

# Математическое моделирование управления производством нефтепродуктов

## Mathematical modeling of petroleum product management

УДК 338.24

Получено: 30.04.2020

Одобрено: 26.05.2020

Опубликовано: 25.06.2020

### **Ильин И.В.**

Д-р экон. наук, профессор, директор Высшей школы управления и бизнеса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
e-mail: ivi2475@gmail.com

### **Ilin I.V.**

Doctor of Economics, professor, Head of Higher School of Business and Management Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
e-mail: ivi2475@gmail.com

### **Коронатов Н.Н.**

Канд. техн. наук, ассистент Высшей школы управления и бизнеса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
заместитель генерального директора по производству и сбыту продукции ООО "КИНЕФ"  
e-mail: alyovina@gmail.com

### **Koronatov N.N.,**

Candidate of Technical Sciences, Assistant of Higher School of Business and Management Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Deputy for production and sales ООО "KINEF"  
e-mail: alyovina@gmail.com

### **Аннотация**

В ходе переработки нефти в зависимости от качества исходного сырья и выбранных параметров технологических процессов возможно получить широкую номенклатуру конечных продуктов, которая по качеству и объёмам должна соответствовать требованиям заказчиков нефтеперерабатывающего производства. Статья посвящена разработке математических моделей, позволяющих производить настройку технологических процессов таким образом, чтобы обеспечивать такой план производства нефтепродуктов, который по ассортименту и объёму производства соответствует заказам при минимизации издержек. Методологической основой исследования являются процессный подход, методы линейного программирования и теория графов. В результате разработан комплекс моделей производственного планирования, позволяющий выбрать оптимальный план производства нефтепродуктов в соответствии с требованиями заказчиков и в зависимости от качества исходного сырья.

**Ключевые слова:** нефтепереработка, производство нефтепродуктов, планирование производства.

### **Abstract**

In the course of oil refining, depending on the quality of the feedstock and the selected parameters of technological processes, it is possible to obtain a wide range of end products, which in quality and volume should meet the requirements of customers of the oil refining

industry. The article is devoted to the development of mathematical models that allow the adjustment of technological processes in such a way as to ensure a plan for the production of petroleum products, which in terms of assortment and volume of production corresponds to orders, while minimizing costs. The methodological basis of the study is the process approach, linear programming methods and graph theory. As a result, a set of production planning models has been developed that allows you to choose the optimal plan for the production of petroleum products in accordance with the requirements of customers and depending on the quality of the feedstock.

**Keywords:** oil refining, petroleum product manufacturing, production planning.

### **Введение**

Нефтепереработка является одним из ключевых звеньев цепочки создания ценности нефтяной промышленности. В ходе переработки в зависимости от качества исходного сырья и выбранных параметров технологических процессов возможно получить широкую номенклатуру конечных продуктов, включая различные виды топлива, продукты для нефтехимического производства, различные масла и пр. [1, 2].

Исследованию особенностей организации процессов производства нефтепродуктов посвящено множество публикаций [1, 3, 4, 5]. Существуют модели определения параметров технологических процессов при известном качестве используемого сырья с тем, чтобы обеспечить производство необходимых объемов нефтепродуктов с минимальными затратами. Принципиальным моментом здесь является то, что весьма затруднительно спрогнозировать качество поступающей нефти для производства нефтепродуктов. Поэтому возникает вопрос о прогнозе или оценке качества используемой нефти. Показатели качества используемой товарной нефти влияют на стоимость технологических процессов, выражаясь в расходах на обеспечение параметров процессов. Прогноз и оценка качества нефти предопределяют степень неопределённости оценки параметров качества товарной нефти. С другой стороны, требования по отгрузке продукции в соответствии с договорами накладывают требования к объемам производства, распределенным во времени.

Настоящая статья посвящена разработке математической модели, позволяющей производить настройку параметров технологических процессов таким образом, чтобы обеспечивать такой план производства нефтепродуктов, который по ассортименту и объему производства позволяет удовлетворить спрос (определяемый заключёнными договорами на покупку нефтепродуктов) при условии минимизации издержек.

### **Методология**

Методологической основой исследования являются:

- процессный подход;
- задача оптимизации;
- теория графов.

Применение процессного подхода к анализу хозяйственной деятельности предприятий позволяет декомпозировать работу по достижению требуемого результата на взаимосвязанные шаги (этапы), каждый из которых характеризуется набором параметров и вносит свой вклад в достижение целевых показателей [6, 7]. При проектировании деятельности такой подход обеспечивает адаптивность и эффективность проектируемых систем, а при анализе – позволяет выявить узкие места и оптимизировать всю цепочку взаимосвязанных работ по выбранным критериям [8]. Моделирование, описание и анализ процессов создают также предпосылки для дальнейшей автоматизации процессов, в том числе для автоматизированного управления на основе данных. Предлагаемый в настоящей работе комплекс математических моделей, описывающих процессы нефтепереработки, подразумевает дальнейшую автоматизацию с использованием нейронных сетей. В этой связи необходимо описать процесс и данные, описывающие его на каждом этапе.

Традиционно процессы нефтепереработки делят на три основных этапа [1, 2]:

1. Процесс первичной переработки – разделение нефтяного сырья на фракции при помощи различных температурных режимов.

2. Процессы вторичной переработки – переработка полученных на первом этапе фракций путем химического преобразования и выработка компонентов товарных нефтепродуктов. Отдельные результаты этого этапа могут считаться товарными продуктами и могут быть проданы.

3. Компаундирование – смешение компонентов с использованием различных присадок для получения товарных нефтепродуктов с требуемыми показателями качества.

Возможности применения моделей линейного программирования для эффективной организации процессов нефтепереработки описаны во многих научно-исследовательских публикациях [3, 4, 5, 9, 10]. Одним из ключевых вопросов управления нефтепереработкой является совершенствование управления технологическими процессами с тем, чтобы обеспечить выполнение заказов потребителей при различном качестве поступающей на переработку сырой нефти. В 90-е годы 20 в. активно разрабатывались нелинейные модели, описывающие процессы нефтепереработки и за ними видели будущее в планировании производства нефтепродуктов [11, 12].

Постановка задачи оптимального планирования нефтепереработки может быть представлена в форме транспортной задачи линейного программирования. По мнению авторов, транспортная задача не позволяет в полной мере учесть особенности процессов нефтепереработки.

Теория графов (в частности, сетевое планирование) часто используется в задачах производственного планирования для выбора оптимального пути, состоящего из последовательного сочетания различных технологических операций [13–19]. В результате удаётся сформировать траекторию получения требуемого результата с заданными параметрами исходя из качества исходной продукции и полуфабрикатов на каждом этапе всего технологического процесса. В настоящей статье представление совокупности процессов в форме ориентированного графа применяется для оптимизации управления технологическими процессами по критерию минимизации затрат.

### Результаты

Рассмотрим следующую постановку задачи планирования нефтеперерабатывающего производства. Товарная нефть, поступающая в резервуары нефтеперерабатывающего завода (далее – НПЗ), является смесью товарных видов нефти, которые добываются из различных источников. Это обстоятельство говорит о том, что показатели качества нефти могут меняться при каждом заполнении резервуаров. В результате, структура первичных нефтепродуктов может отличаться как по объему различных производимых продуктов, так по их качеству.

Для первого этапа моделирования предположим, что структура первичных нефтепродуктов может быть достаточно точно определена при наполнении резервуаров.

Введем следующие обозначения. Продукты процесса первичной переработки нефти разделим на три группы, обозначив объемы их производства через:

- $U_1, \dots, U_k$  – используются для производства продуктов процессов вторичной переработки и товарных нефтепродуктов на основе процесса компаундирования;

- $V_1, \dots, V_l$  – используются для производства товарных продуктов на основе процессов вторичной переработки нефти;

- $W_1, \dots, W_m$  – являются товарными продуктами, полученными в результате процесса первичной переработки нефти.

Соответствующие удельные стоимости первичной переработки обозначим через  $a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_l, c_1, \dots, c_m$ .

Таким образом, стоимость первичной переработки нефти представляется выражением:

$$C^1 = \sum_{i=1}^k a_i U_i + \sum_{i=1}^l b_i V_i + \sum_{i=1}^m c_i W_i.$$

Из продуктов первичной переработки только продукты первой и второй группы подвергаются вторичной переработке. В результате на выходе процессов вторичной переработки получается набор нефтепродуктов, часть которых используется в процессе компаундирования, а другая часть является готовыми нефтепродуктами. Обозначим их объёмы соответственно через:  $Q_1, \dots, Q_g$  и  $R_1, \dots, R_h$ , а соответствующие удельные расходы на их производство  $d_1, \dots, d_g$  и  $e_1, \dots, e_h$ . Продукты  $R_1, \dots, R_h$  являются товарными нефтепродуктами, полученными в результате процессов вторичной переработки.

Стоимость вторичной переработки нефтепродуктов представляется выражением:

$$C^2 = \sum_{i=1}^g d_i Q_i + \sum_{i=1}^h e_i R_i.$$

Часть продуктов вторичной переработки нефти используются в процессе компаундирования для получения товарных нефтепродуктов.

Объёмы товарных нефтепродуктов, полученных в результате процесса компаундирования, обозначим через  $P_1, \dots, P_n$ . Удельные расходы в процессе компаундирования обозначим  $f_1, \dots, f_n$ . Тогда расходы на компаундирование нефтепродуктов могут быть представлены выражением

$$C^3 = \sum_{i=1}^n f_i P_i.$$

Совокупные расходы равны

$$C = C^1 + C^2 + C^3.$$

В результате всех процессов переработки товарной нефти получаем следующие объёмы товарных нефтепродуктов  $W_1, \dots, W_m, R_1, \dots, R_h, P_1, \dots, P_n$ .

Удельные расходы

$$a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_l, c_1, \dots, c_m, d_1, \dots, d_g, e_1, \dots, e_h, f_1, \dots, f_n$$

зависят от параметров технологических процессов: расход электроэнергии, объёмы затрачиваемых присадок и т.д., которые, в свою очередь, зависят от качества товарной нефти и планов производства товарных нефтепродуктов.

Управление качеством производимых нефтепродуктов, главным образом, осуществляется на этапе процессов вторичной переработки.

Обозначим параметры процессов вторичной переработки нефти через

$$\beta_1, \dots, \beta_\mu.$$

Тогда можно зафиксировать функциональные зависимости

$$c_i = c_i(\beta_1, \dots, \beta_\mu), d_i = d_i(\beta_1, \dots, \beta_\mu).$$

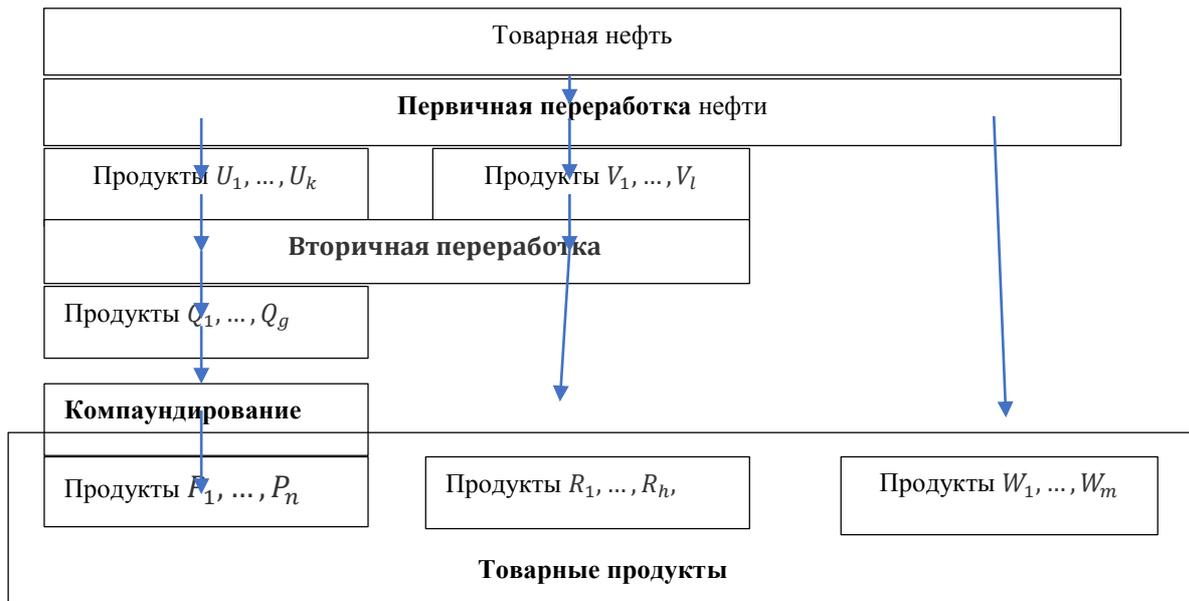
После первичной переработки нефти получают нефтепродукты продукты в объемах  $U_1, \dots, U_k, V_1, \dots, V_l$ , которые перерабатываются при помощи вторичных процессов. Эти продукты характеризуются определенными параметрами качества. Обозначим количественные оценки этих параметров качества через  $\alpha_1, \dots, \alpha_\lambda$ . Тогда

$$Q_i = Q_i(\alpha_1, \dots, \alpha_\lambda, \beta_1, \dots, \beta_\mu, U_1, \dots, U_k), \\ R_i = R_i(\alpha_1, \dots, \alpha_\lambda, \beta_1, \dots, \beta_\mu, V_1, \dots, V_l).$$

Продукты процессов вторичной переработки  $Q_1, \dots, Q_g$  обладают определенными параметрами качества, количественные оценки которых обозначим через  $\gamma_1, \dots, \gamma_\nu$ . Параметры процессов компаундирования обозначим через  $\delta_1, \dots, \delta_\xi$ . Тогда для товарных нефтепродуктов продуктов  $P_1, \dots, P_n$ , получаемых в результате компаундирования, справедливы соотношения

$$P_i = P_i(\gamma_1, \dots, \gamma_\nu, \delta_1, \dots, \delta_\xi, Q_1, \dots, Q_g).$$

Схематично последовательность производства нефтепродуктов, описанная моделями выше, представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Модель процесса нефтепереработки

Введенные обозначения позволяют сформулировать задачу оптимального производства нефтепродуктов по критерию стоимости производства в соответствии с планом производства.

Первым шагом формулировки задачи является определение возможных значений переменных величин:

- параметры технологических процессов вторичной переработки и процесса компаундирования;
- параметры качества первичных и вторичных нефтепродуктов;
- объёмы производства первичных и вторичных нефтепродуктов.

Результатом первичной переработки нефти являются первичные нефтепродукты, характеризующиеся объемами производства и параметрами качества, которые могут изменяться в определенных пределах. Эти пределы обуславливаются поставками нефти на НПЗ. Введем следующие соотношения

$$\begin{aligned} U_i^1 &\leq U_i \leq U_i^2, \\ V_i^1 &\leq V_i \leq V_i^2, \\ \alpha_i^1 &\leq \alpha_i \leq \alpha_i^2. \end{aligned}$$

Отрезок  $[U_i^1; U_i^2]$  разобьём на частичные отрезки

$$[U_i^1; U_i^2] = [U_i(0), U_i(1)] \cup [U_i(1), U_i(2)] \cup \dots \cup [U_i(n(U_i)), U_i(n(U_i))].$$

Диаметр разбиения выберем достаточно малым с точки зрения оценки стоимости производства нефтепродуктов. Получим последовательность значений объемов производства продукта

$$U_i(0) < U_i(1) < \dots < U_i(n(U_i)).$$

Аналогично получим следующие последовательности

$$\begin{aligned} V_i(0) &< V_i(1) < \dots < V_i(n(V_i)), \\ \alpha_i(0) &< \alpha_i(1) < \dots < \alpha_i(n(\alpha_i)), \\ \beta_i(0) &< \beta_i(1) < \dots < \beta_i(n(\beta_i)), \\ Q_i(0) &< Q_i(1) < \dots < Q_i(n(Q_i)), \\ \gamma_i(0) &< \gamma_i(1) < \dots < \gamma_i(n(\gamma_i)), \\ \delta_i(0) &< \delta_i(1) < \dots < \delta_i(n(\delta_i)). \end{aligned}$$

Следующим шагом определим векторы, которые назовем состояниями процесса производства нефтепродуктов:

$$S_1 = (U_{i_1}(j_1), V_{i_2}(j_2), \alpha_1(i(\alpha_1)), \dots, \alpha_\lambda(i(\alpha_\lambda))),$$

$$S_2 = (\beta_1(i(\beta_1)), \dots, \beta_\lambda(i(\beta_\lambda)), U_{i_1}(j_1), V_{i_2}(j_2), \gamma_1(i(\gamma_1)), \dots, \gamma_\lambda(i(\gamma_\lambda))),$$

$$S_3 = (\delta_1(i(\delta_1)), \dots, \delta_\xi(i(\delta_\xi))).$$

Введем ориентированный граф, вершинами которого являются точки  $S_i$ , и который состоит из путей длины:

$$S = S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3.$$

Среди путей необходимо выбрать те, которые представляют осуществимые последовательности технологических процессов. Получим граф как совокупность таких путей. Каждому такому пути соответствуют объемы производства товарных нефтепродуктов и соответствующие издержки. Необходимо выполнить план производства в соответствии с договорными обязательствами при минимизации затрат на производство. Параметры технологических процессов могут выбираться каждый раз для определенных объемов перерабатываемой товарной нефти. Пусть этот выбор производится  $T$  раз. Получаем следующую постановку задачи:

Необходимо выбрать такую последовательность путей на графе

$$S(1), \dots, S(T),$$

которой соответствует минимальная стоимость производства

$$\sum_{t=1}^T C(t) = \sum_{t=1}^T (C^1(t) + C^2(t) + C^3(t)) \rightarrow \min,$$

при условии выполнения плана производства:

$$\sum_{t=1}^T P_i(t) = P_i^0, \sum_{t=1}^T R_i(t) = R_i^0, \sum_{t=1}^T W_i(t) = P_i^0.$$

Предложенная в настоящем разделе статьи экономико-математическая модель позволяет определить эффективный план производства нефтепродуктов, исходя их качества исходного сырья и в соответствии с требованиями заключённых договоров на закупку нефтепродуктов, обеспечивая при этом минимальные издержки.

### **Заключение**

В статье предложен авторский вариант решения задачи производственного планирования НПЗ с применением методов линейной оптимизации и теории графов. Разработанный комплекс моделей позволяет выбрать оптимальные параметры всех этапов технологического процесса переработки нефти для получения требуемого результата.

Для определения параметров качества поступающей на производство товарной нефти необходим статистический анализ предыдущих периодов ее поступления на НПЗ. Применение разработанных моделей подразумевает сбор и анализ больших объемов ретроспективных данных, которые позволили бы изучить зависимости результирующих экономических показателей от характеристик нефтепродуктов на входе. При отсутствии такого набора возможно разработать методологию выявления таких закономерностей на основе нейронных сетей. Это может быть направлением дальнейших исследований в рамках рассмотренной в настоящей статье проблематики.

### **Литература**

1. *Багдасаров Л.Н.* Популярная нефтепереработка. 2017. 59 с. [Электронный документ] URL: <https://mnpz.gazprom-neft.ru/upload/medialibrary/802/populyarnaya-neftepererabotka.pdf> (дата обращения – 24.05.2020).
2. Добыча нефти и газа [Электронный документ] URL: <http://oilloot.ru/82-transportirovka-i-khranenie-gaza-nefti-i-nefteproduktov/192-promyslovyj-sbor-i-podgotovka-nefti-gaza-i-vody> (дата обращения – 24.05.2020).
3. *Symonds, G.H.* Linear Programming: The solution of refinery problems. Esso Standard Oil Company, New York. 1955

4. *Joly M., Moro L.F.L., Pinto J.M.* (2002) Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical PROGRAMMING // Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol.19 no.2, 2002 [Электронный документ] URL: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-66322002000200008&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-66322002000200008&script=sci_arttext) (дата обращения – 25.05.2020)
5. *Coxhead, R.E.* Integrated planning and scheduling systems for the refining industry // Optimization in industry, 2, Ciriani, T.A. and Leachman, R.C., Eds, 185-199, John Wiley & Sons, New York. 1994.
6. Менеджмент процессов. Под ред *Й. Беккера, Л. Вилкова, В. Таратухина, М. Кугелера, М. Роземанна.* Эксмо, Москва. 2010.
7. *Ретин В.* Бизнес-процессы. Моделирование, внедрение, управление // МИФ, 2012. 512 с.
8. *Ильин И.В., Лёвина А.И., Дубгорн А.С.* Формирование требований к ИТ-сервисам системы снабжения на основе математических моделей управления запасами. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 11-12 (101-102). – С. 147–152.
9. *Bodington C. E., Baker T. E.* A History of Mathematical Programming in the Petroleum Industry // INFORMS Journal on Applied Analytics, Vol. 20, No. 4 [Электронный документ] URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.20.4.117> (дата обращения – 25.05.2020)
10. *Moro, L.F.L., Zanin, A.C. and Pinto, J.M.* A planning model for refinery diesel production. Comput. Chem. Eng, 22, 1039- 1042. 1998
11. *Ramage, M.P.* The Petroleum Industry of the 21st Century. In: Foundations of Computer Aided Process Operations – FOCAPO 98, Snowmass. 1998
12. *Bodington, C.E.* Inventory management in blending optimization: Use of nonlinear optimization for gasoline blend planning and scheduling. In: ORSA/TIMS National Meeting, San Francisco. 1992
13. *J.F.Shapiro.* Mathematical Programming Models and Methods for Production Planning and Scheduling. MIT, 1989. [Электронный документ] URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/5082/OR-191-89-24512977.pdf?sequence> (дата обращения – 25.05.2020)
14. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Алгоритм ресурсно-временной оптимизации выполнения комплекса взаимосвязанных работ // Вестник Российской таможенной академии. – 2013. – № 1. – С. 080–087.
15. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Родионова Е.С., Сауренко Т.Н., Силкина Г.Ю., Тебекин А.В.* Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка. – Санкт-Петербург, 2017. – 312 с.
16. *Тебекин А.В., Тебекин П.А.* Классификация методов принятия управленческих решений на основе оптимизации показателей эффективности. // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 13–24.
17. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Новиков В.Е., Останин В.А.* Моделирование оптимизационных задач поддержки принятия решений в инновационном менеджменте // Вестник Российской таможенной академии. – 2016. – № 1. – С. 90–98.
18. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Оптимизационная модель распределения возобновляемых ресурсов при управлении экономическими системами // Вестник Российской таможенной академии. – 2007. – № 1. – С. 49–54.
19. *Anisimov V., Anisimov E., Sonkin M.* A resource-and-time method to optimize the performance of several interrelated operations // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Т. 10. – № 17. – С. 38127–38132.

20. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б.* Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами. – Москва, 2006. – 117 с.