УДК 621.311.22:519.816:621.184.3:620.22 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-74-82

Разработка алгоритма выбора материала для труб пароперегревателя энергоблоков сверхкритических параметров с учётом многокритериальности и неопределённости информации

П.С. Панкратьев

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
scud33@inbox.ru.
https://orcid.org/0000-0002-0921-7842.
Статья поступила 06.05.2026, принята 06.09.2026.

Переход современной тепловой энергетики на сверхкритические (СКП) и ультрасверхкритические (УСКП) параметры пара в сочетании с требованиями к маневренности энергоблоков делает традиционные методы выбора конструкционных материалов неэффективными. Существующая практика, опирающаяся на ретроспективный опыт эксплуатации, не позволяет корректно оценивать новые классы сталей в условиях противоречивости технических и экономических требований. Целью работы является создание инструментария для обоснованного выбора материалов труб пароперегревателей, работающих при температурах выше 585 °С. Разработан алгоритм поддержки принятия решений, базирующийся на методе многокритериального анализа SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks). Предложенная методика позволяет агрегировать разнородные факторы: физико-механические свойства (длительная прочность, термоусталость), экономические показатели (стоимость жизненного цикла) и трудноформализуемые риски (доступность, технологичность сварки). С использованием разработанного алгоритма проведён сравнительный анализ конкурентоспособности отечественной стали 10Х9МФБ-Ш и зарубежных аналогов (Т91, Т92, Super304H) для параметров пара 585 °С и 28 МПа. Установлено, что в базовом сценарии с приоритетом жаропрочности техническим лидером является аустенитная сталь Super304H (интегральный рейтинг 53,8 балла), в то время как широко распространённые стали Т91 и Т92 демонстрируют отставание (33,7 и 40,7 балла соответственно). Выполненный анализ чувствительности выявил неустойчивость лидерства импортного материала: при увеличении веса критерия «Доступность» выше порогового значения 0,31, обусловленного требованиями импортозамещения и стратегической безопасности, оптимальным выбором становится российская сталь 10Х9МФБ-Ш. Предложенный подход обеспечивает прозрачность принятия решений на этапе проектирования и минимизацию стратегических рисков.

Ключевые слова: теплоэнергетика; сверхкритические параметры; пароперегреватель; выбор материала; многокритериальное принятие решений (MCDM); метод SMARTER; системный анализ.

Development of an algorithm for selecting material for superheater tubes of supercritical power units considering multicriteria and information uncertainty

P.S. Pankratiev

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
scud33@inbox.ru.
https://orcid.org/0000-0002-0921-7842.
Received 06.05.2026, accepted 06.09.2026.

The transition of modern thermal power engineering to supercritical (SC) and ultra-supercritical (USC) steam parameters, combined with the requirements for power unit maneuverability, renders traditional methods of structural material selection ineffective. Current practices relying on retrospective operating experience fail to correctly evaluate new steel classes amidst conflicting technical and economic requirements. The aim of this work is to create a toolkit for the substantiated selection of superheater tube materials operating at temperatures above 585 °C. A decision support algorithm based on the SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks) multi-criteria analysis method has been developed. The proposed methodology allows for the aggregation of heterogeneous factors: physical and mechanical properties (creep rupture strength, thermal fatigue), economic indicators (life cycle cost), and hard-to-formalize risks (availability, weldability).Using the developed algorithm, a comparative competitiveness analysis of domestic steel 10Kh9MFB-Sh and foreign analogues (T91, T92, Super304H) is conducted for steam parameters of 585 °C and 28 MPa. It is established that in the baseline scenario prioritizing creep strength, the technical leader is the austenitic steel Super304H (integral rating of 53,8 points), while the widely used T91 and T92 steels show a lag (33,7 and 40,7 points, respectively). The sensitivity analysis reveals the instability of the import material's leadership: when the weight of the «Availability» criterion increases above the threshold value of 0,31, driven by import substitution requirements and strategic security, the Russian steel 10Kh9MFB-Sh becomes the optimal choice. The proposed approach ensures decision-making transparency at the design stage and minimization of strategic risks.

Keywords: thermal power engineering; supercritical parameters; superheater; material selection; Multi-Criteria Decision Making (MCDM); SMARTER method; system analysis.

Введение. Современная теплоэнергетика находится в состоянии глубокой трансформации, определяемой двумя ключевыми вызовами. Первым является необходимость существенного повышения эффективности и снижения экологической нагрузки, ответом на что служит повсеместный переход к энергоблокам сверхкритических (СКП) и ультрасверхкритических параметров (УСКП), позволяющий достичь рекордных значений КПД [1, 2]. Второй вызов связан с интеграцией в энергосистему нестабильной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Это требует от традиционных тепловых электростанций работы в высокоманевренном режиме, с частыми пусками, остановами и изменениями нагрузки, что порождает дополнительные термические и механические напряжения в оборудовании – в частности, в сталях пароперегревателей котлов [3–8].

Мировая энергетика демонстрирует устойчивую тенденцию перехода к параметрам пара 600–620 °С. Особенно впечатляют достижения Китая в этой области, в котором введены или строятся энергоблоки СКП общей мощностью свыше 317 ГВт [9]. В отличие от мировых тенденций, российская энергетика сохраняет отставание в данной области. Тем не менее, энергетическая стратегия России на период до 2050 года и ряд других документов предусматривают разработку энергоблоков СКП и УСКП [1, 10, 11]. Это обстоятельство требует системной работы по пересмотру и обновлению материаловедческой базы, поскольку традиционные отечественные стали (как, например, сталь марки 12Х1МФ) разрабатывались для докритических параметров и их применение в условиях СКП и УСКП, таким образом, является невозможным.

Анализ мирового опыта эксплуатации энергоблоков СКП показывает, что ключевым фактором, лимитирующим ресурс, является деградация микроструктуры металла труб поверхностей нагрева. Для традиционных перлитных сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф) при температурах выше 540–560 °С резко интенсифицируются процессы сфероидизации перлита и ползучести, что приводит к преждевременному исчерпанию паркового ресурса [12, 13]. Кроме того, в условиях маневренных режимов (циклического изменения температур) на внутренней поверхности труб образуется оксидная плёнка (магнетит), низкая теплопроводность которой приводит к локальному перегреву металла и развитию подплёночной коррозии [5, 14].

В связи с этим переход к параметрам пара 585–620 °С потребовал разработки принципиально новых классов материалов: высокохромистых сталей мартенситного класса (9–12 % Cr), упрочнённых карбонитридами ванадия и ниобия, а также аустенитных сталей нового поколения с медным и азотистым легированием. Однако опыт их внедрения выявил новые проблемы, такие как склонность к образованию трещин в зонах термического влияния сварных стыков, что требует пересмотра подходов к выбору материала не только по критерию жаропрочности, но и по технологической живучести [15, 16].

Таким образом, переход к технологиям СКП и УСКП пара невозможен без применения новых конструкционных материалов. Выбор конкретного материала (стали), пригодной для использования на СКП и УСКП пара, в свою очередь, должен опираться на системный подход, учитывающий множественность критериев и различные противоречия при решении такой задачи. Более подробно сущность данного тезиса будет раскрыта далее.

Постановка задачи. В сложившейся практике проектирования теплоэнергетического оборудования выбор материалов и сталей, в частности зачастую базируется на консервативном подходе и прошлом опыте эксплуатации аналогичных установок. Однако для температур пара выше 580 °С релевантный отечественный опыт практически отсутствует. Ввиду этого вновь производимый выбор должен опираться на доступную номенклатуру сталей с учётом физических ограничений по параметрам пара. В данных новых условиях при выборе стали из нескольких вариантов, подходящих по физическим параметрам для использования, между их различными классами возникает зона конкуренции (рис. 1).

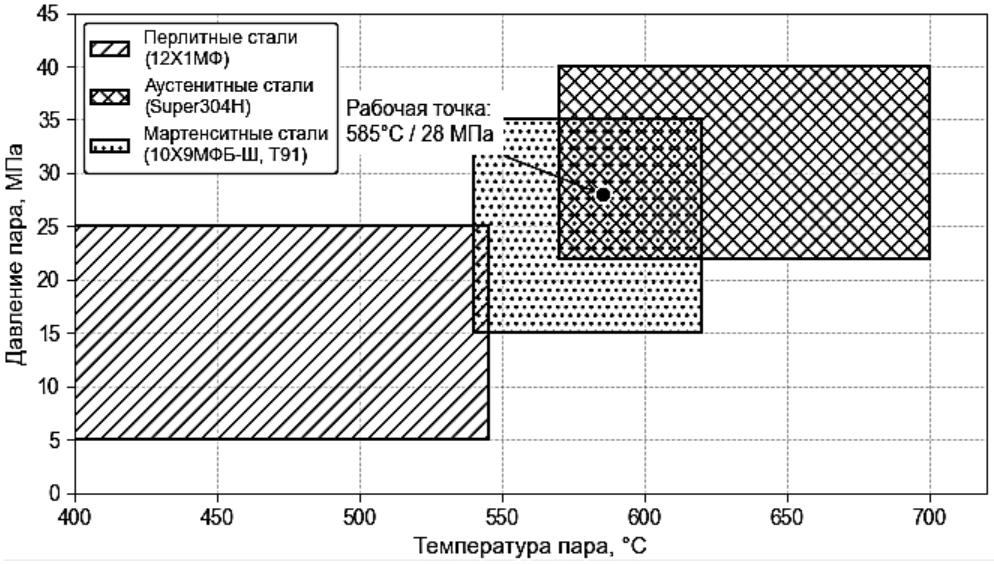

Рис. 1. Области рационального применения сталей различных классов

На диаграмме (рис. 1) выделены зоны применимости различных классов сталей в зависимости от температуры и давления. Видно, что расчётная точка, характеризующая СКП пара (585 °С / 28 МПа), попадает в область пересечения, где технически применимы как мартенситные, так и аустенитные стали. В то же время данная точка не попадает в область перлитных сталей (традиционная сталь 12Х1МФ для докритических параметров пара), что свидетельствует о непригодности последних в рассматриваемых условиях.

Чтобы произвести выбор конкретной марки стали из нескольких пригодных, необходимо учесть дополнительную информацию. Особенностью данной задачи выбора, как будет показано далее, является то, что такая информация может иметь как количественный, так и качественный характер; кроме того, может иметь место и неопределённость такой информации.

Все альтернативы (стали) обладают набором свойств, оценки по которым можно выразить как количественно (например, величиной МПа для предела длительной прочности), так и качественно (например, оценками «высокая», «средняя» и т. п. для технологичности, окалиностойкости, предсказуемости поведения в эксплуатации и т. п.). В свою очередь, каждая конкретная альтернатива (в данном случае – сталь определённой марки) обладает уникальным набором характеристик (оценок) по данным свойствам. В связи с этим для решения задачи выбора сначала необходимо сформировать соответствующие наиболее важным свойствам критерии выбора альтернатив, где по каждому критерию для каждой альтернативы имеется (или задаётся экспертом) своя количественная или качественная оценка.

Данная задача выбора имеет признаки слабоструктурированной проблемы, поскольку, во-первых, по некоторым критериям (например, связанным с санкционными рисками) вообще может быть затруднительно дать какую-то оценку ввиду наличия неопределённости информации; во-вторых, сами критерии могут вступать в противоречие друг с другом: улучшение оценки по одному критерию ведёт к ухудшению по другому и наоборот; и в-третьих, имеет место наличие качественных трудно формализуемых критериев. Ввиду этого решать данную задачу необходимо с применением системного подхода.

В классической постановке решение данной задачи обычно ограничивается традиционными методами расчёта на прочность, которые не располагают средствами для агрегации разнородных факторов и поиска многокритериального сбалансированного решения.

Целью работы является разработка и апробация научно-методического подхода (алгоритма) к выбору материала, основанного на многокритериальных методах принятия решений (MCDM – Multi-Criteria Decision Making). Такой системный подход позволяет перейти от интуитивного выбора, основанного на прошлом опыте (который в условиях перехода к новым параметрам пара ограничен), к более обоснованному и взвешенному, учитывающему множественность качественных и количественных критериев оценки, а также возможную неопределённость информации.

Методология и исходные данные. В теории принятия решений существует множество методов, значительная часть которых оперирует таким понятием как «вес» (альтернативы либо критерия), который отражает «силу» рассматриваемой альтернативы или критерия по отношению к другим. Обычно данные веса определяются экспертным путём и далее в зависимости от применяемого метода особым образом агрегируются для получения итогового решения.

Для решения задач выбора в условиях многокритериальности, а также при наличии неопределённости, когда экспертам сложно назначить точные численные веса критериев, в настоящей работе предлагается применение метода SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks), имеющего множество реальных примеров приложения [17–23]. Он был выбран как достаточно простой, прозрачный и малотребовательный к объёму исходной информации метод, что особенно актуально при ограниченной доступности данных. Метод не требует точной калибровки весов критериев, позволяя оперировать лишь их ранжировкой (порядком); при этом сохраняется физический смысл количественных показателей за счёт прямой нормировки к единой шкале.

Обобщая всё вышесказанное, для реализации системного подхода к выбору материала был разработан алгоритм с использованием метода многокритериального анализа SMARTER, структурная схема которого представлена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма выбора материала

Особенностью данного алгоритма является наличие этапа предварительного скрининга (этап 2), позволяющего отсеять заведомо непригодные материалы на основе физических ограничений, и этапа анализа чувствительности (этап 5), который верифицирует устойчивость решения в условиях неопределенности внешних факторов (например, санкционных рисков).

Формирование альтернатив и критериев задачи выбора. Альтернативами в настоящем исследовании выступают марки различных сталей. Для анализа были отобраны четыре марки стали, технически пригодные для параметров 585 °C / 28 МПа:

- 10Х9МФБ-Ш (РФ) – отечественная высокохромистая сталь мартенситного класса, полученная методом электрошлакового переплава, характеризующаяся высокой структурной стабильностью и чистотой по неметаллическим включениям;
- T91 (импорт, Китай) – зарубежная сталь мартенситного класса, являющаяся мировым стандартом (ASTM A213) для поверхностей нагрева котлов СКП, отличающаяся отработанной технологией производства и сбалансированным комплексом свойств;
- T92 (импорт, Китай) – усовершенствованная модификация стали T91, дополнительно легированная вольфрамом (около 1,8 %) при сниженном содержании молибдена, что обеспечивает повышенное сопротивление ползучести при температурах выше 600 °C;
- Super304H (импорт, Китай) – перспективная аустенитная хромоникелевая сталь, дополнительно легированная медью, ниобием и азотом, обладающая максимальной длительной прочностью в рассматриваемой группе за счёт дисперсионного твердения.

Сталь марки 12Х1МФ, используемая для изготовления труб пароперегревателей котлов с докритическими параметрами пара, исключена из дальнейшего анализа как заведомо непригодная (рис. 1, этап 2 на рис. 2); таким образом, в анализе будут участвовать только конкурентные четыре альтернативы.

Для обеспечения системности выбора были сформулированы шесть критериев (этап 3 на рис. 2), каждый из которых отражает критически важный аспект жизненного цикла изделия:

1. Предел длительной прочности (жаропрочность) (С1). Данный критерий является количественным; единица измерения – мегапаскаль (МПа). Характеризует способность материала сопротивляться разрушению под действием постоянной нагрузки при высокой температуре в течение заданного ресурса (100 или 200 тыс. часов). Для рассматриваемых параметров минимально допустимое значение составляет 90 МПа, однако запас прочности напрямую влияет на толщину стенки трубы и металлоёмкость котла.

2. Окалиностойкость (С2). Качественный критерий. При температурах выше 580 °C скорость окисления поверхности резко возрастает. Для мартенситных сталей это лимитирующий фактор, требующий либо запаса по толщине стенки на коррозию, либо применения более дорогих аустенитных сплавов.

3. Сопротивление термоусталости (С3). Качественный критерий. Особую актуальность критерий приобрёл из-за повышенных требований к маневренности ТЭС для регулирования частоты и мощности энергосистемы [4, 24]. Аустенитные стали, обладая высоким коэффициентом линейного термического расширения (в 1,5 раза выше, чем у мартенситных), испытывают повышенные напряжения при пусках и остановах, что снижает их циклический ресурс.

4. Доступность и логистические риски (С4). Качественный критерий, оценивающий вероятность своевременной поставки сортамента в условиях геополитической нестабильности. Учитывает наличие производственных мощностей на территории РФ, зависимость от импортных компонентов (легирующих присадок) и действующие санкционные ограничения. Информация по данному критерию имеет высокую степень неопределённости.

5. Стоимость жизненного цикла (С5). Количественный критерий; единица измерения – условная (у.е.). Интегральный показатель, включающий не только закупочную цену металла, но и затраты на технологические операции (термообработка, сварка, контроль) и ремонты. Использование относительных единиц позволяет нивелировать волатильность валютных курсов.

6. Технологичность сварки (С6). Качественный критерий. Оценивает склонность материала к образованию холодных и горячих трещин, необходимость сложного предварительного и сопутствующего подогрева, а также требования к послесварочной термообработке, выполнение которой в монтажных условиях затруднительно.

Назначение оценок по альтернативам и критериям. Для выставления оценок по вышеприведённым альтернативам и критериям необходимо привлекать соответствующих экспертов и далее определённым образом проводить экспертный опрос. При оценивании альтернатив (марок сталей) по качественным критериям в соответствии с методом SMARTER экспертам предлагается пользоваться балльной шкалой оценок (от 1 до 10). По количественному критерию С1 оценка выставляется в соответствии с техническими характеристиками стали. По количественному критерию С5 также необходима экспертная оценка с учётом текущей стоимости сталей, а также затрат на технологические операции (термообработку, сварку, контроль) и ремонты; с целью нивелировать влияние волатильности валютных курсов удобнее всего данную оценку приводить в условных единицах (у.е.).

Далее в качестве примера приложения разработанного алгоритма приведена имитация решения поставленной задачи с участием экспертной группы. Оценки для каждой альтернативы по каждому критерию, данные экспертами, (этап 4 на рис. 2) приведены в табл. 1.

Самим критериям также необходимо задать веса их важности; делается это тем же экспертным путём. В методе SMARTER веса вычисляются при помощи формулы центроидов (ROC – Rank Order Centroids). Формула центроидов для вычисления веса j-го критерия w_j выглядит следующим образом [17, 18]:

$$w_j = \frac{1}{K}\sum_{k=j}^{K}\frac{1}{r_j}, \qquad (1)$$

где K – общее количество критериев; j – индекс рассматриваемого критерия; r_j – ранг j-го рассматриваемого критерия.

Сущность ROC-способа состоит в том, что эксперту необходимо сначала назначить ранг каждому критерию (где ранг «1» присваивается самому важному критерию, ранг «2» – второму по важности критерию и т. д.), после чего производится конвертация рангов в веса с помощью формулы (1). Такой подход с назначением рангов весьма привлекателен, так как исключает необходимость трудоёмких попарных сравнений.

Итак, по результатам экспертного опроса и обсуждений был сделан вывод, что ранжировка критериев по важности будет иметь следующий вид:

$$C1 \succ C4 \succ C5 \succ C2 \succ C3 \succ C6 .$$

Тогда веса критериев, вычисленные по формуле (1), будут соответствовать следующим значениям (табл. 2)

Таблица 1. Экспертные оценки для сталей по критериям

Марка стали	**Критерий**					
	*C*1: Предел ДП, МПа	*C*2: Окалиностойкость, балл 1–10	*C*3: Термоусталость, балл 1–10	*C*4: Доступность, балл 1–10	*C*5: Стоимость, у. е.	*C*6: Сварка, балл 1–10
Направление предпочтительности	*Max* ↑	*Max* ↑	*Max* ↑	*Max* ↑	*Min* ↓	*Max* ↑
10Х9МФБ-Ш (РФ)	95	6	8	10	100	5
Т91 (импорт)	95	6	8	6	85	5
Т92 (импорт)	115	7	8	5	120	4
Super304H (импорт)	160	10	4	3	250	6

Таблица 2. Расчёт весов критериев

Ранг	**Критерий**	**Расчёт веса критерия (*K*=6)**	**Вес (*w*)**
1	С1: Предел ДП	(1+1/2+1/3+1/4+1/5+1/6)/6	0,408
2	С4: Доступность	(1/2+1/3+1/4+1/5+1/6)/6	0,242
3	С5: Стоимость	(1/3+1/4+1/5+1/6)/6	0,156
4	С2: Коррозия	(1/4+1/5+1/6)/6	0,103
5	С3: Усталость	(1/5+1/6)/6	0,061
6	С6: Сварка	(1/6)/6	0,028
Сумма	–	–	1,000

Для приведения разнородных критериев (измеряемых в МПа, баллах, у.е.) к единой безразмерной шкале оценки по ним необходимо нормализовать. Для максимизируемых критериев (предел ДП, доступность и др.) использована формула линейной нормировки:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \cdot 100 , \qquad (2)$$

для минимизируемого критерия (стоимость) применена обратная формула:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \cdot 100 , \qquad (3)$$

где x_{ij} – фактическое значение j-го критерия для i-й альтернативы; $x_j^{\max}$, $x_j^{\max}$ – наилучшее и наихудшее значения оценок в группе j-го критерия соответственно.

Интегральный рейтинг i-й альтернативы R_i рассчитывался как аддитивная свертка:

$$R_i = \sum_{j=1}^{K} w_j \cdot x_{ij}^{norm} . \qquad (4)$$

Линейная нормировка позволяет сохранить физический смысл различий между альтернативами, не искажая пропорции, что характерно для нелинейных методов нормировки. Нормированные значения оценок альтернатив по критериям, рассчитанные по формулам (2) и (3), приведены в табл. 3.

Таблица 3. Нормированные значения оценок

Альтернатива	**Критерий**					
	С1	С2	С3	С4	С5	С6
10Х9МФБ-Ш	0	0	100	100	91	50
Т91	0	0	100	43	100	50
Т92	31	25	100	29	79	0
Super304H	100	100	0	0	0	100

Результаты и анализ чувствительности. Итоговые интегральные рейтинги, определённые по формуле (4), приведены в табл. 4.

Таблица 4. Интегральные рейтинги альтернатив

Альтернатива	**Интегральный рейтинг R**
10Х9МФБ-Ш	46,1
Т91	33,7
Т92	40,7
Super304H	53,8

На рис. 3 представлена столбчатая диаграмма, на которой виден вклад каждого критерия в итоговый интегральный рейтинг каждой альтернативы.

В базовом сценарии (приоритет прочности) лидирует сталь Super304H (53,8 балла). Это объясняется её физическим превосходством в жаропрочности.

Детальный анализ полученных рейтингов позволяет выделить ключевые факторы конкурентоспособности. Сравнение сталей T91 и T92 показывает, что легирование вольфрамом обеспечивает стали T92 заметное преимущество над T91 (40,7 против 33,7 баллов) за счёт доминирующего критерия жаропрочности. Однако даже улучшенных характеристик T92 недостаточно для конкуренции с лидерами рейтинга: T92 существенно уступает аустенитной стали Super304H по жаропрочности, а отечественной 10Х9МФБ-Ш – по доступности и стоимости. Таким образом, сталь T92 не располагает уникальными преимуществами, которые оправдали бы её выбор.

Сравнение пары 10Х9МФБ-Ш и Super304H демонстрирует конфликт «надёжность поставок против технического совершенства». Аустенитная сталь Super304H выигрывает за счёт подавляющего превосходства оценок по критерию жаропрочности C1 (вес 0,408), однако имеет нулевые оценки по доступности и стоимости. Это делает её применение рискованным для проектов с жёсткими бюджетными и временными ограничениями, характерными для текущей программы модернизации ТЭС [1, 11].

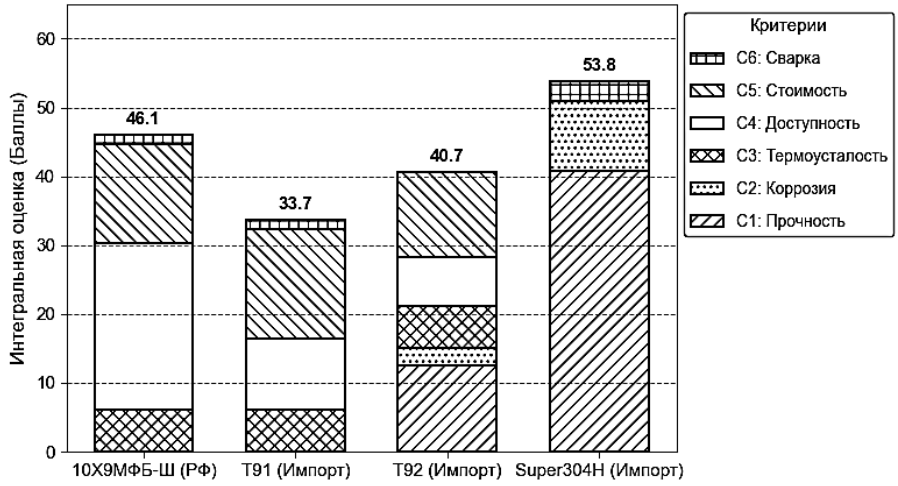

Рис. 3. Столбчатая диаграмма вкладов каждого критерия в итоговый интегральный рейтинг альтернатив

Стоит отметить, что представленный результат является «статичным» и не учитывает динамику внешних факторов. Чтобы это учесть, необходимо провести анализ чувствительности принятых решений к изменению таких факторов. В качестве варьируемого параметра при анализе чувствительности был выбран вес критерия C4 «Доступность». Данный выбор обусловлен тем, что именно этот фактор характеризуется наивысшей степенью неопределенности в текущих макроэкономических условиях, тогда как технические приоритеты (жаропрочность, коррозионная стойкость) остаются относительно стабильными (рис. 4).

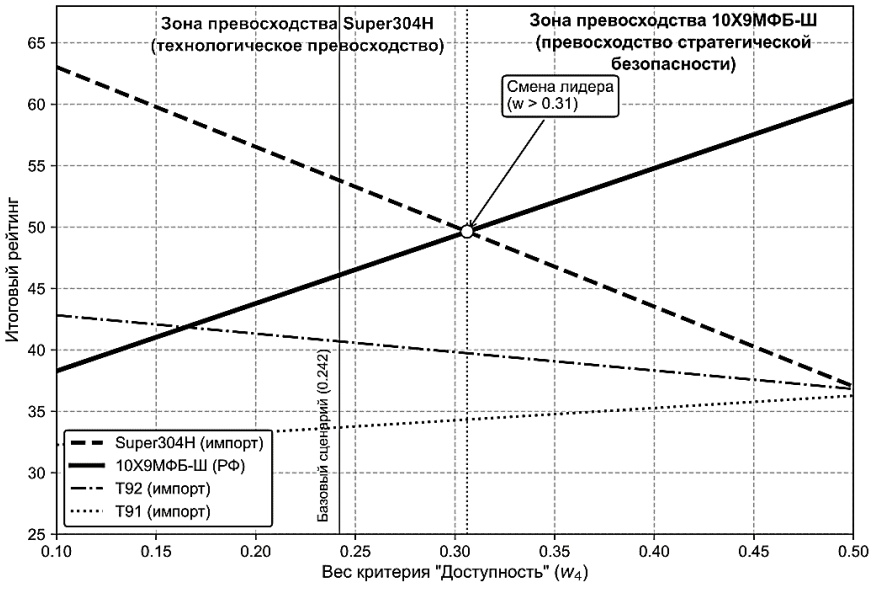

Рис. 4. Анализ чувствительности решения к изменению веса критерия «Доступность»

Анализ показывает, что лидерство импортной стали Super304H является неустойчивым. Точка смены лидера находится при значении веса критерия «Доступность» равном 0,31. Это означает, что при повышении значимости фактора надёжности поставок (стратегической безопасности) более чем на 7 % относительно базового сценария, оптимальным выбором становится отечественная сталь 10Х9МФБ-Ш.

Следует отметить, что альтернативы Т91 и Т92 во всех сценариях занимают проигрышные позиции и являются неконкурентоспособными в текущих экономических условиях.

Заключение. В работе обоснована необходимость смены парадигмы выбора конструкционных материалов для энергоблоков СКП/УСКП. Показано, что традиционный подход, опирающийся на ретроспективный опыт и однокритериальные расчёты длительной прочности, становится неэффективным в условиях конкуренции различных классов сталей (мартенситных и аустенитных) и возрастания роли нетехнических факторов (логистика, маневренность).

Разработан научно-методический подход (алгоритм) выбора материала с применением известного метода SMARTER. Предложенный алгоритм позволяет формализовать слабоструктурированную задачу выбора, обеспечивая корректную агрегацию противоречивых критериев: физико-механических свойств, стоимости жизненного цикла и стратегических рисков.

В базовом сценарии проектирования (приоритет технических характеристик) лидером рейтинга является аустенитная сталь Super304H (53,8 балла). Стали Т91 и Т92, несмотря на широкую распространённость, показали свою неконкурентоспособность в рамках принятой модели, уступая лидерам во всех рассмотренных сценариях.

Анализ чувствительности выявил, что при повышении значимости критерия «Доступность» выше порогового значения 0,31 (что характерно для текущих условий импортозамещения), в лидеры выходит отечественная сталь 10Х9МФБ-Ш. Её применение минимизирует риски реализации проектов модернизации ТЭС, обеспечивая при этом достаточный уровень надёжности в маневренных режимах.

Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года : утв. распоряж. Правительства Российской Федерации от 12 апр. 2025 г. № 908-р. М. : Правительство Российской Федерации, 2025. [Электронный ресурс]. – URL: http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYlA60.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
2. Сомова Е.В. и др. Современные угольные энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 2. С. 5–23. DOI: 10.56304/S0040363623020066
3. Lew D. Impacts of Wind and Solar on Fossil-Fueled Generators : conference paper / D. Lew, G. Brinkman, N. Kumar, P. Besuner, D. Agan, S. Lefton. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2012. 8 p. (NREL/CP-5500-53504). [Электронный ресурс]. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/53504.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
4. Радин Ю.А. Повышение маневренности и надежности паросиловых энергоблоков ТЭС // Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 77–86. DOI: 10.1134/S0040363621060072.
5. Сердюков А.В. Основы безаварийной эксплуатации пароперегревателей котельных агрегатов. СПб. : АО «ГВЦ Энергетики», 2000. 80 с. : ил.
6. Белобородов С.С. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества : монография / С.С. Белобородов, Е.Г. Гашо, А.В. Ненашев. СПб. : Наукоёмкие технологии, 2021. 151 с. ISBN 978-5-6047314-3-7. [Электронный ресурс]. URL: https://publishing.intelgr.com/archive/VIE-i-vodorod-v-enegosisteme.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
7. Eser P. Effect of increased renewables generation on operation of thermal power plants / P. Eser, A. Singh, N. Chokani, R.S. Abhari // Applied Energy. 2016. Vol. 164, iss. 2. P. 723–732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.017.
8. Abang R. Impact of increased power plant cycling on the oxidation and corrosion of coal-fired superheater materials / R. Abang, S. Weiß, H.J. Krautz // Fuel. 2018. Vol. 220. P. 521–534. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.047. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236118302060 (дата обращения: 27.11.2025).
9. Рогалев А.Н. Разработка научно-методологических основ создания перспективных высокотемпературных энергетических комплексов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01, 05.04.12 / Рогалев Андрей Николаевич. М., 2018. 366 с.
10. ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям : утвержден Приказом Росстандарта от 20.12.2022 № 3227. Введ. 2023-03-01. М. : Бюро НДТ, 2022.
11. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года : утв. распоряж. Правительства Российской Федерации от 30 дек. 2024 г. № 4153-р. М. : Правительство Российской Федерации, 2024. [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/Rwf9Akjf5FwAnustDEL2m7PEvZ26i7k3.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
12. Трякина Н.Ю. Деградация структуры и изменение механических свойств металла пароперегревателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Трякина Надежда Юрьевна ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2010. 181 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.dissercat.com/content/degradatsiya-struktury-i-izmenenie-mekhanicheskikh-svoistv-metalla-paroperegrevatelei (дата обращения: 27.11.2025).
13. СТО 17230282.27.100.005–2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования : стандарт организации : утвержден и введен в действие Приказом ОАО РАО «ЕЭС России» от 30.06.2008 № 329. М., 2008. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830863.pdf (дата обращения: 28.11.2025).
14. Тхабисимов А.Б. Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / Тхабисимов Александр Борисович. М., 2016. 179 с.
15. Деменин М.Ф. Методы предотвращения трещин IV типа в сварных соединениях жаропрочных высокохромистых сталей мартенситного класса // Электрические станции. 2021. № 8. [Электронный ресурс]. URL: http://elst.energy-journals.ru/index.php/elst/article/view/1538 (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.34831/EP.2021.1081.8.002

16. Капуткина Л.М. Высокотемпературная прочность аустенитных азотистых коррозионно-стойких Cr-Ni-Mn-сталей с добавкой меди / Л.М. Капуткина, А.Г. Свяжин, И.В. Смарыгина, В.Э. Киндоп // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 3 (753). С. 26–32. [Электронный ресурс]. – URL: https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-mito%2F2018%2F3-688868506 (дата обращения: 27.11.2025).
17. Weiss J.W. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility / J. W. Weiss, D.J. Weiss (eds) // A Science of Decision Making: The Legacy of Ward Edwards. New York : Oxford University Press, 2008. P. 409–421. URL: https://academic.oup.com/book/25378/chapter-abstract/192492481?redirectedFrom=fulltext&login=false. (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195322989.003.0031
18. Edwards W. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement / W. Edwards, F. H. Barron // Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1994. Vol. 60. Pp. 306–325. DOI: 10.1006/obhd.1994.1087.
19. Barron F. H. The Efficacy of SMARTER – Simple Multiattribute Rating Technique Extended to Ranking / F.H. Barron, B.E. Barrett // Acta Psychologica. 1996. Vol. 93, iss. 1–3. P. 23–36. DOI: 10.1016/0001-6918(96)00010-8.
20. Putri N.P. M.E. Decision Making Model for Temple Revitalization in Bali Using Fuzzy-SMARTER Combination Method / N.P.M.E. Putri, I.G.I. Sudipa, I.K. A.G. Wiguna [и др.] // Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika. 2024. Vol. 8, № 1. P. 61–74. DOI: 10.33395/sinkron.v9i1.13177. – e-ISSN 2541-2019 ; p-ISSN 2541-044X.
21. Lakicevic M. Combining AHP and Smarter in Forestry Decision Making / M. Lakicevic, B. Srdjevic, I. Velichkov // Baltic Forestry. 2018. Vol. 24, no. 1. P. 42–49.
22. Dolan J.G. Multi-criteria clinical decision support: A primer on the use of multiple criteria decision making methods to promote evidence-based, patient-centered healthcare // Patient. 2010. Vol. 3, № 4. P. 229–248. DOI: 10.2165/11539470-000000000-00000.
23. Farida I.N. Sensitivity analysis of the SMARTER and MOORA methods in decision making of achieving students / I.N. Farida, U. Mahdiyah, A.F.H. Setiawan // Jurnal Infotel. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 168–173. DOI: 10.20895/infotel.v14i3.751.
24. Зорченко Н.В. Участие ТЭС в регулировании частоты и мощности / Н.В. Зорченко, А.Г. Чаплин, М.Ф. Павлова, М.Е. Паршутин // Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 94–102. DOI: 10.1134/S0040363621060126.

References

1. Energy Strategy of the Russian Federation through 2050: approved by the Order of the Government of the Russian Federation of April 12, 2025, No. 908-r. – Moscow: Government of the Russian Federation, 2025. – [Electronic resource]. – URL: http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYlA60.pdf (date accessed: 27.11.2025).
2. Somov E.V., et al. Modern coal-fired power units with ultra-supercritical steam parameters (review) // Heat and Power Engineering. 2023. No. 2. pp. 5–23. DOI: 10.56304/S0040363623020066
3. Lew D. Impacts of Wind and Solar on Fossil-Fueled Generators : conference paper / D. Lew, G. Brinkman, N. Kumar, P. Besuner, D. Agan, S. Lefton. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2012. 25 p. (NREL/CP-5500-53504). – [Electronic resource]. – URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/53504.pdf (date accessed: 27.11.2025).
4. Radin Yu. A. Improving the maneuverability and reliability of steam power units of thermal power plants // Thermal Power Engineering. 2021. No. 6. pp. 77–86. DOI: 10.1134/S0040363621060072.
5. Serdyukov A.V. Fundamentals of Trouble-Free Operation of Boiler Unit Steam Superheaters. St. Petersburg: JSC GVC Energetiki, 2000. 80 p.: ill.
6. Beloborodov S.S. Renewable Energy Sources and Hydrogen in the Power System: Problems and Advantages: monograph / S.S. Beloborodov, E.G. Gasho, A.V. Nenashev. St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2021. 151 p. ISBN 978-5-6047314-3-7. [Electronic resource]. URL: https://publishing.intelgr.com/archive/VIE-i-vodorod-v-energosisteme.pdf (access date: November 27, 2025).
7. Eser P. Effect of increased renewables generation on operation of thermal power plants / P. Eser, A. Singh, N. Chokani, R.S. Abhari // Applied Energy. 2016. Vol. 164, iss. 2. P. 723–732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.017.
8. Abang R. Impact of increased power plant cycling on the oxidation and corrosion of coal-fired superheater materials / R. Abang, S. Weiß, H. J. Krautz // Fuel. 2018. Vol. 220. P. 521–534. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.047. [Electronic resource]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236118302060 (accessed: 27.11.2025).
9. Rogalev A.N. Development of scientific and methodological foundations for the creation of promising high-temperature energy complexes: dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.14.01, 05.04.12 / Rogalev Andrey Nikolaevich. M., 2018. 366 p.
10. ITS 38-2022. Fuel Combustion in Large-Scale Installations for Energy Production: Information and Technical Handbook on Best Available Technologies: approved by Order of Rosstandart dated 20.12.2022 No. 3227. Introduced 2023-03-01. Moscow: BAT Bureau, 2022.
11. General Layout of Electric Power Facilities until 2042: approved by Order of the Government of the Russian Federation dated 30 December 2024 No. 4153-r. Moscow: Government of the Russian Federation, 2024. [Electronic resource]. URL: http://static.government.ru/media/files/Rwf9Akjf5FwAnustDEL2m7PEvZ26i7k3.pdf (date accessed: 27.11.2025).
12. Tryakina N.Y. Degradation of the structure and change in the mechanical properties of the metal of superheaters: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.16.09 / Tryakina Nadezhda Yuryevna; Ufa State Petroleum Technological University. – Ufa, 2010. 181 p. [Electronic resource]. URL: https://www.dissercat.com/content/degradatsiya-struktury-i-izmenenie-mekhanicheskikh-svoistv-metalla-paroperegrevatelei (date of access: 27.11.2025).
13. STO 17230282.27.100.005–2008. Main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Monitoring of metal condition. Norms and requirements: organization standard: approved and put into effect by Order of JSC RAO UES of Russia dated June 30, 2008, No. 329. Moscow, 2008. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830863.pdf (accessed: November 28, 2025).
14. Tkhabisimov A.B. Increasing the abrasive resistance of the blade apparatus of the first stages of high- and medium-pressure cylinders of powerful steam turbines: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.04.12 / Tkhabisimov Alexander Borisovich. M., 2016. 179 p.
15. Demenin M.F. Methods for preventing type IV cracks in welded joints of heat-resistant high-chromium steels of the martensitic class // Electric Stations. 2021. No. 8. [Electronic resource]. URL: http://elst.energy-journals.ru/index.php/elst/article/view/1538 (date of access: 11/27/2025). DOI: 10.34831/EP.2021.1081.8.002
16. Kaputkina L.M. High-temperature strength of austenitic nitrogen corrosion-resistant Cr-Ni-Mn steels with the addition of copper / L.M. Kaputkina, A.G. Svyazhin, I.V. Smarigina, V.E. Kindop // Metallurgy and heat treatment of metals. 2018. No. 3. P. 26–32. [Electronic resource]. URL: https://bik.sfu-

kras.ru/elib/view?id=PRSV-mito%2F2018%2F3-688868506 (date of access: 11/27/2025).
17. Weiss J.W. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility / J.W. Weiss, D.J. Weiss (eds) // A Science of Decision Making: The Legacy of Ward Edwards. New York : Oxford University Press, 2008. P. 409–421. URL: https://academic.oup.com/book/25378/chapter-abstract/192492481?redirectedFrom=fulltext&login=false. (date accessed: 27.11.2025). DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195322989.003.0031
18. Edwards W. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement / W. Edwards, F. H. Barron // Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1994. Vol. 60. Pp. 306–325. DOI: 10.1006/obhd.1994.1087.
19. Barron F.H. The Efficacy of SMARTER – Simple Multiattribute Rating Technique Extended to Ranking / F.H. Barron, B.E. Barrett // Acta Psychologica. 1996. Vol. 93, iss. 1–3. P. 23–36. DOI: 10.1016/0001-6918(96)00010-8.
20. Putri N.P. M.E. Decision Making Model for Temple Revitalization in Bali Using Fuzzy-SMARTER Combination Method / N.P.M.E. Putri, I.G.I. Sudipa, I.K.A.G. Wiguna [etc.] // Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 61–74. DOI: 10.33395/sinkron.v9i1.13177. – e-ISSN 2541-2019; p-ISSN 2541-044X.
21. Lakicevic M. Combining AHP and Smarter in Forestry Decision Making / M. Lakicevic, B. Srdjevic, I. Velichkov // Baltic Forestry. 2018. Vol. 24, no. 1. P. 42–49.
22. Dolan J.G. Multi-criteria clinical decision support: A primer on the use of multiple criteria decision making methods to promote evidence-based, patient-centered healthcare // Patient. 2010. Vol. 3, No. 4. P. 229–248. DOI: 10.2165/11539470-000000000-00000.
23. Farida I.N. Sensitivity analysis of the SMARTER and MOORA methods in decision making of achieving students / I.N. Farida, U. Mahdiyah, A.F.H. Setiawan // Jurnal Infotel. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 187–194. DOI: 10.20895/infotel.v14i3.751.
24. Zorchenko N.V. Participation of TPPs in frequency and power regulation / N.V. Zorchenko, A.G. Chaplin, M.F. Pavlova, M.E. Parshutina // Thermal Power Engineering. 2021. No. 6. P. 94–102. DOI: 10.1134/S0040363621060126.