

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2127>***А. Д. Данияров**

Восточно-Казахстанский Технический университет

имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменногорск.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2733-8000>*e-mail: aldiyar.daniyarov.132000@gmail.com**ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ФУТЕРОВКИ**

Данная статья представляет собой анализ существующих проблем создания системы прогнозирования остаточного ресурса высокотемпературного термического оборудования. Значительный объем исследований рассматривают процессы теплопередачи, теплотехнического моделирования, разрушения футеровки, анализа эксплуатационных данных и прогнозирования остаточного ресурса разобщиено. Эта разобщиенность проявляется в отсутствии полного исследования, в котором будут учитываться все возможные факторы деградации футеровки в совокупности с учетом их взаимосвязи. Выявлено, что исследованиям, делающим акцент на классические теплоэнергетические модели, основанные на теплопроводности и анализе тепловых нагрузок, недостает практического аспекта и верификации на реальных объектах. Дефицитным компонентом является непостоянность и особенность реальных режимов эксплуатации оборудования. Опыт и информация, полученная непосредственно с высокотемпературного термического оборудования, может значительно отличаться от теоретических моделей, что подтверждает необходимость учета реальных эксплуатационных данных. Уделено особое внимание для перспектив в области интеграции теплотехнического моделирования с учетом данных систем мониторинга и режимов работы оборудования. Произведено обоснование для необходимости комплексного теплоэнергетического подхода к созданию модели прогнозирования остаточного ресурса футеровки, с учетом не только теоретических расчетов, но и эксплуатационной информации.

Ключевые слова: высокотемпературное оборудование; футеровка; температурные поля; температурный градиент; тепловые потоки; тепловые режимы; остаточный ресурс; теплоэнергетика.

Введение

Создание системы прогнозирования остаточного ресурса высокотемпературного термического оборудования – это исследование с получением экономической выгоды, при использовании разнообразного спектра информации, начиная от исследования футеровочного материала и заканчивая режимами работы оборудования, объединенного в одной диссертационной работе. Исследование имеет крайне полезные последствия, так как при создании системы прогнозирования остаточного ресурса надобность в периодических оценках состояния футеровки может полностью исчезнуть, ведь появится инструмент для отслеживания текущего состояния в электронном формате, что значительно будет экономить трудовые и финансовые затраты на амортизацию и капитальные ремонты высокотемпературного оборудования. Исчезнет необходимость в эмпирической оценке состояния футеровки.

В работе предлагается комплексный подход к прогнозированию остаточного ресурса высокотемпературного термического оборудования, основой которого является синтез эксплуатационных данных (давление, температура) оперативного мониторинга, свойств футеровочного материала и CFD моделирования теплоэнергетических явлений внутри оборудования.

Главная проблема эксплуатации печей. Наиболее востребованная проблема эксплуатации высокотемпературного термического оборудования является потеря изолирующего материала (футеровки) своих изоляционных свойств и дальнейшего разрушения под воздействием температурных полей разного градиента, тепловыми перегрузками, перегревами, имеющими локальный характер, а также сложными режимами работы оборудования [1]. Ниже на рисунке 1a можно увидеть вид печи пиролиза, на рисунке 1b – Змеевики и горелки в радиантной камере и на рисунке 1c – Расчетную область для CFD моделирования.

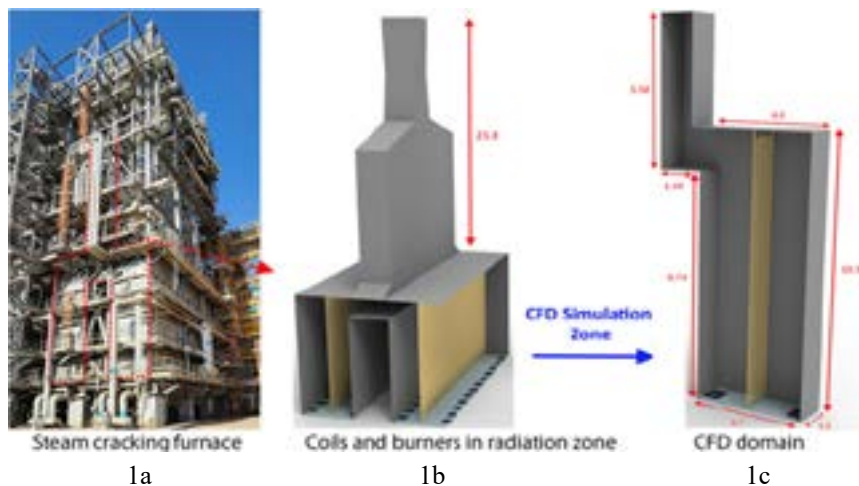


Рисунок 1а – Печь пиролиза [2]. Рисунок 1б – Змеевики и горелки в радиантной камере [2]. Рисунок 1с – Расчетная область для CFD моделирования [2].

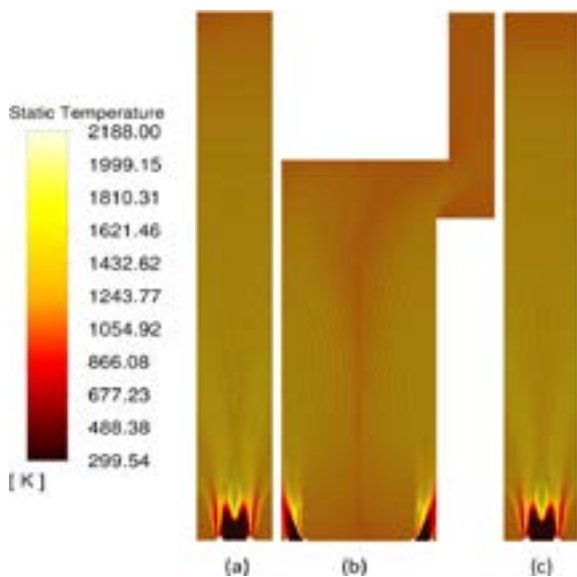


Рисунок 2 – CFD модель печи [2].

Яркий пример такого оборудования – металлургические печи, рабочая температура внутри которых может достигать до 1600 градусов цельсия. Такие режимы работы приводят к интенсивному теплообмену между расплавом, футеровкой и несущими конструкциями печи [3]. Разрушение целостности, старение футеровки повсеместная практика на любом предприятии, и следствием этого является рост тепловых потерь, увеличение энергозатрат печи, изменение тепловых режимов работы печи, а в самых запущенных случаях – аварийная ситуация [4]. В связи со всем вышеперечисленным оценка состояния футеровок печей и прогнозирование ее остаточного ресурса является крайне востребованной задачей для каждого предприятия. Оно имеет важное место как в технологическом аспекте, так и в аспектах теплоэнергетики и безопасности. Имеющиеся на данный момент исследования по прогнозированию остаточного ресурса имеют узкоспециализированный характер, ввиду их преимущественно эмпирических подходах, основанных на конкретные эксплуатационные условия [5,6]. Недостаточное внимание к теплоэнергетическим процессам и их влиянием на старение футеровочных материалов снижает достоверность и рентабельность моделей при изменении условий эксплуатации оборудования.

Футеровка для высокотемпературных термических агрегатов является незаменимой конструктивной частью, функцией которой является тепловая изоляция рабочего пространства, минимизация тепловых потерь и защита несущих конструкций от крайне высоких тепловых излучений. В режиме эксплуатации футеровка находится под постоянным тепловым давлением при разных режимах работы с различными тепловыми потоками.

Если рассматривать футеровку с теплоэнергетической стороны, то она является многослойной системой с функцией накопления и перераспределения температурных полей от рабочего пространства. Существенное воздействие на футеровку производят неравномерные тепловые потоки, вызванные особенностью оборудования, движением расплава, что в свою очередь формирует температурные градиенты и тепловые напряжения [7]. Особую роль в разрушении футеровки занимают температурные поля и температурные градиенты, формирование которых происходит непосредственно в многослойных футеровочных конструкциях [8]. Было установлена следующая взаимосвязь: локальные перепады температур и неравномерность тепловых потоков вызывают термическое напряжение, которое ускоряет процесс деградации материалов. Особое внимание следует уделять анализу тепловых потоков, проходящих непосредственно через футеровку. Показатель плотности теплового потока является ключевым в вопросе скорости накопления тепловых повреждений

и уменьшения эксплуатационного ресурса футеровочного материала [8]. Из этого следует, что температурные градиенты и тепловые потоки представляют собой особую ценность в качестве диагностических параметров состояния футеровки и будут крайне полезны для теплоэнергетического анализа высокотемпературных установок.

Также немаловажным фактором разрушения целостности футеровки является термическая усталость, вызванная циклическим нагревом и охлаждением рабочего тела оборудования. Следствием такого циклического перепада температуры являются микротрещины, изменение структуры и снижение теплоизоляционных свойств футеровки [9].

Тепловой баланс печи крайне нестабилен и пример исследований в этой области показывает его непосредственную связь с деградацией футеровки. Прямая зависимость представляет собой следующий вид: износ футеровки – увеличение тепловых потерь – изменение распределения температур в рабочем пространстве – изменение удельного расхода энергии на процесс плавки [10].

Резюмируя все вышесказанное, износ футеровки – это процесс, оказывающий прямое влияние на энергетическую эффективность, помимо вопросов надежности оборудования. В качестве примера износа футеровки был взят образец из металлургической электропечи. Ниже на рисунках 3а, 3б, 3с вы можете увидеть износ кирпича после капитального ремонта футеровки электропечи.



3а

3б

3с

Рисунок 3а – Фронтальный вид. Рисунок 3б – Вид слева.

Рисунок 3с – Вид сверху.

Материалы и методы

Ключевые задачи для построения модели прогнозирования остаточного ресурса.

1. Лабораторные исследования футеровочных материалов в контексте тепловых нагрузок. Исследование футеровочного материала является одной

из главных задач для оценивания остаточного ресурса, а также для оценки его поведения при условии высоких температур. Особым значением обладают исследования с теплофизической и тепломеханической направленностью [1]. Ниже приведены базовые направления лабораторных исследований для футеровочных материалов:

- Исследования на теплопроводность при повышенных температурах. В процессе эксплуатации оборудования теплопроводность футеровки имеет свойство изменяться вследствие роста пористости, фазовых превращений и накопления микрповреждений, что является источником нарушения теплового баланса агрегата [11].

- Исследования термостойкости и термической усталости. Лабораторные испытания футеровочного материала на термоциклирование дают возможность для оценки устойчивости футеровки к таким нагрузкам, хоть и проводятся в упрощённых условиях и не учитывают реальную нестационарность тепловых режимов промышленной эксплуатации [12].

- Исследования коэффициента линейного теплового расширения и модуля упругости при высоких температурах. Со стороны теплоэнергетики эти параметры определяют устойчивость футеровки к влиянию температурных градиентов и её способность сохранять теплоизоляционные свойства в течение определенного промежутка времени [13, 14].

Результаты лабораторных исследований футеровочных материалов часто рассматриваются изолированно от реальных условий эксплуатации печей. При этом тепловые режимы в промышленных агрегатах характеризуются значительной пространственной и временной неравномерностью, наличием локальных перегревов и кратковременных тепловых перегрузок. Без учёта этих факторов лабораторные данные не позволяют достоверно оценить скорость деградации футеровки и её остаточный ресурс [9].

2. CFD-моделирование высокотемпературного термического оборудования

При помощи теплотехнического моделирования исследуются распределение температур, тепловые потоки, тепловые потери через футеровку и корпус, а также влияние режимов эксплуатации на энергетическую эффективность оборудования. В условиях высоких температур и интенсивного тепловыделения аналитические методы, как правило, оказываются недостаточными, что обуславливает широкое применение численных методов расчёта [15].

Наиболее распространённым подходом к анализу тепловых процессов в металлургических печах является CFD-моделирование. В рамках таких моделей рассчитываются температурные поля в расплаве, газовой фазе и

футеровке, а также распределение тепловых потоков на границе раздела сред. Это позволяет выявлять зоны повышенных тепловых нагрузок и оценивать влияние конструктивных и режимных факторов на тепловое состояние печи. Несмотря на высокую информативность CFD-моделей, большинство существующих исследований ориентировано на анализ краткосрочных или квазистационарных режимов работы печей. Как правило, моделирование проводится для фиксированных условий эксплуатации и не учитывает длительную историю тепловых нагрузок, накопление тепловых повреждений и изменение теплофизических свойств футеровки в процессе износа [16]. В результате CFD-модели используются главным образом для оптимизации технологических параметров, а не для оценки долговременной надёжности оборудования.

С точки зрения теплоэнергетики особый интерес представляет возможность использования результатов теплотехнического и CFD-моделирования для оценки теплового состояния футеровки и прогнозирования её деградации.

3. Системы мониторинга, большие данные и цифровые двойники высокотемпературных печей

С точки зрения теплоэнергетики эксплуатационные данные представляют особую ценность, поскольку позволяют анализировать не только установившиеся, но и переходные и аварийные режимы работы печей. Температурные временные ряды, получаемые с термодатчиков, содержат информацию о колебаниях тепловых потоков, локальных перегревах и неравномерности температурных полей, которые невозможно в полной мере воспроизвести в рамках лабораторных или краткосрочных численных исследований [17].

В существующих исследованиях цифровые двойники металлургических печей, как правило, ориентированы на контроль технологического процесса и повышение производительности. При этом вопросы деградации футеровки и оценки её остаточного ресурса рассматриваются фрагментарно либо не учитываются вовсе. В большинстве случаев состояние футеровки оценивается косвенно, на основе предельных температур или визуальных осмотров, без учёта накопленного теплового воздействия и истории эксплуатации.

Прогнозирование остаточного ресурса футеровки является сложной научно-технической задачей, обусловленной многофакторным характером процессов деградации и нестационарностью тепловых режимов эксплуатации. В существующих исследованиях данная задача решается с использованием различных подходов. Ниже в таблице 2 представлена классификация подходов к прогнозированию остаточного ресурса.

Таблица 2 – Подходы, методы и направления в прогнозировании остаточного ресурса.

Традиционные методы	Их основанием является использование усреднённых значений температуры, нормативного срока службы и результатов периодических осмотров. Такие подходы позволяют получить приблизительную оценку состояния футеровки, однако не учитывают реальной истории тепловых нагрузок, локальных перегревов и влияния нештатных условий эксплуатации [18].
Статистические и данные-ориентированные методы	Ряд исследований использует методы регрессионного анализа, анализа временных рядов и вероятностные модели, основанные на обработке данных мониторинга температур и других технологических параметров [6].
Методы машинного обучения и искусственного интеллекта	Используются нейронные сети, методы опорных векторов и алгоритмы, обученные на больших массивах эксплуатационных данных [5].
Методы, основанные на интеграции эксплуатационных данных, теплотехнических моделей и лабораторных характеристик футеровочных материалов.	Такой подход позволяет учесть не только статистические зависимости, но и физические механизмы накопления тепловых повреждений, связанные с температурными градиентами, тепловыми потоками и нестационарными режимами работы печей [16].

Существенным ограничением большинства существующих систем прогнозирования является недостаточный учёт теплотехнической природы процессов деградации футеровки. В большинстве случаев тепловые параметры используются как агрегированные показатели, без анализа пространственного распределения температур и тепловых потоков. Отсутствие связи прогнозных моделей с теплотехническими расчётами снижает достоверность оценки остаточного ресурса при изменении конструкции или эксплуатационных параметров печи [19]. Кроме того, значительная часть исследований сосредоточена на конкретных типах печей и материалов футеровки, что затрудняет перенос разработанных моделей на другие объекты. Использование фиксированного набора входных параметров и отсутствие обобщённых теплоэнергетических критериев износа ограничивают возможность масштабирования и адаптации таких систем [16]. В условиях промышленной эксплуатации, характеризующихся изменчивостью режимов и вариациями состава сырья, это является существенным недостатком.

Результаты и обсуждение

Проведённый анализ публикаций, посвящённых тепловым процессам в металлургических печах, свойствам футеровочных материалов и системам прогнозирования их остаточного ресурса, показывает, что на сегодняшний день сформировались несколько относительно самостоятельных направлений исследований. К ним относятся теплотехническое моделирование, экспериментальное изучение деградации футеровки и разработка данных-ориентированных систем прогнозирования ресурса. Несмотря на значительный объём выполненных работ, интеграция этих направлений остаётся недостаточной. Ниже на рисунке 4 представлена схема основных направлений исследований в области прогнозирования остаточного ресурса.



Рисунок 4 – Схема основных направлений в области прогнозирования остаточного ресурса.

В области моделирования теплотехнических процессов основное внимание уделяется расчёту температурных полей, тепловых потоков и гидродинамики расплава в печах различного типа. Подобные исследования позволяют глубоко изучить механизмы теплопередачи и энергоэффективность плавильных процессов, однако в большинстве случаев футеровка рассматривается в них как неизменный конструктивный элемент с постоянными теплофизическими свойствами [16]. Влияние деградации футеровки на тепловое состояние печи и обратная связь между тепловыми условиями и износом футеровочных материалов обычно не учитываются.

Экспериментальные исследования материалов футеровки направлены на изучение их термомеханических и химических свойств при высоких температурах. Полученные данные широко используются для выбора материалов и оценки их эксплуатационной стойкости. Однако результаты таких исследований носят локальный характер и слабо соотносятся с реальными условиями эксплуатации, характеризующимися нестационарными

тепловыми нагрузками, циклическими режимами и воздействием расплава [9]. Отсутствие связи между лабораторными данными и эксплуатационными тепловыми условиями ограничивает возможность использования этих результатов для прогнозирования остаточного ресурса футеровки.

В свою очередь, системы прогнозирования остаточного ресурса, основанные на анализе эксплуатационных данных и методах машинного обучения, демонстрируют высокий потенциал для практического применения. Однако большинство таких систем ориентировано на конкретные объекты и наборы данных, а их результаты сложно интерпретировать с точки зрения физических процессов теплопередачи и термического разрушения материалов [16]. Это приводит к тому, что при изменении условий эксплуатации или конструкции печи надёжность прогнозов существенно снижается.

Анализ литературных источников показывает, что в существующих исследованиях футеровка редко рассматривается как активный элемент теплоэнергетической системы, параметры которого изменяются во времени под воздействием тепловых потоков. В большинстве работ отсутствует единый теплоэнергетический критерий, связывающий эксплуатационные температурные условия, теплофизические свойства футеровки и скорость её деградации [8]. Именно этот аспект является ключевым с точки зрения теплотехники и определяет научный пробел в рассматриваемой области.

Выводы

Обобщая все вышесказанное можно сделать вывод об обширной изученности исследований в области проектирования системы оценки остаточного ресурса, однако, как показал анализ, хорошо проработанные модели зачастую не имеют учет эксплуатационной непостоянности режимов работы, что размывает точность полученных результатов. Имеют место и обратные примеры, в которых хорошая эксплуатационная составляющая исследования, в которой недостаточная теоретическая и экспериментальная база. Огромное количество статей, диссертаций, книг и работ посвящены каждому аспекту оценки остаточного ресурса, начиная от анализа футеровки, математического моделирования, CFD моделирования и заканчивая отлично работающими локальными системами. В статье произведен обзор самых важных для представления данных, таких как виды печей, теплоэнергетические процессы в печах, анализ существующих исследований, проблемы, задачи существующие подходы и методы. Это позволяет сделать вывод о том, что в данном направлении все еще есть место для внедрения новых подходов к проектированию моделей остаточного ресурса.

Самая приоритетная задача – выявление научной новизны планируемого исследования. В ходе анализа всего массива данных был предложен новый

подход для создания системы прогнозирования остаточного ресурса высокотемпературного термического оборудования. Подход проявлен в комплексном виде, при создании будущего проекта будут учтены все возможные сильные стороны существующих исследований. Основное отличие от существующих работ будет проявляться в многочисленном наборе данных для системы прогнозирования, начиная от лабораторных исследований футеровочного кирпича и заканчивая эксплуатационными данными печи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Routschka, G., Wuthnow, H.** Pocket Manual Refractory Materials : Design, Properties and Testing / Vulkan-Verlag GmbH, 2008. – 646 p. – ISBN 9783802731587.

2 **Fattahi, M., Ebrahimi, S., Rahimi, M., Gonbadi, M., Hosseini, S. H., Ahmadi, G.** Analyzing Burner Performance and Combustion Phenomenon in an Olefin Plant's Industrial Furnace: A CFD Study // ACS Omega, 2024, Vol. 9, No. 12, pp. 14500–14519. – <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00395>

3 **Luidold, S., Wenzl, C., Wagner, C., Sagadin, C.** High Temperature Corrosion Mechanisms of Refractories and Ferro-Alloy Slags // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts : Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016. Cham: Springer, 2016. P. 45–53. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_5.

4 **Aksel, C.** Mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite-zirconia and alumina-mullite refractory materials by slip casting // Ceramics International. 2003. Vol. 29, No. 3. P. 311–316. – [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00139-6).

5 **Leon-Medina, J. X., Camacho, J., Gutierrez-Osorio, C., Salomón, J. E., Rueda, B., Vargas, W., Sofrony, J., Restrepo-Calle, F., Pedraza, C., Tibaduiza, D.** Temperature Prediction Using Multivariate Time Series Deep Learning in the Lining of an Electric Arc Furnace for Ferronickel Production // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6894. – <https://doi.org/10.3390/s21206894>.

6 **Sadri, A., Tibbo, M., Naghizadeh, M., Climenhaga, B., Santini, R., Cornett, H., Watson, W., Ying, W., Kelly, L., Moodley, P., Sisya, T., Paraje, A.** Implementing Risk-Based Inspection (RBI) and Life Cycle Monitoring into Refractory Lining Management of Pyrometallurgical Furnaces // Proceedings of the 62nd Conference of Metallurgists, COM 2023. Cham: Springer, 2023. P. 625–629. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-38141-6_108.

7 **Schacht, C. A.** Refractories Handbook. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 512 p. – (Chapter 8: Thermomechanical Considerations for Refractory Linings). – ISBN 0-8247-5654-1.

8 **Никифоров, А., Приходько, Е.** Тепловые условия разрушения футеровок высокотемпературных установок : монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 252 с. – ISBN 978-3-659-64754-3.

9 **Luz, A. P., Santos, T., Medeiros, J., Pandolfelli, V. C.** Thermal shock damage evaluation of refractory castables via hot elastic modulus measurements // Ceramics International. 2013. Vol. 39, No. 6. P. 6189–6197. – <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.038>.

10 **Приходько, Е. В., Никифоров, А. С., Кинжибекова, А. К., Арипова, Н. М., Парамонов, А. М.** Методика оценки остаточного ресурса футеровок высокотемпературных агрегатов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18 – № 1. – С. 64-74.

11 ASTM C201-24. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories [Текст]. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2024. – 6 p. – <https://doi.org/10.1520/C0201-24>.

12 ASTM C1171-16(2022). Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and Thermal Cycling on Refractories. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – 3 p. – <https://doi.org/10.1520/C1171-16R22>.

13 ASTM E228-22. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – <https://doi.org/10.1520/E0228-22>.

14 ASTM C1198-20. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020. – 9 p. – <https://doi.org/10.1520/C1198-20>.

15 **Patankar, S. V.** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York : Hemisphere Publishing Corporation; McGraw-Hill, 1980. – xiii, 197 p. – (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences). – ISBN 0-07-048740-5. – ISBN 0-89116-522-3.

16 **Hu, Y., Tan, C. K., Broughton, J., Roach, P. A.** Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces // Applied Energy. – 2016. – Vol. 173. – P. 555–566. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.011>.

17 **Houde, J.-P., Hebel, R., de Oliveira, A. C.** True hearth lining wear as blast furnace campaign extension tool // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 4. – С. 87–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-87-93>.

18 **Гордон, Я. М., Садри, А., Миронов, К. В., Спирин, Н. А.** Развитие методов диагностики состояния футеровки доменных печей [Электронный ресурс] // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сборник докладов II Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ Юрия Гавриловича Ярошенко (Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 46–53. – ISBN 978-5-9908685-3-3. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/58399> (дата обращения: 08.02.2026).

19 **Damhof, F., Brekelmans, W. A. M., Geers, M. G. D.** Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – No. 12. – P. 2091–2105. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.005>.

REFERENCES

1 **Routschka, G., Wuthnow, H.** Pocket Manual Refractory Materials: Design, Properties and Testing. Vulkan-Verlag GmbH, 2008. – 646 p. – ISBN 9783802731587.

2 **Fattahi, M., Ebrahimi, S., Rahimi, M., Gonbadi, M., Hosseini, S. H., Ahmadi, G.** Analyzing Burner Performance and Combustion Phenomenon in an Olefin Plant's Industrial Furnace: A CFD Study // ACS Omega. – 2024, vol. 9. – № 12. – P. 14500–14519. – <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00395>.

3 **Luidold, S., Wenzl, C., Wagner, C., Sagadin, C.** High Temperature Corrosion Mechanisms of Refractories and Ferro-Alloy Slags // In: Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016. – Cham: Springer, 2016. – P. 45–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_5.

4 **Aksel, C.** Mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite-zirconia and alumina-mullite refractory materials by slip casting // Ceramics International, 2003. – vol. 29. – № 3. – P. 311–316. – [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00139-6).

5 **Leon-Medina, J.X., Camacho, J., Gutierrez-Osorio, C., Salomón, J. E., Rueda, B., Vargas, W., Sofrony, J., Restrepo-Calle, F., Pedraza, C., Tibaduiza, D.** Temperature Prediction Using Multivariate Time Series Deep Learning in the Lining of an Electric Arc Furnace for Ferronickel Production. Sensors. – 2021. – vol. 21. – no. 20. – art. 6894. – <https://doi.org/10.3390/s21206894>.

6 **Sadri, A., Tibbo, M., Naghizadeh, M., Climenhaga, B., Santini, R., Cornett, H., Watson, W., Ying, W., Kelly, L., Moodley, P., Sisy, T., Paraje, A.** Implementing Risk-Based Inspection (RBI) and Life Cycle Monitoring into Refractory

Lining Management of Pyrometallurgical Furnaces // In: Proceedings of the 62nd Conference of Metallurgists, COM 2023. – Cham: Springer, 2023. – P. 625–629. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-38141-6_108.

7 **Schacht, C. A.** Refractories Handbook. New York : Marcel Dekker, 2004. – 512 p. (Chapter 8: Thermomechanical Considerations for Refractory Linings). – ISBN 0-8247-5654-1.

8 **Nikiforov, A., Prikhod'ko, E.** Teplovye usloviya razrusheniya futerovok vysokotemperaturnykh ustanovok [Thermal Conditions of Refractory Lining Failure in High-Temperature Installations]. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 252 p. – ISBN 978-3-659-64754-3.

9 **Luz, A. P., Santos, T., Medeiros, J., Pandolfelli, V. C.** Thermal shock damage evaluation of refractory castables via hot elastic modulus measurements // Ceramics International. – 2013. – vol. 39. – no. 6. – P. 6189–6197. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.038>.

10 **Prikhod'ko, E. V., Nikiforov, A. S., Kinzhibekova, A. K., Aripova, N. M., Paramonov, A. M.** Metodika otsenki ostatochnogo resursa futerovok vysokotemperaturnykh agregatov [Methodology for Assessing the Residual Life of Refractory Linings of High-Temperature Units] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2025. – vol. 18. – no. 1. – P. 64–74.

11 ASTM C201-24. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. – 6 p. – <https://doi.org/10.1520/C0201-24>.

12 ASTM C1171-16(2022). Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and Thermal Cycling on Refractories. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – 3 p. – <https://doi.org/10.1520/C1171-16R22>.

13 ASTM E228-22. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – <https://doi.org/10.1520/E0228-22>.

14 ASTM C1198-20. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. – 9 p. – <https://doi.org/10.1520/C1198-20>.

15 **Patankar, S. V.** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation; McGraw-Hill, 1980. xiii. – 197 p. (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences). – ISBN 0-07-048740-5. – ISBN 0-89116-522-3.

16 Hu, Y., Tan, C. K., Broughton, J., Roach, P. A. Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces // Applied Energy. – 2016. – vol. 173. – P. 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.011>.

17 Houde, J.-P., Hebel, R., de Oliveira, A. C. True hearth lining wear as blast furnace campaign extension tool // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2017. – vol. 15. – no. 4. – P. 87–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-87-93>.

18 Gordon, Ya. M., Sadri, A., Mironov, K. V., Spirin, N. A. Razvitiye metodov diagnostiki sostoyaniya futerovki domennykh pechey [Development of Diagnostic Methods for the Condition of Blast Furnace Lining] // In : Sovremennyye nauchnye dostizheniya metallurgicheskoy teplotekhniki i ikh realizatsiya v promyshlennosti: sbornik dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki i tekhniki RF Yuriya Gavrilovicha Yaroshenko (Ekaterinburg, 18–21 sentyabrya 2017 g.). – Ekaterinburg: UrFU, 2018. – P. 46–53. – ISBN 978-5-9908685-3-3. [Electronic resource]. – URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/58399> (Accessed 08.02.2026).

19 Damhof, F., Brekelmans, W. A. M., Geers, M. G. D. Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations // Journal of Materials Processing Technology, 2011. – vol. 211. – no. 12. – P. 2091–2105. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.005>.

Поступило в редакцию 06.04.26.

Поступило с исправлениями 23.04.26.

Принято в печать 09.06.26.

**А. Д. Данияров*

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

06.04.26 ж. баспаға түсті.

23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

09.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ОТЫНДЫ ҚАПТАМАНЫҢ ҚАЛДЫҚ РЕСУРСЫН БАҒАЛАУ ҮШІН ЖЫЛУТЕХНИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ МЕН МОНИТОРИНГ ДЕРЕКТЕРІН БІРІКТІРУ

Бұл мақала жогары температуралы термиялық жабдықтың қалдық ресурсын болжау жүйесін құрудың қолданыстағы мәселелеріне талдау жасайды. Зерттеулердің едәуір бөлігі жылу беру процестерін,

жылу техникалық модельдеуді, футеровканың бұзылуын, пайдалану деректерін талдауды және қалдық ресурсты болжауды бөлек қарастырады. Бұл бөлектік футеровканың деградациясының барлық ықтимал факторларын олардың өзара байланысын ескере отырып, жиынтықта қамтитын толық зерттеудің болмауында көрінеді. Жылу өткізгіштік пен жылу жүктемелерін талдауға негізделген классикалық жылу энергетикалық үлгілерге баса назар аударатын зерттеулерге практикалық аспект және нақты объектілерде верификациялау жетіспейтіні анықталды. Тапшы компонент – жабдықты пайдаланудың нақты режимдерінің тұрақсыздығы мен ерекшелігі. Жоғары температуралы термиялық жабдықтан тікелей алынған тәжірибе мен ақпарат теориялық үлгілерден айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін, бұл нақты пайдалану деректерін ескеру қажеттілігін растайды. Мониторинг жүйелерінің деректері мен жабдықтың жұмыс режимдерін ескере отырып, жылу техникалық модельдеуді интеграциялау саласындағы перспективаларға ерекше назар аударылды. Футеровканың қалдық ресурсын болжау моделін құру үшін тек теориялық есептеулерді ғана емес, сонымен қатар пайдалану ақпаратын да ескеретін кешенді жылу энергетикалық тәсілдің қажеттілігі негізделген.

Кілтті сөздер жоғары температуралы жабдық; футеровка; температура өрістері; температура градиенті; жылу ағындары; жылу режимдері; қалдық ресурс; жылу энергетика.

**A. D. Daniyarov*

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

Received 06.04.26.

Received in revised form 23.04.26.

Accepted for publication 09.06.26.

INTEGRATION OF THERMAL ENGINEERING MODELING AND MONITORING DATA FOR ASSESSING THE RESIDUAL LIFE OF REFRACTORY LINING

This article presents an analysis of the existing problems in creating a system for predicting the residual resource of high-temperature thermal equipment. A significant body of research examines the processes of heat transfer, thermal engineering modeling, lining failure, analysis of

operational data, and residual life prediction in a disjointed manner. This disjointedness manifests itself in the absence of a comprehensive study that would take into account all possible factors of lining degradation in combination with their interrelationship. It is revealed that studies focusing on classical thermal power models based on thermal conductivity and analysis of thermal loads lack a practical aspect and verification on real facilities. The deficient component is the instability and peculiarity of actual equipment operating conditions. Experience and information obtained directly from high-temperature thermal equipment may differ significantly from theoretical models, which confirms the need to take real operational data into account. Special attention is paid to the prospects in the field of integrating thermal engineering modeling with consideration of data from monitoring systems and equipment operating modes. A justification is provided for the necessity of an integrated thermal power approach to creating a model for predicting the residual life of the lining, taking into account not only theoretical calculations but also operational information.

Keywords: high-temperature equipment; lining; temperature fields; temperature gradient; heat flows; thermal modes; residual resource; thermal power engineering.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz