

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ГРУЗОПОТОКОВ НЕФТИ В РАЗВЕТВЛЕННЫХ СИСТЕМАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

А.С. Лосенков, Т.С. Ющенко, С.А. Стрельникова, Д.Е. Мичкова (ООО «Энергоавтоматика»)

Рассматривается новый подход к планированию графика транспортировки нефти в разветвленных системах магистральных нефтепроводов. Представленный подход позволяет рассчитывать распределение грузопотоков за определенный период с заданной дискретизацией с учетом характеристик нефтепроводов (пропускная способность, технологические режимы и т.д.), свойств нефти (массовая доля серы, плотность и т.д.) и вместимости резервуарных парков, а также оптимизировать транспортировку нефти по энергопотреблению. Возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере нефтепроводной системы.

Ключевые слова: магистральные нефтепроводы, планирование грузопотоков, транспорт нефти.

Введение

Одной из актуальных и трудоемких задач при транспортировке нефти и нефтепродуктов является проблема планирования распределения грузопотоков по магистральным трубопроводным системам. Задача усложняется тем, что при планировании перекачки нефти необходимо учитывать как характеристики самих нефтепроводов (пропускная способность, технологические режимы перекачки и т.д.), так и свойства нефти (плотность, массовая доля серы и т.д.), а также вместимость резервуарных парков. Кроме того, необходимо оптимизировать затраты электроэнергии при перекачке и учитывать график плановых работ.

Вопросу оптимизации затрат на энергопотребление при планировании грузопотоков для отдельно взятого магистрального нефтепровода (МН) посвящено множество научных и инженерных работ [1–4]. В этих работах особое внимание уделяется выбору насосного оборудования на насосно-перекачивающих станциях (НПС), а также выбору технологических режимов для перекачки нефти. Для системы, состоящей из нескольких МН, постановка задачи является более общей, и выбор технологических режимов для перекачки на нефтепроводах характеризуется не только оптимизацией затрат на энергопотребление, но и необходимостью выполнения ряда других ограничений. Например, необходимо согласовывать грузопотоки нефти в единицу времени по связанным МН, учитывать вместимость резервуарных парков (РП), а также свойства перекачиваемой нефти и необходимость ее смешивания (компаундирования). Более подробно проблемы планирования грузопотоков нефти в системе МН описаны в [5].

Актуальность данной темы обусловлена ухудшением состава и свойств нефти, поступающей в системы МН от поставщиков, увеличением доли высокосернистых нефтей и необходимостью поставок малосернистой нефти потребителям. В связи с этим необходимо перенастраивать транспортную логистику с целью обеспечения смесового формирования грузопотоков в узком диапазоне качественных параметров [5].

На данный момент задача планирования распределения потоков решается в ручном режиме высококвалифицированным специалистом для каждой трубопроводной системы отдельно. При этом под-

готовка такого специалиста занимает значительное время, и расчет на каждый следующий период базируется на предыдущем опыте, а учет изменений как в свойствах нефти, так и в характеристиках нефтепровода может повлечь большие сложности при планировании грузопотоков. В связи с этим была поставлена задача разработать подход для расчета подробного графика транспортировки нефти в системе МН.

Актуальность

Задача по планированию графика грузопотоков для разветвленной сети трубопроводов с учетом наличия резервуарных парков, ограничений по максимальному/минимальному значению свойств (плотность, массовая доля серы (%) и т.д.) в контрольных точках и фиксированных режимных расходов в трубопроводах (учет карты режимов) ранее не решалась. Вследствие актуальности данной задачи в нефтегазовой отрасли авторами был разработан подход, позволяющий получить график грузопотоков нефти на определенный период (день, неделя, месяц и т.д.) с заданной дискретностью шага (час, день, неделя и т.д.) для всех МН трубопроводной системы.

Описание подхода

Для подробного планирования грузопотоков нефти по разветвленной системе МН необходимо рассчитать перекачку по каждому МН за заданный период с определенной дискретизацией шагов таким образом, чтобы были выполнены следующие условия:

- учитывалась пропускная способность и наличие только режимных расходов на МН (если расход МН не оговорен в плановых работах или на данном МН отсутствует карта технологических режимов);
- учитывалась вместимость нефти в РП (на каждом шаге не было превышение максимального допустимого количества нефти в РП или достижения значения количества нефти РП ниже минимального допустимого);
- при расчете значений свойств нефти в контрольных точках учитывался транспорт нефти, то есть движение нефти с различными свойствами со скоростью потока;
- в точке соединения нескольких МН (точка смешения потоков) и в РП происходило смешение нефти с использованием правила аддитивности по массе.

Формула для расчета значения свойств в узле смешения МН в общем виде следующая:

$$S_n^\theta = \frac{\sum_i s_i^\theta q_{ij}^\theta}{\sum_i q_{ij}^\theta}; \rho_n^\theta = \frac{\sum_i q_{ij}^\theta}{\sum_i \frac{q_{ij}^\theta}{\rho_i}} \quad (1)$$

Для расчета значений свойств в РП используются формулы:

$$S_n^\theta = \frac{s_{RP}^{\theta-1} M_{RP}^{\theta-1} + \sum_i s_i^\theta q_{ij}^\theta}{\sum_i q_{ij}^\theta}; \rho_n^\theta = \frac{\sum_i q_{ij}^\theta + M_{RP}^{\theta-1}}{\frac{M_{RP}^{\theta-1}}{\rho_{RP}^{\theta-1}} + \sum_i \frac{q_{ij}^\theta}{\rho_i}} \quad (2)$$

где θ — шаг счета, s_n^θ и ρ_n^θ — сернистость и плотность в РП/узле смешения на θ -ом шаге счета, $M_{RP}^{\theta-1}$ — масса нефти в РП на $(\theta-1)$ -ом шаге счета, q_{ij}^θ — массовый расход нефти, втекающей в РП/узел смешения по i -ому МН с использованием j -ого режима карты данного МН на θ -ом шаге, s_i^θ и ρ_i^θ — сернистость и плотность данной нефти.

Считаем, что смешение нефти в РП производится до момента вытекания нефти из РП на рассматриваемом шаге. То есть сначала нефть поступает в РП из всех втекающих МН, производится расчет смешения, далее нефть с получившимися свойствами вытекает из РП.

Описанные выше условия можно формализовать в виде системы из оптимизируемой целевой функции $\varphi(x)$ и ограничений $b(x)$, $c(x)$ в виде равенств/неравенств для последующей постановки задачи оптимизации.

Оптимизируемая функция имеет следующий общий вид:

$$\varphi(x) = N_1 f(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step}) + N_2 \gamma(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step}) + N_3 \mathcal{G}(t_{ij}^\theta, T_{step}), x = \{t_{ij}^\theta, q_k^\theta\} \quad (3)$$

где $f(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step})$ — функция энергозатрат при перекачке нефти по системе МН; $\gamma(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step})$ — функция отклонений суммарного количества нефти поставленного поставщиками и полученного потребителями от заданного графиком транспортировки; $\mathcal{G}(t_{ij}^\theta, T_{step})$ — функция, описывающая число переходов между режимами в системе МН; i — номер МН в рассматриваемой системе МН с картой режимов; j — номер технологического режима на МН с картой режимов; θ — номер шага по времени; k — номер МН без карты технологических режимов; T_{step} — величина шага по времени; t_{ij}^θ — время перекачки на i -ом МН на j -ом технологическом режиме в θ -ый шаг по времени; N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 — весовые коэффициенты.

Необходимо обратить внимание, что функция $\gamma(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step})$ добавлена в целевую функция для

того, чтобы при использовании предлагаемого подхода в результате расчета оптимизационной задачи решение выдавалось и в тех случаях, когда система не может перекачать заданные в графике транспортировки объемы нефти от поставщиков к потребителям. В таком случае происходит минимизация отклонений объемов перекачки от графика транспортировки.

Предлагается значения коэффициентов N_1, N_2, N_3 выстраивать в таком порядке:

$$0,01N_2 > N_1 > N_3 \quad (4)$$

В таком виде при решении оптимизационной задачи в первую очередь будет выполняться график транспортировки, далее будет вестись оптимизация по энергопотреблению, а после — уже по количеству переходов.

В оптимизируемую функцию могут добавляться новые слагаемые в соответствии с задачами, которые необходимо решить для конкретной системы МН.

Общие ограничения $b(x)$, $c(x)$ записываются следующим образом:

$0 \leq t_{ij}^\theta \leq T_{step}$ — время работы МН на технологическом режиме не должно превышать время шага T_{step} и не может быть отрицательным;

$\sum_j t_{ij}^\theta = T_{step}$ — сумма значений времени работы МН

на всех технологических режимах из карты МН на шаге θ должна быть равна времени шага T_{step} для каждого МН с картой режимов;

$0 \leq q_k^\theta \leq Q_i$ — расход перекачки не может превышать пропускной способности МН Q_i и не может быть отрицательным. Задается для МН, для которых не определены технологические режимы.

$s_n^{min} \leq s_n^\theta \leq s_n^{max}, \rho_n^{min} \leq \rho_n^\theta \leq \rho_n^{max}$ — значения свойств нефти в контрольных точках должны быть в диапазоне ограничений.

В качестве ограничений в узловых точках системы МН и в РП используется закон сохранения массы:

— втекающий объем нефти в узел равен вытекающему:

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J q_{ij}^\theta t_{ij}^{\theta, in}\right) + \left(\sum_{k=1}^K q_k^\theta T_{step}\right)^{in} = \left(\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M q_{lm}^\theta t_{lm}^{\theta, out}\right) + \left(\sum_{n=1}^N q_n^\theta T_{step}\right)^{out};$$

— количество нефти в РП M_{RP} не должно быть меньше минимально заданного значения M_{min} и быть больше максимально заданного значения M_{max} в каждый момент времени:

$$M_{min} \leq (M_{RP}^{\theta-1} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J q_{ij}^\theta t_{ij}^{\theta, in} + \sum_{k=1}^K q_k^\theta T_{step})^{in} - (M_{RP}^\theta + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M q_{lm}^\theta t_{lm}^{\theta, out} + \sum_{n=1}^N q_n^\theta T_{step})^{out} \leq M_{max}.$$

При наличии плановых работ на МН фиксируется время перекачки на режиме, заданном плановыми работами, то есть $t_{ij}^\theta = T_{plan}$

Кроме описанных ограничений в систему уравнений могут добавляться дополнительные при постановке специальных задач для конкретной системы МН.

Описанная целевая функция и ограничения имеют общий вид и служат основой для предложенного подхода по планированию грузопотоков нефти в разветвленных магистральных нефтепроводах с использованием алгоритмов по решению оптимизационной транспортной задачи. С общими сведениями о постановке и решении транспортных задач можно ознакомиться в работах [6, 7]. Значения коэффициентов в целевой функции, а также полный перечень ограничений будут зависеть от конкретно поставленных задач при расчете задачи планирования грузопотоков.

Оптимизационная транспортная задача может решаться как методами последовательного квадратичного программирования [8, 9], так и методами линейного программирования [10, 11] в зависимости от сложности разветвленной транспортной сети и поставленными при планировании грузопотоков нефти задачами.

При заданных выше $\varphi(x)$ и $b(x)$, $c(x)$ оптимизационная задача решается с использованием алгоритмов линейного программирования (например, симплекс-метод или метод потенциалов) при условии, что ограничения на значения свойств нефти в контролируемых точках можно выразить в линейном виде. Шаг расчета равен шагу дискретизации (например, 1 час). Период расчета при этом, например, — 1 мес. (744 ч). Результатом расчета является определение технологических режимов перекачки на всех МН, на которых есть карта режимов, на каждом шаге расчета, а также массовые расходы перекачки на каждом шаге для МН, у которых нет карты технологических режимов.

Если не удастся найти решение задачи в вышеописанной постановке, делается вывод, что система МН не может перекачать заданные объемы нефти при заданных ограничениях на значения свойств нефти в контрольных точках. В таком случае следует убрать ограничения на s_n^θ , ρ_n^θ из $b(x)$, $c(x)$ и добавить в целевую функцию $\varphi(x)$ две дополнительные функции α , β :

$$\alpha(s_n^\theta, s_n^{\max}, s_n^{\min}) = \sum_i (e^{N_4(s_i - s_n^{\max})} + e^{N_4(s_n^{\min} - s_i)}) \quad (5)$$

$$\beta(\rho_n^\theta, \rho_n^{\max}, \rho_n^{\min}) = \sum_i (e^{N_5(\rho_i - \rho_n^{\max})} + e^{N_5(\rho_n^{\min} - \rho_i)}) \quad (6)$$

Следовательно, целевая функция примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & N_1 f(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step}) + N_2 \gamma(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta, T_{step}) + \\ & + N_3 \vartheta(t_{ij}^\theta, T_{step}) + \alpha(N_4, s_n^\theta(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta), s_n^{\max}, s_n^{\min}) + \\ & \beta(N_5, \rho_n^\theta(q_{ij}^\theta, t_{ij}^\theta, q_k^\theta), \rho_n^{\max}, \rho_n^{\min}), x = \{t_{ij}^\theta, q_k^\theta\} \end{aligned} \quad (7)$$

где N_4 , $N_5 \approx 10 \dots 100$. В таком виде даже незначительное отклонение свойств нефти от ограничений приведет к существенному возрастанию значения целевой функции.

Отметим, что линейность/нелинейность целевой функции и ограничений зависит от сложности рассматриваемой системы МН. В случае разветвленной системы МН с большим числом РП и точек смешива-

ния потоков целевая функция (5) будет нелинейной из-за функций α и β . Так как использование методов квадратичного программирования значительно увеличивает время расчета оптимизационной задачи, а время расчета имеет экспоненциальную зависимость от числа переменных x , то при числе переменных, превышающем $\approx 10^5$, и необходимости использования функций α и β в целевой функции предлагается решать задачу в два этапа следующим образом.

На первом этапе целевая функция $\varphi(x)$ выглядит аналогично (7). При этом оптимизационная задача решается методами квадратичного программирования [8, 9], так как функции $\alpha(s_n^\theta, s_n^{\max}, s_n^{\min})$, $\beta(\rho_n^\theta, \rho_n^{\max}, \rho_n^{\min})$ являются нелинейными. Шаг расчета равняется периоду расчета (например, 1 мес., 744 ч). Результатом первого этапа являются получившиеся значения свойств в контрольных точках, которые становятся новыми ограничениями для второго этапа.

На втором этапе расчета целевая функция $\varphi(x)$ аналогична (3). Оптимизационная задача решается с использованием алгоритмов линейного программирования (например, симплекс-метод или метод потенциалов).

На втором этапе шаг расчета равен шагу дискретизации (например, 1 ч). Период расчета при этом, например, — 1 мес. (744 ч). Результатом расчета на втором этапе является определение технологических режимов перекачки на всех МН, на которых есть карта режимов, на каждом шаге расчета, а также массовые расходы перекачки на каждом шаге для МН, у которых нет карты технологических режимов.

При переходе ко второму шагу для линеаризации поставленной задачи необходимо, чтобы ограничения по значению свойств в контрольных точках с некоторыми допущениями могли быть выражены в линейном виде.

При создании подхода авторами были приняты следующие допущения:

- не учитываются переходные процессы внутри технологического участка МН, в том числе вызванные самотечными участками, то есть переход из одного стационарного режима на другой одномоментный. При этом нет требований к правилам переключения между режимами, то есть возможен переход с любого технологического режима на любой другой из карты режимов МН;

- не учитываются нестационарные процессы и изменение режимного массового расхода, связанные с дискретным смешиванием и изменением свойств, а также наличием зон смешения вдоль всего трубопровода. Принято, что массовый расход технологического режима является постоянным и не зависит от свойств нефти в трубе в каждый момент времени. Принятое допущение о том, что массовый расход в трубе на режиме является постоянным, приводит к погрешности расчета грузопотока в трубе, связанной с изменением плотности в МН. Величина погрешности зависит от диапазона изменения плотности в системе МН;

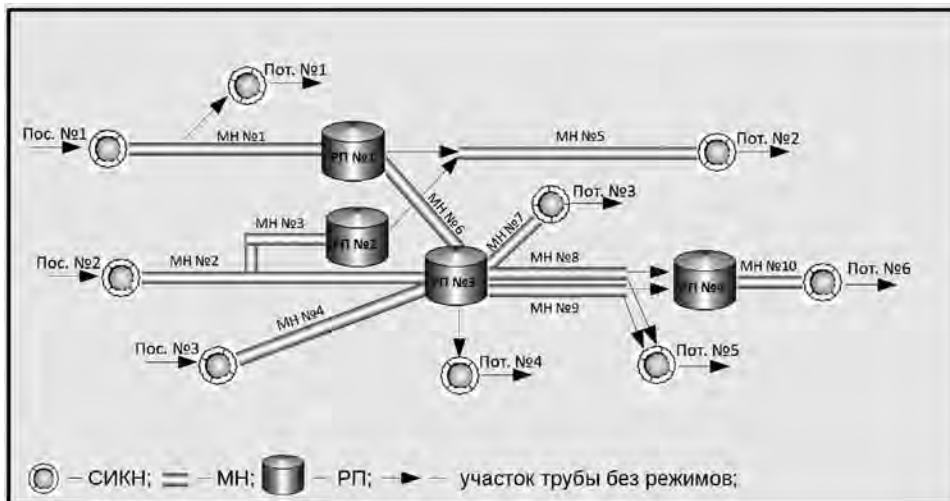


Рис. 1. Схема разветвленной системы нефтепроводов, отражающая взаимодействие потребителей (Пот.) и поставщиков (Пос.)

- движение нефти считается одномерным и поршневым, то есть нефть с различными свойствами в трубе не смешивается в процессе течения по МН;
- не учитывается температура нефти и окружающей среды;

Таблица 1. Плановый валовый объем поставки нефти от поставщиков и ее свойства

	1	2	3
, . . .	4150	3200	1430
, %	1,3	2,1	1,7
, / ³	845	890	850

Таблица 2. Плановый валовый объем поставки нефти потребителям и ограничения по свойствам

	1	2	3	4	5	6
, . . .	120	4380	1150	1240	1500	400
, %	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
, / ³	880	880	880	880	880	880

Таблица 3. Начальный объем нефти и свойства в РП и максимальный/минимальный допустимый объем нефти в РП

	1	2	3	4
, . . .	77,69	65,45	98,175	5,95
, %	1,22	2,15	1,67	1,7
, / ³	850	850	850	850
, . . .	135,75	127,5	110,5	11,48
, . . .	0,4	0,4	0,4	0,4

Таблица 4. Плановые работы на МН

1	156	96	0
2,3	489	72	60
2,3	564	24	0
4	492	72	0
5	156	96	0
10	660	24	0

- смешение нефти в точке смешения потоков считается мгновенным и полным;
- не учитывается прохождение герметизаторов и средств очистки и диагностики;
- РП не разделен на отдельные емкости и рассматривается как единая емкость с нефтью, в котором осуществляется полное равномерное перемешивание нефти при ее поступлении. При этом один РП можно разбить на несколько групп резервуаров. Группа может состоять как из одного, так и из нескольких резервуаров.

Результатом решения задачи оптимизации графика грузопотоков нефти являются значения всех переменных, входящих в целевую функцию, то есть данные о времени перекачки на различных технологических режимах МН (t_{ij}^0) для МН, у которых предусмотрена карта режимов; массовый расход (q_k^0) на каждом шаге для МН, у которых не предусмотрена карта режимов, а также объемы нефти, которые не были отобраны у поставщиков и не были поставлены потребителям. Определение этих переменных позволит рассчитать объем нефти во всех РП, свойства нефти в контрольных точках и режимы работы всех МН на каждом шаге по времени.

Использование такого подхода дает возможность решить задачу при заданных входных данных, а если решения при исходных данных нет, то показывает, насколько нужно уменьшить грузопоток или изменить ограничения по свойствам нефти, чтобы решение стало возможным. При этом решение оптимизируется по энергопотреблению.

Пример расчета грузопотоков нефти в сети разветвленных МН

Для тестирования описанного подхода была выбрана разветвленная система нефтепроводов, состоящая из 10 отдельных МН, четырех РП, трех поставщиков и шести потребителей. При этом технологические режимы на МН №2 и МН №3 — связанные. Схема системы нефтепроводов представлена на рис. 1.

В МН №5 нефть может попадать из РП №1 и РП №2, полностью смешиваясь на входе в МН №5. Значение свойств нефти после смешения рассчитываются по правилу аддитивности по массе. Из шести потребителей, значения свойств у потребителя №1 определяются свойствами от поставщика №1, значения свойств у потребителей №№3,4,5,6 определяются свойствами в РП №3, а значение свойств у потреби-

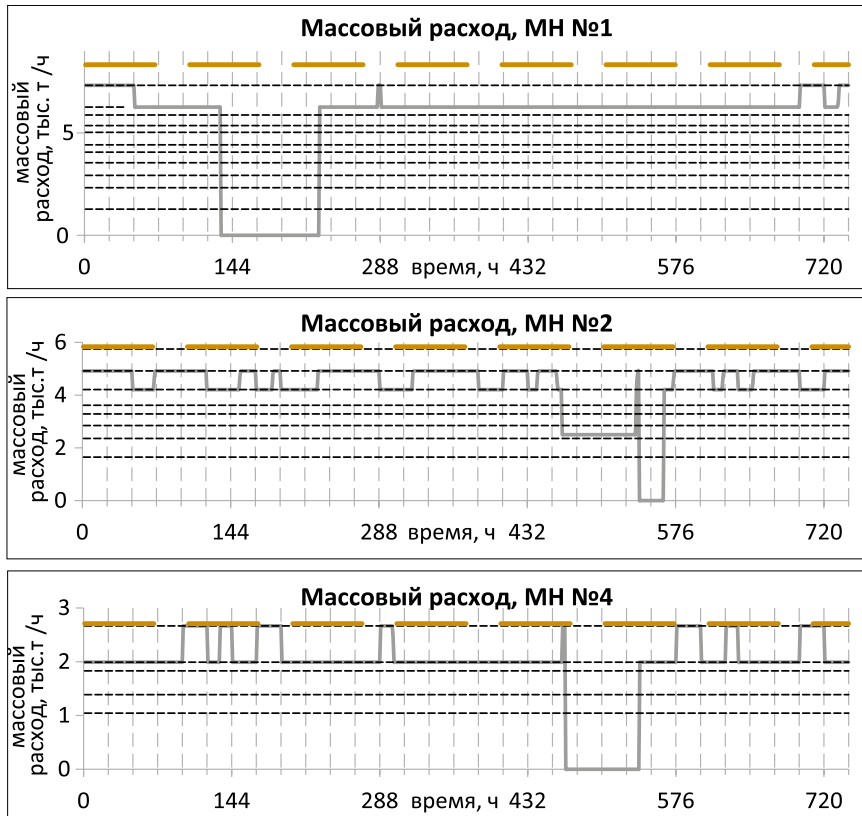


Рис. 2. Массовые расходы нефти в МН, идущих от поставщиков, где серая линия – массовый расход в МН, коричневая прерывистая линия – пропускная способность МН, черная штрихпунктирная линия – массовые расходы технологических режимов МН

теля №2 определяются значениями свойств в узле смешения МН №5 от РП №1 и РП №2. Соответственно у потребителя №2 определяем свойства по правилу аддитивности по массе в узле смешения МН №5 по (1). При расчете свойств нефти в РП №3 используется (2) со следующим допущением: значение свойств, поступающих по МН №6 в РП №3 считается равным значению свойств у поставщика №1 (пренебрегаем начальной массой в РП №1 и начальным распределением свойств в МН №1).

Для труб, идущих от РП №1 и РП №2 к МН №5 нет заданных технологических режимов, поэтому расход в процессе перекачки может быть любой от нуля до пропускной способности трубы. Аналогично и для труб, идущих из МН №1 к потребителю №1, из РП №3 к потребителю №4, из МН №8 и МН №9 к потребителю №5 и в РП №4.

При расчете тестового примера был выбран период перекачки в 1 мес. (31 день, 744 ч) с дискретностью шага T_{step} в один час. В общем графике транспортировки заданы валовые объемы перекачки за месяц, поступающие от поставщиков и поставляемые потребителям. Ограничения по значению массовой доли серы и плотности нефти у потребителей следующие: массовая доля серы у всех потребителей не должна превышать $S_n^{max} = 1,9\%$, а плотность $\rho_n^{max} = 880 \text{ кг/м}^3$. Валовые объемы перекачки (график транспортиров-

ки), значение свойств нефти у поставщиков, а также ограничения по свойствам нефти представлены в табл. 1 и 2.

В качестве исходных данных можно задать как общий валовый объем поставки и потребления, так и распределение поставки по дням или шагам, например, равномерные или точные значения (если известен точный график поставки и потребления), то есть в какой день какое количество нефти необходимо забрать у поставщиков и поставить потребителям. Также в качестве исходных данных задаются значения свойств нефти в трубах, количество нефти в РП и свойства этой нефти на начало периода расчета и максимальная/минимальная вместимость РП (табл. 3). Причем максимальная и минимальная вместимость РП может меняться в течение периода расчета, например, вследствие вывода каких-то резервуаров в ремонт и т. д.

Кроме того, были заданы пропускные способности для МН без карт технологических режимов и технологические режимы для всех остальных МН, а также график плановых работ. Технологические режимы и пропускные способности МН обозначены на графиках решения (рис. 2-4). Плановые работы отображены в табл. 4. Отметим, что допущение о постоянном массовом расходе на режиме при указанном диапазоне изменения плотностей (табл. 1) в системе МН приведет к максимальной погрешности расчета грузопотоков нефти порядка 7...8% (для приведенного примера, если массовый расход на режиме оценивался для плотности 890 кг/м^3 , а по МН текла нефть с плотностью 845 кг/м^3).

Таким образом, для вышеописанных исходных данных с помощью предложенного подхода задача по расчету графика грузопотоков нефти в разветвленной системе МН была решена. Результаты решения для МН, идущих от поставщиков, представлены на графиках (рис. 2), где отображено изменение массового расхода перекачки нефти на МН с течением времени, а также на графиках изменения количества нефти в РП (рис. 3) и значений свойств нефти в контрольных точках (рис. 4).

На рис. 2 представлены массовые расходы от времени в МН, идущих от поставщиков (МН №1, МН №2, МН №4). Массовый расход в МН №3 однозначно связан с массовым расходом в МН №2. Массовый расход на МН №2 показан до отвода на МН №3.

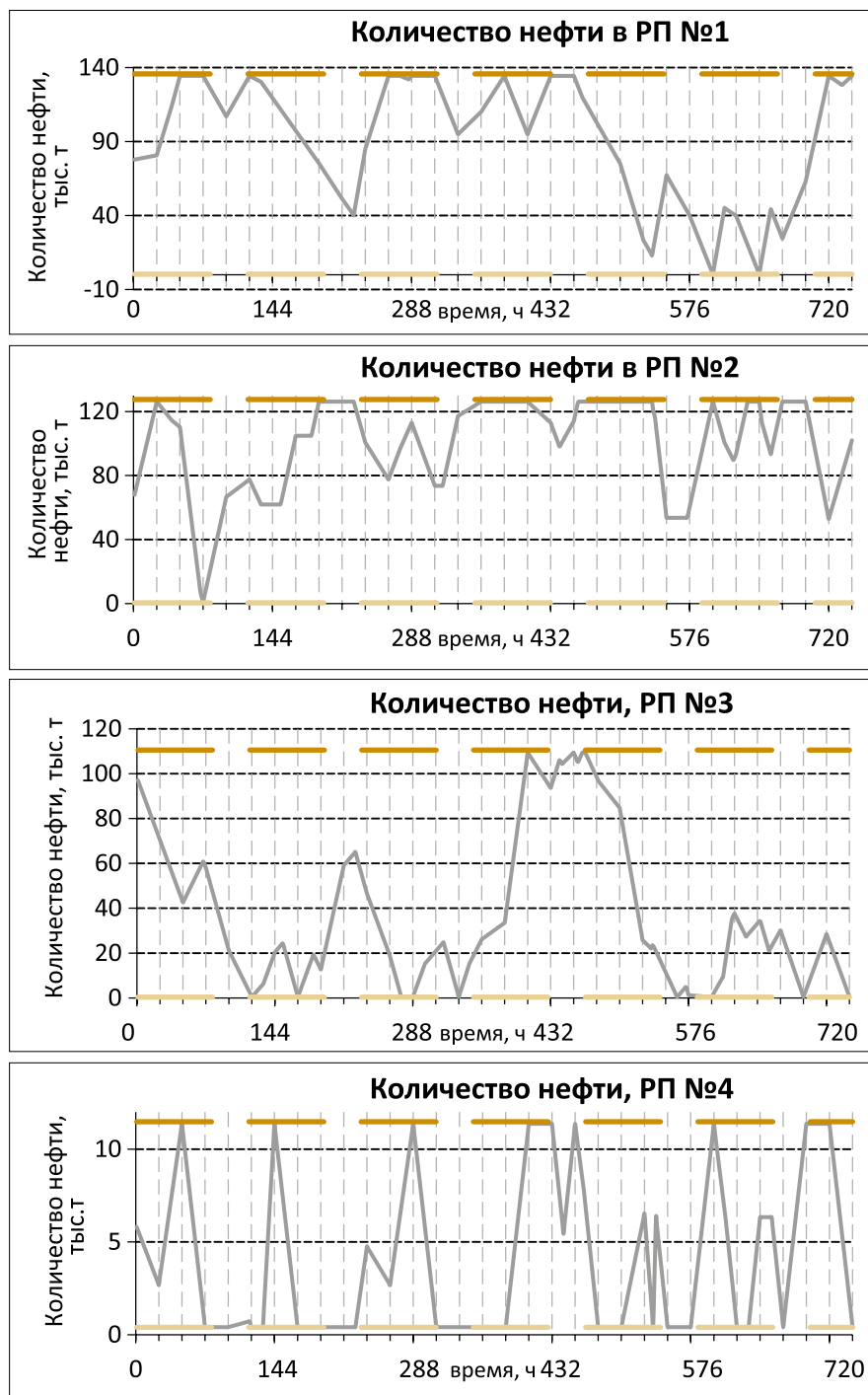


Рис. 3. Количество нефти в РП №№1-4, где серая линия – количество нефти в РП, коричневая прерывистая линия – максимально возможное количество нефти в РП, светло-коричневая прерывистая линия – минимально возможное количество нефти в РП

Внережимные расходы и остановленное состояние в МН №1, №2 и № 4 обусловлено графиком плановых работ (табл. 4). Например, для МН №1 ($i=1$) на 432-ом часе расчета ($\theta=432$) массовый расход нефти $q_{ij}^{\theta}=0$, номер режима в карте МН $j=1$. Для труб без технологических режимов (рис. 1) ограничением по массовому расходу является только их пропускная способность.

Описан новый подход к планированию графика грузопотоков нефти на определенный период с заданным шагом дискретизации в системе разветвленных трубопроводов с учетом выполнения требований по качеству нефти у потребителей, плановых работ, технологических режимов МН и количества нефти в РП.

Заключение

По результатам расчета все поставщики прокачали заданное в графике транспортировки (табл. 1) количество нефти, и все потребители получили указанные в табл. 2 объемы нефти. Разница между общей массой нефти, поставленной в систему МН и количеством нефти, доставленном потребителям, составляет 10 тыс. т. Эта разница по результатам решения была выкачана из РП.

Кроме графиков массового расхода в МН, результатом решения являются графики количества нефти во всех РП от времени. Для примера на рис. 3 приведен график количества нефти от времени в РП № 3. В течение всего периода расчета ни один из РП не перепорожнялся и не переполнялся, то есть $M_{min} \leq M_{RP}^{\theta} \leq M_{max}$ для каждого шага по времени.

Величина свойств нефти у потребителей №3, №4, №5 и №6 будет фактически определяться значением свойств в РП №3. Свойства у потребителя №1 будет равняться значению свойств у поставщика №1. Поэтому на рис. 4 представлены два графика: массовая доля серы от времени для потребителя №2 и в РП №3. Графики плотности нефти будут выглядеть аналогичным образом. Значение плотности для всех потребителей не превышало 880 кг/м^3 в течение всего периода перекачки.

С использованием рис. 2-4 можно составить посуточный график транспортировки нефти на месяц, определить карту переходов технологических режимов МН во всей трубопроводной системе, определять смешение нефти на выходе из РП в МН и в самих РП, а также контролировать технологический процесс перекачки.

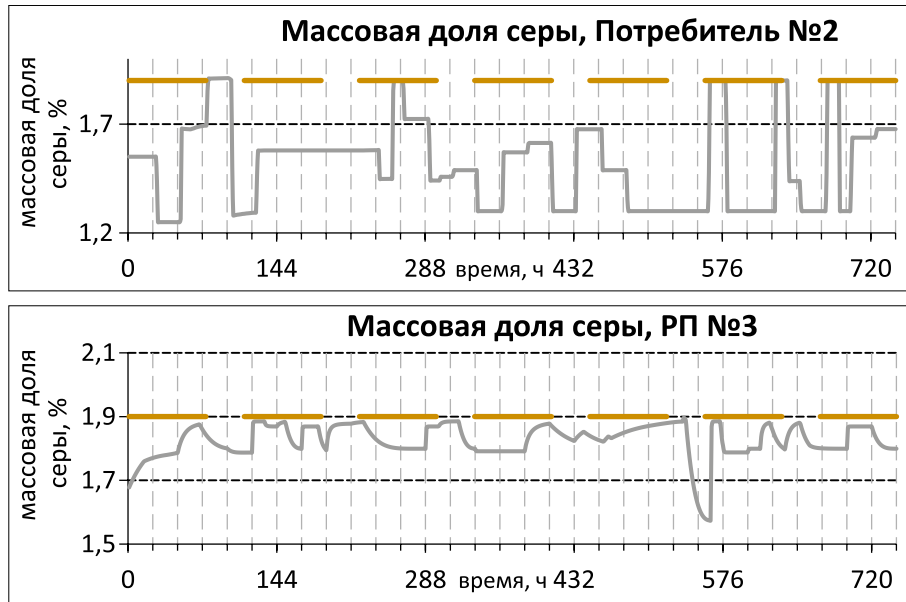


Рис. 4. Массовая доля серы в нефти, где серая линия – массовая доля серы в нефти, коричневая прерывистая линия – максимально разрешенное значение массовой доли серы в нефти

С помощью созданного подхода проведен расчет грузопотоков в разветвленной системе МН с учетом всех условий и ограничений, заданных пользователем по максимальному значению количества нефти в РП, пропускной способности МН, свойствам у потребителей и т.д. Результаты расчета для описанной системы МН периодом в месяц с дискретностью шага равной 1 час приведены в статье. Были получены значения по перекачке нефти по системе МН (объем нефти в РП, технологический режимы в МН, значения свойств нефти в контролируемых точках и т.д. на каждом шаге расчета по времени). Используемый подход является универсальным и может быть модифицирован для учета различных условий при планировании графика грузопотоков нефти в конкретной сети разветвленных нефтепроводов.

Список литературы

1. Васильев Г.Г., Коробков Г.Е., Коршак А.А. и др. Трубопроводный транспорт нефти. Под ред. С.М. Вайнштока: Учеб. для вузов: В 2 т. М: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2002. Т.2. - 621 с.
2. Образбаев Б.Б., Муханбеткалиев А.К. Задачи и методы многокритериального выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода. Алматы: «Эверо». 2007. 147 с.
3. Филлимонов А.Б., Некрасов И.В. Задача оперативного планирования перекачки нефти по магистральному трубопроводу// Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». 2011. С. 288-293.
4. Байков И.Р., Жданова Т.Г., Гареев Э.А. Моделирование ТП трубопроводного транспорта нефти и газа. Уфа. Полиграфкомбинат №1. 1994. 127 с.
5. Гришанин М.С., Андронов С.А., Кацал И.Н., Козобкова Н.А. Управление качеством нефти: Информационное обеспечение// Трубопроводный транспорт нефти. 2016. № 4. С. 4-11.
6. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. Задачи транспортного типа. М.: Либроком. 2010. 184 с.
7. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука. 1969. 368 с.
8. Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. Единый подход / Пер. с англ. Под ред. Е.Г. Гольштейна, М.: «Сов. радио». 1973. 312 с.
9. Кононюк А.Е. Основы теории оптимизации. Безусловная оптимизация К.2 ч.1. Киев: «Освіта України». 2011 г. 544 с.
10. Шевченко В.Н., Золотых Н.Ю. Линейное и целочисленное линейное программирование. Нижний Новгород: Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского. 2004. 154 с.
11. Банди Б. Основы линейного программирования/ Пер. с англ. О.В. Шихеевой. Под ред. В.А. Волынского. М.: «Радио и связь». 1989. 176 с.

Лосенков Александр Станиславович – д-р техн. наук, зам. генерального директора,
Ющенко Тарас Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, инженер 1-ой категории,
Стрельникова Светлана Алексеевна – инженер 1-ой категории,
Мичкова Диана Евгеньевна – инженер 1-ой категории ООО «Энергоавтоматика».
 Контактный телефон (495) 737-04-89.
 E-mail: losenkov@energoavtomatika.com yushchenko@energoavtomatika.com

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- в России – в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в странах СНГ и дальнего зарубежья – через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или оформив анкету на сайте www.avtprom.ru
 В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.