

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Транспортная инфраструктура

УДК [UDC] 519.8

DOI 10.17816/transsyst20206360-75

© Т. С. Карпова, В. И. Моисеев, В. А. Ксенофонтова

Петербургский государственный университет путей сообщений

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕФТЕНАЛИВНОГО ТЕРМИНАЛА ДЛЯ ВЯЗКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

В статье рассматриваются проблемы, возникающие при перевозке вязких нефтепродуктов при низких температурах, предложены пути их решения.

Цель: построение математической модели, описывающей бизнес-процесс; решение построенной задачи с использованием имитационного моделирования.

Материалы и методы: положения теории вероятностей и математической статистики; разработка математической модели; разработка имитационной модели с использованием платформы Business Studio.

Результаты: построены математическая и имитационная модели слива вязких нефтепродуктов, показывающие возможности сокращения времени слива; проанализирована работа предприятия при привлечении дополнительного оборудования.

Заключение: в работе определена функция, возвращающая количество разгруженных вагонов, расход пара и электроэнергии; проведено имитационное моделирование.

Ключевые слова: вязкие нефтепродукты, железнодорожные перевозки, математическая модель, имитационная модель

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Transport Infrastructure

© Tatyana S. Karpova, Vladimir I. Moiseev, Vera A. Ksenofontova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

SIMULATION OF THE OPERATION OF AN OIL LOADING TERMINAL FOR VISCOUS PETROLEUM PRODUCTS

The article discusses problems encountered in the carriage of viscous petroleum products at low temperatures and proposes solutions.

Aim: Construction of a mathematical model describing the business process; solution of the constructed problem using simulation.

Materials and Methods: The position of probability theory and mathematical statistics; the development of a mathematical model; the development of a simulation model using the Business Studio platform.

Results: mathematical and simulation models of the discharge of viscous petroleum products have been constructed showing possibilities of reducing the discharge time; the work of the enterprise was analyzed with additional equipment.

Conclusion: a function is defined, which returns the quantity of unloaded wagons, steam and electricity consumption; simulations are carried out.

Key words: viscous petroleum products, railway transport, simulation model, mathematical model

ВВЕДЕНИЕ

По объему перевозок нефть и нефтепродукты занимают второе место в структуре перевозок РЖД, а по доходной ставке – первое. Несмотря на временное снижение добычи нефти, обусловленное межгосударственными соглашениями, в перспективе, по прогнозам экспертов, объемы перевозок нефти и нефтепродуктов должны возрасти [1, 2].

Нефтяные запасы России, способны полностью удовлетворять её внутренние потребности и обеспечивать высокий уровень экспорта, но качество нефти (за исключением Грозненского месторождения) не высокое.

Нефти России содержат свыше 40 % тяжелых фракций: парафинов, асфальтенов и др., а также таких вредных примесей как сера. Поэтому при переработке нефти и выделения из неё легких и самых ценных фракций: бензина и керосина, остается значительная доля темных нефтепродуктов: мазутов, масел, крекинг-остатков, гудрона, нефтебитумов и др.

Они используются как котельные топлива, применяются в строительстве, являются ценным сырьем при производстве пластмасс, необходимы в дорожном строительстве при приготовлении асфальтобетонов и т.д. Объемы добычи и переработки нефти неуклонно растут, а вместе с ними и объемы перевозок темных нефтепродуктов, составляя на настоящий момент десятки миллионов тонн в год. Более чем на 60 % их перевозки осуществляет железная дорога, около 30 % приходится на морской и речной транспорт, и лишь на 10 % автомобильный транспорт и трубопроводы.

Основные трудности в организации железнодорожных перевозок темных нефтепродуктов в РФ вызваны следующими факторами [3, 4]:

- географическим положением основных районов нефтедобычи (полуостров Ямал, Сибирь и Дальний Восток), удаленных от промышленных центров страны, где проживает основная часть населения и расположены большинство промышленных предприятий – потребителей нефтепродуктов;

- холодным континентальным климатом и продолжительным зимним периодом на большей части страны;
- физико-химическими свойствами темных нефтепродуктов, вязкость которых резко возрастает при охлаждении, при том, что их разогрев, для восстановления текучести также затруднен из-за пожарной опасности. В номенклатуре железнодорожных перевозок темные нефтепродукты относят к вязким нефтепродуктам (ВНП);
- низкой разветвленностью железнодорожной сети в большинстве регионов России; при этом средняя продолжительность перевозок нефтегрузов по Европейской части России составляет 7,5 суток, а с учетом её Азиатской части доходит до 15 суток;
- спецификой вагонного парка РФ, в котором доля вагонов-цистерн с тепловой изоляцией котла очень мала, их применяют для перевозок лишь небольшого количества затвердевающих наливных грузов.

Вязкие нефтепродукты наливают в котел вагона-цистерны в разогретом состоянии при температуре близкой к 100 °С, когда их вязкость мала, а время налива составляет около 60–90 мин.

За время транспортирования ВНП охлаждаются до перехода в высоковязкое состояние. Их выгрузка из вагона-цистерны и передача по наземным трубопроводам в нефтехранилища становятся невозможными без предварительного разогрева [5–7].

Теплофизические характеристики ВНП, на долю которых приходится наибольшие (свыше 70 %) объёмы перевозок, представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики основных видов ВНП

Интервал температур $T, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho_{жс}$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Теплоемкость $C_{жс}$ $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}$	Вязкость $\nu_{жс} \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	Теплопроводность $\lambda_{жс}$ $\text{Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$	Кoeffиц. теплового расширения, $\beta \cdot 10^4$ град^{-1}
Мазуты флотские (Ф-5; Ф-12)					
+20...40	900...950	1880	96 ...43	0,13	9,11
Мазуты котельные (М20, М-40)					
+20...60	982...976	1863	220...60	0,105	9,31
Мазут котельный (М100)					
+35...60	984...970	1860	825...193	0,105	9,57
Мазут котельный (М100 парафинистый)					
+35...60	984...970	1863	3000-400	0,105	9,57
Крекинг-остатки (М200)					
+40...60	1010...998	1848	3674...668	0,102	9,57

Для перевозок ВМП используют как специализированный подвижной состав (вагоны цистерны, имеющие средства разогрева нефтегруза перед выгрузкой), так и нефтебензиновые цистерны общего назначения, для выгрузки которых используют наземное оборудование, осуществляющее разогрев нефтегруза. Те и другие вагоны-цистерны возвращают на нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) порожняком для проведения их очистки от высоковязких остатков. Это существенно увеличивает себестоимость доставки груза.

Специализированный вагон-цистерна (модель 15-1566) для перевозок ВМП показан на Рис. 1 [8]. Вместимость его котла составляет 66 м^3 , наружный диаметр равен 3 м, теплоизолирующей оболочки котел не имеет. На нижней половине котла жестко укреплен паробоггревательный кожух, охватывающий всю нижнюю половину. При выгрузке ВМП в зазор между корпусом котла и кожухом подают пар, которым и обеспечивается разогрев нефтегруза [9]. Разогрев ВМП является продолжительной и чрезвычайно энергозатратной операцией [10]. Подсчитано, что общий годовой простоя вагонов-цистерн вагонного парка России под сливом ВМП превышает 1 млн. вагоночасов, а на разогрев нефтепродукта расходуется свыше 600 тыс. тонн условного топлива.

На сегодняшний день наработано огромное число инженерных решений по совершенствованию операции слива ВМП, направленные на сокращение времени и снижение энергозатрат. Но кардинального прорыва в решении проблемы снижения себестоимости зимних перевозок ВМП так и не получилось.

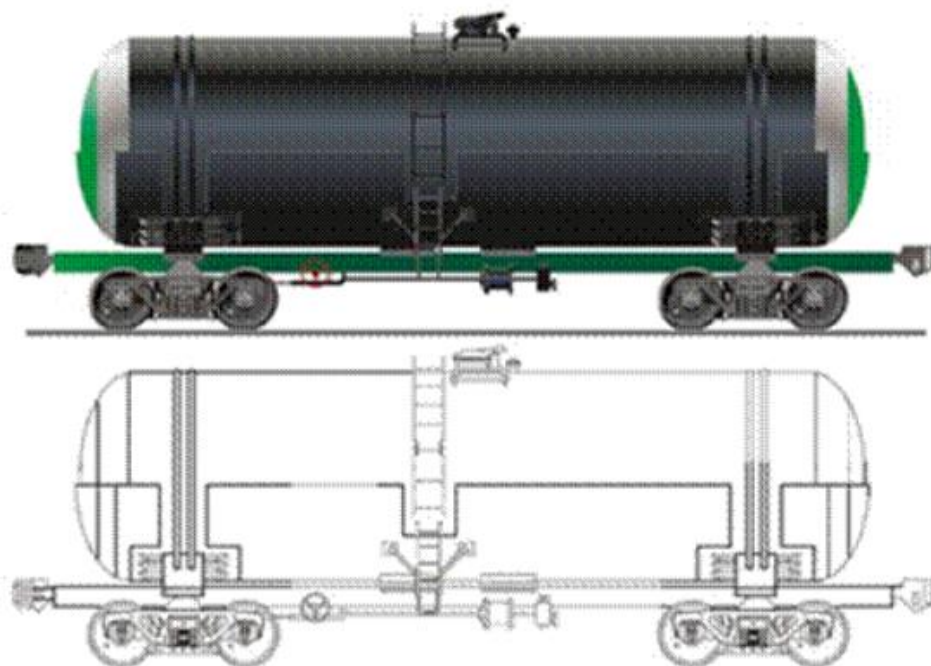


Рис. 1. Вагон-цистерна для перевозки вязких нефтепродуктов модель 15-1566

В работе рассматривается новый и нетрадиционный способ снижения себестоимости транспортировки ВМП (на примере котельного мазута марки М100) за счет рационального использования, как его физических свойств, так и особенностей конструкций вагона-цистерны. Нефтепродукт предлагается перевозить в устойчивом, но неравновесном, так называемом стратифицированном состоянии. При этом плотность ВМП в нижней части котла вагона-цистерны постоянно поддерживается большей, чем в верхней его части. В этом случае сходит на нет естественная конвекция горячего жидкого нефтепродукта на холодных стенках котла. Конвекция особенно интенсивная в первые 15–20 часов после налива ВМП в котел цистерны, когда температура нефтепродукта велика, а вязкость мала. Конвективный теплоперенос является основным механизмом охлаждения нефтепродукта внутри вагона-цистерны, его молекулярная теплопроводность, как видно из Табл. 1 очень мала [11].

Перевод горячего ВМП в стратифицированное состояние осуществляется на стадии заполнения котла вагона-цистерны и достигается следующим образом.

Авторами разработан новый вариант установки сливного прибора на котел вагона-цистерны [12] при котором уплотнительная манжета, выполненная из масла и бензостойкой резины тепло изолируется от наливаемого горячего нефтепродукта.

Мероприятие позволяет повысить исходную температуру ВМП при наливке до $+120...130$ °С, т.е. до уровня значительно превышающего температуру кипения воды при нормальных условиях. Тогда налив ВМП можно одновременно совмещать с охлаждением нижней половины котла вагона-цистерны. Объем свободного пространства между парообогревательным кожухом и стенкой котла вагона-цистерны приблизительно составляет 4 м³, кроме того, он имеет патрубки для сброса пара в атмосферу. Если этот объем предварительно заполнить водой, то вода, при наливке ВМП закипает, превращаясь в пар.

Кипение сопровождается поглощением большого количества теплоты, забираемой от наливаемого нефтепродукта. Образующийся пар сбрасывается в атмосферу, а наливаемый мазут охлаждается до температуры $+50...+60$ °С. Это охлаждение происходит только в нижней половине котла вагона-цистерны. Температура мазута в верхней его половине остается на уровне $+120...130$ °С. Как видно из Рис. 2 с понижением температуры до 80 °С плотность мазута увеличивается на 4–5 %. Нефтепродукт оказывается в стратифицированном состоянии.

Мазут будет охлаждаться как сплошное твердое тело и перейдет в высоковязкое состояние не во всем объеме котла вагона-цистерны, а лишь у его стенок, образуя теплоизолирующую корку толщиной 3–4 см и массой 5–6 тонн. При этом основная масса нефтегруза (свыше 60 тонн) сохранит

свою высокую температуру и текучесть за все время перевозки и не потребует дополнительного разогрева при сливе [6].

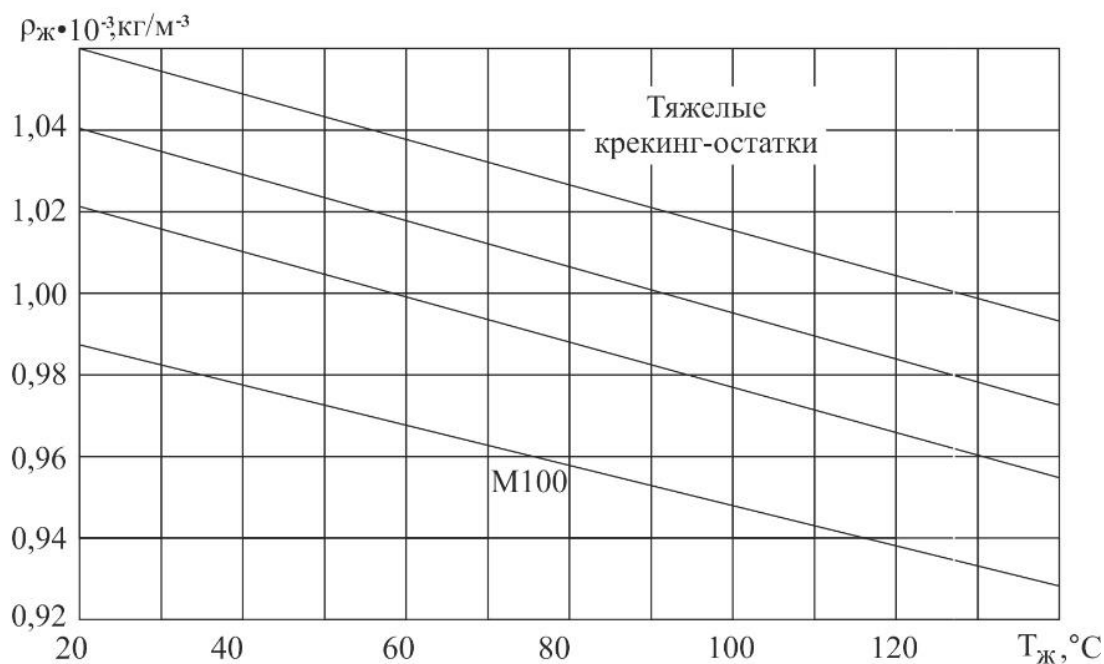


Рис. 2. Температурная зависимость плотности $\rho_{ж}$ мазутов

Ниже рассмотрены математическая и имитационная модели, позволяющие оптимизировать работу крупного нефтяного терминала с объемом переработки десятки тысяч тонн.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Работа современного крупного нефтеналивного терминала, предназначенного для экспортных и внутренних перевозок вязких нефтепродуктов с годовым объемом в десятки тысяч тонн - это сложная система, в которой осуществляется прием доставленного нефтепродукта, его накопление в промежуточные емкости и последующую передачу потребителю. Накопление груза подразумевает выгрузку из цистерн, осуществляемую с подогревом и передачу его по наземным коммуникациям (Рис. 3). На втором этапе накопленный продукт перегружается, например, на плав средства (танкеры) для дальнейшей транспортировки до конечного потребителя с предварительным его разогревом.

Промежуточными операциями являются взятие проб, контроль работы сливного оборудования и наземных коммуникаций (мазутопровода), очистка котла вагона-цистерны и т.д.

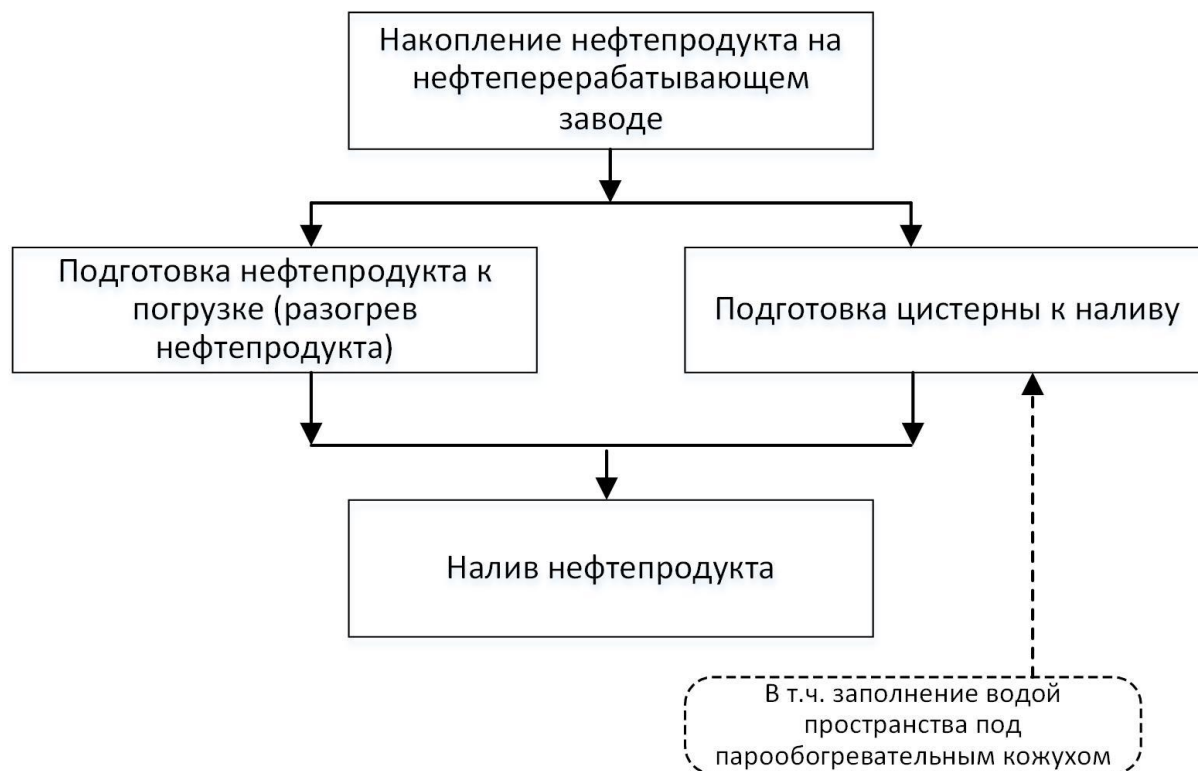


Рис. 3. Операции при наливе нефтепродукта в цистерну

Рассматриваемой задачей является построение математической модели, описывающей процесс слива мазута марки М-100 с учетом допущений:

- На станцию слива ежедневно приходит M вагонов.
- Состав может прийти в любой момент времени в течение суток.
- Для разгрузки состава в наличии имеем K эстакад.

На организацию слива нефтепродукта влияние оказывают его физические свойства, а именно вязкость ν . Она оказывает влияние на продолжительность времени слива τ , расход пара и электроэнергии, необходимых для его разогрева. Для описания этой зависимости широко используются эмпирические данные, сведенные в Табл. 2 [13].

Таблица 2. Зависимость времени слива τ (мин.) от вязкости ВМП при диаметре сливного прибора 160 мм

$\nu \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$	20	50	80	100	110	120	125
τ слива (мин)	45	60	80	110	130	160	180

В качестве числовых характеристик, описывающих процесс слива, рассмотрим время слива груза, расход пара и электроэнергии.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Введем множество T – тестируемый промежуток времени, $t \in T$ – определенный день.

Пусть $X(t)$ – функция, возвращающая для каждого $t \in T$ количество вагонов, прибывших на разгрузку.

Функция $X(t)$ складывается из суммы функций:

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t), \quad (1)$$

где $X_1(t)$ – количество вагонов, пришедшие под разгрузку;

$X_2(t)$ – количество вагонов, оставшихся неразгруженными с прошедшего дня (t – сутки).

Зададим функцию $W(t)$, возвращающую затраты времени, которые требуются для разгрузки имеющегося на момент времени t груза:

$$W(t) = \frac{1}{K} X(t) Y(t), \quad (2)$$

где K – количество эстакад.

Y определяем из следующего соотношения:

$$Y = \frac{1}{F}, \quad (3)$$

где F – пропускная система одной эстакады, то есть количество вагонов, которое может быть разгружено на эстакаде в течение суток. F зависит от вязкости нефтепродукта и температуры окружающей среды.

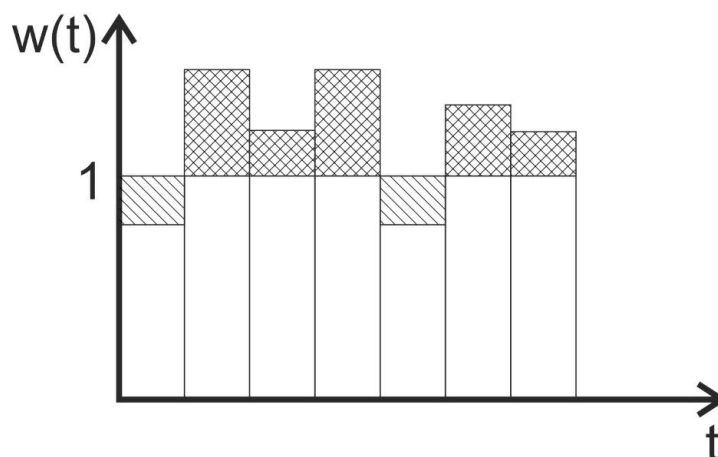
График функции $W(t)$ изображен на Рис. 4.

Очевидно, что для того, чтобы состав будет разгружен полностью при $W(t) = 1$. Тогда время, необходимое для разгрузки оставшегося груза лежит выше прямой $W(t) = 1$. А заштрихованная область, расположенная ниже этой оси, отражает время простоя оборудования.

Из (2), (3) следует, что необходимое количество эстакад можно найти по формуле:

$$K = XY = \frac{X}{F}. \quad (4)$$

Так как F зависит от температуры окружающей среды, то в теплое время года оборудование будет простаивать, а в холодное весь груз не будет разгружен за сутки полностью.

Рис. 4. График $W(t)$

(2) Время, требующееся для разгрузки состава в часах легко получить из

$$W'(t) = \frac{24}{K} X(t) Y(t) \quad (5)$$

Для разгрузки каждого вагона-цистерны требуется определенное количество пара $h_{\pi}^i(t)$.

Обозначим через $H_{\pi}(t)$ расход пара для разгрузки всех вагонов:

$$H_{\pi}(t) = \sum_{i=1}^n h_{\pi}^i(t), \quad (6)$$

где n – количество разгруженных цистерн за сутки.

Аналогично через $H_{\text{ээ}}(t)$ обозначим расход электроэнергии:

$$H_{\text{ээ}}(t) = \sum_{i=1}^n h_{\text{ээ}}^i(t), \quad (7)$$

где $h_{\text{ээ}}^i(t)$ – расход электроэнергии, необходимой для разгрузки одного вагона.

Обозначим через $H(t)$ – функцию затрат, сопоставляющую дате (суткам) затраты на ресурсы. $H(t)$ определяем из (6) и (7) по формуле:

$$H(t) = H_{\pi}(t) + H_{\text{ээ}}(t), \quad (8)$$

Так как количество вагонов, пришедших под разгрузку, время разгрузки и затраты зависят от тестируемого периода, то связь может быть выражена в форме функциональной зависимости.

Введем функцию f , сопоставляющую определенной дате количество цистерн, нуждающихся в разгрузке (1), время их разгрузки (2) и количество затрат пара и электроэнергии (3) (t – дата, сутки):

$$f: T \rightarrow (X, W, H). \quad (9)$$

Таким образом, для каждого $t \in T$ функция $f(t)$ показывает сколько вагонов необходимо разгрузить, сколько для этого потребуется времени и какое количество электроэнергии и пара необходимы для разгрузки.

Если рассматривать поставки мазута за несколько дней, то функция (9) не претерпевает каких-либо изменений. Только оптимальное количество $W(t)$, когда все вагоны, пришедшие на разгрузку, будут разгружены и оборудование не будет простаивать, равно количеству дней за период.

Расход пара и электроэнергии зависит от температуры груза, которая в свою очередь зависит от температуры окружающей среды и продолжительности перевозки. Время разогрева мазута, расход пара и электроэнергии определяются эмпирически. Принимая во внимание объемы поставок на терминале и их ежедневность, можно считать их случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Поэтому для решения полученной задачи применяем имитационное моделирование.

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Целью построения данной модели стала необходимость в процессе моделирования определить для заданного периода времени время, необходимое для его разгрузки, расход пара и электроэнергии (9) [14, 15].

Состав приходит ежедневно в количестве в среднем 15 вагонов. Регулярность поставок и большой объем поставляемого продукта дает возможность использовать нормальный закон при моделировании количества вагонов, приходящих ежедневно (Рис. 5).

Для разгрузки вагонов предусмотрены эстакады, функционирующие круглосуточно. Цистерны, ожидающие разгрузки, ожидают разгрузки на запасных путях.

Применяя имитационное моделирование определим оптимальное количество эстакад, необходимое для разгрузки всех вагонов с целью снизить расходы, связанные с простоем оборудования (Рис. 6).

Задаем параметры объектов с учетом данных, приведенных в Табл. 3.

Время, необходимое для замера количества груза, отбора проб, подготовительных работ перед сливом, разогрев продукта, процесс слива, размывка остатков груза определяется эмпирически и зависит от температуры окружающей среды. Это позволяет задать время выполнения данных процессов как случайную величину, подчиненную случайному закону.

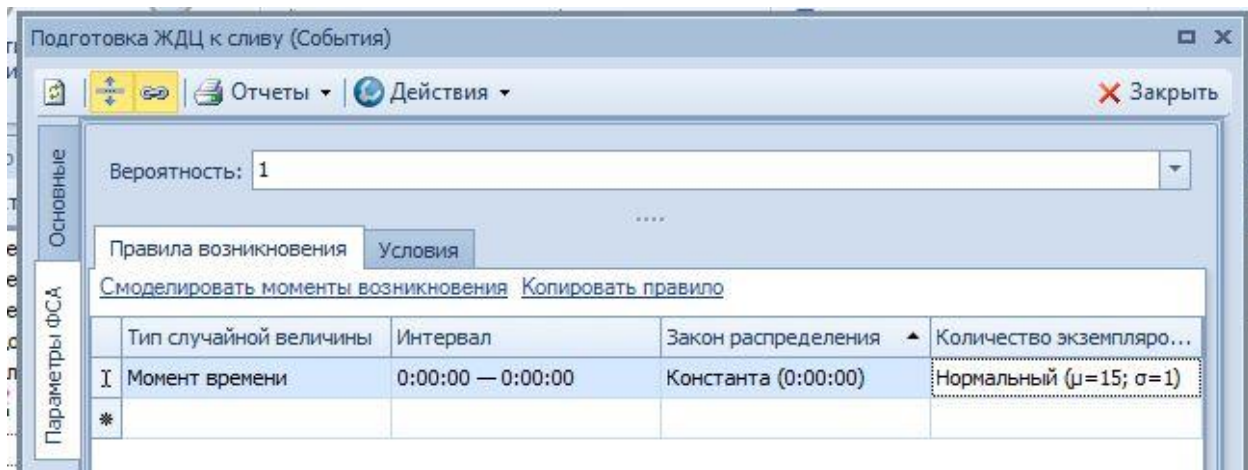


Рис. 5. Свойства начального события

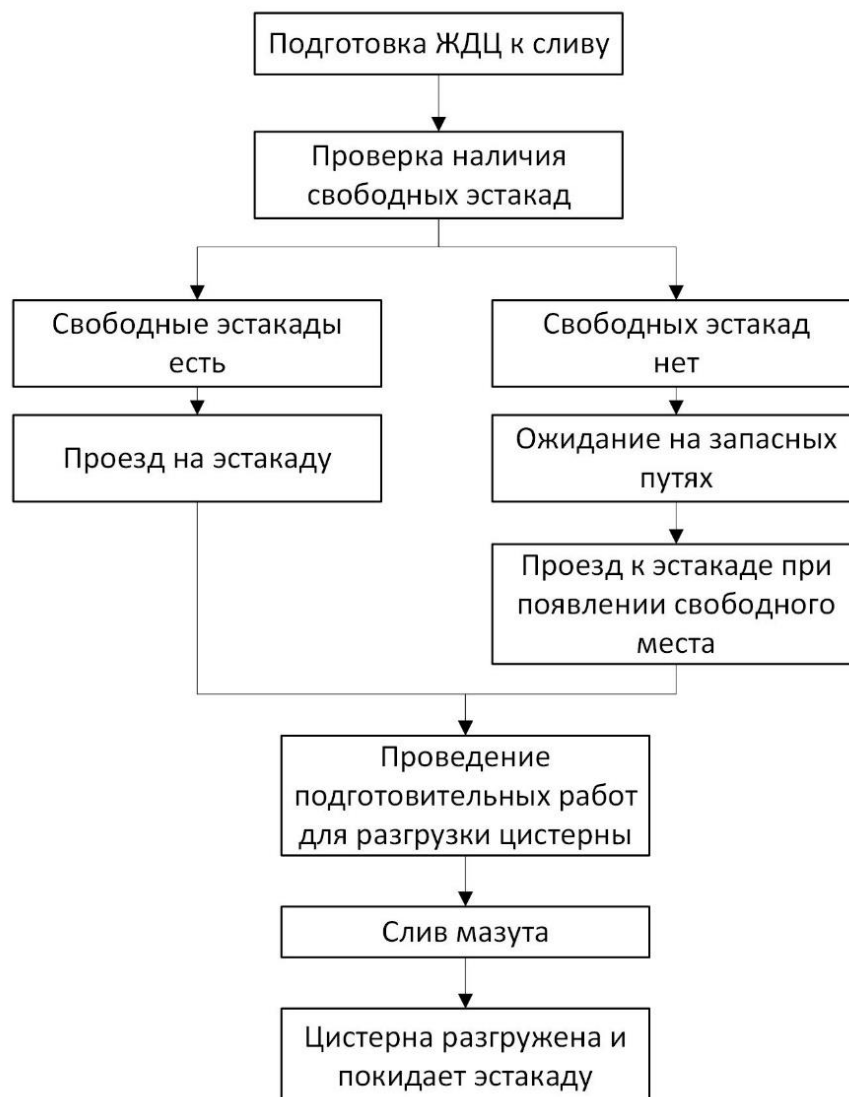


Рис. 6. Осуществление разгрузки на нескольких эстакадах

Таблица 3. Продолжительность этапов процесса слива мазута марки М-100 циркуляционным способом

Этап процесса	Продолжительность процесса
Проверка наличия свободных эстакад	1 мин
Проезд к эстакаде	4 мин
Ожидание на запасных путях	Время моделируется системой автоматически
Замер количества груза и отбор проб	Нормальный закон распределения Математическое ожидание – 1 ч Дисперсия – 10 мин
Подготовительные работы перед сливом	Нормальный закон распределения Математическое ожидание – 30 мин Дисперсия – 5 мин
Слив мазута с предварительным разогревом.	Нормальный закон распределения Математическое ожидание – 8 ч Дисперсия – 1 ч Время выполнения зависит от температуры окружающей среды. В зимнее время увеличивается до 10 ч. Причем основное время уходит именно на разогрев нефтепродукта.
Размывка остатков груза	Нормальный закон распределения Математическое ожидание – 2 ч Дисперсия – 30 мин

Проведем имитационное моделирование с количеством эстакад равным 4, 7 и 10, которое задается как материальный ресурс.

Результаты имитационного моделирования приведены на Рис. 7(a), 7(b) и 7(c) соответственно.

Детализация			
Количество выполнений	Процесс	Средняя длительность	Суммарное полное время
15	A1.1 Проверка наличия своб-х эстакад	0:01:00	0:15:00
8	A1.2 Проезд к эстакаде	7:37:00	3д. 21:40:00
7	A1.3 Ожидание на запасных путях	13:46:00	4д. 20:48:00
5	A1.4 Проезд с зап пути на эстакаду	0:04:00	0:20:00
10	A1.5 Замер количества груза и отбор проб	0:57:12	9:33:00
9	A1.6 Подготовительные работы перед сли...	0:27:13	4:20:00
8	A1.7 Слив мазута	7:55:37	2д. 16:34:00
7	A1.8 Размывка остатков мазута	2:05:08	16:25:00
7	A1.9 Цистерна покинула эстакаду	0:04:00	0:28:00

Рис. 7(a). Результат имитации при наличии 4 эстакад

Из 16 вагонов разгружены только 7. Среднее время ожидания на запасных путях составляет 13 ч 46 мин. Этап, на который тратится наибольшее количество времени – ожидание на запасных путях. Решением сложившейся ситуации может быть увеличение количества эстакад.

Процесс	Количество выполнений	Средняя длительность	Суммарное полное время
A1.1 Проверка наличия своб-х эстакад	15	0:01:00	0:15:00
A1.2 Проезд к эстакаде	7	3:12:08	22:25:00
A1.3 Ожидание на запасных путях	8	10:03:00	3д. 08:24:00
A1.4 Проезд с зап пути на эстакаду	8	0:04:00	0:32:00
A1.5 Замер количества груза и отбор проб	15	1:02:28	15:37:00
A1.6 Подготовительные работы перед сливом	15	0:32:40	8:10:00
A1.7 Слив мазута	14	7:35:51	4д. 11:22:00
A1.8 Размывка остатков мазута	13	1:58:27	1д. 02:59:00
A1.9 Цистерна покинула эстакаду	13	0:04:00	0:52:00

Рис. 7(б). Результат имитации при наличии 7 эстакад

Из 16 вагонов разгружены уже 13, а среднее время ожидания 10 ч.

Количество выполнений	Процесс	Средняя длительность	Суммарное полное время
16	A1.1 Проверка наличия своб-х эстакад	0:01:00	0:16:00
10	A1.2 Проезд к эстакаде	4:20:48	1д. 19:28:00
6	A1.3 Ожидание на запасных путях	3:40:00	22:00:00
6	A1.4 Проезд с зап пути на эстакаду	0:04:00	0:24:00
16	A1.5 Замер количества груза и отбор проб	1:05:15	17:24:00
16	A1.6 Подготовительные работы перед сли...	0:29:56	7:59:00
16	A1.7 Слив мазута	8:03:56	5д. 09:03:00
16	A1.8 Размывка остатков мазута	1:57:15	1д. 07:16:00
16	A1.9 Цистерна покинула эстакаду	0:04:00	1:04:00

Рис. 7(с). Результат имитации при наличии 10 эстакад

Все 16 вагонов разгружены. Среднее время ожидания сократилось до 3 ч 40 мин. Общее время, затраченное на разгрузку менее 24 ч, а значит, оборудование будет простаивать.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что при сохранении начальных условий и увеличении количества эстакад процесс разгрузки состава протекает быстрее (большее количество вагонов разгружается). Но этот ожидаемый результат очевидно требует капиталовложений на строительство дополнительного оборудования. Альтернативой строительства новых эстакад и применения нового оборудования будет перевод нефтепродукта в стратифицированное состояние в момент налива. Из Табл. 2 следует, что при снижении вязкости уменьшается время слива. Этот факт позволяет на тех же площадях, без привлечения дополнительного оборудования увеличить производительность нефтяного терминала.

Предложен способ перевода продукта в стратифицированное состояние с использованием парового подогревателя. Это позволяет увеличить плотность нефтепродукта в нижней части котла вагона-цистерны, что способствует образованию теплоизолирующей корки и

сохранении высокой температуры и текучести груза на протяжении всего пути.

Обзор литературы показал, что при построении математических моделей при решении транспортных задач широко используется система массового обслуживания, которая позволяет оптимизировать работу по сливу нефтепродукта, но не дает никакой информации о сопутствующих затратах. В работе построена функция, которая за конкретный период показывает количество разгруженных вагонов, расход пара и электроэнергии.

Использование Business Studio при построении имитационной модели позволяет сделать ее гибкой и достаточно легко получать новые результаты при изменении входных данных (количество вагонов, пришедших на разгрузку, затраты электроэнергии и пара) в зависимости от региона, в котором находится предприятие, и его размеров, а также проанализировать работу предприятия при привлечении дополнительного оборудования.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Хусаинов В.И., Ожерельева М.В. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 4 (83). – С. 22–27. [Husainov VI, Ozherel'eva MV. Perevozki uglja i neftenalivnyh грузов zheleznodorozhnym transportom: tekushhee sostojanie i perspektivy. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2019;4(83):22-27 (In Russ.)]. Доступно по <http://rostransport.com> Ссылка активна на 07.09.2020.
2. Информационно-справочный портал «Железнодорожные перевозки». [Informacionno-spravochnyj portal “Zheleznodorozhnye perevozki” [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://cargo-report.info>. Ссылка активна на: 07.09.2020.
3. Геллер З.И. Мазут как топливо. – М.: Недра, 1965. [Geller ZI. *Mazut kak toplivo*. Moscow: Nedra; 1965. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.studmed.ru/geller-zimazut-kak-toplivo_767fd1e5abb.html. Ссылка активна на: 07.09.2020.
4. Жебанов А.В., Волов Д.Б. Актуальные задачи транспортировки вязких и затвердевающих нефтепродуктов на железнодорожном транспорте / Материалы 5 Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 364–366. [Zhebanov AV, Volov DB. Aktual'nye zadachi transportirovki vjazkih i zatverdevajushhih nefteproduktov na zheleznodorozhnom transporte. In Proceedings of the Materialy 5 Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Aktual'nye problemy razvitija transportnogo kompleksa”. Samara: SamGUPS; 2009. pp. 364-366 (In Russ.)]. Доступно по <http://irbis.samgups.ru/cgi->

- bin/irbis64r_14/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=S&I21DBN=TRUD&P21DBN=TRUD&S21FMT=fullwebr&S21ALL=%3C.%3EA%3D%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2,%20%D0%94%D0%BC%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%B9%20%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%3C.%3E&Z21ID=&S21SRW=dz&S21SRD=&S21STN=1&S21REF=5&S21CNR=10. Ссылка активна на 07.09.2020.
5. Жебанов А.В. Управление теплофизическими процессами в нефтепродуктах при их перевозках в теплоизолированном вагоне. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – СПб; 2017. [Zhebanov AV. Upravlenie teplofizicheskimi processami v nefteproduktah pri ih perevozkah v teploizolirovannom vagone. [dissertation]. St. Petersburg; 2017. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/upravlenie-teplofizicheskimi-protsessami-v-nefteproduktakh-pri-ikh-perevozkakh-v-teploizolir> Ссылка активна на: 07.09.2020.
 6. Моисеев В.И. Теория и модели процессов тепломассопереноса при транспортных операциях с застывающими наливными грузами. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб; 2012. [Moiseev VI. Teorija i modeli processov teplomassoperenosa pri transportnyh operacijah s zastyvajushhimi nalivnymi грузами. [dissertation]. St. Petersburg; 2012. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/teoriya-i-modeli-protsesov-teplomassoperenosa-pri-transportnykh-operatsiyakh-s-zastyvayushch> Ссылка активна на: 07.09.2020.
 7. Моисеев В.И. Охлаждение горячих нефтепродуктов в цистернах с паробогревательным кожухом / Труды XXII Международной научно-практической конференции «Математика в вузе». – СПб. – 2010. – С. 126–128. [Moiseev VI. Ohlazhdenie gorjachih nefteproduktov v cisternah s paroobogrevatel'nyh kozhuhom. In Proceedings of the International Conference “Matematika v vuze”. St. Petersburg; 2017. p. 126-128. (In Russ.)].
 8. Бахтизин Р.Н., Мастобаев Б.Н., Мовсумзаде Э.М. и др. Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов. Применение электроподогрева. – М.: Химия. – 2004. – 193 с. [Bahtizin RN, Mastobaev BN, Mavsuzade EM, et al. *Transport i hranenie vysokovjazkih neftej i nefteproduktov. Primenenie jelektropodogreva*. Moscow: Himija; 2004. 193 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002459532> Ссылка активна на: 07.09.2020.
 9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. [Miheev MA, Miheeva IM. *Osnovy teploperedachi*. Moscow: Jenergija, 1977. (In Russ.)]. Доступно по: <http://thermalinfo.ru/spravochniki-skachat/miheev-miheeva-osnovy-teploperedachi> Ссылка активна на: 07.09.2020.
 10. Григорьев Б.А., Богатое Г.Ф., Герасимов А.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций. – М.: МЭИ, 1999. [Grigorev BA, Bogatое GF, Gerasimov AA. *Teplofizicheskie svojstva nefti, nefteproduktov, gazovih kondensatov i ih fracziy*. Moscow: MEI; 1999. (In Russ.)]. Доступно по: https://eknigi.org/nauka_i_ucheba/45057-teplofizicheskie-svojstva-nefti-nefteproduktov.html Ссылка активна на: 07.09.20
 11. Монин А.С., Яглом А.М., Статистическая гидромеханика. – М.: Наука, 1965. [Monin AS, Jaglom AM. *Statisticheskaja gidromehanika*. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.studmed.ru/monin-as-yaglom-am-statisticheskaya-gidromehanika-tom-1_4b3c72f48bc.html. Ссылка активна на: 07.09.2020.
 12. Патент РФ на изобретение № 2666018/10.07.17. Бюл. №25 Моисеев В.И., Комарова Т.А. Цистерны для перевозки вязких нефтепродуктов. [Patent RUS № 2666018/10.07.17 Вуль. №25. Moiseev VI., Komarova TA. Tanks for the carriage of viscous petroleum products. (In Russ.)]. Доступно по:

https://www.fips.ru/ofpstorage/BULLETIN/IZPM/2018/09/10/INDEX_RU.HTM.

Ссылка активна на 07.09.2020.

13. ГОСТ Г-14540 «Типовой технологический процесс работы железнодорожных станций по наливу и сливу грузов и промывочно-пропарочных предприятий по очистке и подготовке цистерн под перевозку грузов». – М.: Транспорт, 1982. [Gost Г-14540 “Standard Process for Loading and Unloading Railway Stations and Cleaning and Preparation of Tanks for the Carriage of Goods”. Moscow: Transsport; 1982. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/V4B5.html>. Ссылка активна на 07.09.2020.
14. Документация Business Studio. [Dokumentacija Business Studio [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.businessstudio.ru/>. Ссылка активна на: 04.03.2020.
15. Karpova TS, Moiseev VI, Ksenofontova VA. Construction of the Simulation Model of Transportation Oil Products [Internet]. 2019;2556:103-107 [cited 2019 Dec 5] Available from: <http://ceur-ws.org/Vol-2556/paper18.pdf>.

Сведения об авторах:

Карпова Татьяна Сергеевна, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 9676-3790; ORCID: 0000-0002-8755-5396;

E-mail: t.s.karпова@yandex.ru

Моисеев Владимир Иванович, д.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 6925-1107; ORCID: 0000-0003-0558-6242;

E-mail: moiseev_v_i@list.ru

Ксенофонтова Вера Алексеевна;

eLibrary SPIN: 2747-2890; ORCID: 0000-0002-3085-3771;

E-mail: koc-vera@yandex.ru

Information about the authors:

Tatyana S. Karpova, Candidate of Technical Science, docent;

eLibrary SPIN:9676-3790; ORCID: 0000-0002-8755-5396;

E-mail: t.s.karпова@yandex.ru

Vladimir I. Moiseev, Doctor of Technical Science, docent;

eLibrary SPIN:6925-1107; ORCID: 0000-0003-0558-6242;

E-mail: moiseev_v_i@list.ru

Vera A. Ksenofontova;

eLibrarySPIN:2747-2890; ORCID: 0000-0002-3085-3771;

E-mail: koc-vera@yandex.ru

Цитировать:

Карпова Т.С., Моисеев В.И., Ксенофонтова В.А. Моделирование работы нефтеналивного терминала для вязких нефтепродуктов // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 3. – С. 60–75. doi: 10.17816/transsyst20206360-75

To cite this article:

Karpova TS, Moiseev VI, Ksenofontova VA. Simulation of the Operation of an Oil Loading Terminal for Viscous Petroleum Products. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(3):60-75. doi: 10.17816/transsyst20206360-75