

УДК 519.876.5

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67

МНОГОСЦЕНАРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

MULTI-SCENARIO OPTIMIZATION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY FOR CRYOGENIC AIR SEPARATION PLANTS

©2025

Узбеков Руслан Шавкатьевич¹, аспирант кафедры логистики и
экономической информатики

Челноков Виталий Вячеславович², доктор технических наук, профессор
кафедры логистики и экономической информатики

Uzbekov Ruslan Shavkatievich¹, postgraduate student of the Department of
Logistics and Economic Informatics

Chelnokov Vitaly Vyacheslavovich², Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Logistics and Economic Informatics

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва (Россия)
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow (Russia)

E-mail: uzbekovruslan01@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5843-6951>

E-mail: chelnokov.v.v@muctr.ru

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3065-9776>

Аннотация: В работе использовано многосценарная оптимизация при проектировании установок для фракционирования воздуха, повышение эффективности которых может быть достигнута модернизацией конструкции и оптимизацией управлением процессом, учитывающей влияние множества факторов риска. Существует несколько неопределенностей, влияющих на оптимальные решения проблем проектирования и эксплуатации криогенных установок.

Получена математическая модель стационарного состояния ректификационной колонны для разделения воздуха, включающая материальные и энергетические балансы для основных узлов (колонны, теплообменники, дроссельные клапаны).

Ключевые слова: многосценарная оптимизация, криогенная установка, фракционирование воздуха, химико-технологический процесс, ректификация, математическая модель, оптимизация управления процессом.

Для цитирования: Узбеков Р.Ш, Челноков В.В. Многосценарная оптимизация в условиях неопределенности для криогенных установок разделения воздуха// Вести высших учебных заведений Черного моря. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 67–75. DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67.

Abstract: The work uses multi-scenario optimization in the design of air fractionation plants, the increase in efficiency of which can be achieved by upgrading the design and optimizing process control, taking into account the influence of many risk factors. There are several uncertainties affecting optimal solutions to the problems of designing and operating cryogenic plants.

A mathematical model of the stationary state of a distillation column for air separation has been obtained, including material and energy balances for the main components (columns, heat exchangers, throttle valves).

Keywords: multi-scenario optimization, cryogenic plant, air fractionation, chemical and technological process, rectification, mathematical model, process control optimization.

For citation: Uzbekov R.S., Chelnokov V.V. Multi-scenario optimization under conditions of uncertainty for cryogenic air separation plants// Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 67–75. DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67.

ВВЕДЕНИЕ

Многосценарная оптимизация (МСО) — метод принятия решений в условиях неопределенности будущего, при котором оптимизация проводится одновременно для нескольких возможных сценариев развития событий с целью найти решение, которое будет надежным и показывать приемлемые результаты в широком спектре этих сценариев, а не только в одном «наиболее вероятном» или «ожидаемом» [1–4]. МСО может быть применено при проектировании химических процессов в условиях неопределенности — на этапах проектирования и эксплуатации [5–7].

В концептуальном проектировании неизвестную информацию можно разделить на две категории [8]:

– эпистемическая неопределенность, вызванная недостатком знаний или данных на текущем этапе («известные неизвестные»), которую, в принципе, можно получить (измерить, уточнить или смоделировать) с приемлемой точностью при выделении достаточных ресурсов (времени, денег, усилий);

– онтологическая неопределенность, присущая самой природе системы или явления («неизвестные неизвестные» или фундаментальная случайность), которую нельзя устранить полностью даже при наличии бесконечных ресурсов, так как она обусловлена внутренней стохастичностью процессов или принципиальной непредсказуемостью будущих событий.

МСО определяется:

$$\begin{aligned} \min_{d,u} f_0(d) + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \omega_{mk} f_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u), \\ \text{s.t. } h_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u) = 0, \\ g_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u) \leq 0, k \in K, m \in M, \end{aligned}$$

где d , u_k — проектные и управляющие переменные соответственно, l — переменные со-

стояния, g и h — ограничения неравенства и равенства соответственно, K — индекс для дискретных значений переменных параметров θ^v , M — индекс для дискретных значений неизвестных параметров θ^u .

Целевая функция стремится оптимизировать некоторую агрегированную меру производительности по всем сценариям одновременно, исходя из подходов [9–12]:

– минимум ожидаемых затрат / максимум ожидаемой прибыли;

– минимум максимальных затрат, фокусируемый на наихудшем возможном исходе, делая решение крайне консервативным (робастным к худшему сценарию);

– минимум средних затрат с ограничением на максимальные затраты — комбинация ожидаемого значения и защиты от катастроф;

– максимизация надежности — максимизировать вероятность достижения цели или избежания нежелательного исхода.

Предполагается, что управляющие переменные u могут использоваться для компенсации измеряемых переменных параметров, θ^v , но не неопределенности, связанной с неизвестными параметрами, θ^u .

Цель данной работы — повышение эффективности установок для фракционирования воздуха с использованием многосценарной оптимизации управлением процессом, учитывающей влияние разных факторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является криогенная установка для разделения воздуха в условиях неопределенности.

Фракционирование жидкого воздуха криогенными и некриогенными составляющими используется для получения азота, аргона и кислорода высокой чистоты [13]. Некриогенные процессы (адсорбция при переменном давлении, мембранное разделение) стали более конкурентоспособными, но

криогенная дистилляция является доминирующим выбором при получении больших количеств высокочистых газов [14]. Основным недостатком криогенной дистилляции является высокая энергоемкость.

Повышение эффективности может быть связана с двумя составляющими: модернизацией конструкции криогенной системы и оптимизацией, управлением процессом. Остановимся на последней.

Проектирование криогенных установок разделения воздуха в условиях неопределенности — сложная задача, требующая учета множества факторов риска [15, 16]. Существует несколько неопределенностей, влияющих на оптимальные решения проблем проектирования и эксплуатации криогенных установок.

1. Сырье (Воздух):

- колебания состава (влажность, присутствие CO_2 , углеводородов, N_2O);
- характеристики атмосферного воздуха (давление, температура);
- загрязненность (пыль, аэрозоли, промышленные выбросы).

2. Эксплуатационные условия:

- изменчивость нагрузки (спрос на продукты — O_2 , N_2 , Ar);
- изменение стоимости электроэнергии;
- режимы пуска/остановки, переходные процессы.

3. Технологические параметры:

- неточность моделей тепло- и массообмена;
- неопределенность в параметрах материалов (теплопроводность);
- дрейф характеристик оборудования (загрязнение теплообменников).

4. Внешние факторы:

- колебания рынка (спрос/цена на продукты);
- изменения нормативов (экология, безопасность);
- климатические воздействия (температура среды).

В работе применяется методология, интегрирующая математическое моделирование, многокритериальную оптимизацию и сценарный анализ. Строится строгая нелинейная модель технологического процесса, служащая основой для вычисления целевых функций. Для поиска компромис-

са между энергоэффективностью и надёжностью работы используется многосценарная оптимизация. Анализ чувствительности позволяет оценить влияние ключевых неопределённых факторов на конечный результат и идентифицировать наиболее робастные режимные параметры установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фракционирование воздуха — процесс разделения воздуха на компоненты охлаждением до низких температур и последующей дистилляцией, основанный на различии температур кипения газов: азот (N_2) $-195.8\text{ }^\circ\text{C}$; аргон (Ar) $-185.9\text{ }^\circ\text{C}$, кислород (O_2) $-183.0\text{ }^\circ\text{C}$

Газофракционирующие установки состоят из нескольких основных компонентов:

- ректификационной колонны, где происходит фракционирование;
- резервуаров для хранения продуктов;
- системы охлаждения и нагрева;
- системы контроля и управления процессом.

Типичная криогенная система разделения воздуха включает колонну двукратной ректификации, а при необходимости получения чистого аргона — дополнительную колонну.

На рис. 1 приведена технологическая схема ректификации воздуха.

Поэтапное описание работы ректификационной установки.

1. Подготовка воздуха:

- сжатие: атмосферный воздух компрессором сжимается до высокого давления (обычно 5–6 бар для нижней колонны);
- очистка: сжатый воздух проходит систему очистки для удаления влаги (осушители), углекислого газа (адсорберы), углеводородов (опасны при накоплении в жидком кислороде);
- охлаждение: очищенный воздух охлаждается в теплообменниках (основном противотоке) почти до температуры сжижения, используя холод от выходящих продуктов разделения (азот, кислород).

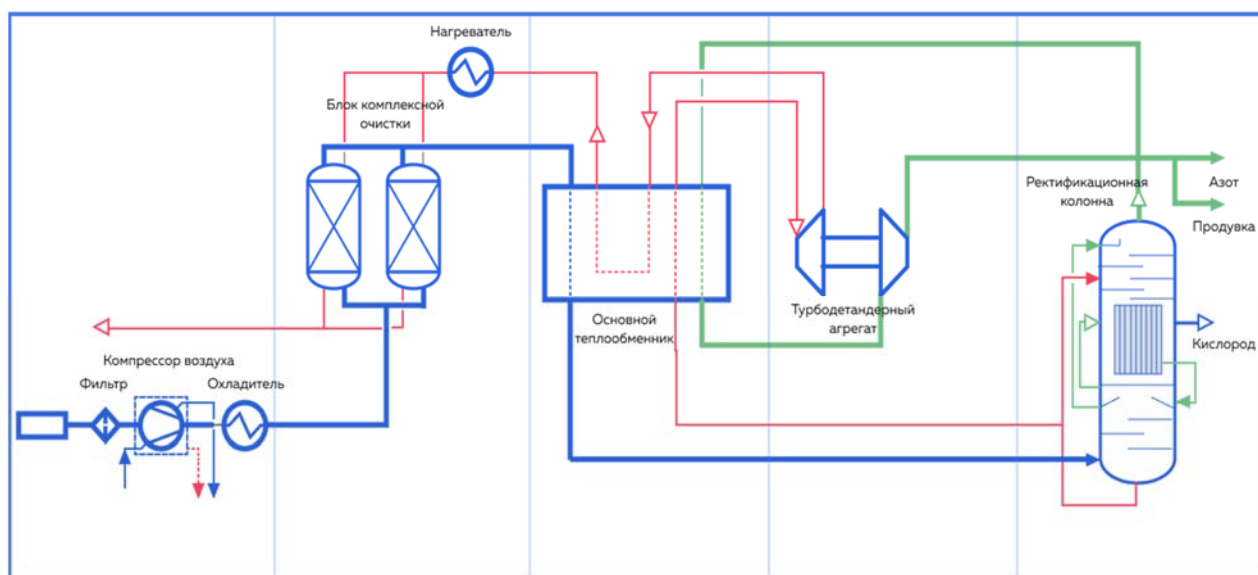


Рис. 1. Технологическая схема ректификации воздуха
Fig. 1. Process flow diagram for air rectification

2. Подача воздуха в нижнюю колонну (колонна высокого давления – КВД):

- охлажденный воздух частично сжижается в теплообменниках;
- воздух под высоким давлением (5–6 бар) подается в середину нижней колонны.

3. Работа КВД.

Колонна необходима для предварительного разделения воздуха на азот (верх колонны) и обогащенную кислородом жидкость (низ колонны).

Воздух поступает на тарелку питания. Из-за снижения давления часть его мгновенно испаряется. Пар (легкокипящая фракция, богатая азотом) поднимается вверх по колонне через отверстия в тарелках (или насадку), жидкость (тяжелокипящая фракция, богатая кислородом) стекает вниз по колонне. На каждой тарелке (или в каждом элементе насадки) пар и жидкость вступают в интенсивный контакт. Более летучий азот испаряется из жидкости, а менее летучий кислород конденсируется из пара. По мере подъема пара концентрация азота возрастает, а по мере стекания жидкости вниз растет концентрация кислорода.

Наверху нижней колонны получается газообразный азот высокой чистоты (99.5–99.9 % N_2), на дне (кубе) нижней колонны – обогащенная кислородом жидкость (30–40 % O_2 , N_2 и Ar), называемая кубовой жидкостью.

Азотный пар поступает в конденсатор, расположенный в верхней части нижней колонны, представляющий собой теплообменник, погруженный в жидкий кислород, находящийся в кубе верхней колонны. Азотный пар конденсируется, отдавая тепло кипящему жидкому кислороду верхней колонны. Часть конденсата (азотная флегма) возвращается в нижнюю колонну как орошение, поддерживая процесс ректификации. Другая часть отводится как жидкий азотный продукт или используется для дальнейшей ректификации.

4. Переток в верхнюю колонну (колонну низкого давления – КНД).

Кубовая жидкость (обогащенная кислородом) из нижней колонны дросселируется (резко снижается давление – до 1.3–1.5 бар), часть жидкости испаряется. Образованная парожидкостная смесь подается в середину верхней колонны.

5. Работа КНД.

В ней происходит окончательное разделение кубовой жидкости на чистый кислород (низ колонны), чистый азот (верх колонны) и отбор аргонной фракции (если требуется).

Принцип работы аналогичен КВД: пар поднимается вверх, жидкость стекает вниз, на контактных устройствах (тарелках/насадке) происходит массо- и теплообмен. По мере подъема пара концентрация

азота растет, а по мере стекания жидкости вниз возрастает содержание кислорода.

Наверху верхней колонны концентрируется газообразный азот (чистота 99.99 % и выше). Часть его используется для регенерации адсорберов очистки воздуха, часть выводится как продукт, часть сжижается.

На дне (кубе) верхней колонны собирается чистый жидкий кислород (99.5–99.8 % O_2), частично выводимый как готовый продукт. Часть испаряется в конденсаторе нижней колонны (обеспечивая холод для конденсации азота КВД), а часть возвращается в колонну для орошения.

Аргон (Ar), имеющий промежуточную температуру кипения между N_2 и O_2 , накапливается в средней части колонны. Для его получения проводят отбор аргонной фракции в зоне максимальной концентрации Ar и подают ее в отдельную аргонную колонну для дальнейшего очищения.

6. Выход продуктов и рекуперация холода.

Газообразные продукты: чистый азот (сверху КНД) и чистый кислород (испарен-

ный из куба КНД) проходят через основной теплообменник (противоток), нагреваясь почти до комнатной температуры, охлаждая входящий сжатый воздух, и направляются потребителям.

Жидкие продукты: кислород, азот (из конденсатора КВД) и аргон (из аргонной колонны) могут отбираться в криогенные емкости для хранения и транспортировки.

Ректификационная колонна (а точнее, система из двух колонн) использует разницу в летучести компонентов воздуха, многократный контакт пара и жидкости на тарелках/насадке, тщательно организованные потоки флегмы и тепла между колоннами, а также рекуперацию холода для эффективного и экономичного разделения воздуха на чистый азот, кислород и аргон в промышленных масштабах.

КНД рассматриваемой ректификационной установки содержит 70 теоретических ступеней разделения, а КВД – 36. Табл. 1 показывает рабочие параметры рассматриваемой установки.

Таблица 1

Основные рабочие параметры для проектирования установки фракционирования воздуха

Table 1

Basic operating parameters for designing an air fractionation plant

Параметры	Значения
Газообразный кислород, моль/с	2.44
Жидкий кислород, моль/с	0.64
Чистота кислорода	$\geq 98 \%$
Газообразный азот, моль/с	13.13
Чистота азота	$\geq 99.99 \%$
Чистота аргона	$\geq 96 \%$
Давление КНД, МПа	0.13–0.14
Давление КВД, МПа	0.68–0.69
Давление аргонной колонны (АК), МПа	0.12–0.13

Математическая модель стационарного состояния ректификационной колонны для разделения воздуха может быть получена с применением предположений:

- полное смешивание на каждой тарелке;
- 100%-ная эффективность тарелки;
- незначительные потери тепла на тарелке;

– постоянный перепад давления на каждой тарелке;

– равномерное давление и температура на каждой тарелке.

Разрабатываемая математическая модель включает материальные и энергетические балансы для двух основных и аргонной ректификационных колонн, двух основных

и двух встроенных теплообменников, дроссельных клапанов.

Массовый баланс трех колонн – высоко-, низкого давлений и аргонного учитывается:

$$F_j^S + F_j^L + V_{j+1} + L_{j-1} - V_j - S_j^S - L_j - S_j^L = 0,$$

где j – индекс каждой тарелки сверху каждой колонны, F_j^S и F_j^L , S_j^S и S_j^L – молярные потоки пара и жидкости, поступающие и выходящие j тарелки, соответственно, V_j и L_j – расходы пара и жидкости.

Массовые балансы компонентов:

$$V_{j+1}y_{i,j+1} + L_{j-1}x_{i,j-1} + F_j^S z_{i,j}^S + F_j^L z_{i,j}^L - (V_j + S_j^S)y_{i,j} - (L_j + S_j^L)x_{i,j} = 0,$$

где $i \in CP$ – индекс каждого компонента (1 – азот, 2 – аргон, 3 – кислород), составы жидкости и пара задаются как $x_{i,j}$ и $y_{i,j}$ соответственно; $z_{i,j}^S$ и $z_{i,j}^L$ – составы пара и жидкости потоков сырья, поступающих на j тарелку.

Математическая модель энергетического баланса каждой тарелки:

$$V_{j+1}H_{j+1}^S + L_{j-1}H_{j-1}^L + F_j^S z_{i,j}^{FS} + F_j^L z_{i,j}^{FL} - (V_j + S_j^S)H_j^S - (L_j + S_j^L)H_j^L = 0,$$

где H_j^{FS} и H_j^{FL} – энтальпии пара и жидкости сырья, поступающего на соответствующую (j) тарелку, H_j^S и H_j^L – энтальпии пара и жидкости.

$H_{i,j}^{FS}$, $H_{i,j}^{FL}$, $H_{i,j}^S$ и $H_{i,j}^L$ рассчитываются по уравнениям:

$$\begin{aligned} H_j^S &= \sum_{i \in CP} y_{i,j} H_{i,j}^S(T_j, P_j) + \Delta H_{mix}^S(T_j, P_j), \\ H_j^L &= \sum_{i \in CP} x_{i,j} H_{i,j}^L(T_j, P_j) + \Delta H_{mix}^L(T_j, P_j), \\ H_j^{FS} &= \sum_{i \in CP} y_{i,j} H_{i,j}^{FS}(T_j^F, P_j^F) + \Delta H_{mix}^{FS}(T_j^F, P_j^F), \\ H_j^{FL} &= \sum_{i \in CP} x_{i,j} H_{i,j}^{FL}(T_j^F, P_j^F) + \Delta H_{mix}^{FL}(T_j^F, P_j^F), \end{aligned}$$

где H_{mix}^{FS} , H_{mix}^{FL} – энтальпии смесового компонента.

Зависимость энтальпий от температуры и давления может быть представлена с использованием полиномиальной подгонки высокого порядка к данным моделирования.

Суммарное уравнение в j тарелке:

$$\sum_{i \in CP} y_{i,j} = 1.$$

Выражения равновесия пар-жидкость для каждой тарелки:

$$y_{i,j} = k_j \gamma_j K_{i,j} x_{i,j} + (1 - k_j) y_{i,j+1},$$

где k_j – эффективность j тарелки по Мэрфи, K – идеальная константа равновесия пар-жидкость, рассчитанная с использованием уравнения Антуана (1), γ – коэффициент активности, рассчитанный с использованием уравнений Маргулеса (уравнения 2 – 4).

Если принимать эффективность тарелки равной 100 %, то составляющей $(1 - k_j) y_{i,j+1}$ можно пренебречь. Тогда:

$$y_{i,j} = \gamma_j K_{i,j} x_{i,j} - 0.$$

Величина константы $K_{i,j}$ определяется выражением:

$$K_{i,j} = \exp \left[\frac{A_i - \left(\frac{B_i}{T_j + C_i} \right)}{P_j} \right]. \quad (1)$$

Соответствующие коэффициенты активности можно рассчитать по уравнениям Маргулеса:

$$\log \gamma_{1,j} = \left(\frac{A_{1,3} x_{3,j}^2 + A_{1,2} x_{2,j}^2 + (A_{1,3} + A_{1,2} - A_{2,3}) x_{3,j} x_{2,j}}{RT_j} \right), \quad (2)$$

$$\log \gamma_{2,j} = \left(\frac{A_{1,2} x_{1,j}^2 + A_{2,3} x_{3,j}^2 + (A_{1,3} + A_{2,3} - A_{1,3}) x_{1,j} x_{3,j}}{RT_j} \right), \quad (3)$$

$$\log \gamma_{3,j} = \left(\frac{A_{1,3} x_{1,j}^2 + A_{2,3} x_{2,j}^2 + (A_{1,3} + A_{2,3} - A_{1,2}) x_{1,j} x_{2,j}}{RT_j} \right), \quad (4)$$

где R – идеальная газовая постоянная, а константы Маргулеса ($A_{i,k}$) описывают взаимодействие жидкой фазы между компо-

нентами i и k . Значения констант Маргулеса и Антуана можно найти в литературе.

Комбинированный конденсатор/ребойлер моделируется как дополнительная тарелка как для КВД, так и для КНД, что определяется выражением:

$$Q_1 = UA_1(T_1^{КВД} - T_{70}^{КНД}) = V_1^{КВД}(H_1^{S,КВД} - H_1^{L,КВД}) = (V_{70}^{КНД} + S_{70}^S)(H_{70}^{S,КНД} - H_{70}^{L,КНД}),$$

где Q_1 – передача энергии от КВД к КНД, UA_1 – коэффициент теплопередачи в конденсаторе/ребойлере, $T_1^{КВД}$ – температура на первой тарелке КВД, а $T_{70}^{КНД}$ – температура на последней тарелке КНД, $V_1^{КВД}$ – поток пара первой тарелки в КВД, который полностью конденсируется Q_1 . Тепло Q_1 выделяется в поток пара $V_{70}^{КНД}$ и поток кислорода S_{70}^S на последней тарелке КНД.

Аналогично, интегрированный по теплу конденсатор АК, моделируется по уравнению:

$$Q_2 = UA_2(T_1^{AK} - T_{O_{2-r}}) = V_1^{AK}(H_1^{S,AK} - H_1^{L,AK}) = \Delta V_{O_{2-r}}(H_{O_{2-r}}^S - H_{O_{2-r}}^L),$$

где T_1^{AK} , $H_1^{S,AK}$ и $H_1^{L,AK}$ – температура, энтальпии пара и жидкости на первой тарелке, V_1^{AK} – поток пара на первой тарелке АК, $T_{O_{2-r}}$ и $\Delta V_{O_{2-r}}$, $H_{O_{2-r}}^S$ и $H_{O_{2-r}}^L$ – температура и объем частично испаренного количества, энтальпии пара и жидкости в потоке, насыщенном кислородом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением многосценарной оптимизации составлена математическая модель криогенной установки для разделения воздуха с учетом некоторых предположений (полное смешивание на каждой тарелке; 100%-ная эффективность тарелки; незначительные потери тепла на тарелке; постоянный перепад давления на каждой тарелке; равномерное давление и температура на каждой тарелке) для двух основных и ар-

гонной ректификационных колонн, двух основных и двух встроенных теплообменников, дроссельных клапанов.

Модель позволит оптимизировать технологический процесс фракционирования воздуха без дорогостоящей реконструкции производства, что, несомненно, скажется на экономической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mora C.A., Orjuela A. Modeling, validation and exergy evaluation of a thermally-integrated industrial cryogenic air separation plant in Colombia. Part II : Optimization under variable products demand. DOI 10.1016/j.cherd.2023.02.009 // Chemical Engineering Research and Design. 2023. № 191. P. 537-551.
2. Multi-scenario data-driven robust optimisation for industrial steam power systems under uncertainty / Y. Han, J. Zheng, X. Luo [et al.]. DOI 10.1016/j.energy.2022.126032 // Energy. 2023. № 263. P. 126032.
3. Multi-Scenario Crop Cultivation Optimization Strategies Based on Linear Programming and Dynamic Programming / G. Lin, M. Zhang, H. Ye, H. Wang. DOI 10.1145/3727993.372801 // CMSDA '24: Proceedings of the 2024 4th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis-2024: CMSDA. 2024. P. 120-128.
4. Фундаментальные знания и гибкость мышления-приоритеты управленческого образования для технологического прорыва / Л.Д. Гительман, А.П. Исаев, М.В. Кожевников, Т.Б. Гаврилова. DOI 10.17747/2618-947X-2022-2-92-107 // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2022. № 13 (2). С. 92-107.
5. The Use of an Optimized Grey Multi-Objective Programming-PLUS Model for Multi-Scenario Simulation of Land Use in the Weigan-Kuche River Oasis, China / K. Dong, Y. Wang, K. Luo [et al.]. DOI 10.3390/land13060802 // Land. 2024. № 13 (6). P. 802.
6. Braniff A., Tian Y. A hierarchical multi-parametric programming approach for dynamic risk-based model predictive quality control. DOI 10.1016/j.conengprac.2024.106062 // Control Engineering Practice. 2024. № 152. С. 106062.

REFERENCES

7. Integrating stochastic programming and reliability in the optimal synthesis of chemical processes / Y. Chen, Y. Ye, Z. Yuan [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. 2022. № 157. P. 107616.
8. Liang Y. Learning from unknown information sources. DOI 10.1287/mnsc.2021.03551 // *Management Science*. 2025. № 71 (5). P. 3873-3890.
9. Gunantara N. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. DOI 10.1080/23311916.2018.1502242 // *Cogent Engineering*. 2018. № 5 (1). P. 1502242.
10. Afsar B., Miettinen K., Ruiz F. Assessing the performance of interactive multi-objective optimization methods: A survey. DOI 10.1145/3448301 // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2021. № 54 (4). P. 1-27.
11. Priyadarshi R. Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-heuristic and Artificial Intelligence-based Approach: A Comprehensive Review. DOI 10.1007/s11831-023-10039-6 // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. № 34 (4).
12. Optimizing federated learning in distributed industrial IoT: A multi-agent approach / W. Zhang, D. Yang, W. Wu [et al.]. DOI 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473515 // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021. № 39 (12). P. 3688-3703.
13. *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Vol. 31 : Natural Gas Liquids and Natural Gasoline to Offshore Process Piping: High Performance Alloys/ Nitrogen, Oxygen, and Argon Production 205. Oxford : Routledge, 2017. 512 p. ISBN 978-1351452335.
14. Analysis and Optimization of Cryogenic Distillation Systems: For Reducing Distillation Energy Consumption / S. Qiao, M. Xu, X. Lv, H. Zhao // *Chemical Engineering & Technology*. 2025. № 48 (1). P. e202400296.
15. Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit / S. Bucsa, A. Serban, M.C. Balan [et al.]. DOI 10.3390/E24020272 // *Entropy*. 2022. № 24 (2). P. 272.
16. Experimental study on the cryogenic distillation system for high-purity liquid nitrogen under offshore conditions / S. Wang, Y. Meng, L. Chen [et al.] // *Cryogenics*. 2024. № 141. P. 103885.
1. Mora C.A., Orjuela A. Modeling, validation and exergy evaluation of a thermally-integrated industrial cryogenic air separation plant in Colombia. Part II : Optimization under variable products demand. DOI 10.1016/j.cherd.2023.02.009 // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. № 191. P. 537-551.
2. Multi-scenario data-driven robust optimisation for industrial steam power systems under uncertainty / Y. Han, J. Zheng, X. Luo [et al.]. DOI 10.1016/j.energy.2022.126032 // *Energy*. 2023. № 263. P. 126032.
3. Multi-Scenario Crop Cultivation Optimization Strategies Based on Linear Programming and Dynamic Programming / G. Lin, M. Zhang, H. Ye, H. Wang. DOI 10.1145/3727993.372801 // *CMSDA '24: Proceedings of the 2024 4th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis-2024: CMSDA*. 2024. P. 120-128.
4. Fundamental knowledge and flexibility of thinking-priorities of management education for technological breakthrough / L.D. Gitelman, A.P. Isaev, M.V. Kozhevnikov, T.B. Gavrilova. DOI 10.17747/2618-947X-2022-2-92-107 // *Strategic decisions and risk management*. 2022. № 13 (2). P. 92-107.
5. The Use of an Optimized Grey Multi-Objective Programming-PLUS Model for Multi-Scenario Simulation of Land Use in the Weigan-Kuche River Oasis, China / K. Dong, Y. Wang, K. Luo [et al.]. DOI 10.3390/land13060802 // *Land*. 2024. № 13 (6). P. 802.
6. Braniff A., Tian Y. A hierarchical multi-parametric programming approach for dynamic risk-based model predictive quality control. DOI 10.1016/j.conengprac.2024.106062 // *Control Engineering Practice*. 2024. № 152. C. 106062.
7. Integrating stochastic programming and reliability in the optimal synthesis of chemical processes / Y. Chen, Y. Ye, Z. Yuan [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. 2022. № 157. P. 107616.
8. Liang Y. Learning from unknown information sources. DOI 10.1287/mnsc.2021.03551 // *Management Science*. 2025. № 71 (5). P. 3873-3890.
9. Gunantara N. A review of multi-objective op-

- timization: Methods and its applications. DOI 10.1080/23311916.2018.1502242 // Cogent Engineering. 2018. № 5 (1). P. 1502242.
10. Afsar B., Miettinen K., Ruiz F. Assessing the performance of interactive multi-objective optimization methods: A survey. DOI 10.1145/3448301 // ACM Computing Surveys (CSUR). 2021. № 54 (4). P. 1-27.
11. Priyadarshi R. Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-heuristic and Artificial Intelligence-based Approach: A Comprehensive Review. DOI 10.1007/s11831-023-10039-6 // Archives of Computational Methods in Engineering. 2024. № 34 (4).
12. Optimizing federated learning in distributed industrial IoT: A multi-agent approach / W. Zhang, D. Yang, W. Wu [et al.]. DOI 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473515 // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. № 39 (12). P. 3688-3703.
13. Encyclopedia of Chemical Processing and Design. Vol. 31 : Natural Gas Liquids and Natural Gasoline to Offshore Process Piping: High Performance Alloys/ Nitrogen, Oxygen, and Argon Production 205. Oxford : Routledge, 2017. 512 p. ISBN 978-1351452335.
14. Analysis and Optimization of Cryogenic Distillation Systems: For Reducing Distillation Energy Consumption / S. Qiao, M. Xu, X. Lv, H. Zhao // Chemical Engineering & Technology. 2025. № 48 (1). P. e202400296.
15. Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit / S. Bucsa, A. Serban, M.C. Balan [et al.]. DOI 10.3390/E24020272 // Entropy. 2022. № 24 (2). P. 272.
16. Experimental study on the cryogenic distillation system for high-purity liquid nitrogen under offshore conditions / S. Wang, Y. Meng, L. Chen [et al.] // Cryogenics. 2024. № 141. P. 103885.