



Д. Серікбаев
атындағы
Шығыс Қазақстан
мемлекеттік техникалық
университетінің

ХАБАРШЫСЫ



ВЕСТНИК

Восточно-Казахстанского
государственного технического
университета
имени
Д. Серикбаева

Регистрационный № 145-ж

№ 3 (85), сентябрь, 2019

Основан в 1998 году

Выходит 4 раза в год

Ғылыми журнал

Д. Серікбаев атындағы
Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық
университетінің

ХАБАРШЫСЫ



ВЕСТНИК

Восточно-Казахстанского
государственного технического университета
им. Д. Серикбаева

Научный журнал



Бас редакторы – Главный редактор

Ж.К. Шаймарданов

доктор биологических наук, профессор

Редакция алқасы – Редакционная коллегия:

Заместитель главного редактора:

О.Д. Гавриленко, канд. геол.-мин. н.

Ответственный секретарь – О.Н. Николаенко

Члены коллегии:

Абрахам Атта Огву, профессор (Великобритания)

Д.Л. Алонцева, к.ф-м н., профессор (Казахстан)

Ю.В. Баталов, д.э.н., профессор (Казахстан)

Бешо Масахико, Dг.PhD, профессор (Япония)

Е.В. Блиная, к.т.н., доцент (Казахстан)

Ю.А. Веригин, д.т.н., профессор (Казахстан)

М.В. Дудкин, д.т.н., профессор (Казахстан)

Б.А. Дьячков, д.г.-м.н., профессор (Казахстан)

Н.К. Ердыбаева, д.ф.-м.н. (Казахстан)

Т.Т. Ипалаков, д.т.н., профессор (Казахстан)

В.А. Кескинов, к.т.н., доцент (Россия)

Е.А. Колос, д.э.н., доцент (Казахстан)

В.П. Колпакова, д.т.н., доцент (Казахстан)

К.К. Комбаев, Dг.PhD (Казахстан)

Н.А. Куленова, к.т.н., асс. профессор (Казахстан)

Г.В. Кустарев, к.т.н., профессор (Россия)

С.В. Мамяченков, д.т.н., профессор (Россия)

О.А. Манцуров, полковник (Казахстан)

М.А. Мизерная, к.г.-м.н., доцент (Казахстан)

С.И. Миргородский, к.т.н., доцент (Казахстан)

М. Млынчак, Dг. hab, профессор (Польша)

Ж.С. Оналбаева, Dг.PhD (Казахстан)

С.В. Плотников, д.ф.-м.н., профессор (Казахстан)

А.Д. Погребняк, д.ф.-м.н., профессор (Украина)

Н.В. Прохоренкова, Dг.PhD (Казахстан)

М.А. Саденова, к.х.н., доцент (Казахстан)

Я. Стрычек, Dг. hab, профессор (Польша)

Б.В. Сырнев, д.т.н., профессор (Казахстан)

З.К. Тунгушбаева, к.т.н. (Казахстан)

Г.К. Уазырханова, Dг.PhD (Казахстан)

Н.А. Чарыков, д.х.н., профессор (Россия)

В.Ю. Чернавин, к.т.н., профессор (Казахстан)

Ю.Н. Шапошник, д.т.н., профессор (Россия)

ISSN 1561- 4212

© Восточно-Казахстанский
государственный технический
университет им. Д. Серикбаева,
2019

References

1. Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F. Consolidation phenomena in laser and powder bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*. 2007. no. 56. – pp. 730-759.
2. Vandenbroucke, B., Kruth, J.P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2007. no. 13. – pp. 196-203.
3. Concept Laser. *Concept Laser GmbH* [online]. [viewed 2018-03-28]. Available from: https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_20ES.pdf.
4. Pogrebnyak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Yakushchenko, I. V., Beresnev, V. M. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Russian Chem. Reviews*. 2014. no. 83. – pp. 1027-1061.
5. Gu, D. D., Shen, Y. F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods. *Materials and Design*. 2009. no. 30. pp. 2903–2910.
6. Hofmeister, W., Griffith, M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing. *Jom*. 2001. no. 53. – pp. 30-34.
7. Gu, D. D., Shen, Y. F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder. *Journal of alloys and compounds*. 2007. no. 432. – pp. 163–166.
8. Shishkovskiy, I.V. Ispolzovanie selektivnogo lazernogo spekaniya v lite po vyiplavlyaemyim modelyarnykh/Liteynoe proizvodstvo. 1999. no. 7. pp. 19-22.
9. Pogrebnyak, A.D., Ivashchenko, V.I. A new type of (TiZrNbTaHf)N/ MoN nanocomposite coating: Microstructure and properties depending on energy of incident ions. *Composites Part B*. 2018. vol. 142. – pp. 85-94.

Получено 18.06.2019

ГРНТИ 44.31.35

А.С. Никифоров, Е.В. Приходько, А.К. Кинжибекова, А.Е. Карманов, Ш.М. Шупеева
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ФУТЕРОВОК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ**

В статье рассматривается характер и механизм разрушений футеровок высокотемпературных агрегатов. Приведены статистические данные по их работе, по результатам анализа которых определены основные причины вывода оборудования в ремонт, аварийные ситуации и т.д.

Мақалада ;оғары температуралы агрегаттардың футеровкаларының бұзылуының сипаты мен механизмі қарастырылады. Олардың жұмысы бойынша статистикалық мәліметтер келтірілген, талдау нәтижелері бойынша жабдықтарды жөндеуге шығарудың негізгі себептері, авариялық жағдайлар және т.б. анықталған.

The article discusses the nature and mechanism of destruction of linings of high-temperature units. The statistical data on their work are given, according to the results of the analysis of which the main reasons for equipment withdrawal for repair, emergencies, etc. are identified.

Ключевые слова: футеровка, высокотемпературные агрегаты, разрушение, разогрев.

В настоящее время в различных отраслях промышленности широко применяются промышленные печи различного назначения, сушильные установки, теплосиловые установки, имеющие в конструкции футеровку.

В процессе эксплуатации оборудования футеровка рассматриваемых агрегатов разрушается и подлежит ремонту. С учётом того, что затраты на огнеупорные материалы значительно сказываются на стоимости конечного продукта, возникает необходимость применения инновационных технологий для снижения удельного расхода огнеупоров на единицу выпускаемой продукции посредством разработки технологических режимов сушки, разогрева и охлаждения агрегатов.

Основными причинами, приводящими к разрушению огнеупорной защиты печей, являются: а) сколы элементов огнеупорного кирпича; б) вспучивание футеровки; в) химическое взаимодей-

ствие между обрабатываемым материалом и поверхностью футеровки; г) абразивное истирание огнеупорной поверхности. Степень влияния указанных причин на стойкость футеровки проявляется по-разному в зависимости от места нахождения рассматриваемой зоны печи.

Кроме того, в результате вращения печи, деформаций поперечного и продольного изгиба, появления скручивания при пуске и остановке высокотемпературных агрегатов футеровка испытывает значительные знакопеременные механические напряжения. Необходимо также отметить, что современные мощные вращающиеся печи работают под открытым небом, например в г. Павлодаре (Республика Казахстан) и в г. Ачинске (Российская Федерация), т.е. эксплуатируются в сложных климатических условиях, что также влияет на надежность работы этих агрегатов.

Рассмотрим тепловую работу футеровки вращающихся печей на примере печей спекания и кальцинации глинозёмного производства. Эти печи можно условно разделить на 4 зоны.

В печах кальцинации: первая зона – зона сушки, где удаляется влага, гидрат нагревается до 200 °С, в то время как газы охлаждаются от 500 до 300-200 °С; вторая зона – зона обезвоживания, в которой гидрат превращается при 900 °С в гамма-модификацию ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), а газы соответственно охлаждаются от 1050 до 600 °С; третья зона – зона прокаливания, где температура среды составляет 1250 °С, а гамма-модификация частично переходит в альфа-модификацию ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Объем исходного продукта уменьшается примерно на 13 %, а твердость повышается, что усиливает абразивное воздействие глинозема на футеровку; четвертая зона – зона охлаждения, в которой материал охлаждается до 1100 °С и затем ссыпается в холодильник.

В печах спекания перерабатывается шихта из смеси красного шлама, известняка и соды. Здесь первая зона – зона сушки и подогрева сырья с температурой порядка 500 °С; вторая зона – зона кальцинирования, где температура среды достигает 900 °С; третья зона – зона спекания, где температура возрастает до своего максимального значения 1100-1250 °С; в четвертой зоне полученный спек начинает охлаждаться. Отходящие из печи газы имеют температуру порядка 250-350 °С.

Таким образом, по длине печи спекания существуют зоны, где материал претерпевает разные физические изменения и, соответственно, имеются различия в тепловой работе футеровки. Первая зона – сушки. Особенность этой зоны – невысокие температуры, вследствие чего спекание кладочного шва отстает по времени или не происходит совсем. Периодически, по мере вращения печи, на футеровку накатывается холодный материал из зоны пульпового факела, что вызывает охлаждение рабочей поверхности кирпича, а значит и линейную усадку, в связи с чем возможен отрыв кирпича от шва.

Зона кальцинации имеет наилучшие условия эксплуатации – кирпич по рабочей поверхности спечен со швами, зажатие умеренное, плотное. В зоне кальцинации существует объективный процесс, сокращающий срок службы футеровки – вырождение кирпича в верхней зоне из-за пропитывания шамота веществами шихты. Основной износ кладки происходит вследствие скалывания частей огнеупора из-за неудовлетворительного ведения процессов разогрева и охлаждения печи. Типичная картина разрушений футеровки – трещины, глубиной до 20-30 мм, длиной до 3,5-4 метров (рис. 4 а, б, в). На рис. 1 в показан скол огнеупора глубиной около 15 мм, длиной до 40 мм. В этой зоне сколы встречаются нечасто (около 2 сколов на 5 м²).



а



б



в

Рисунок 1 – Трещины в футеровке печи спекания

Футеровка в зоне спекания должна быть закрыта гарнисажем и износ огнеупоров должен быть минимальным. Проведённые обследования показали, что износ футеровки в зоне спекания обусловлен отсутствием гарнисажа, вследствие низкой степени стойкости шамота к щелочной жидкой фазе.

Второй составляющей износа является «прожог» футеровки. «Прожог» является результатом термохимического процесса износа шамота щелочными расплавами. На рис. 2 показан пример частичного «прожога» футеровки на термограмме внешней поверхности кожура зоны спекания.



Рисунок 2 – Внешняя поверхность печи спекания

Футеровка зоны охлаждения изнашивается быстрее вследствие, во-первых, циклических перепадов температур, вызванных вращением печи и попеременным воздействием спёка с температурой около 950 °С и воздуха с температурой 300 °С. Во-вторых, спёк содержит щелочную жидкую фазу, которая является причиной химического износа шамота. Это обуславливает разрушение огнеупоров в виде чешуйчатого скалывания кирпича.

Печь кальцинации в тепловом отношении во многом схожа с печами спекания. Остановимся кратко на особенностях её работы и проиллюстрируем износ футеровки фотографиями. Внутри печь на всю длину футерована огнеупорным шамотным кирпичом марки ШЦУ. На длине 60-65 м (со стороны загрузки) толщина футеровки 200 мм, на остальной длине – 230 мм.

Первая зона печи – зона сушки. В ней удаляется внешняя (физическая) влага гидрата, материал нагревается до 200-250 °С. Температура газов, поступающих в зону сушки – около 600 °С, на выходе – около 200-250 °С.

Далее расположена зона кальцинации, где из материала удаляется вся кристаллизационная (химическая) влага, а материал нагревается до 900–950 °С, при этом образуется глинозём гамма-модификации при температуре отходящих газов около 600 – 700 °С. На рис. 3 показана глубина пропитки шамотного огнеупора из зоны кальцинации, достигающая 15 мм.



Рисунок 3 – Глубина пропитки шамотного огнеупора из зоны кальцинации

Третья зона – зона прокали, в которой начинается активное образование альфа-модификации глинозёма. Температура глинозёма на выходе из зоны прокали – 1200 °С, температура газовой среды – 1300–1400 °С. Характерные разрушения футеровки этой зоны – редкие сколы и трещины (рис. 4).



Рисунок 4 – Состояние футеровки зоны прокали

Четвертая – зона охлаждения. В зоне охлаждения глинозем, находясь уже за топливным факелом, охлаждается до температуры 600÷900 °С. В этой зоне вследствие циклических температурных режимов, аналогичных печи спекания, имеет место износ футеровки в виде чешуйчатого скалывания (рис. 5).

Таким образом, стойкость футеровки вращающихся печей в большей степени зависит от перепадов температур, нежели от химического воздействия технологического материала. В связи с чем инструкцией по эксплуатации печей предусмотрены следующие меры по обеспечению долговечности кладки: правильный технологический ход печи и отсутствие её остановок.

Следует отметить, что футеровка вращающейся печи при каждом обороте корпуса подвергается воздействию сред с различными температурами – технологического материала и печной среды. Во время контакта с газовой средой при каждом обороте свечи температура футеровки повышается, а при контакте с обжигаемым материалом понижается. Амплитуда колебаний температуры поверхности футеровки достигает 40–100 °С, а число их составляет 1400 в сутки [1].



Рисунок 5 – Износ футеровки в виде чешуйчатого скалывания

При прочих равных условиях быстрее всего разрушается футеровка в печах, работающих на угле и мазуте. Примерно в 1,4-1,7 раза повышается стойкость футеровки при использовании газа. К главному фактору, обеспечивающему продолжительность сроков её службы, относится образование гарнисажа на поверхности футеровки в зоне спекания. При температуре 1300–1450 °С происходит частичное плавление сырьевой смеси, взаимодействие с материалом футеровки с образованием гарнисажа [2].

Средняя стойкость футеровки вращающихся печей составляет около 250 суток. Она определяется стойкостью зоны спекания. В других менее термонапряженных зонах стойкость составляет в среднем один-два года [1].

Анализ работы данных печей показал, что их футеровка выводится в капитальный ремонт в среднем один раз в год на срок 45 суток. Текущие ремонты составляют от 10 до 30 суток и проводятся один-два раза в год. При текущем ремонте производится замена 30 погонных метра футеровки; при капитальном ремонте кладка меняется полностью. Ежегодно проводится один капитальный ремонт или один-два текущих ремонта. Таким образом, средняя стойкость футеровки рассматриваемых печей составляет около 270 суток. На рис. 6 приведена статистика продолжительности ремонтных работ за последние четыре года на одной из печей спекания.

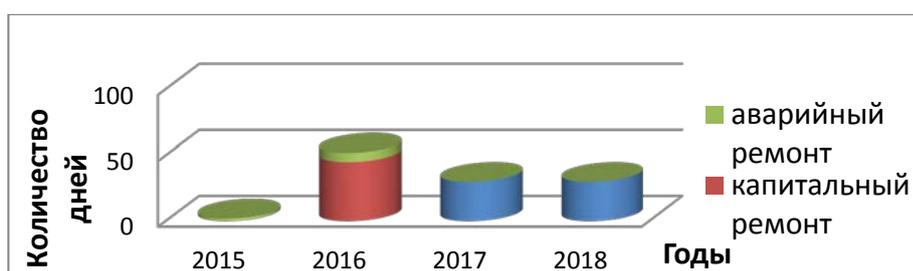


Рисунок 6 – Продолжительность ремонтных работ на печи спекания

Более общая картина по продолжительности ремонтных работ на восьми печах спекания в период с 2015 по 2018 года приведена на рис. 7.

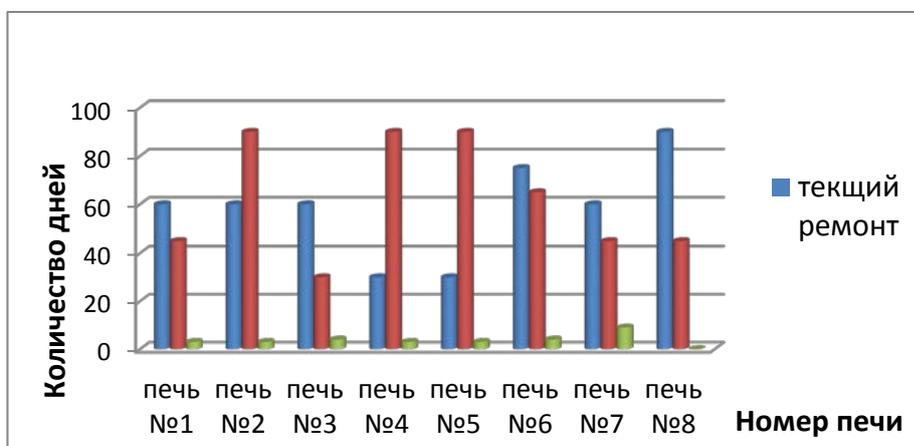


Рисунок 7 – Длительность ремонтных работ на печах спекания (2015-2018 гг.)

Проведем краткий анализ нестационарных тепловых режимов работы печей кальцинации и спекания. Разогрев и охлаждение вращающихся печей по производству глинозема во многом определяет продолжительность их рабочей кампании. Превышение допустимых скоростей нагрева огнеупорной футеровки приводит к появлению опасных разрушающих напряжений и, как след-

ствии, ведет к образованию трещин, сколов отдельных кирпичей и фрагментов футеровки. Как показывает статистический анализ, имеется четкая зависимость длительности межремонтной кампании от скорости разогрева футеровки.

Рассматриваемая модель печи представлена на рис. 8, где на внешней поверхности печи происходит теплообмен по закону Ньютона, а на внутренней поверхности температура задается из графика разогрева (рис. 9).

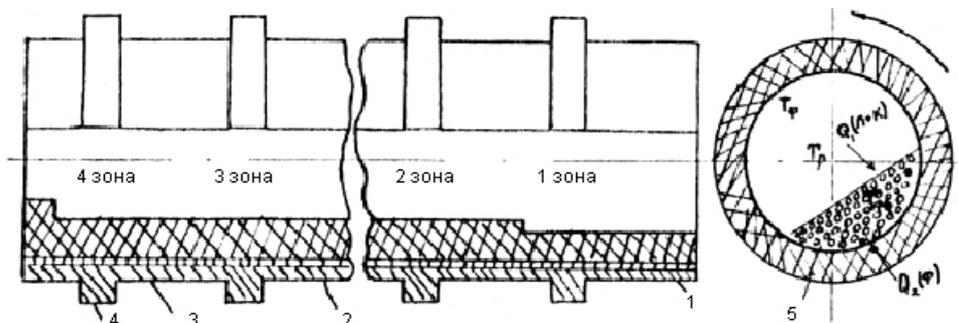


Рисунок 8 – Разрез вращающейся печи: 1 – шамотный огнеупор; 2 – засыпка; 3 – корпус; 4 – бандаж

После капремонта необходим более длительный период разогрева, так как футеруемый материал сырой и большая часть поверхности кладки не имеет гарнисаж. При непродолжительных остановках, вызванных профилактическими работами или технологическими срывами, высокотемпературные агрегаты запускаются по ускоренному графику. Наличие в горячих зонах гарнисажа и достаточная монолитность системы – огнеупорный кирпич + швы + подушка + корпус – позволяют значительно быстрее вводить агрегат в строй. Заводские графики разогрева (36- и 9-часовые) приведены на рис. 8, 9.

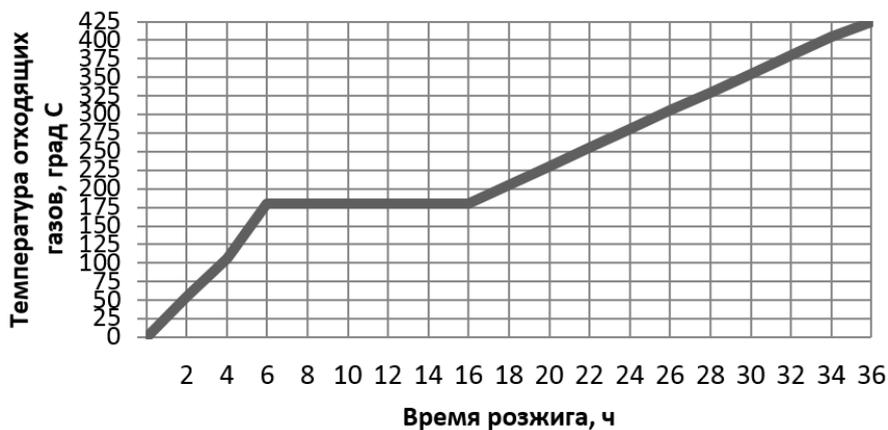


Рисунок 8 – 36-часовой график разогрева печи спекания

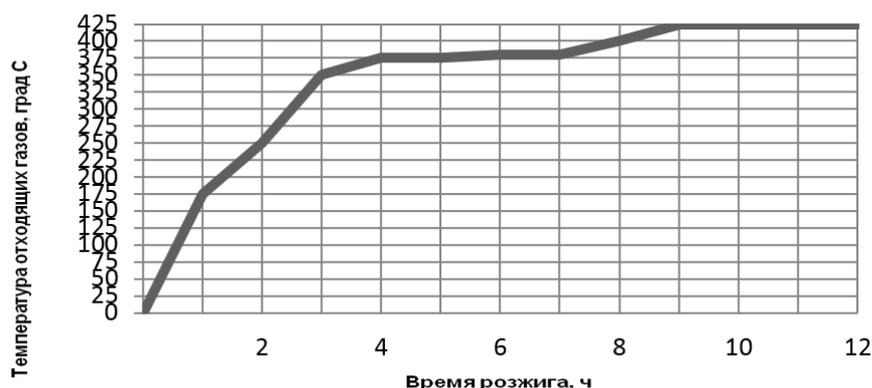


Рисунок 9 – 9-часовой график разогрева печи спекания

На рис. 10 приведен действительный графики разогрева печи спекания по 9-часовой программе, построенный на основании данных термопар, установленных в футеровке.



Рисунок 10 – Действительный график разогрева печи спекания после капитального ремонта

На графике разогрева видно, что от 0 ч 30 мин до 1 ч 10 мин имеется скачок температуры, средняя скорость разогрева $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Далее скорость составляет $0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ разогрева до 4 ч 40 мин. Потом делают температурную выдержку (полочку) 6 ч 30 мин и после этого поднимают температуру разогрева со средней скоростью $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры $381\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем снова делают выдержку для релаксаций температурных напряжений продолжительностью 13 часов и в конце процесса разогрева температуру поднимают по $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры $438\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- проведено обследование и сбор данных по эксплуатации действующего высокотемпературного оборудования: печей спекания и кальцинации;
- выяснены основные причины вывода оборудования в ремонт, аварийные ситуации и т.д.

Список литературы

1. Исламов М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. – Л.: Химия, 1986. – 280 с.
2. Алексеев Б.В. Технология производства цемента. – М.: Высшая школа, 1980. – 264 с.

Получено 18.06.2019

<i>Келаманов Б.С., Самуратов Е.К., Акуев А.М., Абдирашит А.М., Жумағалиев Е.У.</i> Ti-Fe-Si-C жүйесінің термодинамикалық-диаграммалық талдауы зерттеу есептеу	112	<i>Келаманов Б.С., Самуратов Е.К., Акуев А.М., Абдирашит А.М., Жумағалиев Е.У.</i> Термодинамически-диаграммный анализ системы Ti-Fe-Si-C	112
<i>Киялбаев А.К., Киялбай С.Н., Дудкин М.В., Алимгазин Б.Т.</i> Жол-құрылыс материалдары мен жұмыстарын өндіру кезіндегі сапаны басқару жүйесі	118	<i>Киялбаев А.К., Киялбай С.Н., Дудкин М.В., Алимгазин Б.Т.</i> Система управления качеством при производстве дорожно-строительных материалов и работ	118
<i>Курмашева Г.Р., Хамиева Н.С., Жумағалиев И.К.</i> «Стекло-Сервис» компаниясының әйнек өңдейтін цехтарындағы жасанды жарықтандыруды есептеу	122	<i>Курмашева Г.Р., Хамиева Н.С., Жумағалиев И.К.</i> Расчет искусственного освещения в стеклообрабатывающих цехах компании «Стекло-Сервис»	122
<i>Кушалиев Д.К., Балтаев Т.А., Ерманова Б.А.</i> Теңестіргіш сайлентблоктарына инновациялық жөндеу жиынтығы	126	<i>Кушалиев Д.К., Балтаев Т.А., Ерманова Б.А.</i> Инновационный ремонтный комплект для сайлентблока амортизатора	126
<i>Мұратұлы Ә., Недобитков А.И.</i> Өскемен қаласы Қабанбай Батыр көшесі бойынша жол қозғалысын ұйымдастыруды талдау	130	<i>Мұратұлы Ә., Недобитков А.И.</i> Анализ организации дорожного движения по улице Кабанбай Батыра г. Усть-Каменогорска	130
<i>Мякинин А.</i> 3D баспа әдісімен алынған 316L тот баспайтын болаттың сфероидизация процесі, құрылымдық-фазалық жағдайы және механикалық қасиеттері	135	<i>Мякинин А.</i> Процесс сфероидизации, структурно-фазовое состояние и механические свойства нержавеющей стали 316L, полученной методом 3D печати	135
<i>Никифоров А.С., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е., Шупеева Ш.М.</i> Жоғары температуралы агрегаттардың футеровкаларының бұзылу механизмдері мен жұмыс жағдайын талдау	140	<i>Никифоров А.С., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е., Шупеева Ш.М.</i> Анализ условий работы и механизмов разрушения футеровок высокотемпературных агрегатов	140
<i>Плотников С.В., Тұрлыбекұлы А., Мякинин А.А., Жанысов С.А.</i> МРБ үшін аса өткізгіш сымның сипаттамасын өлшеу	147	<i>Плотников С.В., Тұрлыбекұлы А., Мякинин А.А., Жанысов С.А.</i> Измерение характеристик сверхпроводящего провода для МРТ	147
<i>Рыспаев А.Б., Бакланова О.Е.</i> Сөйлеу апаратын тануды басқару жүйесі	149	<i>Рыспаев А.Б., Бакланова О.Е.</i> Система управления распознаванием речевой информации	149
<i>Сапинов Р.В., Куленова Н.А., Суюндиков М.М., Олейникова Н.В.</i> Қазақстандағы техногендік шикізаттан қалайы алудың келешегі	155	<i>Сапинов Р.В., Куленова Н.А., Суюндиков М.М., Олейникова Н.В.</i> Перспективы получения олова из техногенного сырья в Казахстане	155
<i>Төреханова М.Т., Кабдуллина Д.С.</i> Балқытылған металдың құрылымы мен қасиеттеріне азотпен легирлеудің әсерін зерттеу	160	<i>Төреханова М.Т., Кабдуллина Д.С.</i> Исследование влияния легирования азотом на структуру и свойства наплавленного металла	160
<i>Шнис А.А.</i> Кальциймен байытылған сүт	164	<i>Шнис А.А.</i> Молоко, обогащенное кальцием	164

ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЯ

<i>Есбенбетова Ж.Х., Шайхы Р.Т., Танабаева А.Е., Айткенова Г.Т.</i> Еңбекті қорғауды басқарудың жаңа жүйесін әзірлеудегі инновациялық тәсілдер	168	<i>Есбенбетова Ж.Х., Шайхы Р.Т., Танабаева А.Е., Айткенова Г.Т.</i> Инновационные подходы к разработке новой системы управления охраной труда	168
<i>Шорманов С.Т., Абдрахманова Н.Б.</i> Еңбек қауіпсіздігі және еңбек қорғау мәселелері бойынша халықаралық нормаларды Қазақстан Республикасының заңнамалық актілерінде қолданылуы туралы талдау	170	<i>Шорманов С.Т., Абдрахманова Н.Б.</i> Об анализе законодательных актов Республики Казахстан по применению Международных норм по вопросам безопасности и охраны труда	170