прирост массы водяного пара за время  $\Delta\tau$  ( $\Delta M_s = G_s \Delta\tau$ , где  $G_s$  – массовый расход пара, подаваемого в емкость в процессе ее пропарки);  $i_s(t)$  – удельная энтальпия водяного пара на линии насыщения;  $c_a$  и  $c_w$  – удельные теплоемкости сухого воздуха и воды;  $F$  – площадь поверхности «влажный воздух – мазут»;  $t_{out}$  – температура окружающей среды;  $k$  – коэффициент теплопередачи от влажного воздуха в окружающую среду.

Влагосодержание и теплофизические параметры влажного воздуха рассчитываются по методикам [8, 9], коэффициент теплопередачи – по [10, 11].

Разработанная математическая модель (1)–(12) и ее компьютерная реализация в программной среде МАТЛАБ использовалась для расчета динамики изменения параметров пленки нефтепродукта на стенках внутренней поверхности цилиндрического резервуара и теплофизических параметров парогазовой смеси внутри него.

В течение промежутка времени  $\Delta\tau$  происходят следующие изменения параметров находящегося в емкости влажного воздуха и пленки нефтепродукта на ее внутренней поверхности.

Увеличивается температура и влажность воздуха внутри емкости вследствие подачи в нее пара. При достижении относительной влажностью величины 100 % часть вводимого пара конденсируется на поверхности пленки нефтепродукта. Следует помнить, что при этом конденсируется не весь поступивший в емкость пар, так как с увеличением температуры увеличивается его давление насыщения.

Часть влажного воздуха покидает емкость через дыхательный клапан, с помощью которого в емкости поддерживается постоянное давление (около 1 ата). Плотность, а следовательно, и масса находящегося в емкости влажного воздуха уменьшаются вследствие увеличения температуры и влагосодержания. Образовавшийся конденсат удаляется из емкости в ее нижней части.

Увеличивается температура пленки нефтепродукта, покрывающего внутреннюю поверхность емкости. Внешняя часть пленки становится подвижной (текучей) и начинает стекать вниз. Когда вся пленка становится подвижной, распределение ее по высоте емкости определяется только гидродинамическими параметрами ее течения.

Часть теплоты, поступившей в емкость с паром, теряется в окружающую среду вследствие теплопередачи через пленку мазута и стенку резервуара. Коэффициент теплоотдачи от влажного воздуха к пленке нефтепродукта резко увеличивается с началом конденсации части вводимого пара, т. е. при достижении 100 %-й влажности.

Можно предположить, что тепловые потери увеличиваются со временем по мере увеличения температуры в емкости, и поэтому рост температуры замедляется.

Вычислительный процесс организован таким образом, что для каждого момента времени, отделяемого от предыдущего момента выбранным шагом  $\Delta\tau$ , с помощью уравнений баланса энергии (10), (11) и уравнений кинетики (8) рассчитываются температура, актуальное и максимально возможное влагосодержание, давление насыщения и парциальное давление пара в паровоздушной смеси, ее плотность, относительная влажность и энтальпия, количество образовавшегося конденсата.

Для пленки нефтепродукта на стенках емкости рассчитываются средние по высоте стенки емкости теплофизические параметры (напряжение сдвига, вязкость, плотность, поверхностное натяжение, теплопроводность), минимально возможная толщина пленки, зависящие от температуры, а также распределение толщин твердой и жидкой части пленки и скорости ее стекания по высоте стенки емкости.

Расчет прекращается, когда средняя по высоте емкости толщина пленки нефтепродукта достигает минимально возможной [12].

Пример результатов расчета динамики распределения толщины пленки нефтепродукта по высоте цилиндрического резервуара диаметром 8,5 м, высотой 7,049 м при постоянном давлении внутри него, равном барометрическому, представлен на рис. 1.

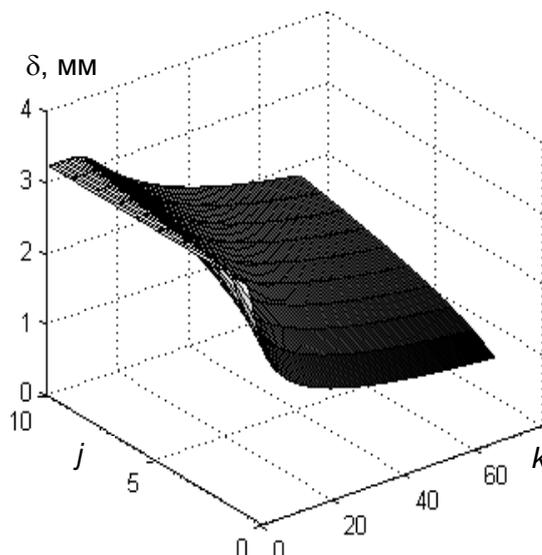


Рис. 1. Эволюция распределения толщины пленки нефтепродукта по высоте емкости

В процессе вычислительных экспериментов выявлено, что скорость увеличения температуры парогазовой смеси внутри емкости уменьшается со временем, асимптотически приближаясь к некоторой величине, при которой вся поступившая в емкость с греющим паром теплота теряется в окружающую среду путем теплопередачи через стенку резервуара и с выбрасываемой через дыхательный клапан смесью. В зависимости от расхода и температуры греющего пара, температуры окружающей среды, а также термического сопротивления стенки, существуют два характерных случая. В первом из них, когда максимальная температура парогазовой смеси внутри емкости превышает 100 °С (назовем это «режим 1»), процесс можно разделить на три стадии:

1. Относительная влажность воздуха быстро увеличивается от начальной величины до 1. При этом парциальное давление пара увеличивается до давления насыщения, влагосодержание – до максимально возможной величины. Как правило, эта стадия быстро заканчивается.

2. Относительная влажность воздуха равна 1, парциальное давление пара равно давлению насыщения, а влагосодержание – максимально возможному. Часть вводимого в емкость греющего пара конденсируется. При этом коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к пленке нефтепродукта резко увеличивается, разность температур между ними уменьшается. Данная стадия заканчивается, когда температура парогазовой смеси достигает 100 °С.

3. При температуре парогазовой смеси в емкости больше 100 °С давление насыщения превышает 1 ата, т. е. всегда больше парциального давления пара. Конденсация пара прекращается, коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к пленке нефтепродукта резко уменьшается, а разность температур между ними увеличивается. Относительная влажность начинает уменьшаться.

В случае, когда максимальная температура парогазовой смеси внутри емкости не достигает 100 °С (назовем это «режим 2»), третья из вышеперечисленных стадий процесса отсутствует.

На рис. 2 представлены примеры расчетов динамики температуры, а на рис. 3 – относительной влажности парогазовой смеси внутри емкости для режимов 1 и 2.

Переход от второй к третьей стадии процесса для режима 1 (верхние графики) происходит приблизительно на 90-м шагу по времени (в данном примере продолжительность одного шага составляет 5 секунд). На рис. 2,а это соответствует скачкообразному уменьшению температуры пленки нефтепродукта вследствие резкого уменьшения коэффициента теплоотдачи к ней от парогазовой смеси, обуслов-

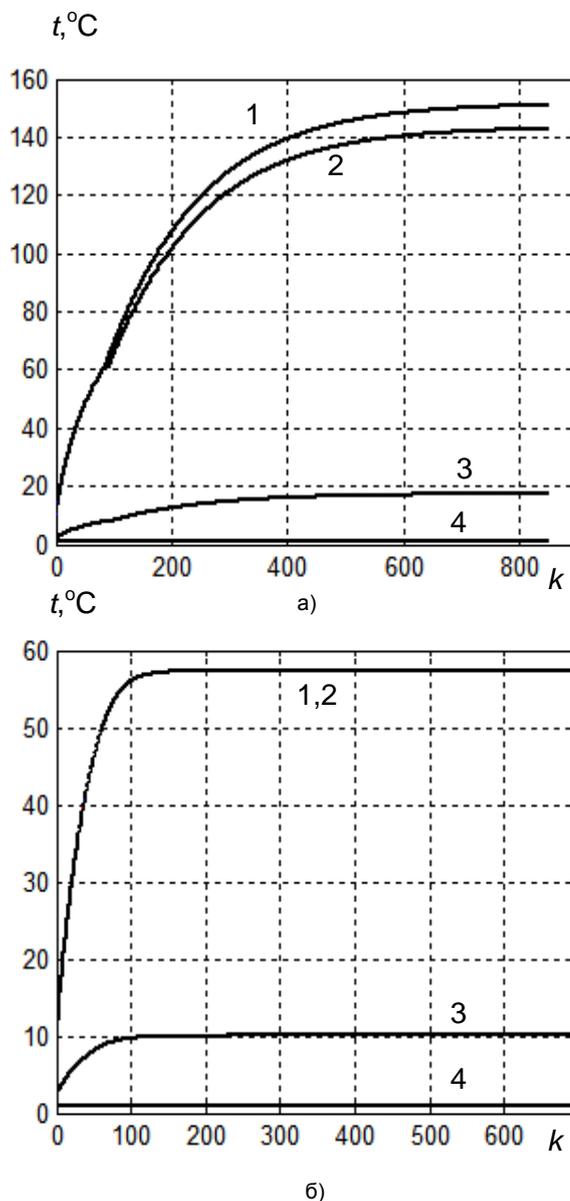


Рис. 2. Динамика температур внутри емкости: 1 – парогазовая смесь; 2 – пленка нефтепродукта; 3 – внутренняя поверхность стенки емкости; 4 – наружная поверхность стенки емкости; 5 – окружающая среда; а – режим 1; б – режим 2

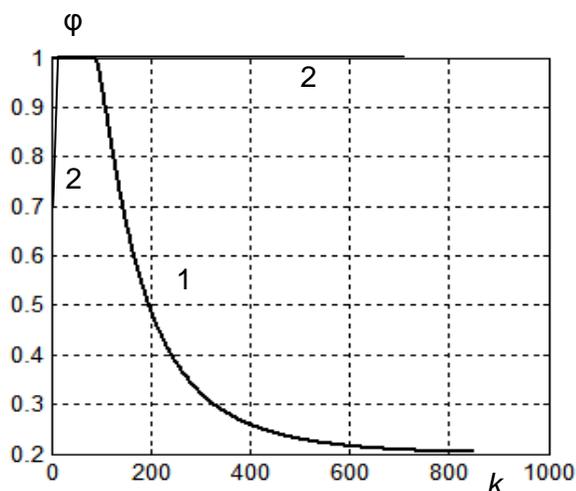


Рис. 3. Динамика относительной влажности парогазовой смеси внутри емкости: 1 – режим 1; 2 – режим 2

ленного прекращением конденсации пара на ее поверхности.

На рис. 3 в этот момент величина относительной влажности парогазовой смеси становится меньше 1 и начинает уменьшаться, парциальное давление пара становится меньше давления насыщения и разница между ними увеличивается со временем, а накопленное количество конденсата прекращает увеличиваться.

Результаты расчетов динамики средней по высоте толщины пленки нефтепродукта, в том числе твердой и жидкой части, представлены на рис. 4.

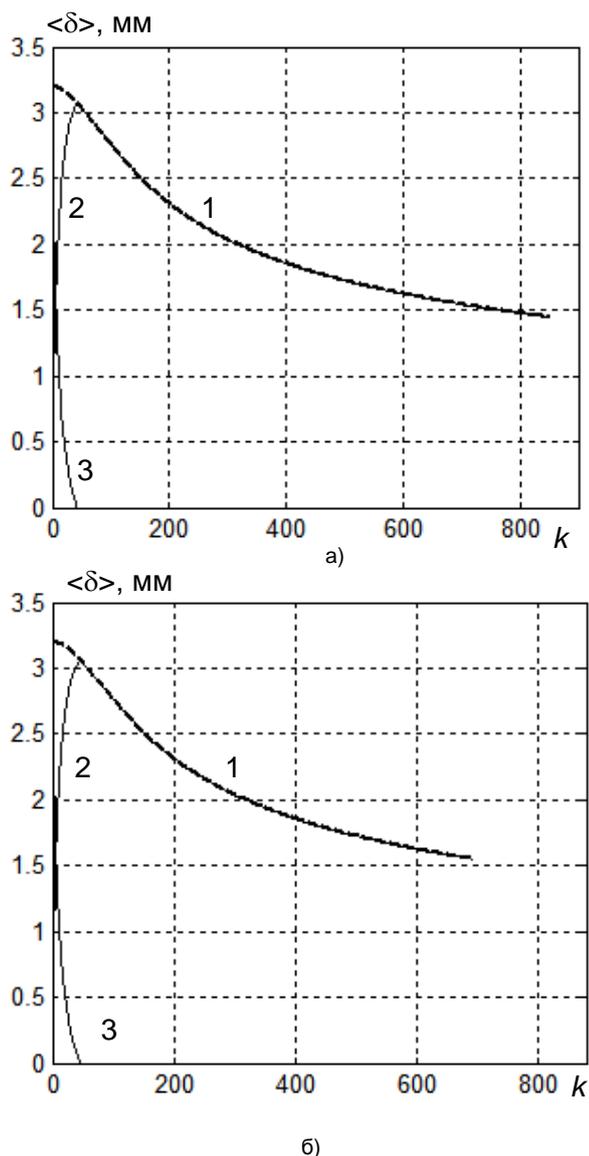


Рис. 4. Эволюция средней по высоте емкости толщины пленки нефтепродукта: 1 – общая; 2 – жидкая; 3 – твердая; а – режим 1; б – режим 2

Результаты расчетов показывают, что пленка нефтепродукта довольно быстро теряет свои неньютоновские свойства, становится жидкой и начинает стекать в нижнюю часть емкости. В рассматриваемых примерах этот период занимает около 5–6 % от общего времени процесса (рис. 4).

Важнейшими параметрами, определяющими эффективность процесса пропарки емкости, являются время его протекания и общие затраты энергии.

В рассматриваемом примере параметры теплоносителя заданы постоянными во времени и одинаковыми для обоих режимов (расход теплоносителя 0,35 кг/с, его температура 220 °С), а различия в максимальной температуре парогазовой смеси, достигаемой внутри емкости, обусловлены разным термическим сопротивлением ее стенки (для режима 1 коэффициент теплопроводности материала стенки принят равным 0,2 Вт/м·К, для режима 2 – 0,3 Вт/м·К). Поэтому единственный критерий технологической оптимальности в данном случае – время протекания процесса.

Результаты расчетов оказались, на первый взгляд, неожиданными: продолжительность режима 1, при котором температура пленки нефтепродукта достигает 143 °С, составила 4260 с, а продолжительность режима 2, при котором температура пленки нефтепродукта достигает всего 57 °С, – 3465 с, т. е. на 23 % меньше. Объяснение этого результата заключается в том, что минимально возможная толщина пленки нефтепродукта, зависящая от его температуры (6), для режима 1 составила 1,221 мм, а для режима 2 – 1,313 мм. Так как скорость стекания жидкой пленки, определяющая длительность процесса, сильно уменьшается при уменьшении ее толщины, продолжительность процесса при этом может заметно увеличиться даже при небольшом уменьшении минимально возможной толщины пленки.

Так как вязкость, поверхностное натяжение и плотность нефтепродукта, входящие в (6), определяются его составом, то единственным параметром, на который можно повлиять в целях уменьшения времени процесса, является угол смачивания «нефтепродукт–материал стенки», зависящий не только от свойств нефтепродукта, но и от свойств материала стенки. Для этого можно использовать специальные покрытия.

Предлагаемая методика и ее компьютерная реализация позволяет более адекватно описывать процесс пропарки емкости и подбирать его рациональные с точки зрения энергосбережения параметры за счет учета нелинейных явлений в процессе стекания пленки и ее теплообмена с паровоздушной смесью.

#### Список литературы

1. **Хизгилов И.Х.** Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов на нефтебазах и нефтепродуктопроводах. Справочное пособие. – М.: Недра, 1988. – 187 с.
2. **Моделирование** и оптимизация трубопроводных сетей паропроводов промышленных предприятий / Н.Н. Елин, П.А. Шомов, П.А. Перов, М.А. Гольбын // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 63–66.
3. **Щербаков А.З., Овчинников В.А., Селиванов Н.В.** Определение расхода пара на подогрев нефтепродуктов в

резервуарах // НТИС. Сер. Нефтехимия и нефтепереработка. – М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – № 4. – С. 13–15.

4. **Тетельмин В.В., Язев В.А.** Реология нефти. – М.: Гранита, 2009. – 256 с.

5. **Попов В.Н., Цедерберг Н.В., Морозова Н.А.** Экспериментальное исследование теплопроводности семи образцов нефтепродуктов // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1964. – № 6. – С. 55–57.

6. **Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.** Теплообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука – Сибирское отд., 1984. – 301 с.

7. **Tamir A.** Applications of Markov chains in Chemical Engineering // Elsevier publishers. – Amsterdam, 1998. – 604 p.

8. **Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. – М.: Наука, 1979. – 512 с.

9. **Моделирование** контактного утилизатора теплоты отработавшего сушильного агента / В.Е. Мизонов, П.В. Якимычев, В.А. Зайцев, Н.Н. Елин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 10. – С. 127–129.

10. **Ячеечная** модель нелинейной теплопередачи через многослойную стенку / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Р. Порошин, Н.Н. Елин // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 6. – С. 50–56.

11. **Тепло- и массообмен.** Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

12. **Михайлов В.М.** К расчету стекания остатка горячего нефтепродукта со стенок железнодорожной цистерны // Известия вузов. Нефть и газ. – 1978. – № 11. – С. 78–80.

#### References

1. Khizgilov, I.X. *Ratsional'noe ispol'zovanie toplivno-energeticheskikh resursov na neftebazakh i nefteproduktoprovodakh. Spravochnoe posobie* [Rational utilization of fuel and energy resources at oil-plants and oil-products pipelines]. Moscow, Nedra, 1988. 187 p.

2. Elin, N.N., Shomov, P.A., Perov, P.A., Golybin, M.A. Modelirovanie i optimizatsiya truboprovodnykh setey paroprovodov promyshlennykh predpriyatiy [Modelling and optimization of steam pipelines network of industrial enterprises]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 63–66.

3. Shcherbakov, A.Z., Ovchinnikov, V.A., Selivanov, N.V. *Opreделение raskhoda para na podogrev nefteproduktov v rezervuarakh* [Determination of steam flow consumption for heating petroleum products in storage tanks]. *NTIS. Ser. Neftekhimiya i neftepererabotka*. Moscow, VNIIOENG, 1990, no. 4, pp. 13–15.

4. Tetel'min, V.V., Yazev, V.A. *Reologiya nefiti* [Oil rheology]. Moscow, Granitsa, 2009. 256 p.

5. Popov, V.H., Tsederberg, H.B., Morozova, N.A. *Eksperimental'noe issledovanie teploprovodnosti semi obraztsov nefteproduktov* [Experimental study of thermal conductivity of seven samples of petroleum products]. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz*, 1964, no. 6, pp. 55–57.

6. Kutateladze, S.S., Nakoryakov, V.E. *Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat and mass transfer in liquid-gas systems]. Novosibirsk: Nauka – Sibirskoe otdelenie, 1984. 301 p.

7. Tamir, A. Applications of Markov chains in Chemical Engineering. Elsevier publishers. Amsterdam, 1998. 604 p.

8. Kirillin, V.A., Sychev, V.V., Sheyndlin, A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering thermodynamics]. Moscow, Nauka, 1979. 512 s.

9. Mizonov, V.E., Yakimychev, P.V., Zaytsev, V.A., Elin, N.N. Modelirovanie kontaktnogo uutilizatora teploty otrabotavshogo sushil'nogo agenta [Modeling of the contact heat utilizer of spent drying agent]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, no. 10, pp. 127–129.

10. Fedosov, S.V., Mizonov, V.E., Poroshin, N.R., Elin, N.N. Yachechnaya model' nelineynoy teploperedachi cherez mnogoslouynuyu stenu [Cell model of nonlinear heat transfer through a multilayer wall]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2011, no. 6, pp. 50–56.

11. Ametistov, E.V., Grigor'ev, V.A., Emtsev, B.T. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiiy eksperiment: spravochnik* [Heat and mass transfer. Thermotechnical experiment: a reference book]. Moscow, Energoizdat, 1982. 512 p.

12. Mikhailov, V.M. K raschetu stekaniya ostatka goryachego nefteprodukta so stенок zheleznodorozhnoy tsisterny [On calculation of petroleum product residue draining on the walls of a rail tank]. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz*, 1978, no. 11, pp. 78–80.

*Елин Николай Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,  
e-mail: yelinnn@mail.ru

*Мизонов Вадим Евгеньевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,  
e-mail: mizonov46@mail.ru

*Макарычев Александр Федорович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
аспирант кафедры гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,  
e-mail: exquler@ya.ru

*Жуков Борис Вячеславович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
доцент кафедры гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,  
e-mail: yelinnn@mail.ru