

УДК 621.1:621.2:519.8

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-45-54

Адаптация аппарата суперструктур к задачам конфигурирования изделий из типовых компонентов: синтез водно-энергетических модулей

Мани Момени, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

А. С. Саркисов, доктор экономических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В данной статье рассматривается задача синтеза оптимальных конфигураций интегрированных водно-энергетических модулей, формируемых из типовых компонентов в условиях проектного производства. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от фрагментированного проектирования к целостному синтезу конфигураций интегрированных водно-энергетических модулей для объектов нефтегазовой инфраструктуры, что позволит сократить дисбаланс потоков и избыточные организационные затраты. Однако существующая практика базируется на фрагментированном подходе: водная и энергетическая подсистемы проектируются независимо, выбор оборудования осуществляется изолированно, а интеграция переносится на стадию монтажа. Это приводит к структурной неоптимальности – дисбалансу потоков, когда избыточная мощность одних компонентов сочетается с дефицитом других; неконтролируемому качеству – неспособности гарантировать выполнение требований к ресурсной эффективности; избыточным организационным затратам – многократным итерациям согласования и постпроектным доработкам. Целью исследования является разработка оптимизационной модели синтеза конфигураций водно-энергетических модулей из типовых комплексных компонентов на основе методологии суперструктур и графов процессов. Разработана оптимизационная модель, позволяющая осуществлять целостный выбор оборудования и режимов его работы с учетом межподсистемных связей, дискретности мощностей, технологических норм расхода и выхода материалов, а также экономических параметров. Модель включает множества сырья, промежуточных и конечных продуктов, типовых установок с альтернативными технологиями, систему линейных ограничений, обеспечивающих материальные балансы, доступность сырья и выполнение спроса. Целевая функция минимизирует приведенные годовые затраты, включающие капитальные вложения (через коэффициент аннуитета), постоянные эксплуатационные расходы и переменные затраты на сырье. Таким образом, предложенный подход обеспечивает комбинаторную полноту поиска и может быть исследован на этапе предпроектного обоснования при выборе структуры систем энерго- и водоснабжения для различных типов промышленных объектов.

Ключевые слова: суперструктура, граф процессов, синтез конфигураций, водно-энергетический модуль, оптимизационная модель, морская нефтедобывающая платформа.

Введение

Современное машиностроение характеризуется переходом к проектному производству сложных технических систем, формируемых из типовых, стандартизованных компонентов в рамках концепции массовой кастомизации. Интегрированные водно-энергетические модули, совмещающие функции генерации энергии и водоподготовки, являются характерным примером такой продукции. Однако существующая практика базируется на фрагментированном подходе: водная и энергетическая подсистемы проектируются независимо, выбор оборудования осуществляется изолированно, а интеграция переносится на стадию монтажа. Это приводит к структурной неоптимальности – дисбалансу потоков, когда избыточная мощность одних компонентов сочетается с дефицитом других; неконтролируемому качеству – неспособности гарантировать выполнение требований к ресурсной эффективности; избыточным организационным затратам – многократным итерациям согласования и постпроектным доработкам.

Особую остроту проблема приобретает в условиях глобального дефицита пресной воды и необходимости обеспечения ресурсной эффективности промышленных объектов. Для Российской Федерации,

несмотря на значительные водные ресурсы, характерна пространственная неравномерность распределения: регионы концентрации промышленного потенциала испытывают устойчивый антропогенный дефицит, что требует учета водных ограничений как первичного граничного условия при проектировании.

Анализ степени разработанности темы показывает, что существующие подходы – методология графа процессов, теория конфигурирования, классические методы проектирования систем водоснабжения – развиты изолированно и не адаптированы к задачам целостного синтеза конфигураций из типовых компонентов с учетом межподсистемных связей и требований к качеству продукции.

Таким образом, возникает актуальная научная задача разработки метода синтеза конфигураций интегрированных систем энерго- и водоснабжения из типовых компонентов на основе суперструктур, обеспечивающего переход от фрагментированного проектирования к целостному формированию структуры изделия с гарантированным выполнением требований к ресурсной эффективности и структурной надежности. Решение данной задачи имеет существенное значение для развития теории организации производства и обеспечения конкурентоспособности

отечественных производителей модульного оборудования.

В современной теории проектирования сложных технических систем суперструктура (superstructure) представляет собой избыточную ориентированную модель, включающую все потенциально возможные технологические связи, альтернативные маршруты движения ресурсных потоков и варианты компоновки оборудования, допустимые с точки зрения физической реализуемости и технических ограничений. Как отмечают Wu, Henaо и Maravelias [1], суперструктура выступает не просто как расширенная схема системы, а как формальное представление всего множества допустимых решений, из которого впоследствии алгоритмически извлекается оптимальная структура.

Наиболее развитой формализацией суперструктурного подхода является методология графа процессов (P-graph – Process Graph), предложенная Ф. Фридлером и Л. Т. Фаном в начале 1990-х годов [2]. Данная методология базируется на пяти аксиомах, определяющих правила построения суперструктуры и гарантирующих физическую осуществимость любой генерируемой конфигурации. На основе этих аксиом разработаны два основных алгоритма: алгоритм генерации максимальных структур (MSG) и алгоритм генерации допустимых структур (SSG), обеспечивающие комбинаторную полноту поиска и воспроизводимость результатов [3].

С момента своего возникновения методология графа процессов получила значительное развитие. Bertók, Friedler и Fan развили методы генерации оптимальных структур для систем с рециклом, что имеет прямое отношение к задачам ресурсосбережения [4]. Varbanov и Friedler адаптировали методологию для задач тепловой интеграции промышленных процессов [5]. Tan, Aviso и Foo предложили интеграцию метода с имитационным моделированием Монте-Карло для планирования углеродных сетей и оценки неопределенностей [6].

Особый интерес представляет работа Lao и соавторов, в которой методология P-graph впервые применена для анализа социо-экологических сетей в контексте взаимосвязи продовольствия, энергии и воды (Food-Energy-Water Nexus) [7]. Авторы показали, что графовый подход обеспечивает явное и непротиворечивое представление связей между компонентами системы, что особенно важно при учете разнородных требований к качеству ресурсов.

Активно развивается направление, связанное с применением суперструктур для одновременной интеграции водных и энергетических потоков. Now и соавторы разработали последовательный граф – теоретический метод синтеза тепловых и водных сетей, продемонстрировав его эффективность для задач регенерации воды с учетом изотермического и неизотермического смешения [8]. Zondervan, Martín и de Naan предложили суперструктурный подход для проектирования систем возобновляемого водо- и энерго-снабжения, включив в модель ограничения по доступности ресурсов и требования к надежности [9].

Важным направлением развития методологии является учет требований к структурной надежности. Orosz и Friedler предложили метод синтеза оптимально устойчивых цепочек поставок, основанный на генерации всех топологически допустимых структур с последующим ранжированием по критериям устойчивости к возмущениям [10]. Sule и соавторы разработали подход к многокритериальному анализу рисков и распределению резерва в критических энергетических системах на основе P-graph [11]. В работах Orosz, Varbanov, Klemeš и Friedler показано, что учет структурной избыточности на этапе синтеза позволяет повысить устойчивость систем в аномальных режимах эксплуатации [12].

Классическая методология суперструктур требует адаптации для задач конфигурирования изделий из типовых компонентов в условиях проектного производства. Как отмечается в работах Friedler, Orosz и Pimentel Losada [13], основными направлениями такой адаптации являются: введение многомерных атрибутов качества компонентов; модификация алгоритмов генерации с механизмами раннего отсека; разработка метрик структурной надежности, оцениваемых через топологические свойства графа; интеграция комбинаторных правил активации синергетических связей.

Современные исследования также направлены на преодоление вычислительной сложности метода [14], интеграцию с машинным обучением для учета нелинейных зависимостей [15] и развитие многокритериальной оптимизации с генерацией полного многомерного фронта Парето [16].

Проведенный анализ показывает, что методология суперструктур и графов процессов представляет собой наиболее развитый формализованный подход к структурному синтезу, успешно примененный в широком спектре задач. Однако для применения к задачам конфигурирования водно-энергетических модулей из типовых компонентов необходима адаптация, учитывающая специфику взаимосвязей водных и энергетических потоков, требования к качеству продукции и структурную надежность. Отсутствие такой адаптированной методологии создает методологический разрыв, который требует восполнения в рамках настоящего исследования.

Цель исследования – разработка оптимизационной модели синтеза конфигураций интегрированных водно-энергетических модулей из типовых компонентов на основе суперструктурного подхода, обеспечивающей целостный выбор оборудования и режимов его работы с учетом межподсистемных связей, технологических и экономических ограничений.

Оптимизационная модель синтеза конфигурации водно-энергетического модуля

Постановка задачи

Требуется определить оптимальную конфигурацию водно-энергетического модуля, включающую выбор типовых компонентов (технологических установок) из заданного множества, обеспечивающую заданные объемы производства пресной воды

и электроэнергии при минимизации дисконтированных затрат.

Формальное описание

Множества

$\mathcal{R} = \mathcal{R}^{in} \cup \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}$ – множество материалов (потоков), где $\mathcal{R}^{in}$ – входное сырье (продукты, которые не производятся внутри системы: исходная вода, топливо, реагенты); $\mathcal{R}^{int}$ – промежуточные продукты (производятся внутри системы, затем потребляются другими процессами: вода на разных стадиях очистки, теплоноситель, электроэнергия); $\mathcal{R}^{out}$ – конечные продукты (не используются и не потребляются внутри рассматриваемой системы: пресная вода). $\mathcal{S}$ – множество типов технологических установок (типовых компонентов).

Для каждой установки $k \in \mathcal{S}$ задаются множества: $I_k \subseteq \mathcal{R}^{in} \cup \mathcal{R}^{int}$ – входные материалы установки k ; $J_k \subseteq \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}$ – выходные материалы установки k .

Параметры

Технологические параметры: $r_k^{prim} \in I_k$ – основной входной материал установки $k \in \mathcal{S}$; $\Pi_k^{min} \geq 0$ – минимальная мощность установки k (в расчете на основной материал); $\Pi_k^{max} \geq 0$ – максимальная мощность установки k (в расчете на основной материал); $\alpha_{k,m} \geq 0$ – норма расхода материала $m \in I_k$ на единицу основного материала установки k . Для основного материала $\alpha_{k,r_k^{prim}} = 1$; $\beta_{k,m} \geq 0$ – норма выхода материала $m \in J_k$ на единицу основного материала установки k .

Экономические параметры: $\Gamma_k \geq 0$ – капитальные затраты на установку $k \in \mathcal{S}$; $\Phi_k \geq 0$ – постоянные эксплуатационные затраты установки k ; $\pi_m \geq 0$ – стоимость приобретения сырья $m \in \mathcal{R}^{in}$; ρ – ставка дисконтирования; T – расчетный период эксплуатации (горизонт планирования); $A = \frac{\rho(1+\rho)^T}{(1+\rho)^T - 1}$ – коэффициент аннуитета.

Параметры спроса (заданные объемы производства): $\Delta_m^{max} \geq 0$ – требуемый годовой объем производства продукта $m \in \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}$.

Параметры доступности сырья: $\Lambda_m \geq 0$ – доступный годовой объем сырья $m \in \mathcal{R}^{in}$.

Переменные

Бинарные переменные: $\delta_k \in \{0,1\}$ – $\delta_k = 1$, если установка $k \in \mathcal{S}$ включается в конфигурацию.

Непрерывные переменные: $\xi_k \geq 0$ – объем переработки установки k (по основному материалу); $\Phi_{m,k}^{in} \geq 0$ – расход материала $m \in I_k$ на входе уста-

новки k ; $\Phi_{k,m}^{out} \geq 0$ – выход материала $m \in J_k$ из установки k ; $\sigma_m \geq 0$ – объем конечного потребления (вне системы) продукта $m \in \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}$.

Целевая функция: минимизируются суммарные усредненные годовые затраты на создание и эксплуатацию водно-энергетического модуля:

$$Z = \sum_{k \in \mathcal{S}} \Gamma_k \delta_k A + \sum_{k \in \mathcal{S}} \Phi_k \delta_k + \sum_{m \in \mathcal{R}^{in}} \pi_m \sum_{k \in \mathcal{S}} \Phi_{m,k}^{in} \rightarrow \min.$$

Первое слагаемое – капитальные затраты на приобретение установок, приведенные к годовому эквиваленту через аннуитет A . Это позволяет корректно сравнивать инвестиции с разными сроками службы.

Второе слагаемое – ежегодные фиксированные расходы на обслуживание выбранных установок (не зависят от объема переработки).

Третье слагаемое – переменные затраты на покупку сырья (исходная вода, топливо, реагенты), пропорциональные их расходу.

Целевая функция не содержит штрафов за невыполнение спроса, так как спрос задается жесткими ограничениями.

Ограничения

1. Логика выбора установок:

$$\xi_k \leq \Pi_k^{max} \delta_k, \quad k \in \mathcal{S}.$$

Если установка k не выбрана ($\delta_k = 0$), то ее объем переработки ξ_k обязан быть нулевым. Если выбрана ($\delta_k = 1$), то объем переработки не превышает максимально возможной мощности Π_k^{max} . Это типичное big-M-ограничение, связывающее бинарную и непрерывную переменные.

2. Связь объема переработки с основным материалом:

$$\Phi_{r_k^{prim},k}^{in} = \xi_k, \quad k \in \mathcal{S}.$$

Для каждой установки k задан основной материал r_k^{prim} (например, исходная вода для очистной установки или газ для турбины). Поток этого материала на входе установки $\Phi_{r_k^{prim},k}^{in}$ в точности равен объему переработки ξ_k . Это нормировка, позволяющая выражать все остальные потоки через ξ_k с помощью коэффициентов.

3. Технологические нормы расхода входных материалов:

$$\Phi_{m,k}^{in} = \alpha_{k,m} \xi_k, \quad k \in \mathcal{S}, m \in I_k.$$

Для каждого входного материала m установки k задан норматив расхода $\alpha_{k,m}$ на единицу основного материала. Например, для опреснительной установки на 1 м³ основного потока (исходной воды) может потребоваться 0,05 кг реагента. Для основного матери-

ала $m = r_k^{prim}$ выполняется $\alpha_{k,r_k^{prim}} = 1$, что согласуется с предыдущим ограничением.

4. Технологические нормы выхода материалов:

$$\Phi_{k,m}^{out} = \beta_{k,m} \xi_k, \quad k \in S, m \in J_k.$$

Каждый выходной материал m (например, очищенная вода, сбросной рассол, электроэнергия) производится в количестве, пропорциональном объему переработки ξ_k с коэффициентом $\beta_{k,m}$. Эти коэффициенты определяются паспортными характеристиками типового компонента.

5. Ограничения мощности установки:

$$\Pi_k^{\min} \delta_k \leq \xi_k \leq \Pi_k^{\max} \delta_k, \quad k \in S.$$

Если установка выбрана ($\delta_k = 1$), ее загрузка ξ_k должна находиться между минимальной и максимальной технологически допустимой мощностью. Минимальная мощность исключает эксплуатацию в неэффективных или недопустимых режимах (например, при слишком низкой загрузке нарушаются параметры очистки).

6. Ограничения доступности сырья:

$$\sum_{k \in S: m \in I_k} \Phi_{m,k}^{in} \leq \Lambda_m, \quad m \in \mathcal{R}^{in}.$$

Для каждого вида сырья m (вода из скважины, природный газ и др.) суммарный расход по всем установкам, которые его потребляют, не может превышать доступный объем Λ_m (например, лимит водозабора или поставки топлива). Это ограничение учитывает ресурсные ограничения внешней среды.

7. Баланс по промежуточным продуктам:

$$\sum_{k \in S: m \in J_k} \Phi_{k,m}^{out} = \sum_{k \in S: m \in I_k} \Phi_{m,k}^{in} + \sigma_m, \quad m \in \mathcal{R}^{int}.$$

8. Баланс по конечным продуктам:

$$\sum_{k \in S: m \in J_k} \Phi_{k,m}^{out} = \sigma_m, \quad m \in \mathcal{R}^{out}.$$

9. Ограничения спроса:

$$\sigma_m = \Delta_m^{\max}, \quad m \in \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}.$$

Объем конечного потребления продукта σ_m равен заданному внешнему спросу $\Delta_m^{\max}$. Это главное требование к системе – гарантированное удовлетворение потребностей. Спрос может быть задан и для некоторых промежуточных продуктов (например, отбор пара на сторону), что покрывается объединением множеств $\mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}$.

10. Условия неотрицательности и целочисленности:

$$\delta_k \in \{0, 1\}, \quad k \in S;$$

$$\xi_k \geq 0, \quad k \in S;$$

$$\Phi_{m,k}^{in} \geq 0, \quad k \in S, m \in I_k;$$

$$\Phi_{k,m}^{out} \geq 0, \quad k \in S, m \in J_k;$$

$$\sigma_m \geq 0, \quad m \in \mathcal{R}^{int} \cup \mathcal{R}^{out}.$$

Бинарность δ_k обеспечивает дискретный выбор типовых компонентов. Все потоки и объемы неотрицательны (отсутствие обратных потоков в модели). Непрерывные переменные могут принимать любые дробные значения в пределах допустимых интервалов (режим работы установки может быть частичным).

Оптимизация системы

водно-энергетического обеспечения морской нефтедобывающей платформы (пример)

Рассматривается задача оптимального проектирования системы водно-энергетического обеспечения морской нефтедобывающей платформы в условиях жаркого климата. Необходимо выбрать состав оборудования и режимы его работы для удовлетворения заданных потребностей в питьевой воде, воде для закачки в пласт и электроэнергии при минимизации годовых затрат [17].

Для решения задачи используется описанная выше оптимизационная модель, позволяющая одновременно рассматривать множество альтернативных технологий и выбирать оптимальную конфигурацию установок.

Исходные данные и альтернативные технологии представлены в таблицах 1–6 [18–21].

Таблица 1. Спрос на продукцию

Table 1. Demand for products

Продукт / Product	Обозначение / Designation	Требуемый объем / Required volume	Ед. измерения / Unit of measurement	Примечание / Note
Питьевая вода / Drinking water	M11	20	$\text{м}^3 \text{сут.}^{-1} / \text{m}^3 \text{day}^{-1}$	Персонал 150–200 человек (80–120 л/чел.·сут.) / The staff is 150–200 people (80–120 liters/person·day)
Вода для закачки / Water for injection	M12	10 000		Поддержание пластового давления, утилизация пластовой воды / Reservoir pressure maintenance, reservoir water utilization

Таблица 2. Доступность сырья

Table 2. Availability of raw materials

Сырье / Raw material	Обозначение / Designation	Доступный объем / Available volume	Ед. измерения / Unit of measurement	Источник / Note
Морская вода / Sea water	M1	100000	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	Окружающая среда / Environment
Природный газ / Natural gas	M2	50000	тыс. м ³ /сут. / 10 ³ m ³ day ⁻¹	Попутный газ / Associated gas
Дизельное топливо / Diesel	M3	20000	т/сут. / ton/day	Резервное топливо / Backup fuel
Воздух / Air	M4	Неограничен / Unlimited	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	Атмосфера / Atmosphere
Химикаты / Chemical	M5	5000	т/сут. / ton/day	Поставка с берега / Delivery from shore
Пластовая вода / Reservoir water	M6	15000	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	Попутно добываемая вода / Produced water
Импорт воды / Import water	M7	5000		Танкерная доставка / Tanker delivery
Импорт энергии / Import energy	M8	10000	МВт·ч/сут. / MWh/day	Кабель с берега / Cable from shore

Таблица 3. Производство питьевой воды

Table 3. Drinking water production

Установка / Installation	Обозначение / Designation	Мощность (min/max) / Power (min/max)	Ед. измерения / Unit of measurement	Примечание / Note
AWG (малый) / (small)	O1	5 / 200	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	Генерация воды из воздуха, уд. энергопотребление 0,25 МВт·ч/м ³ / Water generation from air, specific energy consumption 0.25 MWh/m ³
AWG (крупный) / (big)	O2	20 / 500		Эффект масштаба, сниженное энергопотребление / Economies of scale, reduced energy consumption
RO (малый) / (small)	O3	10 / 300		Опреснение морской воды, требует химикатов / Desalination of seawater, requires chemicals
RO (крупный) / (big)	O4	50 / 1000	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	Более высокий КПД, низкий уд. расход химикатов / Higher efficiency, lower specific consumption of chemicals
Импорт воды / Import water	O5	5 / 500		Внешнее водоснабжение, высокая стоимость / External water supply, high cost

Таблица 4. Генерация электроэнергии

Table 4. Electricity generation

Установка / Installation	Обозначение / Designation	Мощность (min/max) / Power (min/max)	Единица измерения / Unit of measurement	КПД / Efficiency, %	Примечание / Note
ГТУ (малая) / GTU (small)	O6	200 / 2000	МВт·ч/сут. / MWh/day	45	Природный газ / Natural gas
ГТУ (крупная) / GTU (large)	O7	500 / 5000		50	Выше КПД, эффект масштаба / Higher efficiency, scale effect
Дизель-генератор / Diesel Generator	O8	100 / 1500		40	Дорогое топливо / Expensive fuel
Солнечные панели / Solar panels	O9	50 / 1000		18	Высокие капитальные затраты / High capex
Импорт энергии / Import energy	O10	50 / 2000		99	Высокий тариф / High rate

Таблица 5. Очистка пластовой воды

Table 5. Reservoir water purification

Установка / Installation	Обозначение / Designation	Мощность / Power (min/max)	Единица измерения / Unit of measurement	Выход очищенной воды / The output of purified water, %
Очистка ПВ (стандарт) / PV cleaning (standard)	O11	1000 / 10000	м ³ /сут. / m ³ day ⁻¹	95
Очистка ПВ (мини) / PV cleaning (min)	O12	200 / 3000		93

Таблица 6. Закачка воды в пласт

Table 6. Injection of water into the reservoir

Установка / Installation	Обозначение / Designation	Мощность / Power, min/max	Единица измерения / Unit of measurement	Примечание / Note
Насос закачки / Injection pump	O13	1000 / 10000	$\text{м}^3/\text{сут}/\text{m}^3\text{day}^{-1}$	Стандартное давление / Standard pressure
Насос высокого давления / High pressure pump	O14	2000 / 20000		Повышенное энергопотребление / Increased energy consumption

Общее число возможных конфигураций суперструктуры (рис. 1) составляет 16 384 (2^{14}). С учетом обязательности выполнения всех функций (питьевая вода, электроэнергия, очистка ПВ, закачка) количество допустимых конфигураций сокращается до 8649. Дополнительные ограничения (материальные балансы, мощностные диапазоны) сокращают количество технологически реализуемых конфигураций до 527.

Результаты оптимизации

Оптимальная конфигурация включает шесть установок (рис. 2):

AWG (малый) – производство питьевой воды из воздуха ($21,05 \text{ м}^3/\text{сут.}$).

ГТУ (крупная) – генерация электроэнергии на попутном газе ($4\,371,36 \text{ МВт} \cdot \text{ч}/\text{сут.}$).

Очистка ПВ (стандарт) – основная очистка пластовой воды ($10\,000 \text{ м}^3/\text{сут.}$).

Очистка ПВ (мини) – дополнительная очистка остаточного объема ($779,02 \text{ м}^3/\text{сут.}$).

Насос закачки – основная закачка воды в пласт ($8\,224,49 \text{ м}^3/\text{сут.}$).

Насос высокого давления – дополнительная закачка воды в пласт ($2\,000,00 \text{ м}^3/\text{сут.}$).

Минимальные годовые затраты составляют 36 206,39 тыс. USD/год.

Структура затрат:

сырье – 97,6 % ($35\,353,57 \text{ тыс. USD}/\text{год}$);

усредненные капитальные вложения (годовой эквивалент) – 1,6 % ($590,82 \text{ тыс. USD}/\text{год}$); постоянные эксплуатационные затраты – 0,7 % ($262,00 \text{ тыс. USD}/\text{год}$).

Основным видом затрат является природный газ для газотурбинной установки, что обусловлено высокой потребностью в электроэнергии для работы насосов и систем получения и очистки воды.

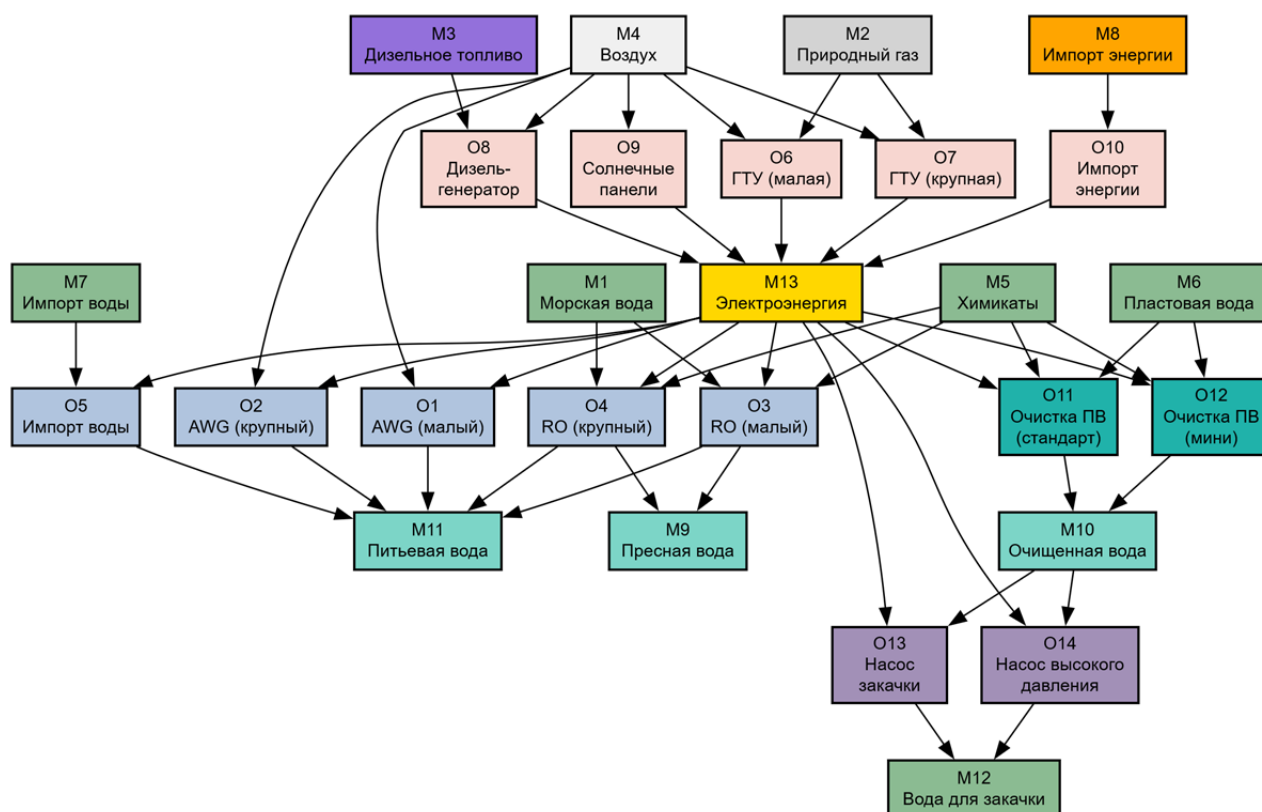


Рис. 1. Суперструктура водно-энергетического обеспечения морской нефтедобывающей платформы

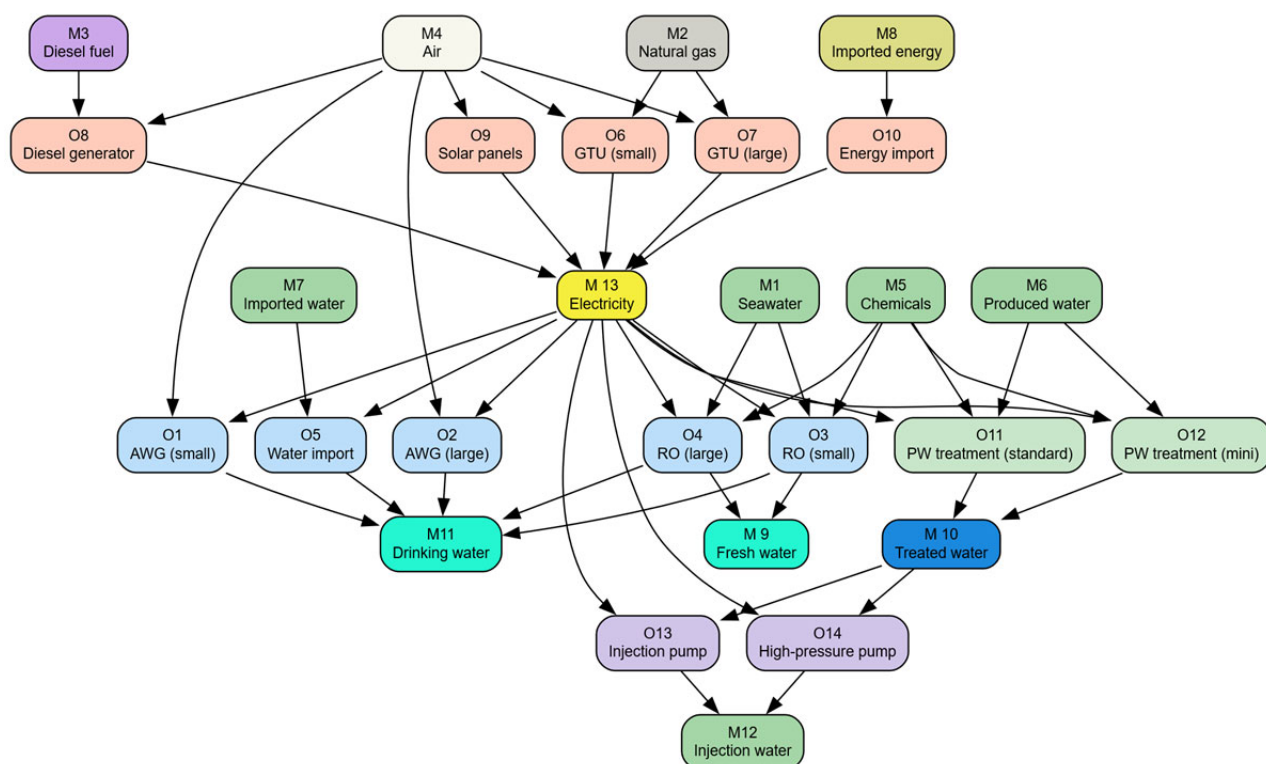


Fig. 1. Superstructure of water and energy supply for an offshore oil production platform

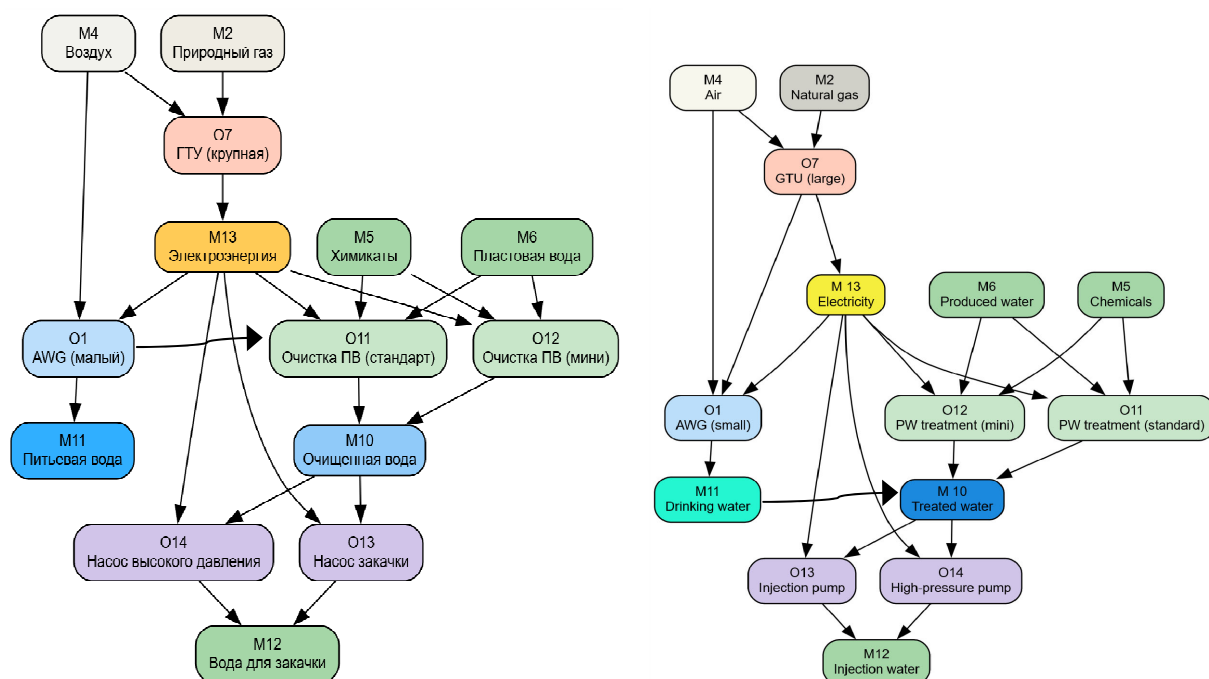


Рис. 2. Оптимальная структура водно-энергетического модуля

Fig. 2. Optimal structure of the water-energy module

Выводы

Разработана оптимизационная модель синтеза конфигураций интегрированных водно-энергетических модулей на основе методологии суперструктур (*P-graph*). Модель позволяет осуществлять це-

лостный выбор оборудования и режимов его работы с учетом межподсистемных связей, дискретности мощностей, технологических норм расхода и выхода материалов, а также экономических параметров.

Апробация модели на задаче проектирования системы водно-энергетического обеспечения морской нефтедобывающей платформы подтвердила ее работоспособность. Полученная оптимальная конфигурация демонстрирует возможность эффективного комбинирования различных технологических решений: генерации воды из воздуха, газотурбинной генерации электроэнергии, комбинированной очистки пластовой воды и закачки подготовленной воды в пласт.

Суперструктурный подход обеспечивает комбинаторную полноту поиска, позволяя рассматривать все потенциально возможные конфигурации, допустимые с точки зрения физической реализуемости и технических ограничений. Разработанная модель может быть использована на этапе предпроектного обоснования при выборе оптимальной структуры систем водно-энергетического обеспечения для различных типов промышленных объектов.

Дальнейшее развитие модели предполагает учет динамических режимов функционирования, требований к структурной надежности, решение многокритериальных задач с одновременной оптимизацией экономических и экологических показателей, а также интеграцию с методами анализа неопределенностей для повышения устойчивости принимаемых решений.

Библиографические ссылки

1. Тайфан Г. С. П., Маравельяс К. Т. Синтез систем разделения с использованием нескольких технологий // Компьютеры и химическая инженерия. 2024. Т. 181. Ст. 108616. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108616
2. Фридлер Ф., Орош А., Пиментел Лозада Дж. П-графы для проектирования технологических систем: математические модели и алгоритмы. Чам: Спрингер, 2022. 261 с. DOI: 10.1007/978-3-030-92216-0
3. Орош А., Фридлер Ф. Синтез процессов с учетом устойчивости как для нормальных, так и для нештатных режимов эксплуатации: подход с использованием Р-графа // Журнал чистого производства. 2023. Т. 414. Ст. 137696. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137696
4. Движение к циркулярности пластиковых отходов: переопределение расширенной ответственности производителя с учетом внешних эффектов с помощью структуры оптимизации жизненного цикла на основе Р-графа / З. Х. Фуанг, К. С. Муля [и др.] // Ресурсы, сохранение и переработка. 2023. Т. 197. Ст. 107187. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107187
5. Исчерпывающий перебор теплообменных сетей с минимальным потреблением утилит с использованием теоретико-графового подхода / А. Орош, Б. С. Хау, Л. С. Йео, Д. Турунавасу, В. Андияппан, Дж. Пиментел, С. Ю. Тенг, Ф. Фридлер // Энергетика. 2025. Т. 335. Ст. 137898. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137898
6. Подход на основе Р-графа и моделирования Монте-Карло для устойчивых портфелей технологий удаления углерода с управлением рисками / М. В. Мигу-Сумаганг, К. Б. Авино, Дж. Ф. Д. Тапиа, Р. Р. Тан // Энергетика. 2024. Т. 310. Ст. 133228. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133228
7. Социально-экологические сетевые структуры, основанные на графиках процессов / А. Лао, Х. Кабесас, А. Орош, Ф. Фридлер, Р. Тан // PLoS ONE. 2020. Т. 15, № 8. Ст. e0232384. DOI: 10.1371/journal.pone.0232384
8. Синтез интегрированной системы регенерации тепловой воды с использованием теоретико-графового последовательного метода / Б. С. Хау, А. Орош, С. Ю. Тен, Дж. Ю. Лим, Ф. Фридлер // Труды по химической инженерии. 2021. Т. 88. С. 43–48. DOI: 10.3303/CET2188008
9. Подход Р-графа в оптимальном синтезе и планировании управления отходами для достижения целей устойчивого развития: систематический обзор / Р. Моход Фирдаус, Н. Абдул Мулок Оон, М. К. Аруа, Л. Т. Гев // Управление отходами и исследования. 2025. Т. 43, № 4. С. 455–473. DOI: 10.1177/0734242X241265010
10. Орош А., Фридлер Ф. Синтез оптимально устойчивых цепочек поставок // Журнал чистого производства. 2020. Т. 272. Ст. 122650. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122650
11. Многоцелевой анализ рисков и распределение резервов на основе графиков в критически важных для безопасности энергетических системах / З. Суле, Дж. Баумгартнер, Г. Дорго, Дж. Абонья // Энергетика. 2019. Т. 179. С. 989–1003. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.117
12. Синтез процессов с учетом устойчивости как для традиционных, так и для нештатных операций: подход с использованием Р-графа / А. Орош, П. С. Варбанов, Ю. Ю. Клемеш, Ф. Фридлер // Журнал чистого производства. 2023. Т. 414. Ст. 137696. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137696
13. Фридлер Ф., Орош А., Пиментел Лозада Дж. П-графы для проектирования технологических систем: математические модели и алгоритмы. Чам: Спрингер Интернэшнл Паблишинг, 2022. 261 с. DOI: 10.1007/978-3-030-92216-0
14. Варбанов П. С., Фридлер Ф., Клемеш Я. Проектирование и оптимизация технологических сетей с использованием Р-графа: успех, проблемы и потенциальная дорожная карта // Труды по химической инженерии. 2017. Т. 61. С. 1549–1554. DOI: 10.3303/CET1761256
15. Хау Б. С., Тен С. Ю., Леонг У. Д., Нг У. П. К., Лим С. Х., Нган С. Л., Лам Х. Л. Нелинейное программирование с использованием фреймворка Р-graph // Труды по химической инженерии. 2019. Т. 76. С. 499–504. DOI: 10.3303/CET1976084
16. Исчерпывающая генерация полного многомерного фронта Парето для синтеза сети многоцелевых процессов / Б. С. Хоу, С. Л. Нган, Б. Х. Хонг, Х. Л. Лам, У. П. К. Нг, С. Юсуп, Рахман Н. Абд., Т. Ф. Яп // Труды по химической инженерии. 2025. Т. 121. Ст. 1027. DOI: 10.3303/CET25121027
17. Разработка комплексного полуавтоматизированного систематического обзора литературы: применение к исследованиям Р-графа с акцентом на устойчивость / А. Тот, А. Сута, Дж. Пиментел, А. Арготи // Журнал чистого производства. 2023. Т. 414. Ст. 137741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137741
18. Клемеш Ю. Ю., Варбанов П. С., Фан Л. Т. Распространение информации: усовершенствования Р-графа: реализации и приложения // Труды по химической инженерии. 2015. Т. 45. С. 2233–2238. DOI: 10.3303/CET1545223
19. Цзянь Сян Тан, Хонг Шенг Тан, Амели Питер Эфферри, Иан Ян Бенг Онг, Доминик Си Ю. Фу, Кэтлин Б. Авино, Рэймонд Р. Тан, Чанг К. Ю. Подход на основе Р-графа к синтезу водородных сетей с ограничениями по давлению и примесям // Process Safety and Environmental Protection. 2020. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107145
20. Абдулкадер Бин Саль, Адриан Чун Мин Лой, Джуин Яу Лим, Акос Оросз, Ференц Фридлер, Бин Шен Хоу. Исследование N-наилучшего пространства решений для теплоинтегрированной сети регенерации водорода с использованием последовательного теоретико-графового подхода // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Т. 48, № 13. С. 4943–4959. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.196

21. Амели Питер Эффери, Цзянь Сян Тан, Иан Ян Бенг Онг, Джуин Яу Лим, Чанг Кю Ю, Бин Шен Хоу, Габриэль Х. Т. Линг, Доминик К. Ю. Фу. Оптимальное планирование междоаводской интеграции водорода в эко-индустриальном парке с использованием Р-графа и анализа теории игр // Process Safety and Environmental Protection. 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.016

References

1. Taifan G.S.P., Maravelias C.T. (2024) [Multi-technology separation system synthesis]. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 181, article 108616. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108616 (in Russ.).
2. Friedler F., Orosz Á., Pimentel Losada J. (2022) [P-graphs for Process Systems Engineering: Mathematical Models and Algorithms]. *Cham: Springer*, 2022. 261 p. DOI: 10.1007/978-3-030-92216-0 (in Russ.).
3. Orosz Á., Friedler F. (2023) [Process synthesis considering sustainability for both normal and non-normal operations: P-graph approach]. *Journal of Cleaner Production*, vol. 414, article 137696. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137696 (in Russ.).
4. Phuang Z.X., Mulya K.S. [et al.] (2023) [Moving towards plastic waste circularity: Redefining extended producer responsibility with externality consideration via P-graph-life cycle optimization framework]. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 197, article 107187. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107187 (in Russ.).
5. Orosz Á., How B.S., Yeo L.S., Turunawarasu D., Andiappan V., Pimentel J., Teng S.Y., Friedler F. (2025) [Exhaustive enumeration of heat exchanger networks with minimum utility consumption using graph-theoretic approach]. *Energy*, vol. 335, article 137898. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137898 (in Russ.).
6. Migo-Sumagang M.V., Aviso K.B., Tapia J.F.D., Tan R.R. (2024) [P-graph and Monte Carlo simulation approach for sustainable and risk-managed CDR portfolios]. *Energy*, vol. 310, article 133228. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133228 (in Russ.).
7. Lao A., Cabezas H., Orosz A., Friedler F., Tan R. (2020) [Socio environmental network structures based on process graphs]. *PLoS ONE*, vol. 15, no. 8, article e0232384. DOI: 10.1371/journal.pone.0232384 (in Russ.).
8. Haw B.S., Orosz A., Ten S.Y., Lim J.Y., Friedler F. (2021) [Synthesis of integrated heat water regeneration system using graph-theoretic sequential method]. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 88, pp. 43-48. DOI: 10.3303/CET2188008 (in Russ.).
9. Mohd Firdaus R., Abdul Mulok Oon N., Aroua M.K., Gew L.T. (2025) [The P-graph approach in optimal synthesis and planning of waste management towards achieving sustainable development goals: A systematic review]. *Waste Management & Research*, vol. 43, no. 4, pp. 455-473. DOI: 10.1177/0734242X241265010 (in Russ.).
10. Orosz A., Friedler F. (2020) [Synthesis of optimally sustainable supply chains]. *Journal of Cleaner Production*, vol. 272, article 122650. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122650 (in Russ.).
11. Sule Z., Baumgartner J., Dorgo G., Abonyi J. (2019) [Multi objective risk analysis and graph based redundancy allocation in safety critical energy systems]. *Energy*, vol. 179, pp. 989-1003. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.117 (in Russ.).
12. Orosz A., Varbanov P.S., Klemeš J.J., Friedler F. (2023) [Process synthesis with sustainability considerations for both conventional and unconventional operations: A P graph approach]. *Journal of Cleaner Production*, vol. 414, article 137696. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137696 (in Russ.).
13. Friedler F., Orosz A., Pimentel Losada J. (2022) [P-graphs for Process Systems Engineering: Mathematical Models and Algorithms]. *Cham: Springer International Publishing*, 2022. 261 p. DOI: 10.1007/978-3-030-92216-0 (in Russ.).
14. Varbanov P.S., Friedler F., Klemeš J.J. (2017) [Process network design and optimisation using P-graph: success, challenges and potential roadmap]. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 61, pp. 1549-1554. DOI: 10.3303/CET1761256 (in Russ.).
15. Haw B.S., Ten S.Y., Leong W.D., Ng W.P.Q., Lim S.H., Ngan S.L., Lam H.L. (2019) [Non-linear programming using P graph framework]. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 76, pp. 499-504. DOI: 10.3303/CET1976084 (in Russ.).
16. How B.S., Ngan S.L., Hong B.H., Lam H.L., Ng W.P.Q., Yusup S., Abd. Rahman N., Yap T.F. (2025) [Exhaustive generation of full multidimensional Pareto front for multi objective process network synthesis]. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 121, article 1027. DOI: 10.3303/CET25121027 (in Russ.).
17. Tóth Á., Suta A., Pimentel J., Argoti A. (2023) [A comprehensive, semi-automated systematic literature review (SLR) design: Application to P graph research with a focus on sustainability]. *Journal of Cleaner Production*, vol. 414, article 137741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137741 (in Russ.).
18. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Fan L.T. (2015) [Spreading the Message: P Graph Enhancements: Implementations and Applications]. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 45, pp. 2233-2238. DOI: 10.3303/CET1545223 (in Russ.).
19. Jian Xiang Tan, Hong Sheng Tan, Amelie Peter Affery, Ian Yan Beng Ong, Dominic C.Y. Foo, Kathleen B. Aviso, Raymond R. Tan, Chang K.Y. (2020) A P-Graph approach for the synthesis of hydrogen networks with pressure and impurity constraints. *Computers & Chemical Engineering*. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107145 (in Russ.).
20. Abdulqader Bin Sahl, Adrian Chun Minh Loy, Juin Yau Lim, Ákos Orosz, Ferenc Friedler, Bin Shen Hou (2023) Exploring N best solution space for heat integrated hydrogen regeneration network using sequential graph theoretic approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 13, pp. 4943-4959. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.196 (in Russ.).
21. Amelie Peter Affery, Jian Xiang Tan, Ian Yan Beng Ong, Juin Yau Lim, Chang Kyoo Yoo, Bing Shen How, Gabriel H. T. Ling, Dominic C. Y. Foo (2023) Optimal planning of inter plant hydrogen integration (IPHI) in eco industrial park with P graph and game theory analyses. *Journal of Cleaner Production*, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.016 (in Russ.).

Synthesis of Water-Power Modules from Standard Components: an Optimization Approach Based on Superstructure and Process Graph (P-Graph) Methodology

Mani Momeni, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

A.S. Sarkisov, DSc in Economic Sciences, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

This article discusses the problem of synthesizing optimal configurations of integrated water-power modules formed from typical components in a design production environment. The relevance of the work is due to the need to move from fragmented design to a holistic synthesis of integrated water-power module configurations for oil and gas infrastructure facilities, which will reduce flow imbalances and excessive organizational costs. However, the current practice is based on a fragmented approach: water and power subsystems are designed independently, equipment is selected in isolation, and integration is postponed until the installation stage. This leads to structural suboptimal design - an imbalance of flows, when excess capacity in some components is combined with a shortage in others; uncontrolled quality - an inability to guarantee resource efficiency requirements; and excessive organizational costs - multiple approval iterations and post-project modifications. The aim of the study is to develop an optimization model for synthesizing configurations of water-power modules from typical complex components based on the methodology of superstructures and process graphs. An optimization model that allows for a holistic choice of equipment and its operating modes, taking into account intersystem connections, capacity discreteness, technological standards of consumption and yield of materials, as well as economic parameters has been developed. The model includes a variety of raw materials, intermediate and final products, typical installations with alternative technologies, a system of linear constraints that ensure material balances, availability of raw materials and meeting the demand. The objective function minimizes the reported annual costs, including capital investments (through the annuity ratio), fixed operating costs, and variable raw material costs. Thus, the proposed approach provides combinatorial completeness of the search and can be investigated at the stage of pre-design justification when choosing the structure of power and water supply systems for various types of industrial facilities.

Keywords: superstructure, process graph (P-graph), configuration synthesis, water-energy module, optimization model, offshore oil platform.

Получено 09.06.2026

Образец цитирования

Мани Момени, Саркисов А. С. Адаптация аппарата суперструктур к задачам конфигурирования изделий из типовых компонентов: синтез водно-энергетических модулей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 3. С. 45–54. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-45-54

For Citation

Mani Momeni, Sarkisov A.S. (2026) [Synthesis of Water-Power Modules from Standard Components: an Optimization Approach Based on Superstructure and Process Graph (P-Graph) Methodology]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 2, pp. 45-54. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-45-54 (in Russ.).