

Оптимизация цепочек поставок нефти и газового конденсата с помощью методов системного анализа и моделирования

Хади Давардоуст

*Кафедра системного анализа
и управления
Санкт-Петербургский горный
университет имени
императрицы Екатерины II*
hdavardoost@gmail.com

Эмиль Эльчин Оглы

Гасымов
*ЗАО «АзерГолд» Управление
горно-обогатительной
промышленностью
Баку, Азербайджан*
azayli.emil@gmail.com

Д. А. Первухин

*Кафедра системного анализа
и управления
Санкт-Петербургский горный
университет имени
императрицы Екатерины II*
pervukhin_da@pers.spmi.ru

Алан Лас Джамаль Хавези

*Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого*
Alanlasjamal1998@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлена математическая модель для оптимизации цепочки поставок нефти и газового конденсата с помощью методов системного анализа и компьютерного моделирования. Модель минимизирует CAPEX, OPEX и выбросы парниковых газов, обеспечивая при этом оптимальное управление давлением и эффективность передачи. Для снижения уровня загрязнения в ключевых сегментах цепи поставок учитываются экологические аспекты. Применяв модель к нефтеперерабатывающему заводу на газовом месторождении, Южный Парс, удалось добиться снижения затрат на 32 %, сокращения выбросов парниковых газов на 52 %, увеличения производства на 9 % и роста экспорта на 66 %. Уникальность модели заключается в том, что она количественно определяет вклад каждого нефтепродукта в затраты и выбросы, показывая, что сырая нефть и газ несут самые высокие затраты, а нефтепродукты, особенно нефть, – самые низкие. Нефтеперерабатывающие заводы оказывают наибольшее воздействие на окружающую среду, а резервуары для хранения – наименьшее. Полученные результаты позволяют разработать практические стратегии для обеспечения баланса между экономической эффективностью и экологической устойчивостью в нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: метаэвристические алгоритмы, математическое программирование, математическое моделирование, дискретно-событийная имитационная модель, SDG

I. ВВЕДЕНИЕ

Постоянная нестабильность цен на нефть и газовый конденсат подчеркивает необходимость рационализации цепочек поставок для удовлетворения растущего мирового спроса на энергоносители [1, 2]. Ближний Восток, являющийся одним из основных держателей запасов, играет ключевую роль, особенно с учетом растущего влияния экономик стран БРИКС. Увеличение доходов населения, промышленный рост и расширение цифрового сектора ускорили спрос на газ, и, по прогнозам, к 2030 году мировое потребление превысит четыре триллиона м³ [3]. Передающие и

распределительные сети, включающие трубопроводы высокого давления и дожимные станции, сталкиваются с техническими проблемами, обусловленными нелинейной динамикой потока и давления и высокой энергией, необходимой для поддержания оптимального давления [4]. Затраты на транспортировку составляют около 30 % от общей стоимости переработанной нефти, что подчеркивает необходимость экономически эффективных решений.

Достижение этих экономических целей осложняется настоятельной необходимостью сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) [5]. Традиционные модели цепочек поставок редко позволяют достичь как экономической эффективности, так и экологической устойчивости, что побуждает к разработке системы многоцелевой оптимизации, которая позволяет интегрировать экологические цели в проектирование цепочек поставок. Предлагаемая система решает главный вопрос: *как можно минимизировать затраты на транспортировку сырой нефти и газа и выбросы парниковых газов с помощью оптимизации, и моделирования?* Применяв модель к газовому месторождению, Южный Парс, можно продемонстрировать значительную экономию затрат, сокращение выбросов и улучшение эксплуатационных характеристик [6–8].

Основными задачами исследования являются:

- Разработать количественную основу с использованием имитационного и математического моделирования для описания эффективности цепочки поставок при снижении затрат и выбросов парниковых газов.
- Предоставить инвестиционно-ориентированную модель для нефтехимической продукции в контексте "зеленой" цепочки поставок.

Ключевой вклад включает: (i) новая многоцелевая модель, балансирующая между экономической и экологической эффективностью; (ii) проверка на

реальных примерах со значительным улучшением затрат, выбросов и мощности; (iii) практические выводы для управления давлением, увеличения производства и роста экспорта [9–11].

II. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании предлагается комплексная схема оптимизации цепочек поставок нефти и газового конденсата, сочетающая в себе экономическую эффективность и экологическую устойчивость для нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Система минимизирует капитальные и операционные затраты (CAPEX, OPEX) и выбросы парниковых газов (GHG) путем определения критических переменных с помощью разработанных экспертами вопросников и решения сложных задач оптимизации с помощью итерационного моделирования и математического моделирования.

Двухцелевая формулировка модели направлена на:

$$\text{Min}(\text{Costs}) = \text{Cost}_{\text{Trans.}} + \text{Cost}_{\text{Inv.}} \quad (1)$$

$$\text{Min}(\text{Rates}) = \text{Rate}_{\text{env.poll.p.c}} + \text{Rate}_{\text{env.poll.d.c}} \quad (2)$$

Эти цели включают в себя транспортные расходы, стоимость запасов и уровень загрязнения окружающей среды в центрах очистки и распределения.

Применительно к разработке газового месторождения Южный Парс (SPGFD) модель позволяет оптимизировать производство и распределение нефтепродуктов, согласовывая цели с ресурсным потенциалом и снижая затраты и уровень загрязнения окружающей среды. Проектирование сети объединяет трубопроводные перекачки внутри нефтеперерабатывающих заводов и перекачки с помощью оборудования на внешние объекты, требуя одновременного принятия решений о затратах, мощностях и выбросах [12–14].

A. Формулировка задачи

1) НОМЕНКЛАТУРЫ

Набор переменных, параметров, индексов и определяемых множеств выглядит следующим образом:

ТАБЛИЦА I. НАБОР ПЕРЕМЕННЫХ, ПАРАМЕТРОВ, ИНДЕКСОВ И ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ МНОЖЕСТВ В ДАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ

Источник: составлено авторами

Набор переменных		λ_{ip}	Процентное содержание продукта p (нефтепродуктов) из входных газов i -го нефтегазового месторождения
x_{ijt}	Объем перекачки конденсата с i -го нефтегазового месторождения на j -й нефтеочиститель в t -й момент времени	$D_{c\text{ctp}}$	Объем спроса потребителя конденсата c на конденсат p в период t
y_{djdpt}	Объем передачи метана от j -го очистителя к d -му распределителю нефти в t -й момент времени	$D_{d\text{dtp}}$	Объем спроса распределительного центра d на конденсат p в период t
y_{cjcpt}	Объем перекачки нефти и газа от j -го очистителя к c -му потребителю конденсата в t -й момент времени	$D_{h\text{htp}}$	Объем спроса нефте- и газоперерабатывающих заводов h на конденсат p в период t
y_{hjpt}	Объем перекачки этана с j -го очистителя на h -й нефтегазоперерабатывающий завод в t -й момент времени	$D_{E\text{ext}}$	Объем спроса на сырую нефть для экспортных центров e_x в период t
ds_{dst}	Объем передачи конденсата от распределительного центра d в хранилище сырой нефти и газа s	$C_{Idm\text{im}}$	Стоимость транспортировки исходного сырья из импортного центра i_m в распределительный центр d в период времени t

Набор переменных		λ_{ip}	Процентное содержание продукта p (нефтепродуктов) из входных газов i -го нефтегазового месторождения
sd_{sdt}	Объем перекачки конденсата из нефтегазового хранилища s в распределительный центр d	$C_{I'jt}$	Стоимость закупки материалов, ввозимых из-за границы j в момент времени t
I_{jt}	Сумма запасов импортированного конденсата в центре очистки j в момент времени t	$C_{Ic'ctp}$	Стоимость потребления конденсата в центрах потребления конденсата c в момент времени t
I_{cctp}	Объем запасов нефтегазового конденсата в центрах потребления c в момент времени t	$C_{Id'atp}$	Стоимость потребления сырой нефти в распределительных центрах d в момент времени t
Id_{atp}	Объем запасов нефти и газового конденсата в распределительных центрах d в момент времени t	$C_{Ih'htp}$	Стоимость производства сырой нефти и газа в центрах переработки h в момент времени t
Ih_{htp}	Объем запасов нефти и газового конденсата на нефте- и газоперерабатывающих заводах h в момент времени t	Определенные наборы	
IS_{st}	Инвентарный объем нефти и газового конденсата в нефтегазовых хранилищах s в момент времени t	I	Набор месторождений нефти и газа для добычи, обозначаемый как $I = \{1, 2, \dots, I\}$
II'_{jt}	Количество закупленных материалов для нефтеочистителя j в момент времени t	J	Набор нефтеочистителей на нефтеперерабатывающих заводах, обозначается как $J = \{1, 2, \dots, J\}$
Ic'_{ctp}	Объем добычи нефти и газового конденсата в центрах потребления конденсата c в момент времени t	P	Набор продуктов, включающий нефтепродукты (конденсаты), обозначается как $P = \{1, 2, \dots, P\}$
Id'_{atp}	Объем добычи сырой нефти и газа в распределительных центрах d в момент времени t	T	Набор временных периодов, обозначаемый как $T = \{1, 2, \dots, T\}$
Ih'_{htp}	Объем производства сырой нефти и газа в центрах переработки h в момент времени t	D	Набор дистрибьюторов, обозначаемый как $D = \{1, 2, \dots, D\}$
Idm_{im}	Количество сырья, поступившего из центра импорта i_m в распределительный центр d в момент времени t	S	Набор хранилищ сырой нефти и газа, обозначаемый как $S = \{1, 2, \dots, S\}$
Набор параметров		C	Набор потребителей конденсата, обозначаемый как $C = \{1, 2, \dots, C\}$
C_{xijt}	Стоимость транспортировки конденсата ci -го нефтегазового месторождения на j -й нефтеочиститель в t -й момент времени.	H	Набор нефтегазоперерабатывающих заводов, обозначаемый как $C = \{1, 2, \dots, C\}$
C_{ydjdp}	Стоимость передачи конденсата от j -го очистителя к d -му нефтегазоперерабатывающему в t -й момент времени	E_x	Набор экспортных центров, обозначаемый как $E_x = \{1, 2, \dots, E_x\}$
C_{ycjcpt}	Стоимость транспортировки конденсата от j -го очистителя до c -го потребителя конденсата в t -й момент времени	I_m	Набор центров импорта, обозначаемый как $I_m = \{1, 2, \dots, I_m\}$
C_{yhjhp}	Стоимость передачи конденсата с j -го очистителя на h -й нефтегазоперерабатывающий завод в t -й момент времени	Набор индексов	
C_{dsdst}	Стоимость передачи конденсата от распределителя d к хранилищу сырой нефти и газа s в t -й момент времени	$i \in I$	Индекс i представляет собой элемент множества нефтегазовых месторождений
C_{sdast}	Стоимость перекачки сырой нефти и газа из хранилища s к распределителю d в t -й момент времени	$j \in J$	Индекс j представляет собой элемент множества очистителей на нефтеперерабатывающих заводах
γ_{dsast}	Процент передачи сырой нефти и газа от распределителя d в хранилище сырой нефти и газа s в t -й момент времени	$p \in P$	Индекс p представляет собой элемент множества нефтепродуктов (конденсатов)

Набор переменных		λ_{ip}	Процентное содержание продукта p (нефтепродуктов) из входных газов i -го месторождения
γ_{sdst}	Процент передачи сырой нефти и газа из хранилища s дистрибьютору d в t -й момент времени	$t \in T$	Индекс t представляет собой элемент множества временных периодов
C_{Ijt}	Стоимость импорта сырья, ввозимого на центр очистки j в момент времени t	$d \in D$	Индекс d представляет собой элемент множества дистрибьюторов
C_{IIjt}	Стоимость импорта конденсата в центр очистки j в момент времени t	$s \in S$	Индекс s представляет собой элемент множества хранилищ сырой нефти и газа
$C_{II'jt}$	Стоимость закупленных материалов для нефтеочистителя j в момент времени t	$c \in C$	Индекс c представляет собой элемент множества потребителей конденсата
C_{Isst}	Стоимость запасов нефтегазового конденсата в нефтегазовом хранилище s в момент времени t	$h \in H$	Индекс h представляет собой элемент множества нефтегазоперерабатывающих заводов
C_{Icctp}	Стоимость потребления конденсата в центрах потребления конденсата c в момент времени t	Ex	Индекс Ex представляет собой элемент множества экспортных центров
C_{Idatp}	Стоимость потребления сырой нефти и газа в распределительных центрах d в момент времени t	Im	Индекс Im представляет собой элемент множества центров импорта
C_{Ihhtp}	Стоимость потребления сырой нефти и газа на нефте- и газоперерабатывающих заводах h в момент времени t		

2) Целевые функции:

Учитывая все предыдущие упоминания, для построения смешанного линейного программирования (MLP) в детерминированной форме используются следующие уравнения.

$$(Cost_{Trans.}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} \cdot C_{x_{ijt}} + \sum_{j=1}^J \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{djapt} \cdot C_{y_{djapt}} + \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{cjcpt} \cdot C_{y_{cjcpt}} + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{hjhtp} \cdot C_{y_{hjhtp}} + \sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T ds_{dst} \cdot C_{ds_{dst}} + \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T sd_{sdt} \cdot C_{sd_{sdt}} + \sum_{im=1}^{IM} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T Idm_{im,d,t} \cdot C_{Idm_{im,d,t}} \quad (3)$$

Можно сделать вывод, что выражение (3) рассчитывает затраты на передачу, а выражение (4), приведенное ниже, рассчитывает стоимость запасов следующим образом:

$$(Cost_{Inv.}) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{IIjt} \cdot II_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{II'jt} \cdot II'_{jt} + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Ic_{ctp} \cdot C_{Ic_{ctp}} + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Ic'_{ctp} \cdot C_{Ic'_{ctp}} + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Id_{atp} \cdot C_{Id_{atp}} + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Id'_{atp} \cdot C_{Id'_{atp}} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T Is_{st} \cdot C_{Is_{st}} + \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Ih_{htp} \cdot C_{Ih_{htp}} + \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P Ih'_{htp} \cdot C_{Ih'_{htp}} \quad (4)$$

Выражение (5) количественно определяет загрязнение окружающей среды на очистных сооружениях, а выражение (6) – загрязнение окружающей среды в распределительных центрах, соответственно.

$$(Rate_{env.poll.p.c}) = \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot \left(\sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{djapt} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{cjcpt} \cdot C_{y_{cjcpt}} + \sum_{h=1}^H \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T y_{hjhtp} \cdot C_{y_{hjhtp}} \right) \quad (5)$$

$$(Rate_{env.poll.d.c}) = \sum_{d=1}^D \beta_{D_d} \cdot \left(\sum_{t=1}^T ds_{dst} \cdot C_{ds_{dst}} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T sd_{sdt} + \sum_{im=1}^{IM} \sum_{t=1}^T Idm_{im,d,t} \cdot C_{Idm_{im,d,t}} \right), \quad (6)$$

где β_j – коэффициент нефтеочистителей, а β_{D_d} – коэффициент спроса на дистрибьюторы, определяемый экспертами. Исходя из полученных точек, объединение выражений (3) с (4) и (5) с (6) рассматривается как объективная функция, выраженная выражением (7):

$$F = 0.5 (Costs) + 0.5 (Rates). \quad (7)$$

3) Ограничения в математической модели:

$$\sum_{j=1}^J x_{ijt} \leq Capacity_{y_i} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (8)$$

Ограничение (8) гарантирует, что учитывается максимальный объем, отправленный с нефтегазового месторождения на нефтеперерабатывающие предприятия.

$$II_{jt} = II_{jt-1} + \sum_{i=1}^I x_{ijt} - \sum_{i=1}^I \sum_{p2 \in P} y_{djapt} - \sum_{c=1}^C \sum_{p1 \in P} y_{cjcpt} - \sum_{h=1}^H \sum_{p3 \in P} y_{hjhtp} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (9)$$

Ограничение (9) показывает количество сырой нефти и газа, поступающих с нефтеперерабатывающих заводов.

$$Ic_{ctp} = Ic_{c,t-1} + \sum_{i=1}^I x_{ijt} - \sum_{j=1}^J y_{cjcpt} - D_{cctp}, \quad \forall c \in C, t \in T, p1 \in P \quad (10)$$

Ограничение (10) учитывает объем нефти и газового конденсата в местах использования конденсата.

$$\sum_{d=1}^D y_{djapt} \leq \sum_{i=1}^I \lambda_{ip} \cdot x_{ijt}, \quad \forall j \in J, t \in T, p2 \in P \quad (11)$$

где λ_{ip} – коэффициент, определяемый экспертами. Ограничение (11) гарантирует, что количество нефти и газа, которое должно быть отправлено с нефтеперерабатывающего завода j на другие распределители, не должно превышать максимальный объем входного нефтепродукта.

$$\sum_{c=1}^C y_{cjcpt} \leq \sum_{i=1}^I \lambda_{ip} \cdot x_{ijt}, \quad \forall j \in J, t \in T, p1 \in P \quad (12)$$

Ограничение (12) гарантирует, что количество конденсата, которое должно быть отправлено с нефтеперерабатывающего завода j другим дистрибьюторам, не должно быть больше максимального входного нефтепродукта.

$$\sum_{c=1}^C y_{cjcpt} \leq \sum_{i=1}^I \lambda_{ip} \cdot x_{ijt}, \quad \forall j \in J, t \in T, p3 \in P \quad (13)$$

Ограничение (13) гарантирует, что объем сырой нефти, отправляемой с нефтеперерабатывающего завода j другим дистрибьюторам, не превышает максимального объема вводимых нефтепродуктов.

$$Id_{atp} = Ic_{d,t-1,p} + \sum_{im=1}^{IM} Idm_{im,d,t} - \sum_{ex=1}^{EX} D_{Ex,t} - \sum_{s=1}^S y_{ds_{st}} \cdot ds_{dst} + \sum_{s=1}^S y_{sd_{st}} \cdot sd_{sdt} + \sum_{j=1}^J y_{djapt} - D_{dapt}, \quad \forall d \in D, t \in T, p2 \in P \quad (14)$$

Ограничение (14) определяет объем сырой нефти и газа в местах распределения.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя ранее определенные параметры, в Anylogic и GAMS смоделирован небольшой пример одного нефтеперерабатывающего завода SPGF. Результаты, приведенные в таблице ниже, подтверждают реалистичность предложенной математической модели.

ТАБЛИЦА II. ЗАДАННЫЕ МНОЖЕСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В МАЛЫХ МАСШТАБАХ

Источник: составлено авторами

Определяемые множества	Количество
Месторождения нефти и газа для добычи	$i_1; i_2; i_3$
Нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ)	$j_1; j_2$
Нефтепродукты	Этан; метан
Временные периоды	$t_1; t_2; t_3$
Нефте- и газоперерабатывающие заводы	$h_1; h_2$
Дистрибьюторы	$d_1; d_2; d_3$
Экспортные центры	$e_1; e_2$
Хранилища сырой нефти и газа	$s_1; s_2$

В таблице ниже показан числовой пример передачи конденсата x_{ijt} с i -го месторождения на j -й очиститель в момент времени t , включая объемы метана и этана. В первом периоде не происходит перекачки с первого месторождения на первый очиститель, а также со второго и третьего центров на первый и второй очистители в любое время. Максимальная передача – 1070,580 МБК – происходит в третьем периоде с первого месторождения на первый центр. Также представлены уровни запасов (II_{jt}) для каждого очистителя и времени.

ТАБЛИЦА III. ОПТИМИЗИРОВАННОЕ КОЛИЧЕСТВО x_{ijt} (ТЫС. БАРРЕЛЕЙ КОНДЕНСАТА (МБС))

Источник: составлено авторами

От→ до	j_1			j_2		
	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3
i_1	-	720.989	1070.580	860.835	770.601	190.949
i_2	-	-	-	-	-	-
i_3	-	-	-	-	-	-

ТАБЛИЦА IV. ИНВЕНТАРНЫЙ ОБЪЕМ (II_{jt}) (ТЫС. БАРРЕЛЕЙ КОНДЕНСАТА (МБС))

Источник: составлено авторами

Очистные сооружения	t_1	t_2	t_3
j_1	-	-	220.249
j_2	-	90.406	150.101

Исходя из результатов, полученных для II_{jt} , количество нефти и газового конденсата, поступивших в начальный период времени на оба очистных сооружения, равно 0. Кроме того, запасы центра очистки равны нулю на втором этапе. В качестве альтернативы запасы центра очистки достигают своего пика в третьем периоде – 220,249 МБК – из всех временных периодов. В таблице ниже показано количество нефтегазового конденсата, передаваемого s -го очистителя на h -й нефтегазоперерабатывающий завод в t -й период времени, (uh_{jht}). Также в другой таблице показан объем перекачки метана от j -го очистителя к d -му нефтераспределителю в t -е время (yd_{jdt}).

ТАБЛИЦА V. ОПТИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ uh_{jht} (ТЫС. БАРРЕЛЕЙ КОНДЕНСАТА (МБС))

Источник: составлено авторами

От→ по	t_1		t_2		t_3	
	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
j_1	-	-	230	5.70	0	130
j_2	-	200.842	0	170.077	0	0

ТАБЛИЦА VI. ОПТИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ yd_{jdt} (ТЫС. ТОНН (КТ))

Источник: составлено авторами

От→ по	1st period			2nd period			3rd period		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
j_1	-	-	-	190	-	-	-	-	280
j_2	-	-	230	-	210	-	-	-	60

В первый период 230,484 тыс. тонн метана отправляется со второго нефтеперерабатывающего завода на третий распределитель, а 190,919 тыс. тонн и 210,107 тыс. тонн – с первого и второго нефтеперерабатывающих заводов на первый и второй распределители, соответственно. В третьем периоде 280,831 тыс. тонн и 60,253 тыс. тонн передаются от первого и второго нефтепереработчиков третьему дистрибьютору. В таблице также представлен импорт сырья ($Im_{im,d,t}$), причем во втором периоде импорт нулевой, а в первом максимальный – 570,386 тыс. тонн в адрес первого дистрибьютора. Также указаны переводы конденсата из хранилища (sd_{sdt}).

ТАБЛИЦА VII. КОЛИЧЕСТВО ($Im_{im,d,t}$) (ТЫС. ТОНН (КТ))

Источник: составлено авторами

От→ по	t_1	t_2	t_3
$i_1 \rightarrow d_1$	570.386	-	490.550
$i_1 \rightarrow d_2$	530.386	-	500.550
$i_1 \rightarrow d_3$	-	-	-
$i_2 \rightarrow d_1$	-	-	-
$i_2 \rightarrow d_2$	-	-	-
$i_2 \rightarrow d_3$	410.402	-	-

ТАБЛИЦА VIII. КОЛИЧЕСТВО (sd_{sdt}) (ТЫС. ТОНН (КТ))

Источник: составлено авторами

От→ по	t_1	t_2	t_3
$s_1 \rightarrow d_1$	-	-	-
$s_1 \rightarrow d_2$	-	-	-
$s_1 \rightarrow d_3$	-	-	-
$s_2 \rightarrow d_1$	1140.460	-	-
$s_2 \rightarrow d_2$	880.260	-	-
$s_2 \rightarrow d_3$	2350.604	-	-

А. Анализ чувствительности

В этом разделе рассматривается, как изменение важнейшего параметра – максимальной мощности центров – влияет на выбор, сделанный в предложенной модели. Эксперты компании South Pas Field Development, являющиеся специалистами в области нефтехимии, нефти и газа, помогли определить этот параметр. На рисунках ниже показано, что изменение максимальной производительности существенно влияет на объемы нефти и бензина. На этих рисунках показана величина изменения параметров для разных значений каждого продукта. Результаты моделирования показывают, что анализ чувствительности для параметров "Нефть" и "Бензин" является линейным, однако для остальных параметров наблюдается нелинейность. Также важно отметить, что при изменении ключевого параметра изучалась вся целевая функция. Для этого определяется значение объективной функции для каждого центра. Влияние параметра максимальной пропускной способности было пропущено на основании результатов объективных функций. На представленных ниже рисунках показано влияние изменения параметра максимальной пропускной способности на транспортные расходы, стоимость запасов и загрязнение окружающей среды соответственно.

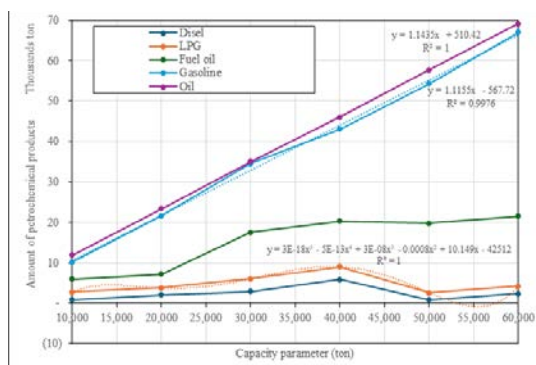


Рис. 1. Результаты моделирования изменения параметра пропускной способности на количество нефтехимической продукции. Источник: составлено авторами

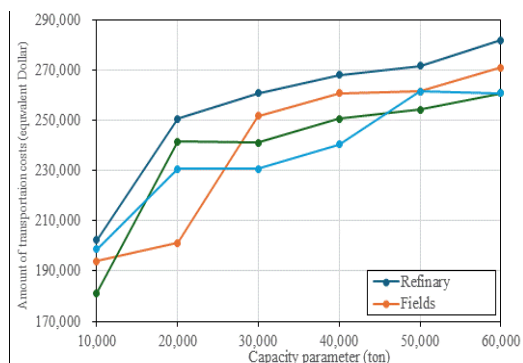


Рис. 2. Результаты моделирования влияния мощности на транспортные расходы. Источник: составлено авторами

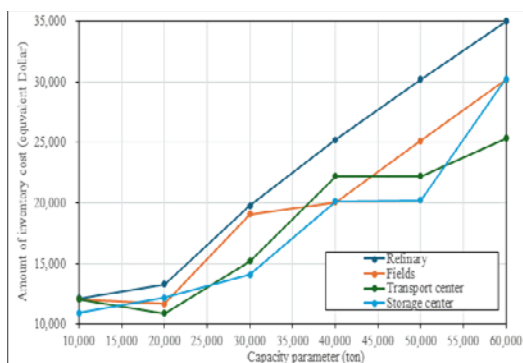


Рис. 3. Результаты моделирования влияния мощности на стоимость запасов. Источник: составлено авторами

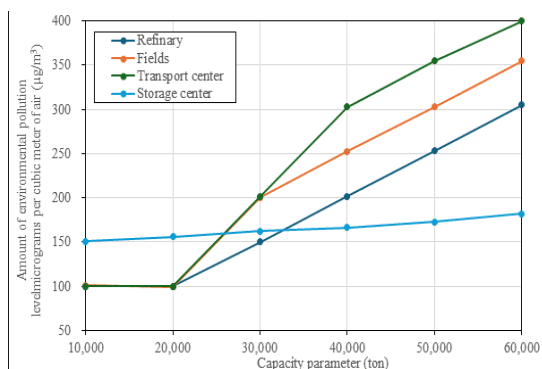


Рис. 4. Результаты моделирования влияния мощности на загрязнение окружающей среды. Источник: составлено авторами

IV. ДИСКУССИЯ

Использование математического программирования для планирования нефтепереработки остается ограниченным. Данное исследование устраняет этот

пробел, объединяя планирование производства и распределения в нефтехимическом и нефтеперерабатывающем секторах, признавая их взаимозависимость. Математическая модель, подтвержденная с помощью имитационного моделирования, позволяет оптимизировать затраты (транспортировка, запасы, пропускная способность трубопроводов) при одновременном снижении воздействия на окружающую среду. Концепция поддерживает ЦУР 7 (Доступная и чистая энергия) и ЦУР 13 (Действия в области климата) путем снижения выбросов ПГ и продвижения устойчивых энергетических практик.

Применив модель к цепочке поставок нефти и газового конденсата, удалось добиться снижения затрат на 32 % за счет оптимизации маршрутов и управления давлением, а также значительного сокращения выбросов. Ее многоцелевой подход позволяет сбалансировать экономическую эффективность и экологическую ответственность, что делает ее ценным инструментом для политиков и руководителей отрасли [15, 16].

Ограничения включают в себя предположение о стабильном спросе и исключение таких сбоев, как геополитические события или поломки оборудования. Будущие исследования должны включать динамические переменные и машинное обучение для повышения адаптивности и точности прогнозирования, что позволит расширить применимость модели к другим условиям в нефтегазовом секторе [17–19].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании представлена многоцелевая оптимизационная модель для цепочки поставок нефтегазового конденсата, объединяющая факторы стоимости – транспортировку и запасы – с сокращением выбросов ПГ. Применив модель к нефтеперерабатывающему заводу SPGF, удалось добиться снижения затрат на 32 %, сокращения выбросов на 52 % и роста экспорта на 66 %, что позволило привести практику отрасли в соответствие с глобальными целями устойчивого развития. Модель улучшает планирование производства, управление давлением и распределение, обеспечивая практические стратегии для политиков и руководителей отрасли.

Концепция модели, поддерживаемая предыдущими исследованиями, одновременно оптимизирует затраты на запасы, процессы передачи и экологические показатели. Устраняя операционные сложности, она способствует декарбонизации и вносит вклад в достижение ЦУР 7 (Доступная и чистая энергия) и ЦУР 13 (Борьба с изменением климата).

Хотя модель предполагает стабильный спрос, в дальнейшей работе следует использовать динамические рыночные условия, управление рисками в реальном времени и машинное обучение, чтобы улучшить адаптивность и расширить ее применимость в регионах и секторах, способствуя переходу к более устойчивой энергетике будущего.

ВКЛАД АВТОРОВ

Хади Давардуст разработал методологию исследования, выполнил системный анализ и оптимизационное моделирование, подготовил первоначальный текст статьи. Первухин Дмитрий Анатольевич осуществлял научное руководство,

формулировал цели исследования и проводил критический анализ результатов. Гасымов Эмиль Эльчин Оглы занимался сбором и обработкой данных, подготовкой литературного обзора и иллюстративного материала. Алан Лас Джамаль Хавези оказывал аналитическую поддержку, проверял расчёты и участвовал в редактировании рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Litvinenko, V.S., et al., Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*, 2023. 259(0): p. 95-111.
- [2] Sheveleva, N.A., Development and validation of an approach to the environmental and economic assessment of decarbonization projects in the oil and gas sector. *Journal of Mining Institute*, 2024.
- [3] Administration, E.I., *Annual Energy Outlook 2012, with Projections To 2035*. 2012: Government Printing Office.
- [4] Abou Rashid, A. and D. Ustinov, using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection. *International Journal of Engineering*, 2024.
- [5] Fetisov V., H. Davardoost, and V. Mogylevets, Technological aspects of methane–hydrogen mixture transportation through operating gas pipelines considering industrial and fire safety. *Fire*, 2023. 6(10): p. 409.
- [6] Hamed M., et al., A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study. *Energy Policy*, 2009. 37(3): p. 799-812.
- [7] Alnaqbi A., et al., Tactical supply chain planning after mergers under uncertainty with an application in oil and gas. *Computers & Industrial Engineering*, 2023. 179: p. 109176.
- [8] Ebrahimi S.B. and E. Bagheri, optimizing profit and reliability using a bi-objective mathematical model for oil and gas supply chain under disruption risks. *Computers & Industrial Engineering*, 2022. 163: p. 107849.
- [9] Attia A.M., A.M. Ghaithan, and S.O. Duffuaa, A multi-objective optimization model for tactical planning of upstream oil & gas supply chains. *Computers & chemical engineering*, 2019. 128: p. 216-227.
- [10] Zarei J. and M.R. Amin-Naseri, An integrated optimization model for natural gas supply chain. *Energy*, 2019. 185: p. 1114-1130.
- [11] Borraz-Sánchez C. and D. Haugland, Minimizing fuel cost in gas transmission networks by dynamic programming and adaptive discretization. *Computers & Industrial Engineering*, 2011. 61(2): p. 364-372.
- [12] Borraz-Sánchez C. and R.Z. Ríos-Mercado, Improving the operation of pipeline systems on cyclic structures by tabu search. *Computers & Chemical Engineering*, 2009. 33(1): p. 58-64.
- [13] Afshar A.S. and H. Chabook, South Pars gas field and Iran's economy and energy future. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2016. 11(4): p. 358-362.
- [14] Mohammadi R., The Role of South Pars Gas Field on Economic Growth of IRAN. *International Journal of Business Management and Entrepreneurship*, 2023. 2(3): p. 41-52.
- [15] Canhimue L. and I. Talovina, Geochemical Distribution of Platinum Metals, Gold and Silver in Intrusive Rocks of the Norilsk Region. *Minerals*, 2023. 13(6): p. 719.
- [16] Tolstykh N.D., et al., Mineralogical zoning of the PGE–Cu–Ni orebodies in the central part of the Oktyabr'sky Deposit, Norilsk District, Russia. *Mineralogical Magazine*, 2024. 88(4): p. 351-368.
- [17] Tulyakov T. F., Afanaseva O. V. Comparative Analysis of Image Segmentation Methods in Power Line Monitoring Systems. *International Journal of Engineering*, 2026; 39(1): 1-11. doi: 10.5829/ije.2026.39.01a.01
- [18] Pervukhin D. A., Tang L. Enhancing operational efficiency in coal enterprises through capacity layout optimisation: a cost-effectiveness analysis // *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2024. Vol. 7, № 3. P. 144–167. doi: 10.5281/zenodo.15093139).
- [19] Galevskiy S., & Qian, H. (2024). Developing and validating comprehensive indicators to evaluate the economic efficiency of hydrogen energy investments. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 7(3), 188-207. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15093154>