

УДК 629.1.04

## СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ МЕНЕДЖМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ

**Г. И. Коршунов,**

доктор техн. наук, профессор

**Ли Шунь Минь,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложены технические средства, модели и методы для уменьшения времени погрузки/выгрузки нефти и сокращения производственного цикла транспортировки нефти морскими танкерами. Рассмотрены особенности грузовых систем, предложено использование быстроразъемного соединения с «плавающим шаром». Представлены математические модели процессов загрузки нефти на базе аппроксимации характеристик насоса, а также модель баланса расходов и напоров на основе гидравлических аналогов уравнений Кирхгофа с учетом местных гидравлических сопротивлений. Разработаны система моделирования и алгоритм погрузки нефти, обеспечивающие близкое к оптимальному изменение скорости потока нефти и сокращение времени по критерию Lead Time.

**Ключевые слова** — время производственного цикла, быстроразъемное устройство, баланс расходов в сети, баланс напоров в сети, метод узловых напоров, моделирование процесса погрузки танкера.

### Введение

Незначительные запасы нефти на суше существенно ограничивают возможности развития экономики, в связи с чем интенсивно осваиваются нефтяные месторождения на шельфе. Вопросы погрузки нефти в открытом море имеют свою специфику, в том числе на их решение определенное влияние оказывают природно-климатические условия и, прежде всего, волны и ветер, которые повышают риск проведения операций погрузки нефти в море. Поэтому актуальны вопросы повышения эффективности использования технологического и транспортного оборудования, сокращения времени погрузки, минимизации вмешательства человека в технологические процессы, что требует специальных проектных и конструктивных решений, приносящих экономический эффект.

Прием груза на борт и подача его в трюмы осуществляются насосными станциями закрытым способом с помощью гибких шлангов, которые крепят к приемным патрубкам посредством бы-

строразъемных соединений. Уменьшение времени погрузки/выгрузки нефти на основе новых методов и средств является актуальным для сокращения времени производственного цикла морской транспортировки нефти.

В статье рассмотрены анализ особенностей схемы грузовой системы, разработка математической модели погрузки нефти в танкер в условиях открытого моря и программного обеспечения системы моделирования, технико-экономический анализ системы «отгрузочные устройства — танкер» при обязательном рассмотрении альтернативных решений, обеспечивающих регулярную и безопасную отгрузку нефти с платформ.

Целью работы является сокращение времени производственного цикла морской транспортировки нефти на основе моделирования процессов погрузки/выгрузки нефти в танкер в условиях открытого моря (с морских нефтесборных платформ и морских отгрузочных терминалов), исследования и выбора вариантов систем.



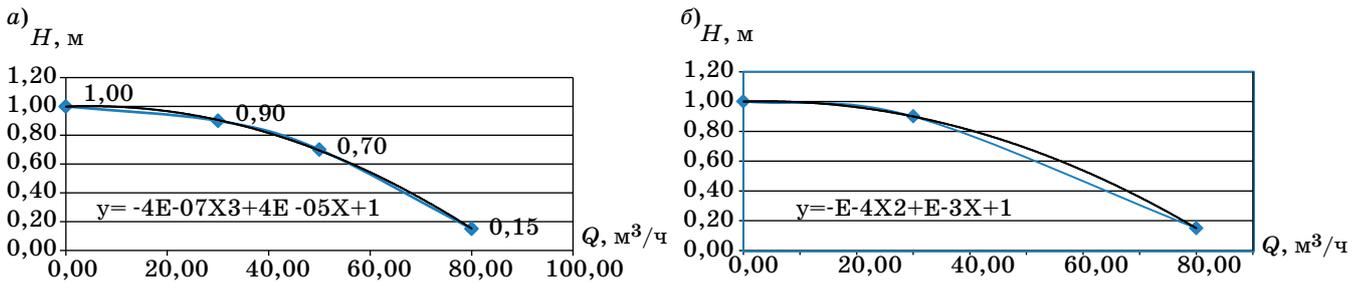


Рис. 2. Кубический (а) и квадратичный (б) полином

ры в узлах  $i$ ;  $H_{i,j}$  — статические и (или) действующие напоры насосов в участке  $ij$ ;  $h_{i,j}$  — потери напора на участке  $ij$ .

Приведем описание решения системы уравнений.

1. Пассивный участок:

$$dP_{i,j} = P_i - P_j + (Z_i - Z_j)\rho;$$

$$Q_{ij} = C_{ij} \sqrt{|\Delta P_{ij}| \text{sign}(\Delta P_{ij})};$$

$$|\sum Q_{ij}| < \varepsilon,$$

где  $Q$  — расход на участке  $ij$ ;  $C$  — коэффициент шероховатости;  $d$  — относительная плотность.

2. Активный участок — вход в насос:

$A_k(1...4)$  — коэффициент кубической параболы (рис. 2, а), аппроксимирующей характеристику насоса  $H(Q)$ ;

$X(1...4)$  — переменная полинома, служащего для нахождения расхода на участках.

Для аппроксимации по трем точкам график имеет вид, представленный на рис. 2, б.

Характеристика насоса задается обычно в виде графиков. Для машинного представления график разбивается на участки по точкам, и данные в компьютер вводятся в виде таблицы. Как правило, достаточно трех точек (см. рис. 2, б), но если требуется большая точность, выбирают четыре точки (см. рис. 2, а). Затем полученный полином используется для дальнейших расчетов режимов работы грузовой системы. Полиномиальные тренды можно построить в Excel и получить соответствующие уравнения. Для получения уравнения надо найти коэффициенты  $K_i$  при неизвестных и значение свободного члена  $K_0$ .

Система уравнений примет вид

$$H_1 = K_1 Q_{13} + K_2 Q_{12} + K_3 Q_1 + K_0$$

$$H_2 = K_1 Q_{23} + K_2 Q_{22} + K_3 Q_2 + K_0$$

$$H_3 = K_1 Q_{33} + K_2 Q_{32} + K_3 Q_3 + K_0$$

$$H_4 = K_1 Q_{43} + K_2 Q_{42} + K_3 Q_4 + K_0$$

Здесь нижние индексы соответствуют выбранным точкам.

Решение системы производится одним из способов, например, заменой переменных. В этом случае мы можем сразу найти значение свободного члена (точка 1 при  $Q_1=0$ ). В результате получим те же коэффициенты, что и в Excel.

Для построения полной математической модели требуется рассчитать нижеследующие параметры:

— объем жидкости в цистерне  $i$ :  $dv_i / dt \neq Q_{ij}$ , где  $ij$  — участок системы, примыкающий к цистерне;

— уровень жидкости в цистерне:  $H_{i,j} = f(V_j)$ ;

— давление в узле, примыкающем к цистерне:

$$P_i = P_{vi} + \rho H_i.$$

Рассчитать давление воздуха в цистерне  $P_B$  (идеальный газ) можно по формуле

$$\frac{dP_B}{dt} = \frac{1}{V_B} \left( RT \frac{dG_B}{dt} - P_B \frac{dV_B}{dt} \right),$$

где  $V_B$  — объем воздуха в цистерне;  $G_B$  — масса

воздуха в цистерне;  $\frac{dG_B}{dt}$  — расход воздуха из/в

цистерну через систему вентиляции цистерны.

Наличие местных сопротивлений изменяет эту структуру на незначительной части участка. Коэффициент местных сопротивлений существенно превосходит коэффициент трения жидкости о стенки трубы. Поэтому по аналогии с законом Ома для электрической цепи потеря напора на участке может быть представлена в виде  $h = QS$ , где  $Q$  — расход на участке за единицу времени;  $S$  — приведенное (к данному расходу) гидравлическое сопротивление участка.

С учетом формулы Дарси — Вейсбаха [6] потеря напора на участке вычисляется по формуле

$$h = \left( \lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{v^2}{2g} \rho \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $l$  — длина участка, м;  $d$  — внутренний диаметр, м;  $\zeta$  — суммарный коэффициент местных сопротивлений на участке;  $v$  — скорость те-

чения,  $m/c$ ;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda=f(\text{Re}, \epsilon)$  — коэффициент сопротивления трения нефти о стенки трубы, где  $\text{Re}$  — критерий

Рейнольдса,  $\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$ ,  $\nu$  — кинематическая вязкость нефти, м<sup>2</sup>/с;  $\epsilon = \frac{k}{d}$  — относительная шеро-

ховатость стенки трубы,  $k$  — абсолютная шероховатость стенки трубы, м.

Суммарный коэффициент местных сопротивлений на участке  $\zeta = \sum_{i=1}^n \xi_i$ .

Приведем формулу (2) к виду

$$h = \left( \frac{\lambda l}{d} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{V^2}{2g} + (I_{\text{к}} - I_{\text{н}}),$$

где  $I_{\text{н}}, I_{\text{к}}$  — соответственно высота начала и конца участка относительно принятого уровня.

Скорость потока может быть выражена через расход  $Q$ , поэтому формулу (2) можно привести к виду

$$h = \left[ \left( \frac{\lambda e}{d} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{8Q}{\pi^2 d^4 g} + \frac{(I_{\text{к}} + I_{\text{н}})}{Q} \right] Q.$$

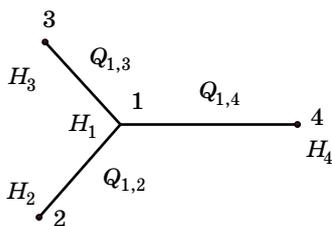
Рассматривая выражение в квадратных скобках как приведенное гидравлическое сопротивление участка  $S$ , можно найти и обратную ему величину — гидравлическую проводимость участка  $P=1/S=Q/h$ , откуда

$$Q = Ph. \quad (3)$$

В соответствии с условием неразрывности потока алгебраическая сумма расходов в любом узле системы равна нулю. Поэтому уравнение баланса расходов для узла 1 (рис. 3) будет иметь вид  $Q_{1,2} + Q_{1,3} - Q_{1,4} = 0$ .

Подставив в него соответствующие выражения из (3), получим потери напора на соответствующих участках:

$$P_{1,2} h_{1,2} + P_{1,3} h_{1,3} - P_{1,4} h_{1,4} = 0. \quad (4)$$



■ Рис. 3. Схема гидравлического узла

При установившемся режиме течения для каждого участка выполняется условие

$$h_{i,j} = H_i - H_j,$$

где  $H_i, H_j$  — приведенные напоры в соответствующих узлах.

При наличии на участке нагнетателя с напором  $H_{i,j}$  потеря напора будет

$$h_{i,j} = H_i - H_j - d H_{i,j}, \quad (5)$$

где  $d = \begin{cases} +I, & \text{если нагнетание происходит} \\ & \text{в сторону узла } i \\ -I, & \text{если в противоположную сторону} \end{cases}$ .

Преобразовав уравнение (4) с учетом выражения (5), получим

$$P_{1,2} (H_1 H_2 - d H_{1,2}) + P_{1,3} (H_1 H_3 - d H_{1,3}) - P_{1,4} (H_1 H_4 - d H_{1,4}) = 0. \quad (6)$$

После преобразований уравнение (6) представим в виде

$$(P_{1,2} + P_{1,3} + P_{1,4}) H_1 - P_{1,2} H_2 - P_{1,3} H_3 - P_{1,4} H_4 = P_{1,2} d H_{1,2} + P_{1,3} d H_{1,3} + P_{1,4} d H_{1,4}.$$

Выражение  $(P_{1,2} + P_{1,3} + P_{1,4})$  условно назовем гидравлической проводимостью узла  $I - P_{1,i}$ , а выражение в правой части будем рассматривать как приведенную производительность (подачу) нагнетателей, действующих на участках, прилегающих к узлу  $I$ , которую обозначим  $G_i$ .

При  $n+1$  узлах в гидравлической сети система уравнений балансов расходов и напоров с учетом принятых обозначений (1) имеет вид

$$\begin{cases} P_{1,1} H_1 - P_{1,2} H_2 \dots - P_{1,n} H_n - P_{1,n+1} H_{n+1} = G_1 \\ -P_{2,1} H_1 - P_{2,2} H_2 \dots - P_{2,n} H_n - P_{2,n+1} H_{n+1} = G_2 \\ \dots \dots \dots \\ -P_{n,1} H_1 - P_{n,2} H_2 \dots - P_{n,n} H_n - P_{n,n+1} H_{n+1} = G_n \\ -P_{n+1,1} H_1 - P_{n+1,2} H_2 \dots - P_{n+1,n} H_n - \\ - P_{n+1,n+1} H_{n+1} = G_{n+1} \end{cases}$$

В случае замкнутой гидравлической сети эта система имеет бесконечное число решений относительно узлов. Поэтому при расчетах напор в одном из узлов должен быть задан (например, равным нулю). Для незамкнутых систем таким узлом может считаться внешняя среда, на которую замыкаются все начальные и конечные узлы. При программной реализации этого метода была предусмотрена возможность задания такого узла под номером «0», в противном случае выбор узла производится программой.

С учетом сказанного система уравнений баланса расходов и напоров в гидравлической сети в матричной форме будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & -P_{1,2} & -P_{1,3} & \dots & -P_{1,n} \\ -P_{2,1} & -P_{2,2} & -P_{2,3} & \dots & -P_{2,n} \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ -P_{n,1} & -P_{n,2} & -P_{n,3} & \dots & -P_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ \dots \\ H_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ \dots \\ G_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

Поскольку при отсутствии непосредственной связи между узлами сети  $P_{ij}=0$ , матрица  $P$ , по существу, определяет топологию этой сети и интенсивность связей между узлами. Особенностью матрицы проводимости является также и то, что она является симметричной относительно главной диагонали; элементы главной диагонали, в отличие от других элементов, положительны и по модулю больше любого другого элемента столбца или строки. Эти особенности имеют принципиальное значение для обеспечения сходимости при решении системы уравнений (6). Получение расходов на участках системы производится многократным решением линейной системы уравнений (6) до достижения необходимой точности по расходам на участках. Существуют различные реализации метода узловых давлений.

Для БРУ с диаметром 600 мм потери на запорном устройстве определены путем пересчета при принятых следующих исходных данных [7]: фактический диаметр  $D=485$  мм; усредненная скорость потока нефти  $V=9,60$  м/с; потеря напора  $h=0,78$  бар= $78\,000$  кг/м<sup>2</sup>; плотность нефти  $\rho=920$  кг/м<sup>3</sup>.

Для расчета  $\zeta$  преобразуем формулу (2) к виду

$$\lambda = h \frac{2g}{v^2 \rho}$$

Подставив вышеприведенные данные, получим

$$\zeta_3 = 7800 \cdot \frac{2 \cdot 9,81}{9,6^2 \cdot 920} = 1,81.$$

Сумма коэффициентов местных сопротивлений БРУ составит

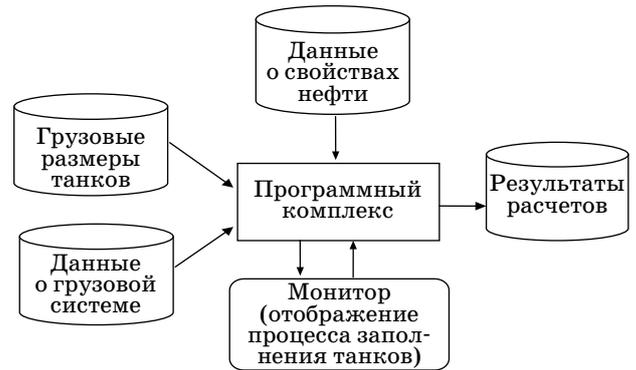
$$\zeta_c = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 = 2 + 0,38 + 1,81 = 4,19,$$

а общие потери напора на БРУ с физическим диаметром 585 мм (условный — 600 мм) при расходе 12000 м<sup>3</sup>/ч при скорости потока в БРУ

$$V = \frac{12\,000 \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot 0,585^2} = 12,4 \text{ м/с}$$

составят  $h = \zeta_c \frac{v^2}{2g}$

или, после подстановки,



■ Рис. 4. Укрупненная блок-схема программно-информационного обеспечения системы моделирования процесса погрузки танкера

$$h_{\text{БРУ}} = 4,19 \cdot \frac{12,4^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 920 = 29\,881 \text{ кг/м}^2 \approx 3 \text{ бар.} \quad (8)$$

С учетом номинального расхода нефти  $Q=12\,000$  м<sup>3</sup>/ч и соответствующего значения  $h_{\text{БРУ}}=29\,881$  кг/м<sup>2</sup> (8) получим выражение для расчета стабилизирующей величины напора на БРУ:

$$H_{\text{БРУ}} = 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 12\,000^2) = 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 144 \cdot 10^6) [\text{кг/м}^2],$$

где  $Q_{\text{БРУ}}$  — изменение потерь объема в БРУ.

Суммарный действующий напор на приемном патрубке грузовой системы

$$H = H_{\text{в}} + H_{\text{БРУ}} = (21\,840 - 0,11466 \cdot \sum V_i) + 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 144 \cdot 10^6) [\text{кг/м}^2],$$

где  $H_{\text{в}}$  — действующий напор:  $H_{\text{в}} = h\rho = 21\,840 - 0,11466 \cdot \sum V_i$  [кг/м<sup>2</sup>].

В общем случае задача выбора диаметров труб относится к задачам оптимизационного класса, связанным с выбором стратегии управления, в данном случае — с последовательностью открытия и закрытия задвижек на сливных патрубках в танках [8]. Приняв стратегию одновременного заполнения всех танков нефтью, выбор диаметров труб на участках можно осуществить путем многовариантных расчетов, используя соответствующую расчетную модель. Такая стратегия обеспечивает минимальное время погрузки танкера при ограничениях на скорость движения нефти в трубах и минимизацию затрат на трубопровод. Укрупненная структура системы моделирования процесса погрузки танкера показана на рис. 4.

Разработанная форма экрана обеспечивает ввод исходных данных для расчета, отображение

принципиальной схемы системы, отображение процесса заполнения отдельных танков, отображение относительной величины расхода в системе во времени, доступ к файлам исходных данных и результатов, управление процессом расчета.

Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования процесса приема нефти представлена на рис. 5. Соответствующая программа предназначена для моделирования процесса погрузки нефти из хранилищ платформы на нефтеналивное судно с целью определить длительность опера-

ций погрузки и основные параметры течения нефти; уточнить диаметры труб грузовой системы танкера по результатам расчетов вариантов грузовой системы.

Программа разработана на ПЭВМ типа IBM PC в среде MS Visual Basic 6.0. Программа работает в среде операционных систем Windows XP. Предназначена для вывода на экран результатов моделирования с заданным шагом вывода расхода в системе, текущих объемов жидкости в цистернах. Все содержимое файла результатов или его фрагмент могут быть скопированы в буфер обмена Windows для последующего вывода на печать или вставки в другой документ.

Результаты расчетов показывают, что выбранные диаметры для участков грузовой системы обеспечивают почти одновременное заполнение танков за время, равное 6 ч [9].

### Оценка снижения затрат на транспортировку нефти при внедрении технологических инноваций

Для оценки рыночной стоимости танкера дедвейтом 60 тыс. т на 2012 г. воспользуемся данными, приведенными на сайте [9] для танкеров дедвейтом 300, 250, 110 тыс. т.

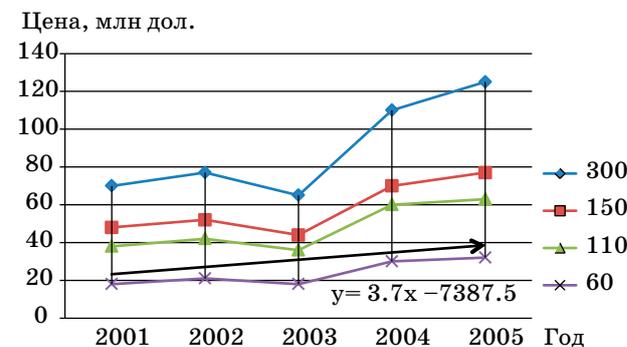
Экстраполируя эти данные для танкера дедвейтом 60 тыс. т, получим в графическом виде зависимость цены танкеров от дедвейта (рис. 6).

Аппроксимируя эту зависимость для танкера дедвейтом 60 тыс. т по линейному закону, получим уравнение  $Y = 3,65x - 7387$ , где  $x$  — год, для которого производится расчет, и получим  $Y = 60,864$  млн дол.

Необходимое количество танкеров для транспортировки всего объема добываемой нефти (порядка 100 тыс. т/сут) на морских месторождениях в море определяется в соответствии со следующей методикой.



■ Рис. 5. Обобщенная блок-схема алгоритма расчета погрузки нефти



■ Рис. 6. Графики изменения цены танкеров в зависимости от дедвейта

1. Время, затрачиваемое традиционно на перевозку нефти одним танкером за 1 круговой рейс:

$$T = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{\text{всп}}) = \\ = (20 + 12 + 25 + 12 + 10) \cdot 1,3 = \\ = 102,7 \text{ ч} \approx 4,3 \text{ сут},$$

где  $t_1, t_2, t_3, t_4$  — время порожнего рейса, погрузки, рейса с грузом, разгрузки соответственно;  $t_{\text{всп}}$  — вспомогательное время; 1,3 — коэффициент, учитывающий ремонтные работы, форсмажорные обстоятельства и т. д.

2. Время, затрачиваемое на перевозку нефти одним танкером за 1 круговой рейс при сокращенном времени погрузки и разгрузки:

$$T = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{\text{всп}}) = \\ = (20 + 6 + 25 + 6 + 10) \cdot 1,3 = 87,1 \approx 3,6 \text{ сут}.$$

3. Принимаем, что годовой дебит нефти на месторождениях

$$D_{\text{н}} = 100 \cdot 365 = 36,5 \text{ млн т}.$$

4. Требуемое количество перевозок нефти танкерами грузоместимостью 60 тыс. т:

$$N_{\text{н}} = D_{\text{н}} : D_{\text{т}} = 36500 : 60 = 608 \text{ танкеров} \cdot \text{рейс}.$$

5. Количество рейсов, совершаемых одним традиционным танкером в течение года:

$$N_{\text{т.т}} = 365 : 4,3 = 84,9 \approx 85 \text{ рейсов}.$$

6. Количество рейсов, совершаемых одним танкером с сокращенным временем погрузки и в течение года:

$$N_{\text{т.год}} = 365 : 3,6 = 101,38 \approx 101 \text{ рейс}.$$

7. Количество традиционных танкеров, требуемых для транспортировки нефти:

$$K_{\text{т}} = N_{\text{н}} : N_{\text{т.т}} = 608 : 85 = 7,15.$$

8. Количество модернизированных танкеров, требуемых для транспортировки нефти:

$$K_{\text{у}} = N_{\text{н}} : N_{\text{т.год}} = 608 : 101 = 6,02.$$

9. Округляя полученное количество танкеров до целого числа, получим, соответственно,  $K_{\text{т}} = 8$  и  $K_{\text{у}} = 7$  танкеров.

Таким образом, в течение одного года для перевозки 36,5 млн т нефти количество требуемых танкеров может быть сокращено на единицу. В денежном выражении, учитывая, что цена одного танкера указанного дедвейта равна 60,864 млн дол., это будет равно экономии от использования 7 танкеров с ускоренной погрузкой.

## Заключение

Предложенные модели и методы обосновывают возможность уменьшения затрат на транспортировку нефти от месторождений за счет сокращения времени погрузки нефти на основе технологических инноваций.

В БРУ использован «плавающий шар», программное управление которым обеспечивает близкое к оптимальному изменение скорости потока загружаемой нефти.

Разработанная программа позволяет моделировать динамические процессы погрузки нефти из хранилищ платформы на нефтеналивное судно.

## Литература

1. Борисов Р. В., Макаров В. Г. Морские инженерные сооружения: учебник. — СПб.: Судостроение, 2003. — 533 с.
2. Бухарицин П. И., Беззубиков Л. Г. Грузовая система наливного судна // Проблемы и перспективы современной науки. Томск, 2011. Т. 3. № 1. С. 103–109.
3. Кутыркин В. А., Постников В. И. Специальные системы нефтеналивных судов: справочник. — М.: Транспорт, 1983. — 192 с.
4. Arvind Bhardwaj, Ajay Gupta, Arun Kanda. Drum-Buffer-Rope: The Technique to Plan and Control the Production Using Theory of Constraints. — Las Cruces, USA: WASET, 2010. Is. 0045. — 120 p.
5. Алиев И. И. Электротехнический справочник. Изд. 5-е, стер. — М.: РадиоСофт, 2010. — 384 с.
6. Путилов В. Я. и др. Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС: РД 153-34.1-27.512; введ. 2002-01-01 / Московский энергетический институт; УралОРГПЭС. — М., 2002. — 36 с.
7. Подволоцкий Н. М. Расчеты основных параметров грузовых насосных установок танкеров/ГМА им. Макарова. — СПб., 2009. — 48 с.
8. Правила морской перевозки нефти и нефтепродуктов наливом на танкерах: РД 31.11.81.36-81; утв. Министерством морского флота СССР / Мортехинформреклама. — М., 1985. — 85 с.
9. Судостроение, машиностроение за рубежом. Т. III–IV: Строительство и ремонт гражданских морских и речных судов, станкостроение, тяжелое машиностроение: справочники ПОЛПРЕД. — М., 2008. [http://polpred.com/free/sector/204\\_demo.pdf](http://polpred.com/free/sector/204_demo.pdf) (дата обращения: 15.10.2013).