

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Ю.М. Цодиков

Сформулирована задача оптимального планирования производства нефтеперерабатывающего завода в виде, предусматривающем ее решение методом последовательного линейного программирования. Рассмотрены факторы, влияющие на сходимость данного метода при решении нелинейных задач большой размерности. Приведен пример нелинейной модели. Исследовано влияние точности решения и даны рекомендации по улучшению его сходимости для сложных моделей.

Ключевые слова: оптимальное планирование, последовательное линейное программирование, нелинейное программирование, многопериодное планирование.

ВВЕДЕНИЕ

Модели оптимального планирования и управления нефтеперерабатывающим заводом (НПЗ) носят динамический характер. Динамика в задачах планирования НПЗ связана с учетом внешних для предприятия и внутренних факторов: макроэкономическими условиями, рынком сбыта продукции, поставками сырья, выполнением программ реконструкции, ремонтами оборудования, условиями транспортировки продукции, запасами продуктов, возможностями оборудования, качеством сырья, климатическими условиями, экологическими нормами и другими условиями работы завода. Все эти факторы изменяются во времени и существенно влияют на результаты моделирования. Модели оптимального планирования часто рассматривают как многопериодные, в которых для каждого периода можно учитывать любые перечисленные факторы. Такой подход универсален для построения модели завода, численного решения, интерпретации и анализа результатов. Он применяется также для моделирования предприятий нефтехимической промышленности и других производств.

Многопериодные модели оптимального планирования для НПЗ рассматривались в ряде работ

[1–5]. Для решения рассматриваемых задач был предложен метод последовательного линейного программирования (ПЛП) [6, 7]. Примеры применения метода ПЛП для оптимизации нелинейных моделей НПЗ описаны также в работах [2–4]. В этих публикациях предполагается, что нелинейные функции в модели оптимизации достаточно гладкие и не имеют разрывов. Метод ПЛП в разных вариантах применяется в системах оптимизации планов НПЗ и нефтяных компаний [8, 9]. В настоящей работе рассматриваются различные факторы, влияющие на эффективность метода ПЛП для решения задач большой размерности, так как условия сходимости и эффективности метода недостаточно изучены.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА МНОГОПЕРИОДНОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

Модели оптимального планирования работы НПЗ являются нелинейными моделями большой размерности. Модель завода включает в себя подмодели всех технологических процессов завода и учитывает качество сырья, данные технологичес-

кой схемы, требования к качеству товарных продуктов, цены на сырье, продукты, энергоносители и вспомогательные материалы.

Модель оптимального планирования НПЗ формулируется как модель многопериодной оптимизации на p периодов:

$$F = \sum_{t=1}^p \sum_{j=1}^n c_j^t x_{jr}^t, \quad F \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ijr}^t x_{jr}^t = b_i^t, \quad t = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

$$x_{jr}^t \geq 0,$$

$$\underline{d}_j \leq \sum_{t=1}^p x_{jr}^t \leq \bar{d}_j, \quad j \in J^0, \quad (3)$$

$$y_{wr}^{t+1} = y_{wr}^t + \sum_{j \in J_w^+} x_{jr}^t - \sum_{j \in J_w^-} x_{jr}^t, \quad 0 \leq y_{wr}^t \leq S_w, \quad (4)$$

$$t = 1, \dots, p, \quad w = 1, \dots, W,$$

$$a_{ijr}^t = f_{ij}(q_{ijr-1}^t), \quad (5)$$

$$q_{ijr-1}^t = \varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t). \quad (6)$$

Здесь F — прибыль; x_{jr}^t — переменные задачи: материальные потоки сырья различных установок, продуктов или энергоносителей в период t ; y_{wr}^t — запасы продуктов к концу периода t ; r — шаг вычислительного процесса (рекурсии), состоящий в решении задачи (1)—(4); a_{ijr}^t — элементы матрицы $A^{tr}\{a_{ijr}^t\}$; c_j^t — цены, b_i^t , \underline{d}_j , \bar{d}_j — параметры ограничений; S_w — объем резервуара для продукта (максимальный запас) в единицах массы в любом периоде; J_w^+ — множество потоков, пополняющих запас; J_w^- — множество потоков, расходующих запас; J^0 — множество общих ограничений на весь горизонт планирования T . Длительность τ_t периодов может быть различной, весь горизонт планирования фиксирован $T = \sum_{t=1}^p \tau_t$. Часть элементов

матрицы a_{ijr}^t постоянные, а другие определены соотношениями (5), (6). Задача линейного программирования (ЛП) (1)—(4) может быть как многопериодной, так и однопериодной ($p = 1$).

Задача ЛП (1)—(4) решается при заданных начальных значениях величин q_{ij0}^t и элементов мат-

рицы. После решения задачи ЛП (1)—(4) те коэффициенты матрицы a_{ijr}^t , которые определены зависимостями (5), (6), пересчитываются на каждом шаге r вычислительного процесса.

Величины q_{ijr-1}^t по физическому смыслу это, как правило, показатели качества сырья и продуктов установок или показатели качества компонентов смесей, которые определяются на шаге $r - 1$ в зависимости от переменных x_{jr-1}^t ; $f_{ij}(q_{ijr-1}^t)$ — заданные нелинейные или линейные зависимости; $\varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t)$ — заданные нелинейные функции, определяющие расчет соответствующих показателей качества нефтепродуктов. При первом, $r = 1$, решении задачи (1)—(4) начальные значения показателей q_{ij0}^t заданы.

Задача (1)—(6) — нелинейная со значительным числом переменных, которые входят в нелинейные зависимости. Ограничения (2) становятся нелинейными при подстановке в них зависимостей (5). Форма записи задачи (1)—(6) предполагает решение методом последовательного моделирования и оптимизации, который рассматривается как вариант ПЛП [3]. В результате моделирования зависимостей (5), (6) определяются параметры линеаризованной модели (1)—(4), а затем решается задача ЛП (1)—(4). После получения решения задачи ЛП проверяется погрешность моделирования путем сравнения значений параметров: q_{ijr-1}^t и q_{ijr}^t , а также элементов матрицы a_{ijr}^t , которые пересчитываются. Этот процесс рекурсивно повторяется до получения заданной погрешности моделирования и линеаризации:

$$|q_{ijr}^t - q_{ijr-1}^t| \leq \varepsilon_k. \quad (7)$$

Величины q_{ijr}^t имеют разную физическую природу и разную погрешность определения ε_k для каждого показателя качества k . В решаемых задачах разных погрешностей было более 20. Список основных показателей качества, участвующих в расчетах, и структура соотношений (5), (6) приведены далее. Для каждой модели задаются допустимые погрешности ε_k величин q_{ijr}^t и a_{ijr}^t .

Постановка нелинейной задачи в форме (1)—(7) отличается от обычной формулировки ПЛП [6] более детальным определением процесса линеаризации. Задача ПЛП была сформулирована в работе [6] как задача планирования на один период, эта формулировка приведена также в работе [2], но тогда не было данных об эффективности этого метода для решения нелинейных задач большой раз-



мерности. Основная особенность формулировки задачи (1)—(7) состоит в том, что для показателей q_{ijr}^t можно задать технически обоснованные требования к погрешности расчета ε_k .

В системе моделирования нефтепереработки и нефтехимии RPMS [9] реализован вариант задачи (1)—(7), в котором структура матрицы A^r одинакова для каждого периода, а ограничения (2) от периода к периоду отличаются значениями коэффициентов b_i^t и элементов матрицы, которые определяются соотношениями (5), (6) в процессе рекурсий. Такая неизменность структуры матрицы для разных периодов создает некоторые сложности для формулировки таких задач планирования, когда в периодах возможно изменение направления потоков в схеме завода, например, при ремонтах или реконструкции установок. В другой системе моделирования нефтепереработки и нефтехимии PIMS, разработанной позднее, определение структуры матрицы для периодов аналогично.

2. СТРУКТУРА НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ (5), (6)

Модель НПЗ состоит из подмоделей установок и смесей нефтепродуктов. Для подмодели установки показатели качества продукта q_{ijr-1}^t могут быть постоянными или определяться в зависимости от качества сырья и режима работы установки по соотношениям (5), (6). Соотношения (5), (6) могут включать в себя технологические зависимости: свойства смеси от количества и качества компонентов, выход продукта установки от качества сырья, качество продукта установки от качества сырья, качество продукта установки от нагрузки установки и др. В модель завода могут быть включены любые показатели качества нефтепродуктов. Как минимум, в модель НПЗ включают такие показатели качества для разных продуктов переработки нефти: относительную плотность при 20 °С, содержание серы, фракционный состав; показатели для бензиновых фракций (упругость паров, содержание ароматики, октановое число); для дизельных фракций (цетановое число, вязкость, температуру вспышки, температуру застывания), для авиакеросина (температуру вспышки, температуру кристаллизации). Все перечисленные показатели качества продуктов установок могут определяться по соотношениям (5), (6). (Далее в § 3 (см табл. 2) приведены показатели качества, которые обычно учитываются, и технологически обоснованные значения погрешности расчета.)

Рассмотрим простой пример соотношений (5), (6) для расчета относительной плотности d_{pr} основного продукта установки, когда плотность про-

дукта зависит от плотности сырья d_{row} этой установки. Сырье установки является смесью двух потоков x_1 и x_2 , которые поступают с других установок и имеют плотности d_1 и d_2 .

Соотношение (6) для плотности сырья установки представляет собой нелинейную функцию:

$$d_{row} = (x_1 + x_2)/(x_1/d_1 + x_2/d_2). \quad (8)$$

Соотношение (5) для плотности продукта установки имеет вид:

$$d_{pr} = \alpha_1 + \alpha_2 d_{row}, \quad (9)$$

где коэффициенты α_1 и α_2 определены на основе статистических или проектных данных о работе установки. Плотность продукта d_{pr} входит как коэффициент в различные ограничения (2), например, когда этот продукт поступает на смешение товарных нефтепродуктов. В свою очередь, потоки x_1 и x_2 получают на других установках, и их плотность может определяться аналогично по сырью. Таким образом, по технологической цепочке установок определяются свойства продуктов в процессе рекурсий. Другие показатели качества продуктов также определяются аналогично соотношениями (5), (6), но соответствующие зависимости могут быть более сложными, чем приведенные выше для расчета плотности. В результате значительное число элементов a_{ijr}^t матрицы A^r , определяемых соотношением (5), пересчитывается в процессе рекурсий.

Технологическая цепочка состоит, как минимум, из 2—3-х установок. Нелинейные зависимости (5), (6) могут быть связаны для нескольких установок. Например, для цепочки из трех установок только для расчета плотности в модель будут входить три соотношения (8), (9). Число таких нелинейных зависимостей определяет общую сложность модели.

Для подмодели смешения нелинейные зависимости (5), (6) возникают в том случае, когда компонент смеси товарного продукта образуется в результате объединения нескольких потоков. Например, в ограничение для плотности смеси товарного продукта в этом случае будет входить элемент a_{ijr}^t матрицы A^r , равный плотности компонента, которая определяется нелинейной функцией (8). Другие показатели качества определяются по более сложным зависимостям, например, вязкость смеси рассчитывается по индексам, которые являются нелинейными функциями от вязкости компонентов смеси. В модель НПЗ входит значительное число таких нелинейных зависимостей, определяемых промежуточными смешениями [2].

3. ОСОБЕННОСТИ СХОДИМОСТИ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

С учетом структуры нелинейных зависимостей (5), (6) рассмотрим факторы, влияющие на эффективность метода ПЛП для задач большой размерности: сложность задачи, требования к точности выполнения нелинейных зависимостей (5), (6), возможность задать близкие к оптимальным начальные значения показателей q_{ij0}^t , вид нелинейных функций (5), (6) и метод решения задачи ЛП. Под эффективностью метода ПЛП здесь понимается точность при ограниченном числе рекурсий.

Сложность задачи зависит от размерности и структурной сложности, т. е. от того, сколько подмоделей установок включено в общую модель завода, а также, сколько потоков сырья, продуктов и энергоносителей связывают подмодели. В модели завода может быть несколько тысяч элементов матрицы A'' , которые пересчитываются на основе нелинейных зависимостей (5), (6).

При анализе причин нарушения условия сходимости (7) часто выявляются незначительные потоки, по которым условия (7) нарушаются. Например, для смеси при небольшом ее количестве состав смеси оказывается нестабильным, т. е. может существенно изменяться при расчете следующей рекурсии, причем значение целевой функции при расчете следующей рекурсии не изменяется. В процессе исследования сходимости для таких потоков исключалась проверка условия (7), что значительно улучшало сходимость. При этом погрешность расчета качества для данной смеси может увеличиться. В производственных условиях НПЗ этот способ улучшения сходимости модели не всегда применим, так как у специалистов нет времени для такого исследования при частой корректировке модели.

Требования к погрешности ε_k для показателей q_{ijr}^t , определяемых зависимостями (6), существенно ниже, чем к погрешности решения ε_{LP} задачи ЛП (1)–(4). Обычно $\varepsilon_{LP} = 10^{-7}$, допустимая погрешность расчета плотности 0,001, а допустимая погрешность расчета других показателей больше. Учет технически обоснованных требований к точности наряду с другими факторами позволяет объяснить высокую эффективность метода ПЛП. Пусть ε_{\min} — минимальное значение ε_k . Если условие $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$ не выполняется, то метод ПЛП практически не работает. Это проверено экспериментально на разных моделях НПЗ. Такая проверка выполнялась для исследования возможностей метода ПЛП. Таким образом, требование $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$

является условием эффективности метода ПЛП для задач большой размерности, которое определено экспериментально. Для задач небольшой размерности это условие может не выполняться.

Технически обоснованное требование к погрешности ε_k расчета показателя качества нефтепродукта должно быть согласовано с погрешностью метода его измерения, а также с погрешностью метода расчета при смешении. Различия в значениях ε_k для разных показателей качества нефтепродуктов очень существенны (см. далее в § 4 табл. 2), значения ε_k в которой служат хорошим примером согласования погрешности ε_k с погрешностью измерения при разработке модели НПЗ. Если заданное требование по погрешности ε_k не обеспечивает сходимости, то допустимую погрешность ε_k приходится увеличивать. При этом нужно убедиться в корректности нелинейных зависимостей (5), (6) и достоверности начальных значений q_{ij0}^t . Например, проверить достоверность для рассматриваемой установки зависимостей (5), (6) по данным производственного учета и лабораторным исследованиям.

Начальные значения показателей q_{ij0}^t , определяемые по текущим лабораторным исследованиям при работе установок завода в нормальных режимах, могут быть достаточно близки к оптимальным. Поэтому задание реальных начальных значений показателей q_{ij0}^t важно для получения решения. При расчете нескольких вариантов выбор начальных значений q_{ij0}^t для текущего расчета из предыдущего решения, как правило, существенно сокращает число рекурсий.

Предполагается, что нелинейные функции (5), (6) $\varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t)$ и $f_{ij}(q_{ijr-1}^t)$ непрерывные, т. е. не имеют разрывов. Это условие для нелинейной задачи оптимизации во всех публикациях, посвященных методу ПЛП, рассматривалось как условие возможности применения данного метода [2, 6, 7].

Оптимальное решение задачи ЛП (1)–(4) может быть получено симплекс-методом или методом барьерных функций [10]. Решение задачи ЛП методом барьерных функций дает решение в точке x^* при включении в барьерные функции условий $x_{jr}^t \geq 0$ для всех переменных. В этом случае, если оптимальное решение задачи ЛП достигается в области Q значений переменных, то точка x^* удалена от всех границ области Q . Решение задачи ЛП (1)–(4) симплекс-методом может дать решение в любой вершине области оптимальных значений переменных. Можно предположить, что сходимость



метода ПЛП для задач большой размерности будет лучше, если решение для любой задачи ЛП достигается в точке, удаленной от границ области Q . Для проверки этого предположения была решена серия из 10 задач ПЛП двумя методами [11]. В среднем число рекурсий незначительно сократилось при решении методом барьерных функций по сравнению с симплекс-методом.

4. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ ЗАВОДОВ

Рассмотрим примеры моделей НПЗ в виде (1)–(6). Модели разрабатывались с помощью системы RPMS [8]. Эта система автоматизирует построение общей модели завода на основе подмоделей отдельных процессов, проверяет данные, обращается к пакету программ оптимизации Xpress и после решения формирует отчеты о результатах расчета. Система применяется для текущего планирования работы НПЗ, нефтяных компаний и для планирования реконструкции заводов. Задача ЛП (1)–(4) решается с помощью пакета программ Xpress. В программе Xpress задача ЛП большой размерности решается методом барьерных функций (Primal-dual barrier algorithm). Если этим методом не удастся получить решение с требуемой точностью, то тогда найденное решение может быть стартовой точкой для решения симплекс-методом.

В табл. 1 приведены основные характеристики моделей двух НПЗ. Модель НПЗ 1 разработана для НПЗ с глубокой переработкой нефти, который получает два вида нефтяного сырья (нефть и газовый конденсат) и производит товарные нефтепродукты, соответствующие Евро-5, и нефтехимические продукты. Модель НПЗ 1 включает в себя подмодели установок, смешения нефтепродуктов и объектов общезаводского хозяйства. Некоторые установки моделируются по блокам, если это необходимо. Далее кратко описаны в основном принципы и особенности моделирования, а не технологическая схема.

Табл. 1 характеризует сложность оптимизационной модели завода. В таблице приведены число подмоделей установок и смесей, из которых формируется модель НПЗ и размерность задачи ЛП для одного периода. В число установок включены объекты общезаводского хозяйства и блоки некоторых установок. Нелинейные зависимости модели связаны в основном с влиянием качества сырья установок, в том числе нефти на выход и качество продуктов, а также со смесями, для которых рассчитываются показатели качества на основе качества компонентов. Примерно 10 % ненулевых элементов матрицы A^T определяются зависимостями (5), (6). В строке «Число потоков...» указаны пото-

ки с разными свойствами, а общее число потоков примерно соответствует числу переменных модели.

Список показателей качества нефтепродуктов, которые рассчитываются в модели, и погрешности ϵ_k , при которых останавливаются рекурсии, приведены в табл. 2. Значения показателей качества нефтепродуктов для планирования переработки нефти описаны в работах [2, 12].

Таблица 1

Основные характеристики моделей

Характеристика	НПЗ 1	НПЗ 2
Число переменных задачи ЛП	2843	4915
" ограничений задачи ЛП	4323	3370
" ненулевых элементов матрицы	26 273	27 818
" периодов планирования	1	3
" установок	149	61
" смесей (с расчетом показателей качества)	94	64
Число потоков продуктов и сырья установок	526	272

Таблица 2

Показатель качества нефтепродуктов

k	Показатель	Погрешность ϵ_k	
		абсолютная	относительная, %
1	Плотность, т/м ³	0,001	—
2	Содержание серы, % масс.	0,01	—
3	Октановое число, моторн.	0,1	—
4	Октановое число, исслед.	0,1	—
5	Давление паров, мм. рт. ст.	2	—
6	Содержание ароматики, %	1	—
7	Содержание олефинов, %	1	—
8	Содержание бензола, %	0,1	—
9	Выкипание при 70 °С, %	0,5	—
10	Выкипание при 100 °С, %	0,5	—
11	Выкипание при 150 °С, %	0,5	—
12	Выкипание при 180 °С, %	0,5	—
13	N + 2A сырья риформинга, %	2	—
14	Содержание парафинов, %	2	—
15	Индекс температуры застывания	—	5
16	Индекс температуры вспышки	—	5
17	Индекс вязкости (при 80 °С)	—	5
18	Цетановое число	1	—
19	Дизельный индекс	1	—
20	Фракционный состав (50 %), °С	2	—
21	Фракционный состав (90 %), °С	2	—
22	Фракционный состав (96 %), °С	2	—
23	Индекс вязкости (при 20 °С)	—	5
24	Выкипание при 280 °С, %	2	—
25	Выкипание при 360 °С, %	2	—

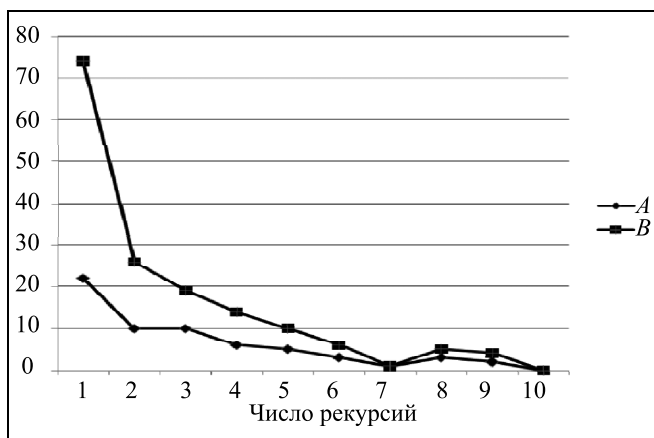


График сходимости: *A* — показатели качества, для которых нарушается сходимость; *B* — общее число нарушений условия сходимости

Определение технически обоснованного требования к погрешности расчета ε_k показателя качества нефтепродукта рассмотрим на примере октанового числа бензина. Для октанового числа в таблице принято ε_k равно 0,1 пункта при условии, что точность измерения октанового числа в лаборатории 0,1 и для смеси точность расчета по линеаризованной модели 0,2 пункта.

При задании погрешности ε_k нужно учитывать, что расчет некоторых показателей свойств нефтепродуктов взаимосвязан, поэтому и погрешности расчета таких показателей взаимосвязаны. Так, например, плотность нефтепродукта входит в формулы расчета объема и, следовательно, в расчеты других свойств смеси, определяемых по объемной концентрации. Поэтому для обеспечения достоверности точность расчета плотности должна быть выше точности расчета других показателей. Другой пример зависимости показателей связан с выбором режима работы установки. Выбор режима установки в процессе оптимизации зависит от качества сырья и нагрузки, а выбранный режим влияет на выход продуктов и различные показатели качества продуктов. Например, содержание серы в бензине каткрекинга влияет на режим его гидроочистки, а выбранный режим влияет не только на содержание серы, но и на октановое число бензина после гидроочистки.

Расчет показателей, приведенных в табл. 2, задается для разных потоков: сырья установок, продуктов установок, товарных продуктов и промежуточных смесей. Превышение заданной погрешности приводит к повторению рекурсии. Задается максимальное число рекурсий, после которого процесс останавливается. В этом случае требуемая точность расчета некоторых показателей не достигну-

та, т. е. погрешность расчета по этим показателям превышает допустимую, условие сходимости рекурсий не выполнено. Решение получено, но необходимо дополнительный анализ задачи. Таким образом, сложность задачи и точность ее решения взаимосвязаны.

Для модели НПЗ 1 ход решения показан на рисунке, решение сходится за 10 рекурсий.

На графике *A* показано число разных показателей качества, для которых условие сходимости (7) нарушалось; на графике *B* показано общее число нарушений условия сходимости (7) на каждом шаге рекурсии. Графики на рисунке наглядно демонстрируют процесс сходимости. В данном расчете из общего списка 25-ти показателей (см. табл. 2) условие сходимости нарушалось для 22 показателей, т. е. почти все показатели качества продуктов изменялись в процессе решения.

В модели осуществляется контроль исходных данных и решения путем сравнения по массе количества сырья и всех продуктов, включая потери. Для этого все подмодели технологических установок имеют баланс по массе сырья и продуктов. При таком контроле необходимо вычисление плотности продуктов, в том числе небольших по количеству, которые могут существенно изменяться в процессе рекурсий по количеству и составу. Поэтому для этих потоков целесообразно исключить проверку выполнения условия (7) по плотности и всем показателям качества для улучшения сходимости, так как расчет качества таких потоков нужен только для информации.

На модели НПЗ 2 проверялось изменение сходимости при изменении значения ε_{\min} от 0,001 до 0,00001 и соответствующего изменения значений всех ε_k . Для применения модели НПЗ достаточная точность расчетов будет при значении $\varepsilon_{\min} = 0,001$. Эксперимент с меньшими значениями ε_{\min} выполнялся для исследования потенциальных возможностей метода ПЛП для задач большой размерности. В результате было установлено, что при значении ε_{\min} не более 0,00001 устойчиво получить решение задачи методом ПЛП невозможно. Это проверялось и на других моделях аналогичной сложности. Для задач такой размерности должно выполняться условие $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$.

Для корректности сравнения разных расчетов в примерах предусмотрено выполнение двух условий, улучшающих сходимость. Для продуктов, которые производятся в небольших количествах, и по которым нет ограничений на показатели качества, исключена проверка условия сходимости. Потоки, которые используются только в особых случаях (при ремонте установок, при пуске, в непредвиденных ситуациях), исключаются.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе приведенных примеров и опыта разработки моделей разных заводов рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность применения метода последовательного линейного программирования для решения задач большой размерности. Приведенные данные объясняют причины эффективности метода в случае сложных моделей. Данные о сходимости метода последовательного линейного программирования при решении задач планирования большой размерности показывают, что возможно успешное применение этого метода для аналогичных нелинейных задач оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Coxhead R.E.* Integrated Planning and Scheduling Systems for the Refining Industry. In Optimization in industry. Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice / Eds. T.A. Ciriani, R.C.J. Leachman — N.-Y.: Wiley&Sons, 1994. — P. 185—199.
2. *Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М.* Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
3. *Цодиков Ю.М., Хохлов А.С.* Нелинейные модели оптимального планирования работы нефтеперерабатывающего завода // Тр. VII Московской междунар. конф. по исследованию операций (ORM2013) / ВЦ РАН. — М., 2013. — Т. 2. — С. 54—56.
4. *Цодиков Ю.М.* Оптимальное календарное планирование для непрерывного производства с ограничением на структуру графика // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 171—179.
5. *Шишорин Ю.П., Цодиков Ю.М., Мостовой Н.В.* и др. Комплексный подход компании Honeywell к разработке долгосрочных программ развития перерабатывающих предприятий вертикально-интегрированных компаний // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 4. — С. 53—60.
6. *Griffith R.E., Steward R.A.* A nonlinear programming technique for the optimization continuous processing systems // Management Science. — 1961. — Vol. 7, N 4. — P. 379—392.
7. *Zang J., Kim N., Lasdon L.* An improved successive linear programming algorithm // Management Science. — 1985. — Vol. 31, N 10. — P. 1312—1331.
8. *Соркин Л.Р.* Современные технологии управления в нефтегазовом комплексе. — М.: МФТИ, 2003. — 104 с.
9. *Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS).* — URL: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/advanced-applications/software-production-management/Pages/rpms.aspx> (дата обращения: 17.09.2017).
10. *Gondzio J.* Interior point method 25 years later // European Journal of Operational Research. — 2012. — Vol. 218. — P. 583—601.
11. *Цодиков Ю.М., Макаров Д.В.* Особенности сходимости метода последовательного линейного программирования для задач оптимального планирования // Тр. VIII Московской междунар. конф. по исследованию операций (ORM2016) / МАКС Пресс. — М., 2016. — Т. 2. — С. 54—56.
12. *Мановян А.К.* Технология первичной переработки нефти и природного газа. — М.: Химия, 2001. — 567 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Цодиков Юлий Моисеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ tsodikov_y@mail.ru.

**Систематизирующие обзоры,
опубликованные в журнале «Проблемы управления»
в 2017—2019 гг.**

- ✓ **Гусев В.Б.** Модели автономного управления в развивающихся системах. — 2018. — № 6. — С. 2—17.
- ✓ **Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В.** Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме. — 2018. — № 6. — С. 18—23.
- ✓ **Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г.** Методы построения оптимальных очередей воздушных судов при посадке на взлетно-посадочную полосу. Ч. 1. Статическая задача формирования оптимальной очереди воздушных судов на прилет. — 2018. — № 4. — С. 2—13.
- ✓ **Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г.** Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения. — 2018. — № 5. — С. 2—13.
- ✓ **Митришкин Ю.В., Корнев П.С., Прохоров А.А.** и др. Управление плазмой в токамаках. Ч. 1. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Токамаки. Компоненты систем управления. — 2018. — № 1. — С. 2—20.
- ✓ **Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Павлова Е.А.** и др. Управление плазмой в токамаках. Ч. 2. Системы магнитного управления плазмой. — 2018. — № 2. — С. 2—30.
- ✓ **Шведов А.С.** Аппроксимация функций с помощью нейронных сетей и нечетких систем. — 2018. — № 1. — С. 21—29.
- ✓ **Шведов А.С.** Нечеткое математическое программирование: краткий обзор. — 2017. — № 3. — С. 2—10.
- ✓ **Логинов М.П.** Дорожные карты: понятие, сущность, классификация. — 2017. — № 5. — С. 2—17.