

Энергетика

УДК 681.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ*

А.А. Афиногентов¹, Ю.Э. Плешивцева¹, А.С. Снопков²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ОАО «Приволжскнефтепровод»
443020, г. Самара, ул. Ленинская, 100

Формулируется и решается краевая задача математического моделирования процесса трубопроводного транспорта жидких углеводородов как объекта с распределенными параметрами. В качестве управляющих воздействий рассматриваются напор, развиваемый насосными агрегатами перекачивающих станций, и подкачка или отбор продукта по трассе трубопровода.

Ключевые слова: *математическое моделирование, объект с распределенными параметрами, управляющее воздействие, трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов.*

Введение. Системы магистральных трубопроводов (МТП) имеют значительную протяженность и являются одним из дешевых и эффективных способов транспортировки нефти и нефтепродуктов на большие расстояния.

В конкурентных условиях развития производства возникает задача организации энергосберегающих режимов транспортировки жидких углеводородов по МТП, которая может быть сформулирована как задача достижения предельных технико-экономических показателей работы магистральных трубопроводов в условиях, обеспечивающих гибкость процесса транспортировки. Получение качественных результатов при решении поставленной задачи возможно путем оптимизации технологических режимов работы магистральных трубопроводов.

Принципиально новые результаты могут быть достигнуты путем развития системного подхода, диктующего переход к задачам более высокого уровня производственной иерархии на экстремум совокупного экономического показателя работы систем трубопроводного транспорта в целом. Системный подход к данной проблеме заключается в определении режимов работы технологического оборудования магистральных трубопроводов как в стационарных, так и в переходных режимах, по комплексным критериям оптимальности, формулировка которых является самостоя-

* Работа выполнена в рамках целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (государственный контракт №П2560).

Юлия Эдгаровна Плешивцева – д.т.н., доцент.

Александр Александрович Афиногентов – к.т.н., ассистент.

Антон Сергеевич Снопков – инженер.

тельной задачей. Решение таких задач может основываться на методах теории управления системами с распределенными параметрами (СРП).

Основная задача систем трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов состоит в осуществлении перекачки заданного объема нефти или нефтепродукта от мест добычи (месторождений) или нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) к экспортным терминалам или потребителям. Расстояния, на которые необходимо осуществить перекачку, значительны и составляют сотни и даже тысячи километров.

В процессе транспортировки нефти и нефтепродуктов по трубопроводам происходит снижение напора по трассе ввиду наличия сил трения и местных сопротивлений. Величина потерь возрастает с ростом скорости движения жидкости.

Для обеспечения рационального процесса транспортировки МТП на протяжении эксплуатационного участка до резервуарного парка (РП) или конечного пункта (КП) имеет в своем составе кроме *головной* нефтеперекачивающей станции (ГНПС) несколько *промежуточных* нефтеперекачивающих станций (ПНПС) для поддержания требуемого давления в трубопроводе в соответствии с гидравлическим расчетом, а также трубопроводы путевого отбора/подкачки продукта, как показано на рис. 1.

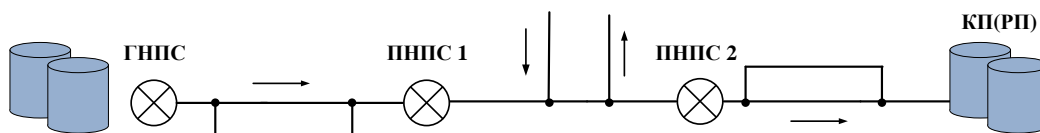


Рис. 1. Схема магистрального трубопровода (МТП)

Нефтеперекачивающая станция (НПС) нефтепроводов и нефтепродуктопроводов оборудуется магистральными (МНА) и подпорными (ПНА) насосными агрегатами, состоящими, как правило, из центробежного насоса (ЦН) и электропривода (ЭП).

Затраты электроэнергии на привод насосных агрегатов являются основной статьей затрат в системе трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, что обуславливает актуальность задачи оптимизации режимов работы МТП. Важным этапом решения задач оптимального управления является выбор математической модели рассматриваемого процесса и набора управляющих воздействий. В рамках указанного подхода формулируется и решается краевая задача математического моделирования процесса трубопроводного транспорта жидких углеводородов как объекта с распределенными параметрами (ОРП).

Краевая задача моделирования процесса транспорта нефти по МТП. Магистральный трубопровод, ввиду его значительной протяженности, предлагается рассматривать в качестве объекта с распределенными параметрами, для которого давление в трубопроводе и скорость потока выступают в качестве управляемой функции состояния. Тогда в общем виде поведение ОРП в любой точке $x \in \bar{D}$ замкнутой области \bar{D} в произвольный момент времени t может быть описано функцией состояния $Q(x, t)$, удовлетворяющей уравнению вида [1]:

$$L[Q(x, t)] = f(x, t), \quad x \in D, \quad t > 0, \quad (1)$$

где D – открытая часть области \bar{D} , L – оператор *линейной* комбинации функции Q и ее частных производных по x, t , $f(x, t)$ – функция, описывающая внешнее управляющее (возмущающее) воздействие на систему, приложенное во внутренней точке ОРП. При $f(x, t) \neq 0$ уравнение (1) является *неоднородным*, при $f(x, t) = 0$ *однородным*, соответственно.

В общем случае $Q(x, t)$ является векторной функцией состояния $Q(x, t) = (Q_i(x, t))$, $i = \overline{1, n}$, а векторное уравнение (1) эквивалентно системе, состоящей из n уравнений относительно $Q_i(x, t)$.

Состояние ОРП в начальный момент времени $t = 0$ описывается векторной функцией $Q_0(x) = (Q_{0i}(x))$, такой, что

$$N[Q(x, t)] = Q_0(x), \quad x \in \bar{D}, \quad t = 0. \quad (2)$$

Поведение функции $Q(x, t)$ на границе области \bar{D} , т.е. в точках $x \in \bar{D} \wedge x \notin D$, в любой момент времени $t > 0$ описывается как

$$\Gamma[Q(x, t)] = g(x, t), \quad x \in \bar{D} \wedge x \notin D, \quad t > 0, \quad (3)$$

где $g(x, t)$ – внешнее воздействие, приложенное на границе ОРП, которое наряду с $f(x, t)$ также можно рассматривать в качестве управляющего воздействия (*управление по граничным условиям*), N, Γ – линейные дифференциальные операторы.

Основное уравнение (1) с начальными условиями (2) и граничными условиями (3) составляет *краевую задачу*, решение которой однозначно определяет поведение ОРП на всей области определения функции состояния $Q(x, t)$.

Взаимосвязь основных параметров (давления в трубопроводе p и скорости потока перекачиваемого продукта ω), характеризующих движение жидкости плотностью ρ по трубопроводу постоянного диаметра D длиной L , может быть описана в любой точке x по направлению движения потока и в момент времени t системой двух уравнений, в общем случае нелинейных вида [2]

$$\begin{cases} -\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \rho \cdot \left(\frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} + \frac{\lambda(\omega(x, t)) \cdot \omega^2(x, t)}{2 \cdot D} + g \cdot \sin \alpha(x) \right), \\ -\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = c^2 \cdot \rho \cdot \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x}, \end{cases} \quad (4)$$

здесь $\sin \alpha(x) = dz(x)/dx$, где $z(x)$ – высота оси трубопровода над плоскостью сравнения (уровень моря), g – ускорение свободного падения, $\lambda(\omega(x, t))$ – коэффициент гидравлического сопротивления, который определяется в зависимости от скорости $\omega(x, t)$ по формулам Стокса, Блазиуса, Альтшуля [3], c – скорость распространения волн в жидкости, текущей в стальной трубе с толщиной стенки d , определяется по формуле Жуковского:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho \cdot D}{d \cdot E}}}, \quad (5)$$

где K – модуль объемного сжатия жидкости (для нефти $K \approx 1500$ МПа), E – модуль упругости материала трубы (для стали $E \approx 2 \cdot 10^5$ МПа).

Полагая, что в момент времени $t = 0$ движение жидкости в трубопроводе отсутствовало, начальные условия задачи запишем в следующем виде:

$$p(x,0) = p_0(x), \quad \omega(x,0) = \omega_0, \quad (6)$$

где $p_0(x)$ – распределение давления по длине трубопровода в начальный момент времени, ω_0 – скорость потока в трубопроводе в начальный момент времени.

Условия на границах трубопровода определяются исходя из технологической постановки задачи. В начале трубопровода подключен насосный агрегат, изменяющий расход $Q(t)$ нефтепродукта по известному закону от времени, а в конце задано остаточное $p_{ост}$ и/или $p_{атм}$ атмосферное давление в резервуарах КПП:

$$\omega(0,t) = \frac{4 \cdot Q(t)}{\pi \cdot D^2}, \quad p(L,t) = (p_{атм} + p_{ост} + \rho \cdot g \cdot \Delta Z), \quad (7)$$

где ΔZ – разница геодезических отметок начала и конца трубопровода.

Основная система уравнений (4) с начальными и граничными условиями (6), (7) соответствуют краевой задаче (1) – (3), при $n = 2$ и $f(x,t) = 0$ в (1).

Рассмотренная краевая задача описывает движение нефти от НПС до резервуарного парка (РП) без промежуточных станций и путевых отборов либо подкачек, т.е. представляет однородную задачу с управлением по граничным условиям.

Неоднородная краевая задача моделирования процесса транспорта нефти по МТП. Рассмотрим теперь неоднородную краевую задачу, для которой в правой части уравнения (1) примем:

$$f(x,t) = (f_i(x,t)) \neq 0, \quad i = 2, \quad (8)$$

где $f_1(x,t) \equiv f_p(x,t)$ – функция распределения источников давления по длине трубопровода, $f_2(x,t) \equiv f_\omega(x,t)$ – функция распределения источников жидкости по длине трубопровода, распространенные на некотором участке ограниченной протяженности, представим в следующем виде:

$$f_p(x,t) = \begin{cases} u_p(x,t), & x \in [x_A, x_B] \cap t \in [t_{00}, t_{01}], \\ 0, & x \notin [x_A, x_B] \cup t \notin [t_{00}, t_{01}], \end{cases} \quad (9)$$

$$f_\omega(x,t) = \begin{cases} u_\omega(x,t), & x \in [x_a, x_b] \cap t \in [t_{10}, t_{11}], \\ 0, & x \notin [x_a, x_b] \cup t \notin [t_{10}, t_{11}], \end{cases} \quad (10)$$

где $u_p(x,t)$ – функция изменения во времени давления (Па) на участке $x \in [x_A, x_B]$ за счет включения насосного оборудования (+) либо дросселирования регулирующей заслонкой (-), t_{00} – момент включения насоса (начала дросселирования), t_{01} – момент отключения насоса (окончания дросселирования). Функция $u_\omega(x,t)$ определяет изменение во времени скорости ($м/с$) потока подкачки (+) или отбора (-) продукта на участке $x \in [x_a, x_b]$, t_{10} – момент начала подкачки (отбора) продукта, t_{11} – момент окончания отбора (подкачки).

Функции распределения скорости подкачки (отбора) продукта $u_{\omega}(x, t)$ и изменения давления $u_p(x, t)$ могут иметь вид, представленный на рис. 2.

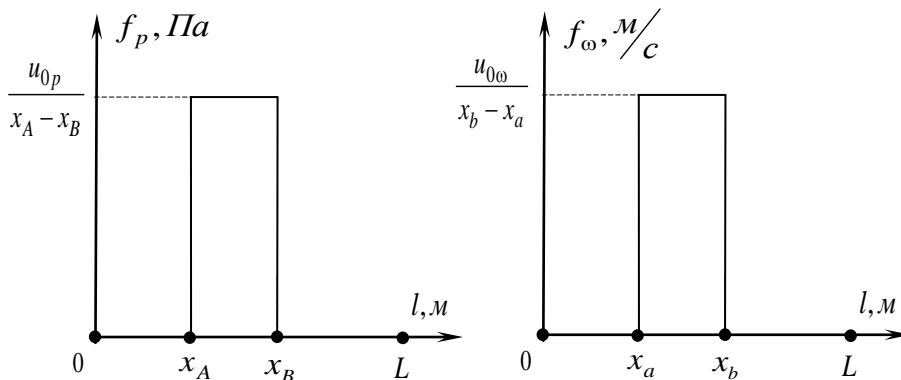


Рис. 2. Пример функции распределения источников давления $f_p(x, t)$ и источников жидкости $f_{\omega}(x, t)$ по координате трубопровода x

С учетом (8), (9), (10) систему неоднородных уравнений, соответствующих системе уравнений (4), можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = -\rho \cdot \left(\frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} + \frac{\lambda(\omega(x, t)) \cdot \omega^2(x, t)}{2 \cdot D(x)} + g \cdot \sin \alpha(x) \right) + f_p(x, t); \\ \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x} = -\frac{1}{c^2 \cdot \rho} \cdot \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} + f_{\omega}(x, t). \end{cases} \quad (11)$$

При описании реальных трубопроводов, длина которых составляет десятки километров, участок приложения давления или потока жидкости крайне мал.

Пусть

$$x_p \in [x_A, x_B], \quad x_{\omega} \in [x_a, x_b], \quad (12)$$

тогда

$$x_A \rightarrow x_B \rightarrow x_p, \quad \text{если } |x_B - x_A| \ll L, \quad (13)$$

$$x_a \rightarrow x_b \rightarrow x_{\omega}, \quad \text{если } |x_b - x_a| \ll L, \quad (14)$$

что означает приложение внутренних источников давления и расхода жидкости не на участке, а в точках x_p, x_{ω} , что переводит рассматриваемые управляющие воздействия в класс сосредоточенных. Это означает, что аналогично задаче, рассмотренной в [1], можно получить следующее представление $f_p(x, t)$ и $f_{\omega}(x, t)$:

$$f_p(x, t) = u_p(t) \cdot \delta(x - x_p), \quad (15)$$

$$f_{\omega}(x, t) = u_{\omega}(t) \cdot \delta(x - x_{\omega}), \quad (16)$$

где $\delta(x - x_p), \delta(x - x_{\omega})$ – функции Дирака, а $u_p(t)$ и $u_{\omega}(t)$ определяются следующим образом [3]:

$$u_p(t) = \rho \cdot g \cdot h(t), \quad (17)$$

$$u_\omega(t) = \frac{4 \cdot q(t)}{\pi \cdot D^2}, \quad (18)$$

где $q(t)$ – объем подачи или отбора нефти из трубопровода [$\text{м}^3/\text{с}$] в точке с координатой x_ω , $h(t)$ – напор, развиваемый насосным агрегатом, установленным в точке x_p трубопровода.

Пример моделирования процесса транспортировки нефти по МТП. Проведем расчет гидродинамических процессов, проходящих в магистральном нефтепроводе диаметром $D=1200$ мм и длиной $L=454$ км, в течение вывода на стационарный режим производительностью $Q=114000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Перекачиваемым продуктом является нефть плотностью $\rho = 870 \text{ кг}/\text{м}^3$ и вязкостью $\nu = 25 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Рассматриваемый нефтепровод включает шесть станций: одну головную (ГНПС) и пять промежуточных (ПНПС), оснащенных магистральными насосными агрегатами (МНА) марки НМ 10000-210, по четыре на каждой станции. Требуемый режим обеспечивается тремя станциями: ГНПС, ПНПС2, ПНПС4, на каждой из которых в работе находятся по одному МНА.

Решение системы дифференциальных уравнений (9)-(11) проводится численными методами в программе MathCAD с использованием стандартной функции Pdsolve. На рис. 3 приведено распределение по длине трубопровода полного напора $H(x,t)$, состоящего из геометрического напора $z(x)$, скоростного напора $\frac{\omega^2(x,t)}{2 \cdot g}$, пьезометрического напора $\frac{p(x,t)}{\rho \cdot g}$. В начальный момент времени распределение напора по длине трубопровода соответствовало линии 4 (см. рис. 3).

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета технологического режима

Нефтеперекачивающая станция (НПС)	ГНПС	ПНПС1	ПНПС2	ПНПС3	ПНПС4	ПНПС5
№ агрегата (диаметр колеса, мм)	МНА 4 (490)	–	МНА 4 (480)	–	МНА 4 (490)	–
Момент включения, мин	0	–	74	–	57	–

Порядок пуска магистрального нефтепровода следующий:

- пуск 1-го подпорного агрегата (ПА) ГНПС;
- пуск 2-го ПА ГНПС;
- пуск МНА4 ГНПС производится при достижении давления во всасывающем коллекторе 1,4 МПа;
- при достижении давления 2,0-2,3 МПа на входе ПНПС4 производится пуск МНА4 ПНПС4 (линия 1 на рис. 3);

- после стабилизации режима (5...10 мин) производится пуск МНА4 ПНПС2 (линия 2 на рис. 3);
 - через 20-30 мин в трубопроводе устанавливается требуемый стационарный режим с заданной производительностью (линия 3 на рис. 3).
- Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 1.

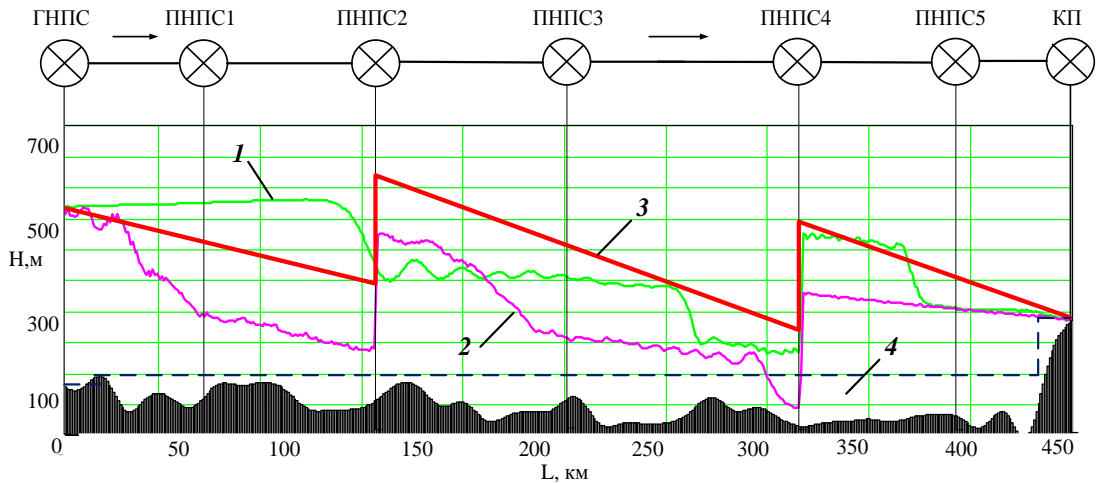


Рис. 3. Распределение напора по длине трубопровода в процессе вывода участка МНП на режим производительностью $Q=114$ тыс. т/сут ($5460 \text{ м}^3/\text{ч}$):
 1 – распределение напора после включения ПНПС4 (57 мин),
 2 – распределение напора после включения ПНПС2 (74 мин),
 3 – установившийся режим (120 мин),
 4 – распределение напора в начальный момент времени

Заключение. В работе сформулирована краевая задача математического моделирования процессов транспортировки жидких углеводородов по системам магистрального транспорта. Полученная математическая модель может рассматриваться в качестве базовой при решении задач оптимального управления процессом трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, где в качестве управляющих воздействий выступают напор, развиваемый насосными агрегатами станций, величина дросселирования регулирующей заслонкой и изменение скорости подкачки / отбора продукта в произвольной точке трубопровода.

Сформулированная краевая задача математического моделирования позволяет рассматривать магистральный трубопровод в качестве системы с распределенными параметрами (СРП) с источниками давления и расхода, приложенными на границах, и внутренними источниками давления и расхода, которые также выступают в роли управляющих воздействий. Такой подход позволяет в дальнейшем формулировать и решать задачи управления процессами трубопроводного транспорта жидких углеводородов с применением методов теории управления системами с распределенными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.
- Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
- Тугунов П.И., Новосёлов В.Ф., Коршак А.А., Шамазов А.М. Типовые расчёты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. – Уфа: Дизайн-ПолиграфСервис, 2002. – 658 с.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2010 г.

UDC 681.5

MATHEMATICAL SIMULATION OF CONTROLLABLE HYDRODYNAMIC PROCESSES OF PETROLEUM AND PETROCHEMICAL PRODUCTS TRANSPORTATION IN TRUNK PIPELINES

A.A. Afinogentov¹, Yu.E. Pleshivtseva¹, A.S. Snopkov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² ОАО «Privolgsknefteprovod»
100, Leninskaya st., Samara, 443020

The boundary problem of mathematical simulation is formulated and solved for the process of petroleum and petrochemical products transportation in trunk pipelines. The process is considered as an object with distributed parameters. The pressure developed by transfer pumps and the inflow/outflow of petrochemical products along pipeline can be considered as input control functions.

Keywords: *mathematical simulation, object with distributed parameters, input control function, petroleum and petrochemical products transportation in trunk pipelines.*

*Yulia E. Pleshivtseva – Doctor of Technical Sciences, Associate professor.
Alexander A. Afinogentov – Candidate of Technical Sciences, assistant.
Anton S. Snopkov – engineer.*