

ISSN 1609-1825 (PRINT)

ISSN 2710-3382 (ONLINE)



УНИВЕРСИТЕТ
ЕҢБЕКТЕРІ

ТРУДЫ
УНИВЕРСИТЕТА

№3
2025



- ◆ Машиностроение. Металлургия
- ◆ Геотехнологии. Безопасность жизнедеятельности
- ◆ Строительство. Транспорт
- ◆ Педагогика высшей школы. Экономика
- ◆ Энергетика. Автоматика. ИКТ



республикалық
журналы

республиканский
журнал

УНИВЕРСИТЕТ
ЕҢБЕКТЕРІ
ТРУДЫ
УНИВЕРСИТЕТА



3 (100)
2025

2000 жылдан бастап шығарылады
Мерзімділігі жылына 4 рет

Издается с 2000 года
Периодичность 4 раза в год

Журнал Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің жанындағы Ақпарат комитетінде тіркелген (қайта есепке алу куәлігі № KZ63VPY00044097 15.12.2021 ж.)

Журнал зарегистрирован в Комитете информации при Министерстве информации и общественно-го развития Республики Казахстан (свидетельство о перерегистрации № KZ63VPY00044097 от 15.12.2021 г.)

МЕНШІК ИЕСІ

«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (Қарағанды қаласы)

СОБСТВЕННИК

Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда)

Главный редактор

Ю.Н. Пак

академик НАН ВШК, КазНАЕН, д-р техн. наук, профессор

Редакционный совет

Сагинтаева С.С.	ректор НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик НАН ВШК, д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, проф. (председатель) (Казахстан)
Куликов В.Ю.	проф. кафедры нанотехнологий и металлургии НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик МАИН, канд. техн. наук (зам. главного редактора) (Казахстан)
Сагадиева К.К.	заведующий редакционно-издательским отделом НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (и.о. ответственного секретаря) (Казахстан)
Ахметов Б.С.	проф. кафедры информатики и информатизации образования Казахского национального педагогического университета имени Абая, академик НИА, МАИН, д-р техн. наук (Казахстан)
Бирюков В.В.	декан факультета инженерной экономики и менеджмента НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», д-р экон. наук (Казахстан)
Варгула Л.	PhD, ассоциированный проф. Познанского технологического университета (Польша)
Выжва С.А.	директор института геологии Киевского национального университета имени Т. Шевченко, д-р геол.-мин. наук, проф. (Украина)
Демин В.Ф.	проф. кафедры разработки месторождений полезных ископаемых НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», д-р техн. наук (Казахстан)
Жанбаев Р.А.	эксперт по устойчивому развитию городов и внедрению цифровых и зеленых технологий, канд. экон. наук, РОО «Национальная инженерная академия РК» (Казахстан)
Жетесова Г.С.	проф. кафедры технологического оборудования, машиностроения и стандартизации НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик КазНАЕН, д-р техн. наук, проф. (Казахстан)
Жетписбаева Б.А.	проректор по стратегическому развитию НАО «Карагандинский университет имени Е.А. Букетова», д-р пед. наук, проф. (Казахстан)
Ибатов М.К.	советник ректора НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик КазНАЕН, НИА РК, иностранный член Академии горных наук РФ, д-р техн. наук, проф. (Казахстан)
Ибраев М.К.	декан химического факультета НАО «Карагандинский университет имени Е.А. Букетова», д-р хим. наук (Казахстан)
Исагулов А.З.	руководитель аппарата НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик МАИН, КазНАЕН, НАН ВШК, д-р техн. наук, проф. (Казахстан)
Кадыров А.С.	проф. кафедры транспортной техники и логистических систем НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», д-р техн. наук (Казахстан)
Каталинич Б.	проф. Венского университета технологий, д-р техн. наук, President IAE-CEB, Professor, Dr.sc., Dr.mult.h.c., Prof.h.c., President of DAAAM International (Австрия)
Коликов К.С.	зав. кафедрой горнопромышленной экологии Национального исследовательского технологического университета МИСиС, д-р техн. наук (Россия)
Кошебаета Г.К.	проф. кафедры экономики и менеджмента предприятия НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», д-р экон. наук (Казахстан)
Кропачев П.А.	доцент кафедры строительных материалов и технологий НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», канд. техн. наук (Казахстан)
Мехтиев А.Д.	проректор по науке и инновациям НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», канд. техн. наук, ассоц. проф. (Казахстан)
Нугужинев Ж.С.	директор КазМИРР, советник Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), д-р техн. наук, проф. (Казахстан)
Окишев К.Ю.	проф. кафедры термообработки и физики металлов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», д-р физ.-мат. наук (Россия)
Портнов В.С.	проф. кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», академик МАИН, иностранный член Академии горных наук РФ, д-р техн. наук (Казахстан)
Сахапов Р.Л.	зав. кафедрой дорожно-строительных машин Казанского государственного архитектурно-строительного университета, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Шеров К.Т.	проф. кафедры технологических машин и оборудования НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», д-р техн. наук (Казахстан)



Пневмомеханический способ транспортировки сена погрузчиком уборочно-транспортного агрегата

¹*АБУЛХАИРОВ Дармен Каратаевич, д.т.н., профессор, adk511@bk.ru,

²САГЫНГАНОВА Индира Кенесовна, PhD, старший научный сотрудник, kaznaen.rk@mail.ru,

³СМАИЛОВА Бахытгуль Мерзояновна, старший преподаватель, bm_smailova@mail.ru,

¹МИТРОФАНОВА Елена Анатольевна, преподаватель, elena171@inbox.ru,

³БАШИРОВ Александр Витальевич, к.т.н., руководитель лаборатории, bashirov_av@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», пр. Женис, 62, Астана, Казахстан,

²Казахстанская национальная академия естественных наук, ул. Ш. де Голля, 1, Астана, Казахстан,

³Карагандинский университет Казпотребсоюза, ул. Академическая, 9, Караганда, Казахстан,
*автор-корреспондент.

Аннотация. Статья рассматривает технологический процесс заготовки сена с использованием уборочно-транспортного агрегата, включающего подборщик, погрузчик и сборочную камеру. Обоснован пневмомеханический способ транспортировки растительного материала с помощью погрузчика. Проведен теоретический анализ мультипликативного эффекта воздействия воздушного потока и механических сил на транспортируемый материал. Представлены расчетные и экспериментальные данные мощности воздушного потока при транспортировке. Определена скорость воздушного потока на входе в воздухопровод погрузчика. Построены графики зависимости дальности полета порций сена от числа оборотов ротора.

Ключевые слова: уборочно-транспортный агрегат, пневмомеханический погрузчик, сборочная камера, скорость, мощность, воздушный поток, лопасть, ротор, вентилятор.

Введение

Технологии заготовки рассыпного сена предусматривают применение уборочно-транспортного агрегата (УТА), приводимого в движение колесным трактором (рисунок 1) [1, 2]. Агрегат обеспечивает совмещение операций, начиная с подбора валка до выгрузки сформированного стога. Очевидно, что совмещение операций отвечает агротехнологическим требованиям, являясь выгодным с точки зрения снижения потерь питательных веществ корма в результате сокращения сроков его заготовки. При этом резервом повышения производительности уборочного процесса, является формирование стога в сборочной камере уплотняющим механизмом без остановки агрегата [3, 4].

Во время работы агрегат движется по валку с переносной скоростью v_e . Проявленный в валках материал подбирается и со скоростью v_n подается в приемную камеру погрузчика 2. Как видно из рисунка, технологический процесс предусматривает последовательное участие трех основных машин агрегата – подборщика 1, погрузчика 2 и сборочной камеры 3.

Известно, что основным элементом воздушных систем сельскохозяйственных машин, являются вентиляторы, создающие давление менее 1,5 кПа. В сложившейся практике в уборочных машинах применяют центробежные радиальные вентиляторы с меньшим числом лопастей (4-6), которые создают низкое давление при больших расходах воздуха.

Проведенный обзор исследований способов погрузки растительной массы в сборочную камеру показывает, что материал мож-

но перемещать:

- энергией воздушного потока, вырабатываемого вентилятором;
- кинетической энергией, сообщаемой ему лопастями ротора;
- за счет мультипликативного эффекта от приложения как пневматических, так и механических силовых составляющих [5].

Методы и материалы

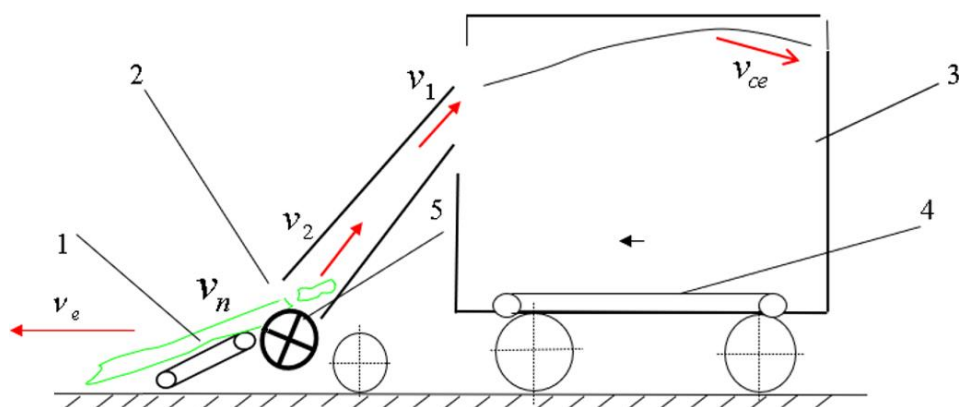
Обоснование пневмомеханического способа транспортирования растительного материала погрузчиком.

Среди них более эффективным для погрузки сена с точки зрения снижения потерь представляется первый способ, т.к. в этом случае выдерживается щадящий режим перемещения ценного продукта.

С учетом этого в рассматриваемом процессе считаем приемлемым использование центробежного вентилятора (ротора) с шестью лопастями и концентрической формой кожуха.

При осуществлении пневмоподачи массы в сборочную емкость энергия потока воздуха, в общем случае, расходуется на обеспечение приема и направление массы с подборщика в воздухопровод погрузчика. Для этого на входе погрузчика 2 должно создаваться перемещение материала со скоростью v_2 , а на выходе она имеет скорость v_1 (рисунок 2) [6].

При этом примем во внимание следующую особенность технологического процесса. Так, поступающий в воздухопровод погрузчика с подборщика валок характеризуется неоднородностью своего состава (стебли, листья) и объемной массы. Поэтому перемещение мощного валка только воздей-



1 – подборщик, 2 – погрузчик, 3 – сборочная емкость, 4 – ротор вентилятора, 5 – цепочно-планчатый транспортёр для уплотнения материала; v_2 – скорость воздушного потока на входе в воздухопровод погрузчика, v_1 – скорость воздушного потока на выходе из воздухопровода погрузчика, $v_{се}$ – скорость воздушного потока у задней стенки сборочной камеры

Рисунок 1 – Технологическая схема уборочно-транспортного агрегата

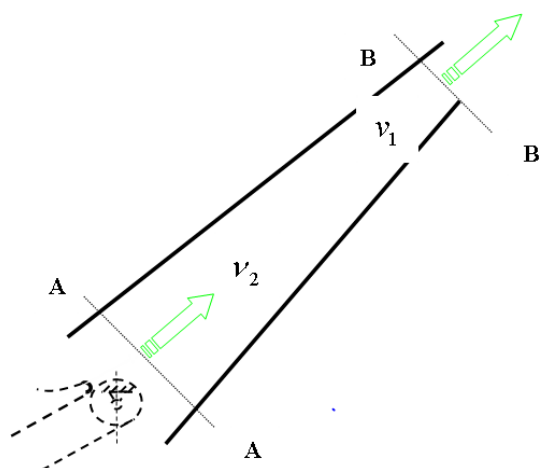


Рисунок 2 – Схема подачи и транспортирования массы в воздухопроводе погрузчика

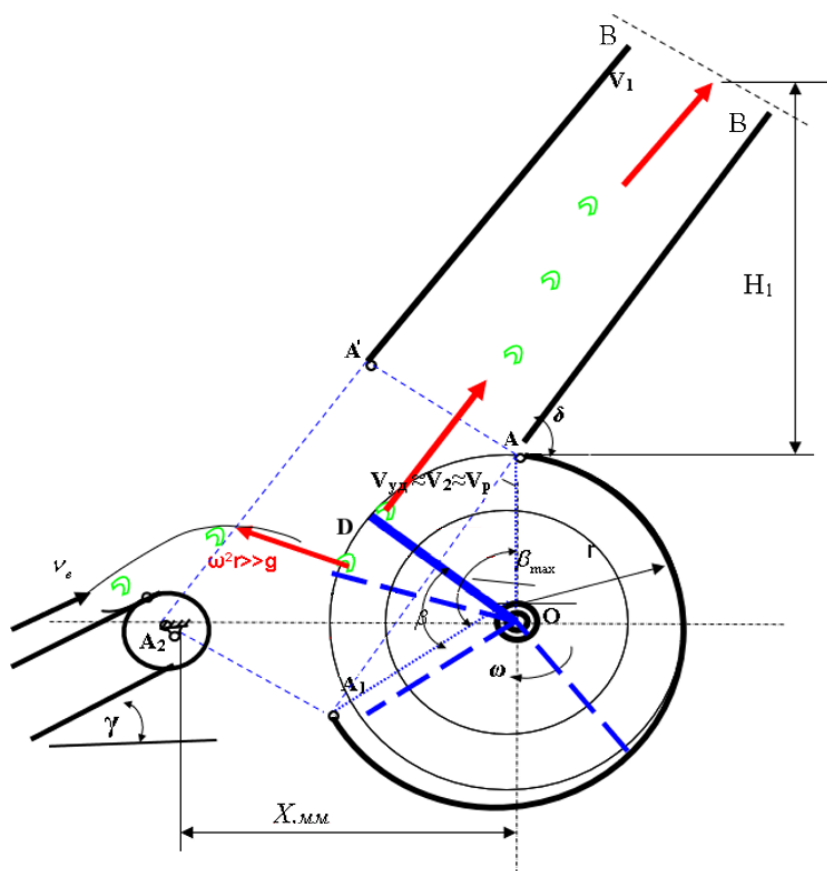
провода.

Для устранения этого недостатка представляется целесообразным введение в зону схода с подборщика материала, активных рабочих элементов – лопастей ротора, которые за счет воздействия на стебли придают им первоначальную скорость движения (метод выбрасывания). Затем масса подхватывается воздушным потоком и направляется по воздухопроводу погрузчика в сборочную емкость [6].

Предлагаемая пневмомеханическая схема транспортировки сена погрузчиком представлена на рисунке 3.

Некоторые параметры транспортирующей системы нами использованы из практики работы стогообразователя СПТ-60, радиус лопасти r (0,34 м), ширина воздухопровода А-А' (0,4 м). Принятое взаиморасположение кожуха погрузчика и ротора позволило частично перекрыть вращающимися лопастями площадь поперечного сечения нижней части воздухопровода, реализован пневмомеханический способ транспортирования

ствием воздуха может быть недостаточным, что приводило бы к «забиванию» воздухо-



X – расстояние между ведущим валом подающего подборщика и валом ротора вентилятора, мм;
H₁ – высота воздухопровода, мм; сечение А-А' – вход воздухопровода;
сечение В-В – выход воздухопровода

Рисунок 3 – Пневмо-механический способ транспортировки сена погрузчиком

сеносоломистой массы. Степень перекрытия S'_c определяется соотношениями соответствующих площадей:

$$S'_c = \frac{S_{\text{сег}}}{S_{\Pi}} = \frac{S_{\text{сек}} - S_{\text{т}}}{S_{\Pi}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S_{\text{сег}}$ – площадь сегмента A_1DA ;

$S_{\text{сек}}$ – площадь сектора OA_1DA ;

$S_{\text{т}}$ – площадь треугольника OA_1A ;

S_{Π} – площадь прямоугольника $A_1A_2A'A$.

Лопастей ротора вращаются по часовой стрелке в сегменте A_1BA (от точки A_1 до точки A) от угла $\beta = 0$ до β_{max} . При этом можно предположить, что в некотором среднем значении угла β направляющая скорости v_p , являющаяся результирующей от ударного воздействия лопастей и воздушного потока, будет направлена по касательной под прямым углом к лопасти.

При этом считаем, что в предлагаемой схеме оптимальной является взаиморасположение ведущего вала подающего подборщика и ротора на одной линии на расстоянии X между ними. Это предположение обосновывается тем, что в этом случае обеспечивается ввод материала в зону высоких скоростей воздушного потока, в результате создаются наилучшие условия для транспортировки массы и достижения высокой пропускной способности подборщика-погрузчика.

В целях снижения сопротивления при движении массы в воздухопроводе угол его наклона δ был принят параллельным направлению скорости v_p ориентировочное значение данного параметра равно 60° .

Как отмечено выше, суть пневмомеханического способа транспортировки заключается в том, что лопасти ротора (рисунок 3) подхватывают и ударяют по сеносоломистому материалу и принудительно их направляют в воздухопровод с начальной скоростью v_r . Далее происходит совместное транспортирование материала воздушным потоком и швырянием. Тем самым, исключается задержка в перемещении даже мощных или неоднородных по составу сеносоломистой массы.

Связь между скоростью $v_{\text{уд}}$ удара лопастями частиц, дальностью L подбрасывания массы, скоростью витания v_s частиц была установлена Фатеевым М.Н. [8]. Им предложена формула определения дальности выбрасывания:

$$L = \frac{v_s^2}{2g} \ln \left(1 + \frac{v_{\text{уд}}^2}{v_s^2} \right), \text{ м.} \quad (2)$$

В предлагаемой схеме (рисунок 3) погрузчика предусмотрено частичное перекрытие ротором канала. Степень S'_c перекрытия (1) не превышает 30% и ее можно

при необходимости уменьшать.

Перекрытие S_{Π} не препятствует совместной работе воздушного потока и выбрасывающего эффекта, способствует прохождению в погрузчик и тонкого, и толстого слоя сеносоломистого материала из погрузчика.

Так как один и тот же рабочий орган погрузчика (ротор) создает воздушный поток и выбрасывание, очевидно, скорость выбрасывания материала:

$$v_{\text{уд}} = v_2. \quad (3)$$

Здесь имеется в виду выбрасывающий эффект лопастей ротора распространяется на весь проходящий в погрузчике сеносоломистый материал.

Выбрасывание не только перемещает массу на расстояние L , но и также поднимает ее на высоту h_n , поэтому формула (2) корректируется как:

$$h_n = \frac{v_s^2}{2g} \ln \left(1 + \frac{v_{\text{уд}}^2}{v_s^2} \right), \text{ м.} \quad (4)$$

Для нормального протекания технологического процесса работы погрузчика необходимо соблюдение условия:

$$h_n \geq H_{\text{се}}, \quad (5)$$

где $H_{\text{се}}$ – высота погрузчика.

Условие (5) констатирует о том, что после выхода из погрузчика в пределах сборочной емкости сеносоломистый материал транспортируется главным образом за счет давления воздушного потока. Для проверки (5) был просчитан h_n по данным: $v_s = 5$ м/с, $v_2 = 30$ м/с, $H_{\text{се}} = 4$ м, $\eta = 0,5$. Полученный результат $h_n = 6,5$ м указывает на соблюдение условия (5).

Необходимая мощность на подбрасывание материала определяется по формуле:

$$N_{\text{в}} = \frac{qv_{\text{уд}}^2}{10^3 \eta} \cdot \text{кВт.} \quad (6)$$

При выбрасывании с ударом $q = 5$ кг/с сеносоломистого материала со скоростью $v_{\text{уд}}$ равной 30 м/с ротор потребляет не более 9 кВт мощности.

Величина мощности транспортирования воздушным потоком составляет:

$$N = \frac{P_{\text{сум}} V_{\text{в}}}{n_p} = 10 \text{ кВт.}$$

Отсюда определим расчетное значение необходимой суммарной мощности на транспортирование массы:

$$N_{\text{сум}} = N + N_{\text{в}} = 10 + 9 = 19 \text{ кВт.}$$

Результаты исследования

Величина скорости воздушного потока на входе в воздухопровод.

В ходе экспериментальных исследований, установив оптимальные положение подборщика, взаиморасположение осей подборщика и ротора, были определены параметры скорости воздушного потока на входе в воздухопровод при определенной частоте оборотов ротора [9].

На рисунке 4 представлены значения скоростей воздушного потока v_2 на входе в воздухопровод, которые получены за счет ударного воздействия лопастей ротора и напора воздуха. Так, при частоте вращения ротора 900 об/мин и $v_2 = 28,8$ м/с дальность полета частиц сена составляет 5,8 метров, а при $n = 1100$ об/мин $v_2 = 32,4$ м/с дальность полета в пределах 7,5 метров.

Таким образом, для эффективной транспортировки растительной массы сена (донник желтый) погрузчиком при частоте вращения ротора вентилятора 1100 об/мин, рациональное значение скорости воздушного потока на входе в воздухопровод находится в пределах 30 м/с.

В экспериментальных исследованиях транспортирования воздуха при $v_2 = 23$ м/с на расстояние 2 м от сечения В-В отмечено снижение скорости до 17 м/с, т.е. уменьшение скорости более чем наполовину (рисунок 2). Это указывают на правомочность наших теоретических предпосылок транспортирования материала погрузчиком.

На создание напора воздуха со скоростью v_2 и на удар лопастей по стеблевому материалу, обеспечивающих подбрасыва-

ние (швыряние), затрачивается мощность:

$$N = \frac{P}{\eta} \cdot v_2 \cdot F \text{ кВт}, \quad (7)$$

где P – суммарное сопротивление воздушно-стеблевой смеси на транспортирование по каналу погрузчика, Па;

η – коэффициент полезного действия канала;

F – площадь поперечного сечения начального участка воздухопровода погрузчика (по В-В на рисунке 2), м².

В наших производственных экспериментах при наибольшей подаче 5,8 кг/с на перемещение стеблевого материала погрузчик затратил мощность $N = 17$ кВт.

Заключение

В реализованном пневмомеханическом способе транспортировки сена погрузчиком уборочно-транспортного агрегата (УТА) установлено, что при частоте вращения ротора 900 об/мин скорость воздушного потока на входе в погрузчик составляет $v_2 = 28,8$ м/с, при этом скорость на выходе из погрузчика снижается до 17 м/с. При этом на создание напора воздуха со скоростью v_2 и на удар лопастей по стеблевому материалу, обеспечивающего подбрасывание (швыряние), затрачивается мощность 17-19 кВт.

Полученные данные подтверждают достоверность теоретических расчетов по необходимому скоростному режиму воздушного потока, достаточного для заполнения сборочной камеры УТА.

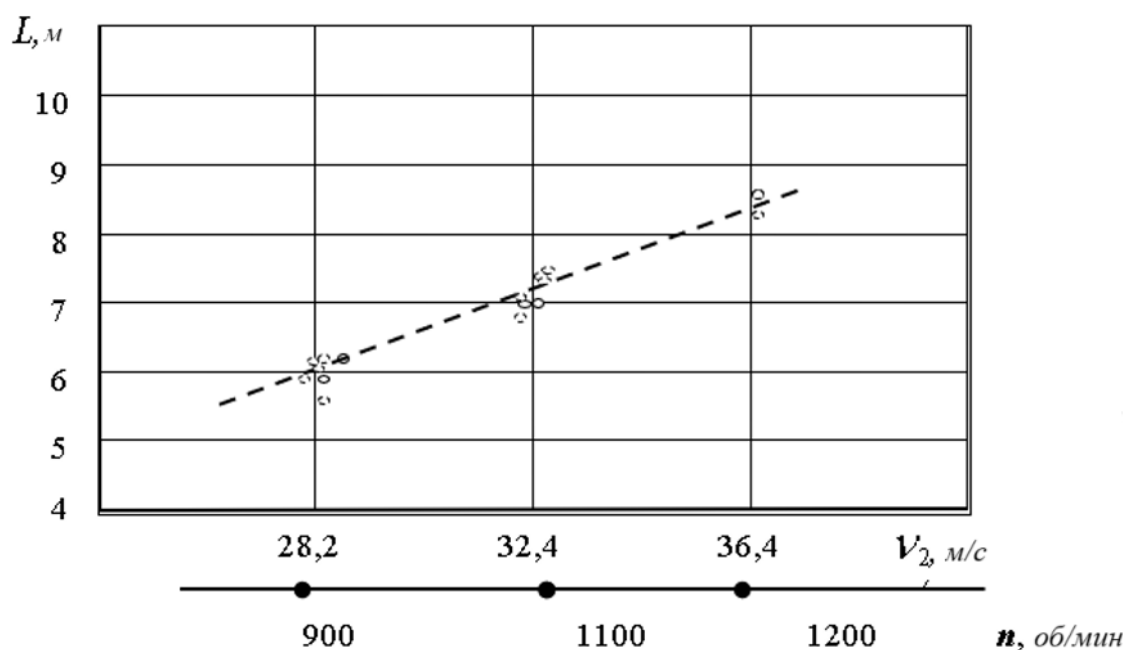


Рисунок 4 – Влияние средней скорости v_2 на входе в воздухопровод на дальность полета порций сена при разных числах оборота ротора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas Daum. Mechanization and sustainable agri food system transformation in the Global South. A review. – Agronomy for Sustainable Development (2023) 43: 16.
2. Baudron, F., Sims, B., Justice, S., Kahan, D.G., Rose, R., Mkomwa, S., Kaumbutho, P. et al. 2015. Reexamining appropriate mechanization in Eastern and Southern Africa: two-wheel tractors, conservation agriculture, and private sector involvement. Food Security, 7 (4): 889-904.
3. Абулхаиров Д.К., Сагынганова И.К., Усербаев М.Т. Исследование технологического процесса подбора валка уборочно-транспортным агрегатом // «Университет еңбектері – Труды университета» Карагандинского технического университета. 2024. № 1 (94). С. 30-35.
4. Абулхаиров Д.К., Сагынганова И.К., Усербаев М.Т. Обоснование технологической схемы и параметров механизма уплотнения сена в сборочной камере // «Там же. 2022. № 1 (86). С. 11-15.
5. Заушицын В.Е. Исследование пневматического транспорта сеносоломистых продуктов // Сб. «Конструирование и производство СХМ / НТОМП Ростовское ОП, 1991. С. 328.
6. Абулхаиров Д.К., Сагынганова И.К., Усербаев М.Т. Обоснование величины давления воздушного потока для транспортирования растительного материала // «Университет еңбектері – Труды университета» Карагандинского технического университета. 2023. № 1 (90). С. 18-22.
7. Инновационный патент РК №20921. Пневмотранспортное устройство для сеносоломистых материалов / Бобков С.И., Абулхаиров Д.К. Полищук Ю.В., Дерепаскин А.И. Опубл. 16.03.2009. Бюл. № 3.
8. Фатеев М.Н. Теоретические и экспериментальные исследования процесса транспортирования измельченной растительной массы рабочими органами роторного типа // Труды ВИСХОМ. Вып. 55. М., 1967. 656 с.
9. Абулхаиров Д.К., Сагынганова И.К., Усербаев М.Т., Мендалиева С.И., Бобеев А.Б. Определение оптимальных параметров воздушного потока, создаваемого пневмопогрузчиком уборочно-транспортного агрегата // «Университет еңбектері – Труды университета» Карагандинского технического университета. 2024. № 3. С. 60-79.

Жинау-тасымалдау агрегатының жүктегішімен шепті тасудың пневмо-механикалық әдісі

¹*АБІЛҚАЙЫРОВ Дәрмен Каратайұлы, т.ғ.д., профессор, adk511@bk.ru,

²САҒЫНҒАНОВА Индира Кенесқызы, PhD, аға ғылыми қызметкер, sagynganova_ik@enu.kz,

³СМАИЛОВА Бахытгүл Мерзоянқызы, аға оқытушы, bm_smailova@mail.ru,

¹МИТРОФАНОВА Елена Анатольевна, оқытушы, elena171@inbox.ru,

³БАШИРОВ Александр Витальевич, т.ғ.к., зертхана басшысы, bashirov_av@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан,

²Қазақстан Ұлттық жаратылыстану ғылымдары академиясы, Ш. де Голль көшесі, 1, Астана, Қазақстан,

³Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Академическая көшесі, 9, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Шөп дайындау технологиялық процесі іріктегіш, тиегіш және жинау камерасынан тұратын жинау-тасымалдау агрегаты арқылы қарастырылады. Өсімдік материалын тиегішпен пневмомеханикалық тәсілмен тасымалдау негізделген. Ауа ағыны мен механикалық күштердің материалға мультипликативтік әсері теориялық тұрғыда талданған. Тасымалдау кезінде ауа ағынының қуаты бойынша есептік және тәжірибелік мәліметтер келтірілген. Тиегіштің ауа өткізгішіне кіреберістегі ауа ағынының жылдамдығы анықталған. Ротор айналым санына байланысты шөп порцияларының ұшу қашықтығына әсерін көрсететін графиктер жасалған.

Кілт сөздер: жинау-тасымалдау агрегаты, пневмомеханикалық жүктегіш, жинау камерасы, жылдамдық, қуат, ауа ағыны, қалақ, ротор, желдеткіш.

Pneumo-mechanical Method of Hay Transportation by the Loader of a Harvesting-transport Unit

¹***ABULKHAIROV Darmen**, Dr. of Tech. Sc., Professor, adk511@bk.ru,

²**SAGYNGANOVA Indira**, PhD, Senior Researcher, sagynganova_ik@enu.kz,

¹**SMAILOVA Bakhytgul**, Senior Lecturer, bm_smailova@mail.ru,

¹**MITROFANOVA Elena**, Teacher, elena171@inbox.ru,

³**BASHIROV Alexander**, Cand. of Tech. Sc., Head of Laboratory, bashirov_av@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Zhenis Avenue, 62, Astana, Kazakhstan,

²Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, Ch. de Gaulle Street, 1, Astana, Kazakhstan,

³Karaganda University of Kazpotreboysuz, Akademicheskaya Street, 9, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The article examines the technological process of hay harvesting using a harvesting and transport unit consisting of a pickup, a loader, and an assembly chamber. A pneumatic-mechanical method for transporting plant material with a loader is substantiated. A theoretical analysis of the multiplicative effect of air flow and mechanical forces on the transported material is carried out. Calculated and experimental data on the power of the air flow during transportation are presented. The air flow velocity at the inlet to the loader's air duct is determined. Graphs showing the dependence of hay portion flight distance on rotor speed are constructed.

Keywords: harvesting-transport unit, pneumo-mechanical loader, assembly chamber, speed, power, air flow, blade, rotor, fan.

REFERENCES

1. Thomas Daum. Mechanization and sustainable agri food system transformation in the Global South. A review. – *Agronomy for Sustainable Development* (2023) 43: 16.
2. Baudron, F., Sims, B., Justice, S., Kahan, D.G., Rose, R., Mkomwa, S., Kaumbutho, P. et al. 2015. Reexamining appropriate mechanization in Eastern and Southern Africa: two-wheel tractors, conservation agriculture, and private sector involvement. *Food Security*, 7(4): 889-904.
3. Abulhairov D.K., Sagynganova I.K., Userbaev M.T. Issledovanie tekhnologicheskogo processa podbora valka uborochno-transportnym agregatom // «Universitet eñbekteri – Trudy universiteta» Karagandinskogo tekhnicheskogo universiteta, 2024, № 1 (94), pp. 30-35.
4. Abulhairov D.K., Sagynganova I.K., Userbaev M.T. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy i parametrov mekhanizma uplotneniya sena v sborochnoy kamere // *Tam zhe*, 2022, № 1 (86), pp. 11-15.
5. Zaushicyn V.E. Issledovanie pnevmaticheskogo transporta senosolomistyh produktov // *Sb. «Konstruirovaniye i proizvodstvo SKHM / NTOMP Rostovskoe OP*, 1991, p. 328.
6. Abulhairov D.K., Sagynganova I.K., Userbaev M.T. Obosnovanie velichiny davleniya vozdušnogo potoka dlya transportirovaniya rastitel'nogo materiala // «Universitet eñbekteri – Trudy universiteta» Karagandinskogo tekhnicheskogo universiteta, 2023, № 1 (90), pp. 18-22.
7. Innovacionnyj patent RK № 20921. Pnevmotransportnoe ustrojstvo dlya senosolomistyh materialov / Bobkov S.I., Abulhairov D.K. Polishchuk YU.V., Derepaskin A.I. Opubl. 16.03.2009. Byul. № 3.
8. Fateev M.N. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya processa transportirovaniya izmel'chennoj rastitel'noj massy rabochimi organami rotornogo tipa // *Trudy VISKHOM*, vyp. 55, Moscow, 1967, 656 p.
9. Abulhairov D.K., Sagynganova I.K., Userbaev M.T., Mendaliev S.I., Bobeev A.B. Opredelenie optimal'nyh parametrov vozdušnogo potoka, sozdavaemogo pnevmopogruzchikom uborochno-transportnogo agregata // «Universitet eñbekteri – Trudy universiteta» Karagandinskogo tekhnicheskogo universiteta, 2024, № 3, pp. 60-79.

Критерий устойчивости электродуговой руднотермии ферросплавов

ЖАКИБЕКОВ Тыштыкбай Бейсембаевич, к.т.н., tbzhakibek@mail.ru.

Аннотация. Проведен обобщенный анализ теоретических и экспериментальных исследований технологии производства ферросплавов в дуговых руднотермических электропечах. Отмечается, что процессы электротермии характеризуются чрезвычайным многообразием физико-химических взаимодействий компонентов, твердых, жидких и газовых фаз при сверхвысоких температурах, усложненной задачей оптимизации неустойчивых электрических параметров. Этим обусловлено разнообразие теоретических подходов к решению вопроса управления процессом электротермии. Попытки воздействия на параметры технологии с позиций современной теории безуспешны, в частности, методом термодинамически-диаграммного анализа. На практике регулирование ходом электротермии требует, помимо общих знаний, значительной доли искусства и интуиции. Целью настоящего исследования является анализ и определение наиболее важных движущих сил процесса электротермии ферросплавов и создание единого гармоничного комплекса, раскрывающий особенности физико-химических преобразований под действием электрических сил. В данной работе простым анализом показан и доказан наиболее вероятный механизм, определяющий стабильность и устойчивость параметров технологии электротермии ферросплавов. По результатам исследований предложен научно обоснованный критерий, позволяющий прогнозировать действующую и разрабатывать новые технологии.

Ключевые слова: ферросплавы, электротермия, руднотермические электропечи, стабильность, устойчивость, электрическая дуга, плотность, кремний.

Введение

За последнее столетие предпринималось много попыток оптимизации процессов электротермии в руднотермических электропечах [1-2]. Интересен метод термодинамически-диаграммного анализа [1], где прослеживалась динамика изменения фазового состава минерала в восстановительных условиях. Метод не дал возможности влияния на ход процесса. Недостатком метода являются ограничения в выборе предмета анализа – рассматривалась только минеральная, в основном окисленная часть общего целого – это собственно руда и шлаки. Металл, восстановитель и энергетическая составляющая (в частности, характер и движение токов) в анализе не участвуют. Между тем передел минерального сырья на полезные компоненты – это электротермический передел, базирующийся на энергии, выделяемой дуговым разрядом. Основа процесса – это устойчивый дуговой режим. При нарушении этого условия разрушается весь процесс. Это основная проблема электротермии.

Объекты и методы исследования

Для анализа устойчивости электриче-

ской дуги при электротермии ферросплавов объектом исследования принята руднотермическая электропечь, в частности характер распределения шихтовых материалов в ванне печи и особенности движения электрического тока.

На рисунке 1 [3] представлен разрез руднотермической электропечи, показаны зоны расположения шихтовых материалов и продуктов плавления, а также направления движения электрического тока.

Ток протекает по цепи электрод (1) – металло-шлако-карбидная фаза (4) – металл (5) – графитовая подина (6). Между металлом (5) и электродом (1) образуется электрическая дуга (2) с температурой в столбе дуги 7000-18000 С° (данные Википедии). Условием стабильного горения электрической дуги является высокое соотношение тока к напряжению $I / U > 300$ [3, 4]. Сила тока достигает несколько десятков тысяч ампер.

Продукты плавления ферросплавов – шлак (3) и металл (5) различаются по плотности. Это свойство материалов существенно влияет на процесс образования дуги, т.к.

может нарушиться последовательность зон расположения электрической цепи (см. рисунок «а», «b» или увеличенно «с» и «d», масштаб 3:1).

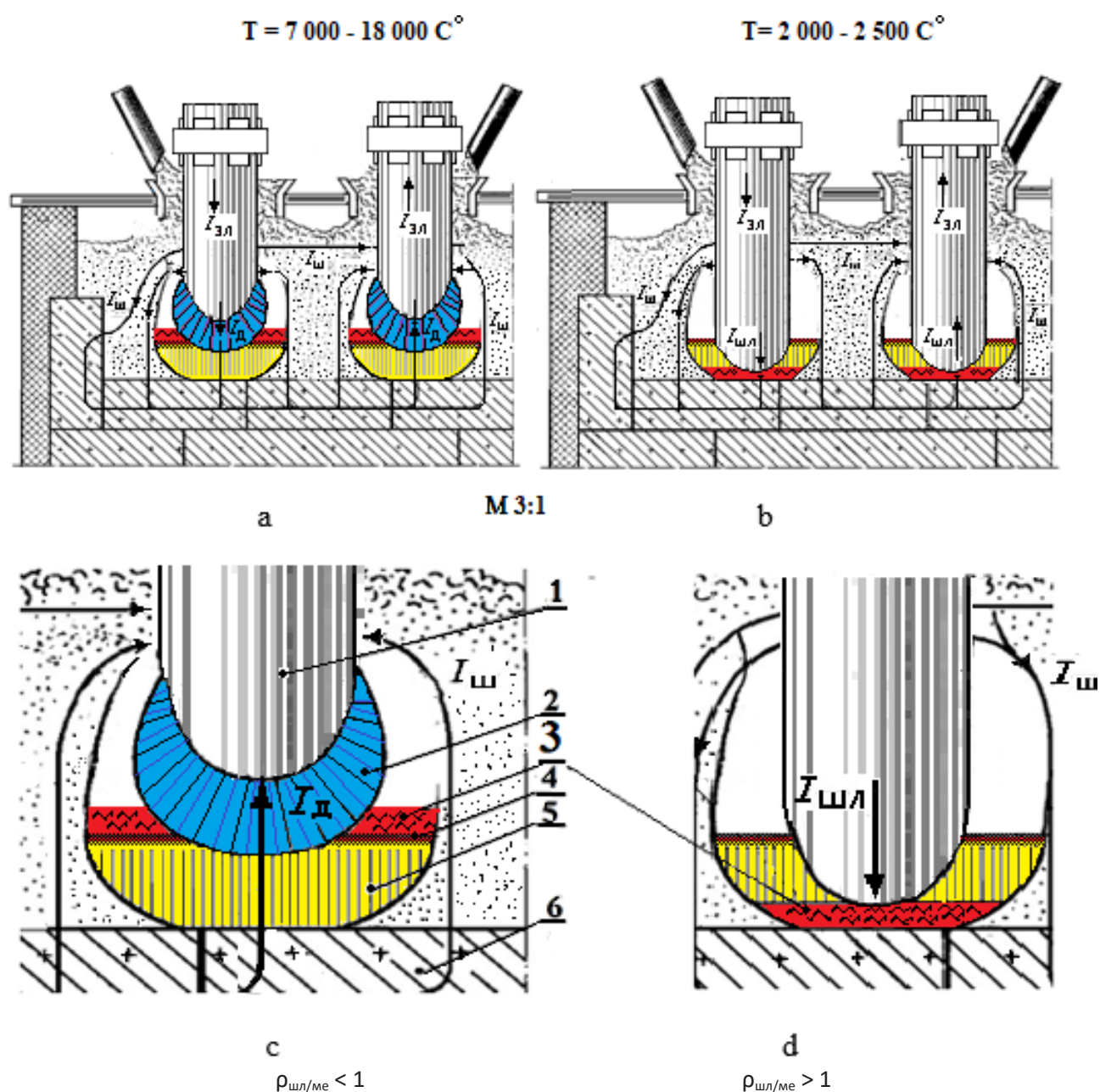
Рассмотрим случай, когда шлак (3) плотнее металла (5) (рисунок «d»).

Согласно закону Архимеда плотные шлаки тонут в менее плотном металле и, накапливаясь на подине, разрывают электрическую цепь на участке металл – электропроводящая подина (рисунок d).

При разрыве цепи электрическая дуга

гаснет, т.к. шлаки по своей природе диэлектрики. Но это в нормальных условиях, для твердого состояния. В жидком состоянии, при высоких температурах, шлаки электропроводны, но имеют высокое электросопротивление, приводящее к резкому снижению проводимости цепи. Сила тока падает, нарушается условие стабильного горения электрической дуги ($I/U > 300$). В итоге дуга теряется. Процесс переходит в режим электрошлаковой плавки (ЭШП).

Температура ЭШП порядка 2000-2500°C.



$I_{шл}$ – ток шлака $I_{ш}$ – ток шихты, $I_{д}$ – ток дуги, $I_{эл}$ – ток электрода, 1 – электрод, 2 – электрическая дуга, 3 – шлак, 4 – металло-шлако-карбидная фаза, 5 – металл, 6 – электропроводящая подина

Схема распределения тока в ванне ферросплавной печи

Это ниже дугового процесса на 3,5-7,2 раза. В таких случаях визуально наблюдается потемнение колошника. Такой переход приводит к значительному снижению мощности печного агрегата, падает производительность.

Таким образом при электротермии ферросплавов:

1. Плотные шлаки, накапливаясь на подине, разрывают электрическую цепь;
2. Разрыв цепи приводит к угасанию электрической дуги;
3. Процесс переходит в режим ЭСП;
4. Температура процесса значительно снижается.

Предложенный механизм объясняет природу интенсификации процессов карбидообразования – карбиды кремния SiC (плотность $\rho = 3,21 \text{ г/см}^3$) и алюминия Al_4C_3 (плотность $\rho = 2,36 \text{ г/см}^3$) всплывают, а окислительные шлаки тонут в расплавленном металле. Идет процесс сегрегации и, как следствие, интенсивного выраженного карбидообразования, обусловленного физическим разделением компонентов восстановительных реакций. Данный факт подтверждается многочисленными исследованиями [1, 3].

Материалы и методы исследования

Материалом исследования является все многообразие комплексных ферросплавов на основе хрома, марганца, кремния, алюминия, кальция [1-7]. Методы исследования расчетные.

Электротермия углеродистого феррохрома, ферромарганца стабильна, агрегаты работают годами. Соотношение плотностей

шлака к металлу составляет $\rho_{\text{шл/ме}} < 0,51$ (таблица 1, выделено зеленым). Сплавы кремния с марганцем, хромом, железом имеют соотношение $\rho_{\text{шл/ме}} < 1$ и, как показывает практика, эти технологии не испытывают сложности. В противовес технологии с соотношением $\rho_{\text{шл/ме}} > 1$ (шлаки тяжелее металла, выделено коричневым) отличаются тяжелым расстройством процесса электротермии. В особенности это силикокальций с показателем $\rho_{\text{шл/ме}} = 1,21$, когда «зарастание» подины приводит к вынужденным остановкам до 3 раз в год [3], кремний кристаллический ($\rho_{\text{шл/ме}} = 1,26$), когда вынуждены использовать вращающиеся руднотермические элетропечи. Пограничные технологии $\rho_{\text{шл/ме}} \approx 1,00$ выделены желтым.

Результаты и их обсуждение

Анализ особенностей распределения продуктов восстановления в плавильной зоне руднотермической электропечи показывает, что, согласно закону Архимеда, тяжелые шлаки ($\rho_{\text{шл/ме}} > 1$), более плотные, чем металл, накапливаясь на токопроводящей подине, разрывают электрическую цепь и приводят к затуханию электрической дуги. Процесс продолжается в режиме электрошлакового переплава с резким снижением температуры на 3,5-7,2 раза, что приводит к тяжелым расстройствам хода электротермии.

В случае, когда шлаки легкие ($\rho_{\text{шл/ме}} < 1$), электрическая цепь на участке металл-электропроводящая подина действует в штатном режиме, электрическая дуга устойчива и параметры процесса оптимальны.

Из данного анализа особенностей техно-

Таблица 1 – Плотности металла и шлака и соотношение $\rho_{\text{шл/ме}}$ различных ферросплавов

Сплав	Плотность, г/см ³		Соотношение $\rho_{\text{шл/ме}}$
	металла	шлака	
Феррохром углеродистый	6,8	3,5	0,51
Ферромарганец углеродистый	6,8	3,4	0,50
Силикомарганец	6,0	3,5	0,58
Силикохром	5,0	3,7	0,74
Ферросиликоалюминий ФСА 45	4,3	3,2	0,74
Ферросилиций ФС75	3,4	3,3	0,97
Ферросилиций ФС90	2,9	2,9	1,00
Ферроалюмосиликокальций ФАСК	3,2	3,3	1,03
Ферросиликоалюминий ФСА 65	3,2	3,8	1,18
Силикокальций	2,3	2,8	1,21
Кристаллический кремний	2,3	2,9	1,26

логии ферросплавов следует сделать вывод, что **необходимым условием устойчивости электрической дуги является превышение плотности проплавленного металла над плотностью сопутствующего шлака, в противном случае процесс неустойчивый.**

Изложенная особенность поведения шлака и металла в ванне руднотермической электропечи и их влияние на сопротивление электрической цепи имеет логический, обоснованный, доказательный характер, не противоречит законам физики, подтверждается практикой и является закономерным для электротермии ферросплавов. Из данной закономерности следует правило, согласно которому, для оценки состояния технологии принимается соотношение шлака к металлу $\rho_{\text{шл/ме}}$. Это очень важный количественный показатель, характеризующий процесс, и вполне резонно определить его как критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}}$ электротермии ферросплавов.

Предложенный критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}}$ позволяет заблаговременно прогнозировать действующую или новую разрабатываемую технологии.

Например технология производства ферроалюмосиликокальция ФАСК с барием [1].

Расчеты показывают, что критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}} > 1,03$ – это рисковое, пограничное состояние. На основе этой технологии создают технологию ФАСК с барием. Добавки оксида бария ($\rho = 5,72 \text{ г/см}^3$) приводят к повышению $\rho_{\text{шл/ме}}$, что приводит к тяжелым расстройствам хода процесса.

На основе этих положений проанализируем широко разрекламированную технологию получения ферросиликоалюминия (ФСА, сплав «Казахстанский») из сопутствующей породы высокозольных углей Экибастузского месторождения [5].

В таблице 2 представлены расчеты плотностей металла и шлака (все справочные данные взяты из Википедии). Интересным является факт, что на показатель $\rho_{\text{шл/ме}}$ влияет степень перехода Si в металл. В этом плане, с позиций оценки технологии по критерию устойчивости, электротермия ФСА является пограничной $\rho_{\text{шл/ме}} = 1$. Так, при извлечении Si до 83% шлаки легче металла ($\rho_{\text{шл/ме}} < 1$) и процесс устойчивый, с повышением извлечения более 83% шлаки тяжелее ($\rho_{\text{шл/ме}} > 1$) и ход процесса нарушается. И это может быть в ходе одного периода плавки. Как показывает практика, поднимают мощность печи, увеличивается температура и соответственно извлечение, а процесс

Таблица 2 – Расчет плотностей металла и шлака при выплавке ФСА65 из угольной породы Экибастузского месторождения

Данные для расчета									
Химический состав золы		Атомная масса		Степень перехода		Плотности, г/см ³			
				металл	шлак	металл	оксид		
SiO ₂	58,98	Si	28,086	0,83	0,17	Si	2,33	SiO ₂	2,65
Al ₂ O ₃	29,76	Al	26,982	0,65	0,35	Al	2,7	Al ₂ O ₃	3,99
Fe ₂ O ₃	9,17	Fe	55,845	0,99	0,01	Fe	7,874	Fe ₂ O ₃	5,24
CaO	1,28	Ca	40,078	0,5	0,5	Ca	1,55	CaO	3,34
MgO	0,37	Mg	24,307	0,3	0,7	Mg	1,738	MgO	3,58
	99,56	O	15,999						
Расчет									
		Переход компонентов			Химический состав		Расчетные плотности		
оксид	металл	в O ₂	в Me	в Шл	% Me	% Шл	металл	шлак	Критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}}$
SiO ₂	[Si]	26,07	22,88	5,34	57,21	50,59	1,33	1,34	
Al ₂ O ₃	[Al]	9,11	10,24	4,90	25,60	46,45	0,69	1,85	
Fe ₂ O ₃	[Fe]	2,73	6,35	0,03	15,88	0,26	1,25	0,01	
CaO	[Ca]	0,18	0,46	0,18	1,14	1,73	0,02	0,06	
MgO	[Mg]	0,04	0,07	0,10	0,17	0,97	0,00	0,03	1,00
							3,29	3,30	

переходит в неустойчивое состояние. Это касательно марки сплава ФСА65 с показателем критерия устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}} = 1,18$ (при извлечении кремния 0,98). Если добавить в шихту железную стружку (увеличив плотность металла), то ход процесса нормализуется. Однако это другая марка сплава – ФСА45 с критерием устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}} = 0,74$ (таблица 1).

Также были предприняты попытки вовлечения в металлургический передел вскрышной породы углей Борлинского месторождения (таблица 3). Анализ на критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}} = 1,26$ показывает, что в чистом виде (при содержании углерода и породы в стехиометрически необходимой пропорции) породу переплавлять нельзя. Процесс электротермии нарушится. Следует предпринять технологические поправки и здесь необходимы знания закономерностей предложенной в настоящем исследовании.

Заключение

Указано на отсутствие общих теоретических предпосылок для управления и оптимизации электротермии ферросплавов.

Определены движущие силы процесса и основные факторы дестабилизации работы руднотермических электропечей. Раскрыт механизм влияния физических параметров продуктов плавления на процесс электротермии, заключающийся в том, что тяжелые шлаки, более плотные, чем проплавляемый металл, накапливаясь на подине печи, разрывают электрическую цепь. Дуга гаснет, и процесс продолжается в режиме электрошлакового переплава при значительном снижении температуры. Показано, что необходимым условием устойчивости электрической дуги является превышение плотности проплавляемого металла над плотностью сопутствующего шлака, в противном случае процесс неустойчивый.

Предложен критерий устойчивости электротермии ферросплавов $\rho_{\text{шл/ме}}$, согласно которому:

при $\rho_{\text{шл/ме}} < 1$ – система устойчива,

$\rho_{\text{шл/ме}} > 1$ – система неустойчива,

$\rho_{\text{шл/ме}} \approx 1$ – пограничное состояние.

Критерий устойчивости позволяет заблаговременно прогнозировать действующую или новую разрабатываемую технологии.

Таблица 3 – Расчет плотностей металла и шлака при выплавке ФСА65 из угольной породы месторождения Борлы

Данные для расчета										
Химический состав золы		Атомная масса			Степень перехода		Плотности, г/см ³			
					металл	шлак	металл		оксид	
SiO ₂	59,6	Si	28,086		0,83	0,17	Si	2,33	SiO ₂	2,65
Al ₂ O ₃	33,7	Al	26,982		0,65	0,35	Al	2,7	Al ₂ O ₃	3,99
Fe ₂ O ₃	2,22	Fe	55,845		0,99	0,01	Fe	7,874	Fe ₂ O ₃	5,24
CaO	0,7	Ca	40,078		0,5	0,5	Ca	1,55	CaO	3,34
MgO	0,5	Mg	24,307		0,3	0,7	Mg	1,738	MgO	3,58
	96,72	O	15,999							
Расчет										
		Переход компонентов			Химический состав		Расчетные плотности			
оксид	металл	в O ₂	в Ме	в Шл	% Ме	% Шл	металл	шлак	Критерий устойчивости $\rho_{\text{шл/ме}}$	
SiO ₂	[Si]	26,34	23,12	5,40	63,29	48,20	1,47	1,28		
Al ₂ O ₃	[Al]	10,31	11,59	5,55	31,68	49,60	0,86	1,98		
Fe ₂ O ₃	M	0,66	1,54	0,01	4,20	0,06	0,33	0,00		
CaO	[Co]	0,10	0,25	0,10	0,68	0,89	0,01	0,03		
MgO	[Mg]	0,06	0,09	0,14	0,25	1,24	0,00	0,04	1,25	
							2,67	3,33		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородаенко Л.Н., Такенов Т.Д., Габдуллин Т.Г. Электротермия комплексных сплавов с активными элементами. - Алма-Ата, 1990. – 120 с.
2. Чекимбаев А.Ф., Макаев Т.С., Исагулов А.З., Достоева А.М., Исагулова Д.А. Исследование восстановления диоксида кремния и оксида алюминия при выплавке сплава ферросиликоалюминия из высокозольных углей // Вестник ВКГТУ. – 2018. – № 4. – С. 190-194.
3. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов // М.: Металлургия, 1988. – 783 с.
4. Gasik, M. Handbook of ferroalloys: theory and technology // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 536 p.
5. Предпат. 19287 РК. Способ получения ферросиликоалюминия в руднотермической печи // Байсанов С.О., Толымбеков М.Ж., Жарменов А.А., Такенов Т.Д.; опублик. 15.04.2008, Бюл. № 4. – 5 с.
6. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевых производств // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017. – № 1. – С. 31-39.
7. Рябчиков И.В., Бакин И.В., Усманов Р.Г., Ромашко А.О. О бесшлаковом способе производства силикокальция и силикобария // Бюллетень «Черная металлургия». – Том 78. № 8. 2022. – С. 692-696.

Ферроқорытпалардың электр доғалық кен термиясының тұрақтылық критеріі

ЖАКИБЕКОВ Тыштықбай Бейсембайұлы, т.ғ.к., tbzhakibek@mail.ru.

Аңдатпа. Доғалы кенді-термиялық электр пештерінде ферроқорытпаларды өндіру технологиясын теориялық және эксперименттік зерттеулерге жалпылама талдау жүргізілді. Электротермия процестері өте жоғары температурада компоненттердің, қатты, сұйық және газ фазаларының физика-химиялық өзара әрекеттесуінің өте алуан түрлілігімен, тұрақсыз электр параметрлерін оңтайландырудың күрделі міндетімен ерекшеленетіні атап өтілді. Бұл электротермия процесін басқару мәселесін шешудің теориялық тәсілдерінің әртүрлілігіне байланысты. Қазіргі теория тұрғысынан технология параметрлеріне әсер ету әрекеттері сәтсіз, атап айтқанда термодинамикалық-диаграммалық талдау әдісі. Іс жүзінде электротермия барысын реттеу жалпы білімнен басқа, өнер мен түйсіктің үлкен үлесін талап етеді. Осы зерттеудің мақсаты ферроқорытпалардың электротермиясы процесінің аса маңызды қозғаушы күштерін талдау және анықтау және электр күштерінің әсерінен физика-химиялық түрлендірулердің ерекшеліктерін ашатын бірыңғай үйлесімді кешен құру болып табылады. Бұл жұмыста қарапайым талдау ферроқорытпа электротермиясы технологиясы параметрлерінің тұрақтылығын анықтайтын ең ықтимал механизмді көрсетеді және дәлелдейді. Зерттеу нәтижелері бойынша қолданыстағы технологияларды болжауға және жаңа технологияларды жасауға мүмкіндік беретін ғылыми негізделген критерий ұсынылды.

Кілт сөздер: ферроқорытпалар, электротермия, руднотермиялық электр пештері, тұрақтылық, орнықтылық, электр доғасы, тығыздық, кремний.

The Criterion of Stability of Electric Arc Ore Metallurgy of Ferroalloys

ЖАКИБЕКОВ Тыштықбай, Cand. of Tech. Sc., tbzhakibek@mail.ru.

Abstract. A generalized analysis of theoretical and experimental studies of ferroalloy production technology in arc ore-thermal electric furnaces has been carried out. It is noted that the processes of electrothermy are characterized by an extraordinary variety of physico-chemical interactions of components, solid, liquid and gas phases at ultrahigh temperatures, and the

complicated task of optimizing unstable electrical parameters. This is due to the variety of theoretical approaches to solving the problem of controlling the process of electrothermia. Attempts to influence the parameters of technology from the standpoint of modern theory have been unsuccessful, in particular by the method of thermodynamic-diagram analysis. In practice, regulating the course of electrothermia requires, in addition to general knowledge, a significant amount of art and intuition. The purpose of this study is to analyze and determine the most important driving forces of the ferroalloy electrothermy process and create a single harmonious complex that reveals the features of physico-chemical transformations under the action of electric forces. In this work, a simple analysis shows and proves the most probable mechanism determining the stability and stability of the parameters of ferroalloy electrothermy technology. Based on the research results, a scientifically based criterion is proposed that allows predicting the current and developing new technologies.

Keywords: ferroalloys, electrothermy, ore-thermal electric furnaces, stability, sustainability, electric arc, density, silicon.

REFERENCES

1. Borodaenko L.N., Takenov T.D., Gabdullin T.G. Electrothermy of complex alloys with active elements // Alma-Ata: 1990. – 120 p.
2. Chekimbaev. A.F., Makaev T.S., Isagulov A.Z., Dostaeva A.M., Isagulova D.A. Study of the reduction of silicon dioxide and aluminum oxide during the smelting of ferrosilicoaluminum alloy from high-ash coals // «Bulletin of EKSTU» 2018. – No. 4, pp. 190-194.
3. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I., Theory and technology of production of ferroalloys // Moscow: Metallurgy, 1988. – 783 p.
4. Gasik, M. Handbook of ferroalloys: theory and technology // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 536 p.
5. Predpat. 19287 RK. Method for producing ferrosilicon aluminum in an ore-thermal furnace // Baysanov S.O., Tolymbekov M.Zh., Zharmenov A.A., Takenov T.D.; publ. 04/15/2008, Bulletin. No. 4. – 5 p.
6. Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-chemical composition of furnace slags from silicon production // News of universities. Non-ferrous metallurgy. – 2017. – No. 1. – Pp. 31-39.
7. Ryabchikov I.V., Bakin I.V., Usmanov R.G., Romashko A.O. About the slag-free method for the production of silicocalcium and silicobarium // Bulletin «Ferrous metallurgy». – Vol. 78. No. 8, 2022. – Pp. 692-696.

Обработка ферросилиция борсодержащими флюсами для снижения содержания алюминия

¹**АКБЕРДИН Александр Абдуллович**, д.т.н., профессор, зав. лабораторией Бор, akberdin_38@mail.ru,

¹**КИМ Александр Сергеевич**, д.т.н., главный научный сотрудник, Boron_213@mail.ru,

¹***ОРЛОВ Алексей Сергеевич**, PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник, wolftailer@mail.ru,

²**СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауржанович**, PhD, и.о. доцента, sulrus83@mail.ru,

³**ЗАЯКИН Олег Вадимович**, д.т.н., профессор, зав. лабораторией ферросплавов и сталей, zferro@mail.ru,

¹Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Казахстан, Караганда, ул. Ермакова, 63,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

³УрО РАН ИМЕТ имени Ватолина, ул. Амундсена, 101, Екатеринбург, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В рамках данной работы выполнено полное термодинамическое моделирование процесса обработки ферросилиция боратовыми флюсами. Установлено, что в этом случае из ферросилиция удаляется алюминий и происходит легирование бором. Присутствие бора в металле обеспечивают FeB , Fe_3SiB_2 и TiB_2 . В металл извлекается 86% бора от загруженного. Проведены лабораторные опыты по получению ферросилиция с низким содержанием алюминия в печи сопротивления Таммана. Доказана возможность практического производства ферросплава с использованием в качестве флюса казахстанской боратовой руды. Средний химический состав получаемого ферросилиция (мас. %): 63,6 Fe, 31,89 Si, 3,41 B, 0,51 Ti, 0,31 Cu, 0,26 Al.

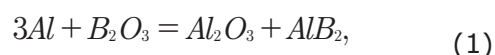
Ключевые слова: ферросилиций, борсодержащие флюсы, термодинамическое моделирование, удаление алюминия, легирование.

Теоретический анализ. Ужесточение требований к качеству стали повысило спрос на специальные марки ферросилиция с пониженным содержанием примесей: алюминия, кальция, углерода, титана, фосфора, хрома и т.д. В настоящее время ведущие фирмы - производители ферросилиция - освоили производство чистых и высокочистых по примесям сортов ферросилиция. Особое внимание при этом уделяется получению в металле низких концентраций алюминия. Связано это с тем, что при подаче такого ферросплава в сталь алюминий окисляется до глинозема, плохо удаляется из слитка, загрязняет его, снижая качество по механическим свойствам [1]. В электротехнических сталях он приводит к повышению электрического сопротивления, вызывая ваттные потери и перегрев трансформаторов.

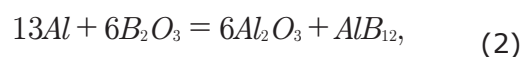
Проект имеет целью очистить ферросилиций от таких нежелательных для сталей примесей, как Al, Cu, Pb, Zn, и одновремен-

но легировать его бором обработкой борным ангидридом или содержащими его природными рудами. Предлагаемый процесс оценили по изменению энергии Гиббса реакций взаимодействия элементов ферросилиция с борным ангидридом в диапазоне температур 298-2500K. Ниже их характеристики приведены для температуры 298,15K.

Окисление алюминия кислородом B_2O_3 идет энергично по всем изученным реакциям (1-2) [2]. Однако нельзя допускать недостатка B_2O_3 , т.к. в этом случае алюминий в ферросилиции останется в виде AlB_2 и AlB_{12} .



$$\Delta G = -537,4 \text{ кДж},$$

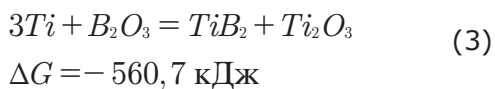


$$\Delta G = -2599,7 \text{ кДж},$$

Содержащийся в ферросилиции кремний также может окислиться. Этого нельзя допу-

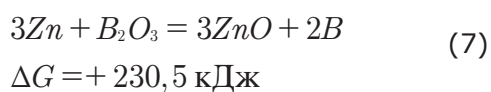
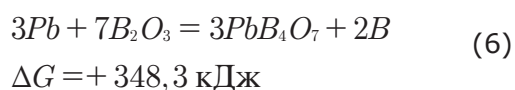
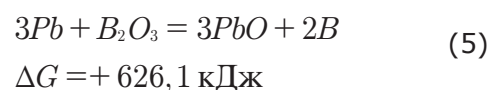
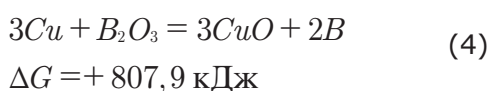
скать, т.к. кремний является ведущим элементом ферросилиция. Для этого необходимо соблюдать соотношение между Al и B_2O_3 , чтобы не оставалось излишнего количества борного ангидрида [3, 4].

Взаимодействие титана с борным ангидридом описали следующей реакцией:



Судя по величине ΔG_{298} , титан по взаимодействию с борным ангидридом может конкурировать с Al и Si. По этой причине в ферросилиции возможно присутствие диборида титана TiB_2 .

Взаимодействие меди, свинца и цинка с B_2O_3 описали следующими реакциями:



Из полученных данных следует, что медь, свинец и цинк таким способом окислить и перевести в шлак не удастся. Известно, что в сталеплавильных печах даже при прямом вдувании кислорода (конвертер) цветные металлы не удается окислить и удалить в шлак. По этой причине на заводах черной металлургии металлический лом с примесями цветных металлов не используется.

Выполнили полное термодинамическое моделирование с использованием комплекса ТЕРРА, когда учитываются все составляющие реагирующих веществ [5]. Моделирование выполняли в диапазоне температур 1500-2500 К, который охватывал уровень нагрева металла на выпуске из печи и его регламентированное охлаждение при нахождении в ковше. Исходный состав ферросилиция был следующий (мас. %): 64,2 Fe, 25 Si, 10 Al, 0,3 Cu, 0,48 Ti, 0,01 Zn, 0,01 Pb. Ферросилиций обрабатывали B_2O_3 и плавленной боратовой рудой индерского месторождения Атырауской области состава (мас. %): 12,1 B_2O_3 , 24,7 SiO_2 , 35,5 CaO, 20,3 MgO, 7,4 Al_2O_3 .

Рисунки 1 и 2 показывают результаты обработки ферросилиция борным ангидридом в диапазоне его расхода от 3 до 6 % от веса металла. Это должно обеспечить содержание бора в металле в пределах 1-2 %.

Присутствие бора в металле обеспечивают FeB, Fe_5SiB_2 и TiB_2 . Вызывает беспокойство присутствие в металле содержащего алюминий соединения Al_2Fe_2Si . Его поведение будет исследовано ниже при использовании боратовой руды.

При всех температурах медь не окисляется и остаётся в металле. Свинец при 1500 и 1750 К содержится в нем в количестве $0,92 \cdot 10^{-4}$ – $0,65 \cdot 10^{-4}$ массовых долей, а при более высоких температурах (2000-2500 К) не обнаруживается вообще. Это согласуется с температурой кипения свинца, составляющей 2013 К [6]. Цинк при всех исследованных температурах (1500-2500 К) в металле не обнаруживается, поскольку его температура кипения составляет 1180 К.

Планируемый к выпуску из руд Шалкия ферросилиций имеет пониженное содержание кремния (25-40 %). Такой ферросплав применяют не в сталеплавильной промышленности, а для производства литейного чугуна [7]. В последнем медь повышает прочность при растяжении (до 40 %) и текучесть (до 50 %). Поэтому медь из руд Шалкия для ферросилиция можно считать полезной примесью. Свинец в чугуне ограничивают содержанием 0,005 % из-за отрицательного влияния на его свойства, равно как и цинк.

Для приближения к производственным условиям выполнили полный термодинамический анализ процесса обработки ферросилиция плавленной боратовой рудой индерского месторождения в диапазоне температур металла на выпуске 2000-2200 К. На рисунке 3 показаны фазовые составы металла и шлака этого процесса.

Доминирующей фазой в металле является силицид железа (FeSi), а носителями бора – Fe_5SiB_2 , FeB и TiB_2 . Алюминий обнаруживается в чистой форме в предельно низких содержаниях 1·10⁻¹⁵. Таким образом, достигается цель удаления алюминия и легирование ферросилиция бором. Металлическая медь (Cu) сохраняется вплоть до 2150 К. Цинк и свинец отсутствуют.

Шлак складывается из моноалюмината кальция ($CaAl_2O_4$), боратов магния ($Mg_3B_2O_6$, MgB_4O_7) и кальция ($Ca_2B_2O_5$). Они обеспечивают хорошее отделение шлака от металла из-за низкой вязкости и температуры плавления.

На рисунке 4 показан состав газовой фазы при обработке ферросилиция индерской боратовой рудой.

В ней преобладают Mg, Cu, Pb, Zn. Менее подвержены улёту их оксиды. Исходя из полученных данных рекомендовано в производственных условиях использовать казахстанскую боратовую руду. Установлено, что в этом случае из ферросилиция активно

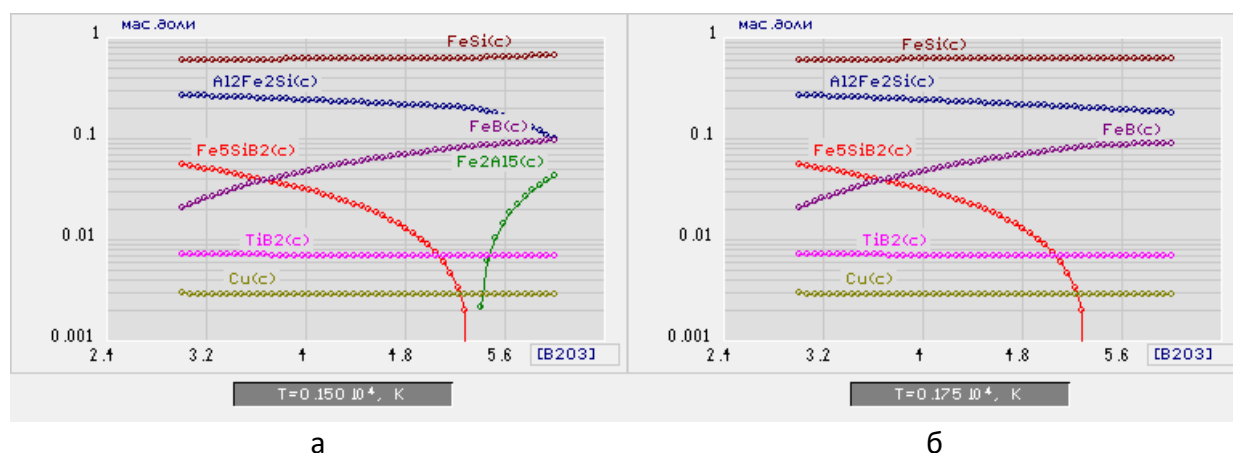


Рисунок 1- Влияние борного ангидрида на фазовый состав ферросилиция при температурах 1500 К (а) и 1750 К (б)

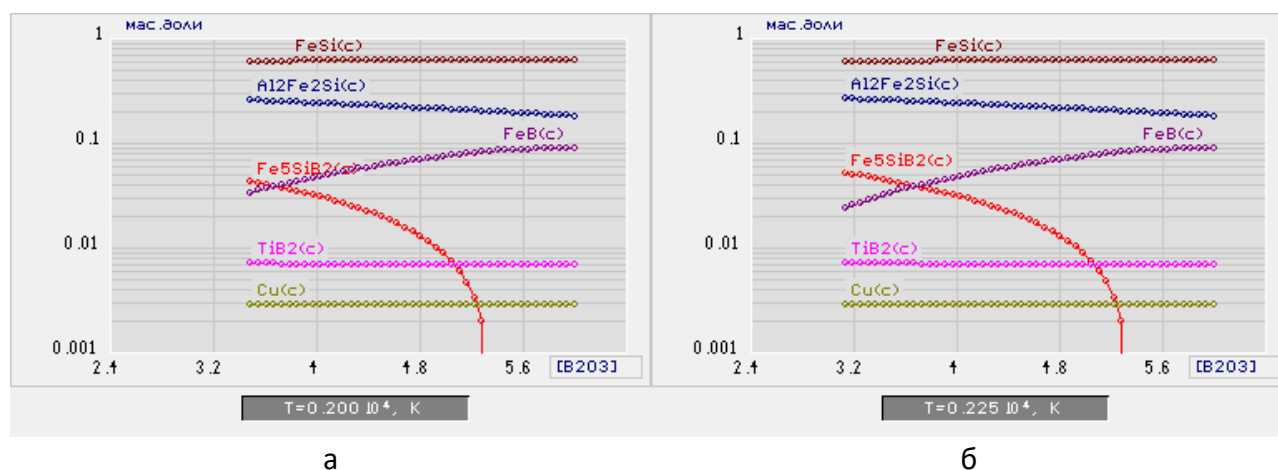


Рисунок 2 - Влияние борного ангидрида на фазовый состав ферросилиция при температурах 2000 К (а) и 2250 К (б)

удаляется алюминий и происходит легирование бором. Присутствие бора в металле обеспечивают FeB, Fe_5SiB_2 и TiB_2 . При всех температурах медь не окисляется и остаётся в металле, являясь полезным элементом для литейных чугунов, свинец и цинк отсутствуют. Средний химический состав получаемого ферросилиция (мас. %): 31,2 Si, 1,21 B, 0,50 Ti, 0,29 Cu. В металл извлекается 86% бора от загруженного. Шлак содержит (мас. %): 33,4 CaO, 55,9 Al_2O_3 , 9,1 MgO, 1,6 B_2O_3 . Его доля от металла составляет 0,4.

Материалы и методика эксперимента. Для обработки ферросилиция в качестве флюсов было решено использовать предварительно проплавленную индерскую боратовую руду. Ферросилиций (мас. %): 56,2 Fe, 35 Si, 8 Al, 0,3 Cu, 0,48 Ti, 0,01 Zn, 0,01

Pb и индерская боратовая руда (мас. %): 36,07 CaO, 18,75 MgO, 28,17 SiO_2 , 3,16 Al_2O_3 , 11,0 B_2O_3 , 2,85 Fe_2O_3 были предварительно продроблены до фракции 3-5 мм.

На основании теоретических разработок были проведены лабораторные испытания по получению ферросилиция с низким содержанием алюминия.

Экспериментальные исследования. Опыты по обработке ферросилиция плавной боратовой рудой Индерского месторождения проводили в печи сопротивления Таммана. Температуру в печи измеряли при помощи вольфрам-рениевой термопары ВР 5-20. Ферросилиций фракцией 3-5 мм загружали в графитовый тигель ($h - 120$ мм, $d - 50$ мм), устанавливали в печь. Сверху тигель продували аргоном, чтобы не было окисления ме-

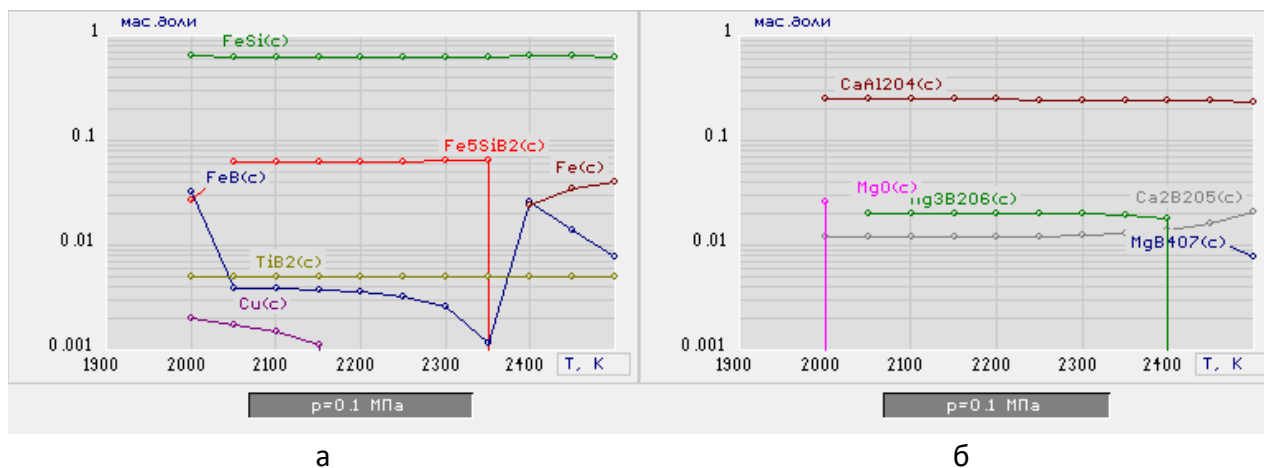


Рисунок 3 – Фазовый состав металла (а) и шлака (б) при обработке ферросилиция индерской боратовой рудой

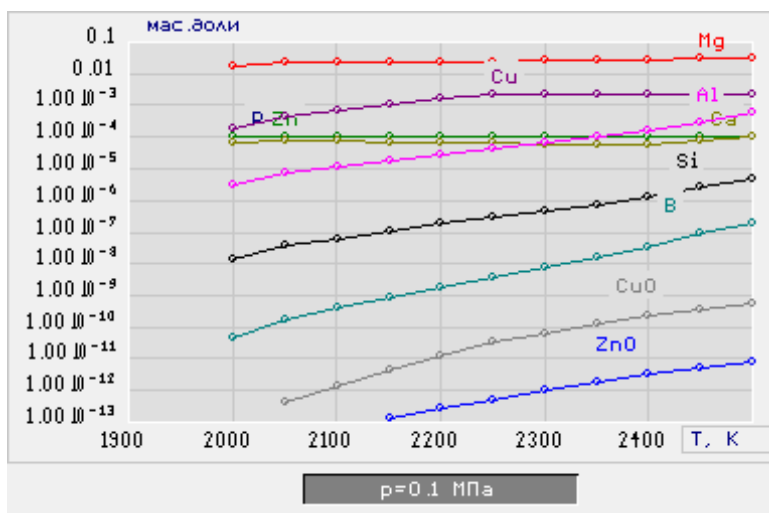


Рисунок 4 – Состав газовой фазы при обработке ферросилиция индерской боратовой рудой

талла, и поднимали температуру до 1650°C. При достижении заданной температуры давали выдержку 10 минут, после этого вводили в тигель навеску плавленной боратовой руды. Общая выдержка при температуре 1650°C во время обработки ферросилиция боратовой рудой составляла 20 минут. Затем тигель вынимали из печи и охлаждали.

Результаты химического анализа полученного металла представлены в таблицах 1, 2.

Как видно из полученных данных, при недостатке боратовой руды начинает расти содержание алюминия в сплаве, а при избытке на восстановительные процессы расходуется не только алюминий, но и ведущий

элемент – кремний.

Заключение.

1. Выполнено полное термодинамическое моделирование процесса обработки ферросилиция боратовыми флюсами. Установлено, что в этом случае из ферросилиция удаляется алюминий и происходит легирование бором. Присутствие бора в металле обеспечивают FeB, Fe₅SiB₂ и TiB₂. В металл извлекается 86 % бора от загруженного.

2. Проведены лабораторные опыты по получению ферросилиция с низким содержанием алюминия в печи сопротивления Таммана. Доказана возможность практического производства ферросплава с использованием в качестве флюса казахстанской

Таблица 1 – Исходные шихтовые материалы

Шихтовые материалы	Химический состав, %						
Ферросилиций	Fe	Si	Al	Cu	Ti	Zn	Pb
	56,2	35	8	0,3	0,48	0,01	0,01
Плавляная Индерская боратовая руда	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	B ₂ O ₃	-
	36,07	18,75	28,17	3,16	2,85	11,0	-

Таблица 2 – Химический состав продуктов плавки при использовании Индерской боратовой руды

Шихта	Химический состав металла, %							
	Fe	Si	Al	Cu	Ti	Zn	Pb	B
Недостаток бор. руды 20 %	60,51	34,78	1,44	0,31	0,49	0,01	0,01	2,45
Недостаток бор. руды 10 %	60,75	34,69	0,95	0,3	0,49	0,01	0,01	2,80
По стехиометрии	60,91	34,71	0,39	0,31	0,51	0,01	0,01	3,15
Избыток бор. руды 10 %	63,6	31,89	0,26	0,31	0,51	0,01	0,01	3,41
Избыток бор. руды 20 %	65,51	29,77	0,12	0,32	0,53	0,01	0,01	3,73

боратовой руды. Средний химический состав получаемого ферросилиция (мас. %): 63,6 Fe, 31,89 Si, 3,41 B, 0,51 Ti, 0,31 Cu, 0,26 Al. Таким образом, использование казахстанской боратовой руды позволяет удалить из ферросилиция 95,1-98,5% алюминия и легировать его бором на уровне 3,15-3,73%, чем достигаются поставленные в проекте

задачи.

Данное исследование финансировалось Комитетом развития промышленности Министерства индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан (Грант № BR19777171).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильиных Н.И., Моисеев Г.К., Куликова Т.В. и др. Термодинамические характеристики расплавов Fe-Al // Известия Челябинского научного центра. – 2003. – Т. 19, № 2 – С. 32-36.
2. Dinsdale A. T. SGTE data for pure elements // Calphad. – 1991. – Vol. 15. – Pp. 317-425.
3. Aronsson B., Lundgren G., Hansen S. et al. X-Ray Investigations on Me-Si-B Systems (Me = Mn, Fe, Co). I. Some Features of the Co-Si-B System at 1000 degrees C. Intermediate Phases in the Co-Si-B and Fe-Si-B Systems // Acta Chemica Scandinavica. – 1959. – No. 13. – Pp. 433-441.
4. Miettinen J., Visuri V-V., Fabritius T. et al. Thermodynamic description of ternary Fe-B-X systems. Part 5: Fe-B-Si. // Arch. Metall. Mater. – 2019. Vol. 4. – Pp. 1239-1248.
5. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. – В кн.: III межд. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24-26 августа 2005. Алматы, Казахстан. – Алматы: Казак. университеті. – С. 52-57.
6. Thermo-Calc Software. Режим доступа: <http://www.thermocalc.com> (дата обращения 11.10.2023).
7. Lacaze J., Dawson S., Hazotte A. Cast Iron: A Historical and Green Material Worthy of Continuous Research / International Journal of Technology. – 2021. No. 12. Pp. 1123-1138.

Алюминий құрамын азайту үшін құрамында бор бар ағындармен ферросилицийді өңдеу

¹**АКБЕРДИН Александр Абдуллаевич**, т.ғ.д., Бор зертханасының меңгерушісі, Akberdon_38@mail.ru,

¹**КИМ Александр Сергеевич**, т.ғ.д., Бор зертханасының бас ғылыми қызметкері, boron_213@mail.ru,

¹***ОРЛОВ Алексей Сергеевич**, PhD, қауымдастырылған профессор, аға ғылыми қызметкері, wolftailer@mail.ru,

²**СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауыржанович**, PhD, доцент м.а., sulrus83@mail.ru,

³**ЗАЯКИН Олег Вадимович**, т.ғ.д., Феррокорытпа және болат зертханасының меңгерушісі, zferro@mail.ru,

¹Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Ермаков көшесі, 63, Қарағанды, Қазақстан,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

³Ватолін атындағы УрО РАН ИМЕТ, Амундсен көшесі, 101, Екатеринбург, Ресей,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Осы жұмыс аясында ферросилицийді борат ағындарымен өңдеу процесін толық термодинамикалық модельдеу жүргізілді. Бұл жағдайда алюминий ферросилицийден алынып тасталатыны және бор көмегімен жүретіні анықталды. Металда бордың болуын FeB , Fe_5SiB_2 және TiB_2 қамтамасыз етіліп, металл жүктелгеннен бордың 86% алынады. Тамманның пешінде төмен алюминий ферросилиций алу үшін зертханалық тәжірибелер жүргізілді. Қазақстандық борат кенін ағын ретінде пайдалана отырып, ферроқорытпаны іс жүзінде өндіру мүмкіндігі дәлелденді. Алынған ферросилицийдің орташа химиялық құрамы (мас. %): 63,6 Fe, 31,89 Si, 3,41 B, 0,51 Ti, 0,31 Cu, 0,26 Al.

Кілт сөздер: ферросилиций, құрамында бор бар ағындар, термодинамикалық модельдеу, алюминийді кетіру, легирлеу.

Treatment of Ferrosilicon with Boron-Containing Fluxes to Reduce Aluminum Content

¹**AKBERDIN Aleksandr**, Dr. of Tech. Sc., Professor, Head of Laboratory Bor, Akberdon_38@mail.ru,

¹**KIM Aleksandr**, Dr. of Tech. Sc., Chief Researcher of Laboratory Bor, boron_213@mail.ru,

¹***ORLOV Alexey**, PhD, Associate Professor, Senior Researcher, wolftailer@mail.ru,

²**SULTANGAZIEV Ruslan**, PhD, Acting Associate Professor, sulrus83@mail.ru,

³**ZAYAKIN Oleg**, Dr. of Tech. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Ferroalloys and Steels, zferro@mail.ru,

¹Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Ermekov Street, 63, Karaganda, Kazakhstan,

²NPJSC «Abylqas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

³Ural Branch of the Russian Academy of Sciences named after Vatolin, Amundsen Street, 101, Yekaterinburg, Russia,

*corresponding author.

Abstract. In this work, a complete thermodynamic modeling of the ferrosilicon treatment process with borate fluxes was performed. It was found that in this case, aluminum is removed from ferrosilicon and alloying with boron occurs. The presence of boron in the metal is provided by FeB , Fe_5SiB_2 and TiB_2 . 86% of the loaded boron is extracted into the metal. Laboratory experiments were conducted to obtain ferrosilicon with a low aluminum content in a Tamman resistance furnace. The possibility of practical production of ferroalloy using Kazakhstan borate ore as a flux was proven. The average chemical composition of the resulting ferrosilicon (wt. %): 63,6 Fe, 31,89 Si, 3,41 B, 0,51 Ti, 0,31 Cu, 0,26 Al.

Keywords: ferrosilicon, boron-containing fluxes, thermodynamic modeling, aluminum removal, alloying.

REFERENCES

1. Il'inyh N.I., Moiseev G.K., Kulikova T.V. i dr. Termodinamicheskie harakteristiki rasplavov Fe-Al. Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra. – 2003. – T. 19, № 2 – Pp. 32-36.
2. Dinsdale A. T. SGTE data for pure elements. Calphad. – 1991. – Vol. 15. – Pp. 317-425.
3. Aronsson B., Lundgren G., Hansen S. ect X-Ray Investigations on Me-Si-B Systems (Me = Mn, Fe, Co). I. Some Features of the Co-Si-B System at 1000 degrees C. Intermediate Phases in the Co-Si-B and Fe-Si-B Systems. Acta Chemica Scandinavica. – 1959. – No. 13. – Pp. 433-441.
4. Miettinen J., Visuri V-V., Fabritius T. ect. Thermodynamic description of ternary Fe-B-X systems. Part 5: Fe-B-Si. Arch. Metall. Mater. – 2019. Vol. 4. – Pp. 1239-1248.
5. Trusov B.G. Programmnaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovyh i himicheskikh ravnovesij pri vysokih temperaturah. – V kn.: III mezhd. simpozium «Gorenie i plazmohimiya». 24-26 avgusta 2005. Almaty, Kazahstan. – Almaty: Kazak. universiteti. – Pp. 52-57.
6. Thermo-Calc Software. Rezhim dostupa: <http://www.thermocalc.com> (data obrashcheniya 11.10.2023).
7. Lacaze J., Dawson S., Hazotte A. Cast Iron: A Historical and Green Material Worthy of Continuous Research / International Journal of Technology. – 2021. No 12. Pp. 1123-1138.

СББ станоктарындағы бұрандалы беттергі қалпына келтіру кезіндегі дірілдің себептерін талдау

¹**БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна**, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, t.buzauova@ktu.edu.kz,

^{1*}**ЕҢБЕК Дамир Жақсыбекұлы**, докторант, damiko_e@mail.ru,

²**ГАВРИЛИН Алексей Николаевич**, т.ғ.д., профессор, gawral@tpu.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

²Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ленин даңғылы, 30, Томск, Ресей, *автор-корреспондент.

Аңдатпа. СББ (сандық бағдарламамен басқарылатын) станоктарындағы дірілдер өңдеудің дәлдігі мен жабдықтардың қызмет ету мерзіміне әсер ететін маңызды фактор болып табылады. Атқарушы органдардың дәл қозғалысына жауап беретін жетек біліктерінің бұрандалы беттерін қалпына келтіру кезіндегі дірілді талдау ерекше маңызға ие. Басқарылмайтын, әрі бақыланбайтын дірілдер тетіктердің тез тозуына, бөлшектер сапасының төмендеуіне және жабдықтың тоқтап қалу уақытын ұзартады. Мақалада СББ станоктардың бұрандалы беттерін қалпына келтіру кезінде пайда болатын дірілдің себептері мен сипаттары қарастырылады. Балқытылып, механикалық өңделу арқылы қалпына келтірілген бұрандалы жұптар күшейтілген дірілді тудырады, бұл СББ станоктарының позициялау дәлдігін, беріктігін және өңдеу сапасын төмендетеді. Мәжбүрлі, өздігінен қозатын және акустикалық дірілдің көздеріне, олардың технологиялық және құрылымдық параметрлермен байланысына талдау жасалды. Қалпына келтіру кезіндегі материалдардың сәйкес келмеуіне, бұранда қадамының ауытқуына және құрылымдық ақаулардың әсеріне назар аударылды. Дірілді бақылауға және бұрандаларды қалпына келтіру әдістерін жетілдіруге, соның ішінде, материалдарды таңдауға және бұрандалардың геометриясын бақылауға кешенді көзқарас керек. Мақалада қарастырылған нәтижелер бұрандаларды қалпына келтіру дәлдігін жақсарту үшін және СББ жүйелеріндегі бұрандалы жұп ресурстарын арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілт сөздер: СББ станоктары, бұрандалы жұп, діріл, шарикті-бұрандалы жетектер.

Кіріспе. СББ жүйесімен жабдықталған станоктар оператор орнатқан өңдеу бағдарламасына сәйкес бөлшектерді автоматты түрде өңдейді. Металл кескіш станоктарда бағдарламалық басқаруды пайдалану өңдеу процестерін жоғары дәлдікте қайталануын қамтамасыз етеді, бұл әсіресе сериялық өндіріс үшін тиімді. Бұл станоктар түсінуге оңай және икемді параметрлерге ие, сонымен қатар, операторлардың жұмысын жеңілдеті келе, адам факторына байланысты өнімнің ақауын азайтады [1].

Станоктық құрал күймешегін және жұмыс органдарын жылжыту траекториясының дәлдігі бағыттаушылармен, ал позициялау дәлдігі шарикті – бұрандалы жетектермен қамтамасыз етіледі [2]. Заманауи СББ ста-

ноктарда қолданылатын бұндай жетектер 6 мкм дейінгі позициялау дәлдігін қамтамасыз етеді. СББ станоктарында өңдеу кезіндегі жоғары сызықтық жылдамдық, айналу жиілігі, жоғары кесу күштері және соққы жүктемелер осы жетектің бұрандалы беттерінің тозуына, серпіліс қозғалысына және дірілді тудырады, ал ол өңдеу сапасына әсер етеді. Осьтік күші (500 Н дейін) және айналу жылдамдығы (1000-1500 айн/мин) мәзірлерімен кесетін Bodor-C6 Lean металдарды газ және лазермен өңдеуге арналған СББ станок конструкциясында шарикті-бұрандалы жетектер арқылы ұзындығы 1 м болатын дайындама бойымен қозғалу қажет, жұмыс үздіксіз 800 жұмыс сағаты бойы орындалады, сондықтан жетектердің жұмысшы бұрандалы

беттерінде тозу (бұранда шыңдарының диаметрін 0,05 мм-ге тоздыру) және позициялау дәлдігі 0,1 мм-ге дейін төмендеуі байқалады.

Бұрандалы беттердің істен шығу себептерін талдайтын болсақ (кесте) СББ станоктарда бұрандалы жұптардың істен шығуы ақаулардың жалпы санының 72,34% құрайтыны анықталды [2].

Тозған бұрандалы беттер балқытылып, одан кейін механикалық өңдеумен қалпына келтіріледі. Қарағанды облысының машина жасау өндіріс-кәсіпорындарында (КЛМЗ) 2021-2024 жылдары орындалған ақау журналдарын сараптау барысында, қалпына келтіру операцияларын орындау кезіндегі «тетік пен кесу құрылғысы» жүйесіндегі тербелістерден туындаған ақаулар көп кездесетіні анықталды.

Зерттеу мақсаты – СББ станоктарында бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезіндегі дірілдің, яғни балқытылып, механикалық өңделген беттерді қалпына келтіру кезіндегі діріл себептерін зерттеу.

Негізгі мәселе – қалпына келтірілгеннен кейін діріл күшейіп, бөлшектердің қызмет ету мерзімі қысқарады, позициялау дәлдігі төмендейді. Себептері: қалпына келтіру кезіндегі технологиялық қателер (қадам ақаулары, материалдың сәйкес келмеуі және т.б.) және «құрал-дайындама» жүйесіндегі дірілдің ұлғаюы.

Зерттеу әдістемесі: Әдеби-дереккөздер мен техникалық құжаттаманы талдау: бұрандалы беттердің істен шығу себептері және оларды қалпына келтіру әдістері туралы ақпаратты жинау және жүйелеу; бұрандалы беттерді қалпына келтіру әдістеріне шолу; машина жасау кәсіпорындарының ақаулар жайлы журналдарын талдау.

Негізгі бөлім. СББ станоктардағы дірілдің негізгі көздері үш санатқа жіктеледі (1-сурет) [4]:

1. Мәжбүрлі дірілдер (айналдырықтың

дисбалансы, қалыпсыз беріліс және кесу аймағына салқындату-майлау сұйықтығын (СМС) беру кезіндегі кавитациялық құбылыстар);

2. Өздігінен қозатын дірілдер (кесу күштерінің өзгеруі, мойынтіректердегі үйкеліс);

3. Акустикалық резонанс (айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігі).

Мәжбүрлі дірілдер сыртқы күштердің әсерімен пайда болады және станоктың конструктивті немесе пайдалану кезіндегі ақауларымен байланысты, яғни, айналырлықтың дисбалансы, беріліс пен СМС пульсациясы, өңделетін тетіктердің эксцентриситеті

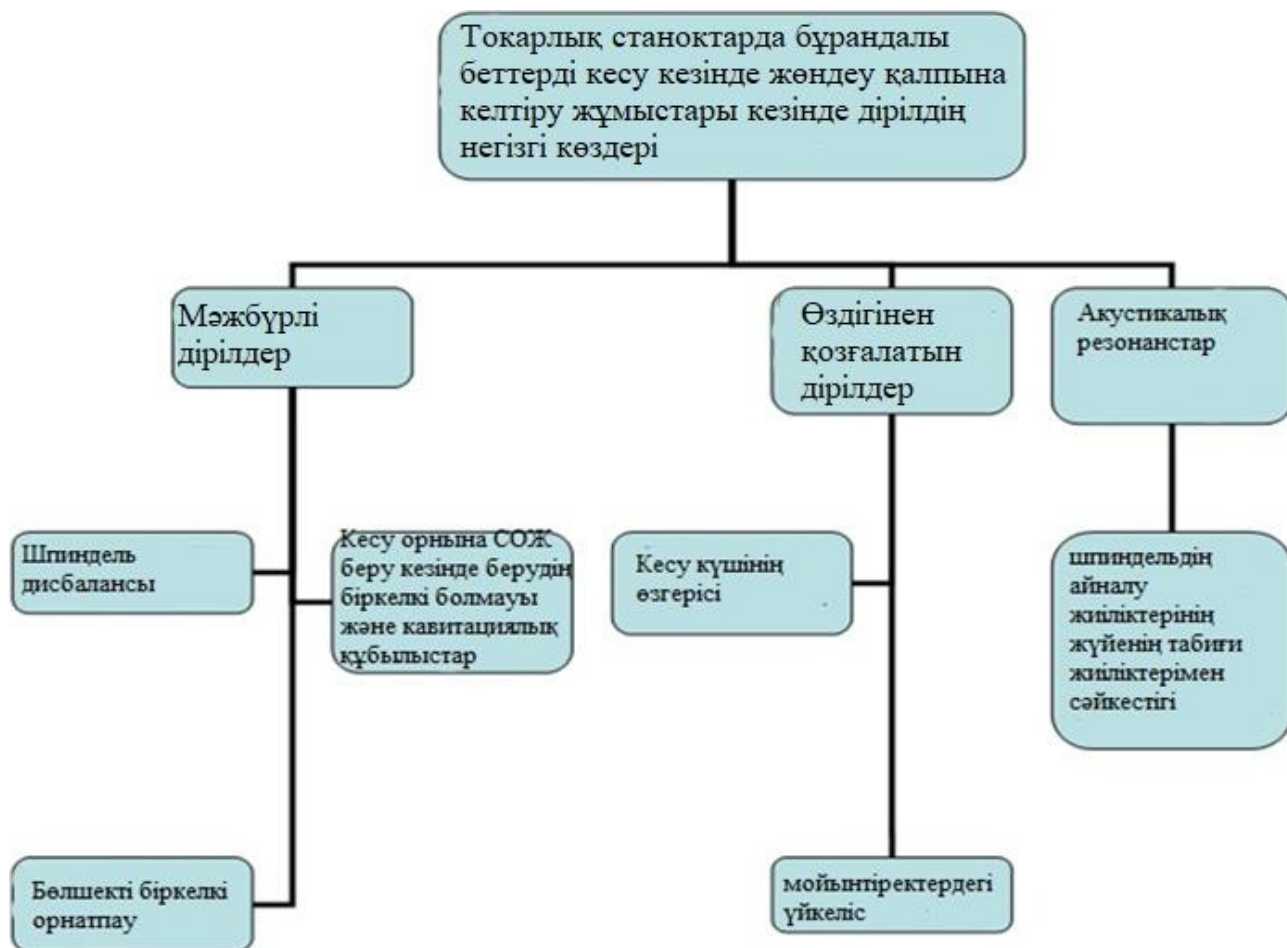
Айналырлық дисбалансы – айналатын элементтер осьтерінің сәйкес келмеуі (айналырлықтың 0,1 г·мм-ден асатын теңгерімсіздігі) центрден тепкіш күштерді тудырады. Центрден тепкіш күштер айналырлықтың айналу жиілігіне тең жиіліктегі дірілдерге әкеледі. [3] аталғандай, рұқсат етілген нормадағы 5% деңгейіндегі теңгерімсіздік дірілдің амплитудасын 12-15%-ға арттырады.

Берілістің және СМС пульсациясы немесе каретканың үзілісті қозғалысы (мысалы, жетек белдемелерінің тозуына байланысты) 2-4 октава диапазонында дірілді тудырады. [4] авторлар жүрісті бұранда қадамының 0,01 мм-ден жоғары ақауы жүйеде резонанс тудыратыны аталған. Тәжірибелік зерттеулерде кесу тереңдігі 2 мм көп және айналырлықтың жылдамдығы 1500 айн/мин-ден жоғары болғанда кавитация ұлғаятыны анықталған. Мысалы, 40ХН маркалы болатты $\varnothing = 180$ мм/мин жылдамдықпен өңдегенде амплитудасы 0,03 мм болатын кавитациялық дірілдер тіркелген, ал жылдамдықты $\varnothing = 120$ мм/мин төмендеткенде амплитуданың 0,01 мм дейін төмендегені зерттелген [5].

Бағыттаушы беттерінің өзара параллель болмауы немесе оларды орнату қателіктері құралдың қозғалу жылдамдығының есе-

2021-2024 жж. СББ станоктардың істен шығу себептері

Ел	Бұрандалы беттердің тозуы	Электроникалық ақаулар	Механикалық сыну және ақаулар	Бағдарламалық жасақтама мәселелері	Сыртқы факторлар
Ресей	75,20%	12,50%	8,30%	2,10%	1,90%
Украина	70,80%	14,10%	9,70%	3,20%	2,20%
Беларусь	68,50%	13,80%	10,40%	4,50%	2,80%
Қазақстан	72,10%	15,30%	7,60%	3,00%	2,00%
Өзбекстан	65,40%	16,70%	11,20%	4,10%	2,60%
Орта көрсеткіш	72,34%	14,48%	9,44%	3,38%	2,30%



1-сурет – СББ станоктарындағы діріл көздері

ленген жиіліктегі діріліне әкеледі. Мысалы, каретканың 0,05 мм қисаюы дірілді 3-5 есе арттырады [9].

Өздігінен қозатын дірілдер (автоматты дірілдер) кесу процесі мен жүйенің деформациясы арасындағы кері байланыстың нәтижесінде пайда болады. Оның басты механизмдері кесу күштерінің өзгеруі, мойынтірек түйіндеріндегі үйкелісі, термодинамикалық әсерлер болып табылады.

Тұтқырлығы жоғары материалдарды өңдеу кезіндегі кесу күштерінің 200-800 Н диапазонының өзгеруі (мысалы, тот баспайтын болаттар) құралдың 100-500 Гц жиіліктегі дірілін тудырады [6]. Бұл Армареихтің кесу теориясына сәйкес келеді, мұнда тербеліс амплитудасы кесу тереңдігіне тура пропорционал.

Мойынтірек түйіндеріндегі құрғақ үйкеліс немесе дұрыс майланбауы «жабысып сырғанауды» (stick-slip) тудырады және жиілігі 50-200 Гц тербелістерді тудырады. Мойынтіректерді гибриді керамикамен ауыстыру автоматты тербеліс амплитудасын 40%-ға төмендететіні тәжірибеде тіркелген [5].

Айналдырықтың немесе құралдың бірқалыпты қызбауы жылулық деформациясын тудырады, бұл [8] сәйкес 10°C-тан жоғары температура айырмашылығында дірілді 18%-ға арттыруы мүмкін.

Акустикалық резонанстар айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігінде пайда болады. Бұл құбылыс бұрандалы беттерді кесу үшін сыни, өйткені ұзын, жіңішке білікте үздіксіз спираль кесіледі. Мұндай жүйеде шексіз циклдік акустикалық толқын пайда болады, ол білік денесінен өтіп, интерференция заңдылығын жоғарылатады, ал конструкцияның қатаңдығы және басқару алгоритмі резонанстық сипаттарға әсер етеді.

Әдеттегі токарлық станок үшін меншікті жиіліктер 50-500 Гц аралығында болады. Мысалы, 1,5 м ұзындықта 120 Гц жиілікті резонанс болатыны анықталған [9].

Айналдырықтың айналу жиілігі бұрандалы жұптың жиілігімен сәйкес келгенде тербелістердің амплитудасы 3-7 есе жоғарылайды. Бұл спектрлі сараптамамен расталған, тіркелген дірілдің шыңы 9-11 құрайды [9].

Бірқатар зерттеулерде аталғандай [8-9], қалпына келтірілген бұрандалы механизмдер әдетте, беріктікті төмендеуімен және станок қондырғыларының құрамындағы діріл деңгейінің жоғарылауымен сипатталады. Бұл бұрандалы беттерді кесу процесінде пайда болатын дірілді бағалау әдістерін әзірлеуді, сондай-ақ, қалпына келтіру кезінде оларды азайтудың тиімді жолдарын іздеуді қажет етеді. Осы міндеттерді кешенді шешу бұрандалы беттерді өндіру және қалпына келтіру процестерінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді, бұл әсіресе бұрандаларды ауыстырумен бірге жүретін шектеулерге байланысты:

- СББ станок бұрандаларының жоғарғы құны: шет елдік бұрандалардың бағасы бүкіл станок жинағының құнының 40% дейін болуы мүмкін;

- Өндіру ұзақтығы: дәлдігі 4 қвалитетті бұранданы өндіру кезінде оны сонымен қатар, термиялық өңдеу мен ажарлауға 5-7 жұмыс күні қажет;

- Сыртқы жеткізілімдерге тәуелділік: жақын және алыстағы шет елдердегі компоненттердің үлесі 70%-ға жетеді, бұл логистикадағы өзгертулер кезіндегі жабдықтың тоқтап қалу қаупін арттырады.

Бұрандалы беттерді қалпына келтіру келесі әдістермен жүзеге асырылады (2-сурет) [10]:

- Тозған аймақтарды балқыту және механикалық өңдеу.

- $\pm 0,01$ мм дәлдікпен бұранда пішінін қалпына келтіру үшін тозған беттерді хромдау.

- Геометрияны түзету үшін лазермен балқыту.

Талқылау. Қалпына келтірілген бұрандалар жаңа өнімдермен салыстырғанда пайдалану ресурстары төмен, бұл келесі факторлармен байланысты:

- Қолданылатын материалдардың сәйкес келмеуі: бастапқы легірленген болаттардың орнына 40ХН маркалы болатты пайдалану (мысалы, 18ХГТ) тозуға төзімділіктің 30%-ға дейін төмендеуіне әкеледі;

- Технологиялық ауытқулар: қалпына келтіру кезінде пайда болатын қателіктер, атап айтқанда, бұрандалы беттің қадамының ұзындығы метріне 0,02 мм-ге дейін ауытқуы теңгерімсіздікті тудыруы және резонанстық дірілді тудыруы мүмкін.

- Бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезінде дірілдің пайда болу себептерін талдай отырып, дірілдің төмендеуі және сәйкесінше кесілген беттердің сапасының жоғарылауы станоктарды пайдалануға беру шығындарын едәуір төмендететінін атап өтуге болады.

Қорытынды

1. Қалпына келтірілген бұрандалы беттер көбінесе дірілдің жоғарылау көзіне айналады, әсіресе қадам дәлдігі сақталмағанда, жарамсыз материалдарды қолданғанда және балқыту кезінде технологиялық ауытқулар болғанда.

2. СББ станоктарындағы дірілдің негізгі көздері:

- Мәжбүрлі дірілдер (дисбаланс, эксцентриситет, кавитация).

- Өздігінен қозатын дірілдер (кесу және үйкеліс күштерінің өзгеруінен болатын дірілдер).

- Акустикалық резонанстар (айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігі).



2-сурет – Бұрандалы беттерді қалпына келтіру әдістері

3. Діріл мыналарға әсер етеді:
- Өңдеу және позициялау дәлдігінің төмендеуі.
- Баптау уақыты мен құны артады.
- Қалпына келтірілген түйіннің ресурсы төмен.
4. Бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезіндегі дірілді азайту үшін:
- Түпнұсқа сипаттамаларға сәйкес келетін материалдарды мұқият таңдау.

- Балқыту және жону кезінде бұранда геометриясын дәл сақтау.
- Дірілді бақылаудың диагностикалық әдістерін әзірлеу.
5. Ұсынылған деректер шет елдік машина жасау кәсіпорындарында бұрандалы жұптарды жөндеу және техникалық қызмет көрсету бойынша ұсыныстарды әзірлеу үшін негіз бола алады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Holodkova, A.G. Obshhie osnovy tehnologii metalloobrabotki i rabot na metallovezhushhih stankah / A.G. Holodkova. – Vologda: Infra-Inzheneriya, 2015. – 256 p.
2. Chukarin, A.N. Teorija i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tehnologicheskikh mashin dlja mehanicheskoy obrabotki / A.N. Chukarin. Feder. agentstvo po obrazovaniju, GOU VPO Don. gos. tehn. un-t. Rostov n/D: Izd. centr DGTU, 2020. 151 p. EDN QNAZWX.
3. D.Z. Evseev. Novoe v bezopasnosti i zhiznedejatel'nosti i jekologii: Sb. st. dokl. konf. 14-16 okt. Sankt-Peterburg, 2019. Pp. 222-223.
4. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / A.E. Nabokov, I.A. Jaickov, A.N. Chukarin. AKUSTIKA, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41. Pp. 189-194. DOI: 10.36336/akustika 202141189.
5. Battarra M., Mucchi E. Incipient cavitation detection in external gear pumps by means of vibro-acoustic measurements. Measurement. – 2018. – Volume 129. – Pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.013>
6. Zuti Z., Shuping C., Huawei W, Xiaohui L., Jia D., Yuquana Z. The approach on reducing the pressure pulsation and vibration of seawater piston pump through integrating a group of accumulators. Ocean Engineering. – 2019. – Volume 173. – Pp. 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.078>
7. Svishchev A.V., Aistov I.P. The Theoretical and Experimental Studies Comparison of the Pressure Pulsation in the Discharge Chamber of the Gear Pump // Procedia Engineering. – 2024. – Volume 113. – Pp. 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.316>
8. Rituraj R., Vacca A. Investigation of flow through curved constrictions for leakage flow modelling in hydraulic gear pumps. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Volume 153. – Pp. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107503>
9. Krishnasamy K., Subbulekshmi D., Deepa T., Gnanasekaran B.M., Maridurati T., Sriram M., Kumar, S.S., Markos, M. Fatigue Failure Analysis of a Gear in Automobile Engine Coolant Pump. Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – 3982415. – Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/3982415>
10. Zhao X., Vacca A. Analysis of continuous-contact helical gear pumps through numerical modeling and experimental validation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Volume 109. – Pp. 352-378. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.043>

Анализ причин вибраций при восстановлении винтовых поверхностей на станках с ЧПУ

¹БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна, к.т.н., ассоциированный профессор,
t.buzauova@ktu.edu.kz,

¹***ЕНБЕК Дамир Жаксыбекулы**, докторант, damiko_e@mail.ru,

²**ГАВРИЛИН Алексей Николаевич**, д.т.н., профессор, gawral@tpu.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина,
30, Томск, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Вибрации в станках с ЧПУ являются критическим фактором, влияющим на точность обработки и срок службы оборудования. При восстановлении винтовых поверхностей приводных валов, которые отвечают за прецизионное перемещение исполнительных органов, анализ вибраций приобретает особую значимость. Неконтролируемые колебания приводят к ускоренному износу компонентов, снижению качества деталей и увеличению времени простоя оборудования. В статье рассматриваются причины и характер вибраций, возникающих при восстановлении винтовых поверхностей на станках с числовым программным управлением. Показано, что после наплавки и последующей механической обработки восстановленные винтовые пары подвержены усиленным вибрациям, что снижает точность позиционирования, долговечность и качество обработки. Проведен анализ источников вынужденных, самовозбуждающихся и акустических колебаний, их связи с технологическими и конструктивными параметрами. Особое внимание уделено влиянию несоответствия материалов, отклонений шага винта и конструктивных дефектов. Обоснована необходимость комплексного подхода к контролю вибраций и совершенствованию методов восстановления винтов, включая подбор материалов и контроль геометрии витков. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности восстановления и увеличения ресурса винтовых пар в системах с ЧПУ.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, винтовые пары, вибрации, шарико-винтовые приводы.

Analysis of Vibration Causes During the Restoration of Screw Surfaces on CNC Machines

¹**BUZAUOVA Toty**, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, t.buzauova@ktu.edu.kz,

¹***YENGBEK Damir**, Doctoral Student, damiko_e@mail.ru,

²**GAVRILIN Aleksey**, Dr. of Tech. Sc., Professor, gawral@tpu.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56,
Karaganda, Kazakhstan,

²National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Russia,

*corresponding author.

Abstract. Vibrations in CNC machines are a critical factor affecting machining accuracy and the service life of equipment. During the restoration of screw surfaces of drive shafts, which are responsible for the precision movement of actuators, vibration analysis becomes especially important. Uncontrolled oscillations lead to accelerated wear of components, reduced part quality, and increased equipment downtime. This article examines the causes and nature of vibrations that occur during the restoration of screw surfaces on computer numerical control (CNC) machines. It is shown that after welding and subsequent machining, the restored screw pairs are subject to intensified vibrations, which reduces positioning accuracy, durability, and machining quality. An analysis of the sources of forced, self-excited, and acoustic vibrations is carried out, along with their relationship to technological and design parameters. Special attention is given to the influence of material mismatches, screw pitch deviations, and design defects. The need for a comprehensive approach to vibration control and the improvement of screw restoration methods is substantiated, including material selection and control of thread geometry. The results obtained can be used to improve the accuracy of restoration and extend the service life of screw pairs in CNC systems.

Keywords: CNC machines, screw pairs, vibrations, ball screw drives.

REFERENCES

1. Holodkova, A.G. Obshhie osnovy tehnologii metalloobrabotki i rabot na metallorazhishhikh stankah / A.G. Holodkova. – Vologda: Infra-Inzheneriya, 2015. – 256 p.
2. Chukarin, A.N. Teoriya i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tehnologicheskikh mashin dlja mehanicheskoy obrabotki / A.N. Chukarin. Feder. agentstvo po obrazovaniju, GOU VPO Don. gos. tehn. un-t. Rostov n/D: Izd. centr DGTU, 2020. 151 p. EDN QNAZWX.
3. D.Z. Evseev. Novoe v bezopasnosti i zhiznedejatel'nosti i jekologii: Sb. st. dokl. konf. 14-16 okt. Sankt-Peterburg, 2019. Pp. 222-223.
4. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / A.E. Nabokov, I.A. Jaickov, A.N. Chukarin. AKUSTIKA, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41. Pp. 189-194. DOI: 10.36336/akustika 202141189.
5. Battarra M., Mucchi E. Incipient cavitation detection in external gear pumps by means of vibro-acoustic measurements. Measurement. – 2018. – Volume 129. – Pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.013>
6. Zuti Z., Shuping C., Huawei W, Xiaohui L., Jia D., Yuquana Z. The approach on reducing the pressure pulsation and vibration of seawater piston pump through integrating a group of accumulators. Ocean Engineering. – 2019. – Volume 173. – Pp. 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.078>
7. Svishchev A.V., Aistov I.P. The Theoretical and Experimental Studies Comparison of the Pressure Pulsation in the Discharge Chamber of the Gear Pump // Procedia Engineering. – 2024. – Volume 113. – Pp. 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.316>
8. Rituraj R., Vacca A. Investigation of flow through curved constrictions for leakage flow modelling in hydraulic gear pumps. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Volume 153. – Pp. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107503>
9. Krishnasamy K., Subbulekshmi D., Deepa T., Gnanasekaran B.M., Maridurati T., Sriram M., Kumar, S.S., Markos, M. Fatigue Failure Analysis of a Gear in Automobile Engine Coolant Pump. Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – 3982415. – Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/3982415>
10. Zhao X., Vacca A. Analysis of continuous-contact helical gear pumps through numerical modeling and experimental validation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Volume 109. – Pp. 352-378. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.043>

Сорғы жүйелерінің тозған бөліктерін қалпына келтіру технологиялары

¹**ТАТЫБАЕВ Мұхтарбек Калмурзаевич**, п.ф.к., қауымдастырылған профессор, Mukhtar_t.k@mail.ru,

^{1*}**АБІЛҚАЙЫР Жасталап Наурызғали**, PhD, қауымдастырылған профессор, jastalap81@mail.ru,

¹**АЛЬПЕИСОВ Азамат Турусбекович**, т.ф.к., қауымдастырылған профессор, alpeisov73@mail.ru,

¹**МАНКЕШЕВА Олимпиада Таукеевна**, докторант, mankesheva@mail.ru,

²**ЕГЕМОВА Шынар Батырбекқызы**, PhD, қауымдастырылған профессор, sinar_86@mail.ru,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан,

²«Алматы технологиялық университеті» АҚ, Төле би көшесі, 100, Алматы, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақала қатты заттар мен сұйықтықтардан тұратын гидроқосылғыларды айдау үшін қолданылатын жер сорғыларының өнімділігі мен тозуға төзімділігін талдауға арналған. Ол сорғы жүйелеріне қойылатын негізгі техникалық талаптарды, соның ішінде, қосылыстардың беріктігі мен тығыздығын, сондай-ақ, қарқынды гидроабр тозу жағдайында бөлшектердің тозуға төзімділігін қамтамасыз ету қажеттілігін қарастырады. Бөлшектердің біркелкі тозуына байланысты динамикалық жүктемелер мен теңгерімсіздіктерді тудыратын жұмыс дөңгелегінің айналу жиілігі сияқты сорғылардың сенімділігіне әсер ететін факторлар егжей-тегжейлі талқыланады. Мақалада олардың беріктігін арттыру үшін арна өлшемдері мен қабырға қалыңдығын ескере отырып, сорғыларды жобалауды оңтайландырудың маңыздылығы көрсетілген. Қызмет ету мерзімін ұзарту үшін жуу суын беруді қоса алғанда, тығыздағыш құрылғылардың тығыздағыш беттерінің тозуын азайтуға бағытталған шараларға ерекше назар аударылады. Сондай-ақ, ең көп тозуға ұшыраған бөлшектер топтары ерекшеленеді, бұл қалпына келтіру мен жөндеудің басым бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді. Суреттер сияқты көрнекі материалдар мәтінді толықтырады және тозу процесін жақсы түсінуге ықпал етеді. Мақала агрессивті пайдалану жағдайында өнімділікті жақсартуға және сорғылардың қызмет ету мерзімін ұзартуға ұмтылатын инженерлер мен сорғы жүйелеріне қызмет көрсету мамандары үшін құнды ресурс болып табылады.

Кілт сөздер: топырақ сорғылары, бөлшектердің тозуы, қалпына келтіру, жұмыс дөңгелегі, абразивтілік, гидравликалық қоспалар.

Кіріспе. Дайындаушы зауыттар шығаратын драгалық сорғылар белгілі бір техникалық талаптарға жауап беруі тиіс.

Айдалатын сұйықтықты сыртқы ортадан бөліп тұратын сорғы бөлшектері берік және тығыз болуы тиіс. Сорғылар жиналған жағдайда сұйықтықты ағызуға барлық жұмыс режимдерінде бекітілген түйіспелерде жол берілмейді [1].

Корпусы бар топырақ сорғы, онда орналасқан цилиндрлік кіреберіс мойны бар жұмыс дөңгелегі, бронедиск, бос жерлерді таза сумен жуу жүйесі, бронедиск жұмыс беті тозуға төзімді материалмен нығайтылған, ауыстырылатын дискімен жабдықталған, ал сорғы корпусының ішкі бетінде жұмыс бетін-

де тозуға төзімді жабыны бар ұқсас ауыстырылатын бронедиск жасалғандығымен ерекшеленеді, бронедиск пен жұмыс дөңгелегі, корпус және жұмыс дөңгелегі арасындағы саңылауларға оларды жуу үшін абразивті бөлшектерден таза қысымды су беріледі, сорғының қысым құбырындағы қысымнан асып кетсе, бұл саңылауларда тығыздағыш манжеттер орнатылған [2].

Сорғының жұмыс ресурсын арттыруға жетек дискісінен, жетек дискісінен және бұрандалар немесе түйреуіштер көмегімен дискілерге қосылған қалақтардан жасалған жұмыс дөңгелегін қолдану арқылы қол жеткізіледі, жұмыс дөңгелегінің ішкі жұмыс бетіне тозуға төзімді жабын қолданылады [3].

Сорғының және оның бөлшектерінің конструкциясы жинау, монтаждау және тексеру кезінде ілмектермен және арнайы жүк көтергіш құрылғылармен ыңғайлы және сенімді қысылу мүмкіндігін көздеуі тиіс. Сорғының негізгі бөліктері мен қосалқы бөлшектері бірін-бірі алмастыратын болуы тиіс.

Түбін тереңдету сорғылары жұмысының негізгі ерекшелігі – олар біртекті емес сұйықтықтарды – гидравликалық қоспаларды сорып алады, олар көп жағдайда қатты материал мен судың қоспасы болып табылады. Сорғылар айдайтын сұйықтықтардың өзіндік қасиеті – абразивтілік және ірі қатты заттардың болуы – сорғыларға қойылатын негізгі талаптарды анықтайды.

Жұмыс процесінде топырақтың едәуір мөлшерін жылжытып, сорғылар ағында қозғалатын қатты бөлшектердің деструктивті әсеріне ұшырап, қарқынды тозуға ұшырайды. Осыған байланысты бөлшектердің тозуын барынша азайтуға және олардың қызмет ету мерзімін ұлғайтуға ықпал ететін шаралардың ерекше маңызы бар.

Сужабдықтардың қарқынды тозу жағдайында жұмыс істейтін сорғылардың сенімділігі үлкен дәрежеде импеллердің жылдамдығына байланысты. Жылдамдықты төмендету – қалақтардың әркелкі тозуы мен арналардың бітеліп қалуы салдарынан импелдердің қазіргі тепе-теңсіздігі салдарынан импелдердің тозуын және динамикалық жүктемені төмендетудің тиімді құралы. Жылдамдықтың азаюы, арна өлшемдерінің ұлғаюы және бөлшектердің қалыңдауы түбін тереңдету сорғысын жалпы мақсаттағы сорғылармен салыстырғанда көлемі мен салмағы жағынан үлкен етеді.

Осылайша, техникалық қызмет көрсету, монтаждау және бөлшектеу жеңілдігі, әртүрлі компоненттерге оңай қол жеткізу түбін тереңдету сорғыларының маңызды өнімділік көрсеткіштерінің қатарына жатады.

Гидравликалық қоспада қатты абразивті бөлшектердің болуы без құрылғыларының герметикаланған беттерінің және ішкі жағындағы тығыздау беттерінің тез тозуына әкеледі. Қызмет ету мерзімін арттыру үшін шайынды су сорғы безінің итбалықтарын құрастыруға беріледі.

Жаңалықтың негізгі аспектілерінің бірі-тозуға төзімді материалмен нығайтылған ауыстырылатын дискіні қамтитын құрама броньды дискіні пайдалану. Бұл шешім сорғының қызмет ету мерзімін едәуір ұзартуға мүмкіндік береді: егер тозған бөлікті ауыстыру қажет болса, ауыстыру дискісі ғана ауыстырылады, бұл қызмет көрсету уақыты мен шығындарын азайтады. Корпустың ішкі беттерінде де осындай тозуға төзімді жабын бар, бұл абразивті әсерден қорғаудың қо-

сымша қабатын қосады.

Сонымен қатар, қысымды құбырдағы қысымнан жоғары таза қысымды сумен қамтамасыз ететін саңылауларды жуу жүйесі абразивті бөлшектерден тиімді тазартуды қамтамасыз етеді. Сорғылар қазір осы аймақтарда тығыздағыш манжеттермен жабдықталған, бұл ағып кету қаупін азайтады және сенімділікті арттырады.

Жұмыс дөңгелегінің конструкциясында заманауи технологиялар енгізілді, оның ішінде, құрамдас бөліктерді пайдалану: бұрандалардағы немесе түйреуіштердегі қалақтарға қосылған жетек және жетек дискілері. Доңғалақтың ішкі жұмыс беттеріне тозуға төзімді жабынды қолдану да алға жасалған маңызды қадам болып табылады, өйткені бұл компоненттің қызмет ету мерзімін ұзартып қана қоймайды, сонымен қатар, оның біркелкі тозуын қамтамасыз етеді.

Заманауи топырақ сорғылары көтеру және орнату үшін сенімді ұстау мүмкіндігін ескере отырып жасалған, бұл құрастыру, бөлшектеу және қайта қарау процесін жеңілдетеді. Барлық негізгі бөлшектер мен қосалқы бөлшектер бір-бірін алмастыра бастады, бұл сорғылармен жұмыс істеуді операторлар үшін ыңғайлы етеді.

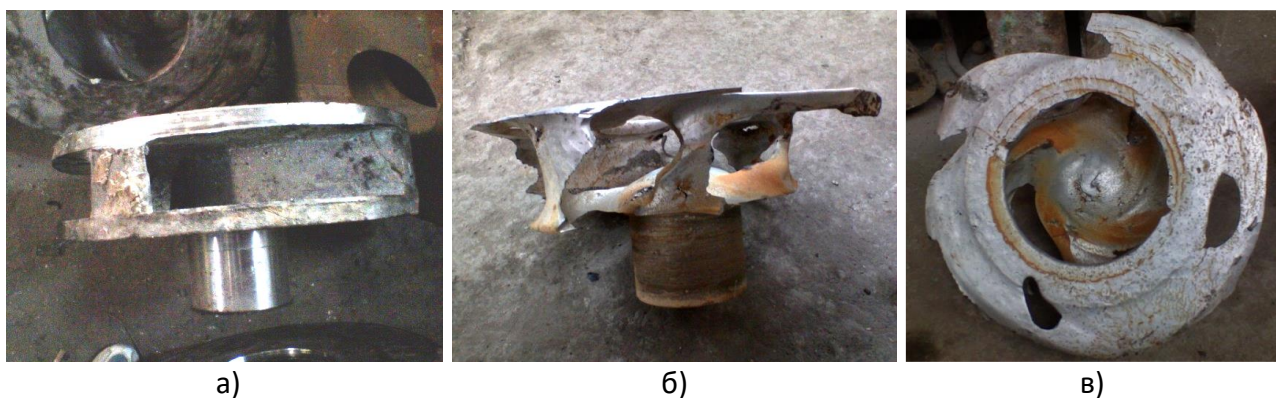
Дөңгелектің айналу жиілігінің төмендеуі сорғы механизмдеріне шамадан тыс жүктемені болдырмай, тозуды азайтуда тиімді екенін дәлелдеді. Арналардың және әртүрлі құрылымдық элементтердің үлкен өлшемдері жалпы жұмыс сенімділігін жақсартуға және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартуға ықпал етеді.

Осылайша, заманауи топырақ сорғыларының конструкцияларының жаңалығы материалдарды, құрастыру технологияларын жақсартуда, сондай-ақ, абразивті қоспаларды айдауға байланысты тапсырмаларды тиімді шешуге мүмкіндік беретін құрылғыда көрінеді. Бұл жақсартулар қарқынды тозу жағдайында сорғы жабдықтарының сенімділігі мен ұзақ мерзімді жұмысын жақсартуға бағытталған.

Зерттеу әдісі. Абразивтік гидравликалық қоспаны пайдалану процесінде жылжытып, сорғы бөлшектері ағында қозғалатын абразивтік бөлшектердің қарқынды тозуына ұшырайды. Тозу сипатына сәйкес барлық бөлшектерді екі топқа бөлуге болады. Бірінші топқа жұмыс дөңгелегі мен бұру кіреді, олардың ағынды арналары ең көп тозады. Ірі қатты қоспалары бар гидро қоспаларды айдағанда бұл бөлшектер де соққыға ұшырайды [4].

1, а-суретте – жаңа доңғалақ, ал 1, б, в-суретте жұмыс дөңгелегінің максималды тозуы көрсетілген.

Кіріс және шығыс жұмыс дөңгелектерінің



1-сурет – 8Гр-8 топырақ сорғының жұмыс дөңгелегі: а – жаңа жұмыс дөңгелегі; б, в – тозған жұмыс дөңгелегі

қалақтары, жұмыс дөңгелектері дискілерінің ішкі беттері (1, в-сурет), есептік қима аймағындағы бұру беттері, диффузорға кіру, сондай-ақ бұру тілі аймағында ең қарқынды тозады. Сору құбыры айтарлықтай аз тозуға ұшырайды.

Сорғылардың жұмыс дөңгелектерінің су ағынының бұзылуының апатты өлшемдері абразивті бөлшектері бар су ағынының үлкен деструктивті қабілетін көрсетеді [3]. Егер суда олардың көп мөлшері болса, металл бөліктің сынған беті қабыршақтанады (1, б-сурет), аз мөлшерде жойылу кавитациялық сипатта болады (1, а-сурет).

Сөйтіп, қиыршық тас целлюлозамен жұмыс істегенде ең көп тозу сұқпаның басында және аяғында, ал біршама азырақ – артқы қабырғада байқалады. Сұқпаның ортаңғы бөлігі іс жүзінде тозбаған күйінде қалып отыр. Бұл соқтығысу сәтіндегі бөлшектердің тангенциалды сырғанап, тозуы абразиялық екенін көрсетеді. Доңғалақтың артқы қабырғасында аркалы атыздар пайда болады, бұл бөлшектердің соқтығысу сәтіндегі тангенциалды және тозуы абразиялық екенін көрсетеді.

2-суретте сорғы импеллерінің тозу сипаты көрсетіледі. Артқы диск алдыңғысына қарағанда ең көп тозуға ұшырайды. Сызықшалы сызықтар жаңа доңғалақтың ағын арнасының сұлбасын көрсетеді, ал тұтас сызықтар жаңа доңғалақтың ағын арнасының сұлбасын көрсетеді, ал тұтас сызықтар тозған доңғалақтың пайдаланылғанын көрсетеді. Доңғалақтың төменгі жартысы 180 тонна айдауға сәйкес келеді, ал жоғарғы жартысы 990 тонна қиыршық тасқа сәйкес келеді. Екінші жағдайда айдалатын топырақтың көлемі артқы доңғалақ дискісін қалпына келтіруді ескере отырып алынды.

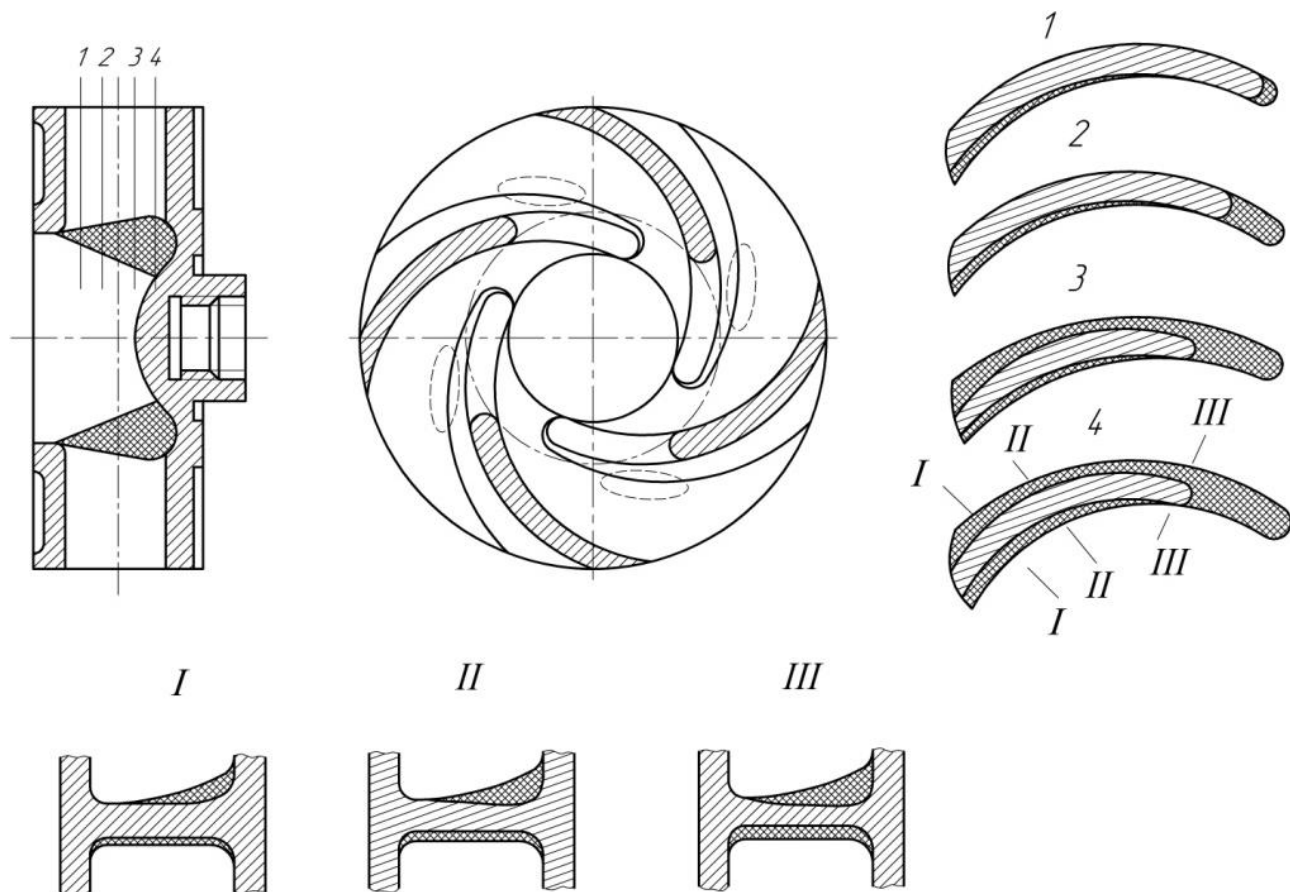
3-суретте 610 сағат жұмыс істегеннен



2-сурет – 2Гр 8000/71 сорғы импеллерінің қирау сипаты: а – импелль дискінің сыртқы беті (кавитациялық тозу); б – импеллердің (сұжабық тозуы) сауда нүктесінің жиектерінің беттері

кейін ГрАТ типті сорғының тозған секцияларының топографиясы көрсетілген. Доңғалақтың меридиандық учаскесінде сұқпаның жұмыс жағының және артқы жағының тозу аймақтары көлеңкеленеді. 1-4 сандарында қалақтың импелльдерге кіре берістен дискіге дейінгі бағыттағы қималары көрсетіледі; I-III – гидравликалық қоспаның кірмесінен доңғалақтан шығуға дейінгі бағыттағы сұқпа көлденең қималары.

Доңғалақ қалақтарының тозу қарқындылығы бірқатар факторларға байланысты, олардың негізгілері қоспаның қатты бөлшектерінің гранулометриялық құрамы болып табылады. Жер сорғыларының жұмыс дөңгелектерінің қалақтары үлкен қалыңдыққа ие. Олардың кіріс жиектері дөңгелектенгендіктен, қалақтардың айналуын дөңгелек цилиндрдің айналасы деп санауға болады, ци-



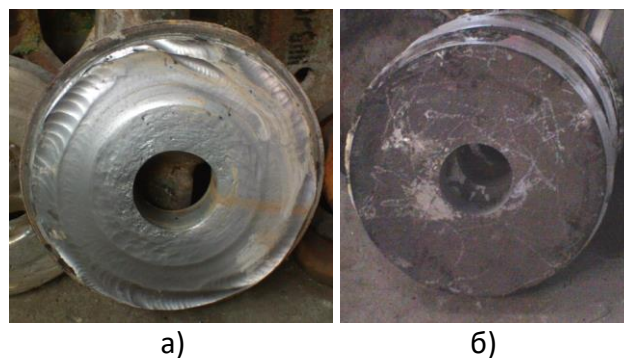
3-сурет – ГраТ типті түбін тереңдету сорғысы импеллерлерінің тозған учаскелерінің топографиясы

линдрді айналып өтетін қоспаның ағынында қозғалатын бөлшектер неғұрлым үлкен болса, соғұрлым олардың саны оның бетіне түседі [6].

Сұқпаның кіреберіс жиегінің тозу қарқынына импеллерге кіре берістегі қоспа ағынының айналу сипаты елеулі әсер етеді. Ағын бұрылғанда пайда болатын центрипеттік үдеудің әсерінен қоспадағы қатты заттар қайта бөледі. Бұрылыстағы ағынды учаскелерде олардың концентрациясы біркелкі емес болып, арнаның сыртқы қабырғасының бағытына қарай ұлғаяды [7].

Қатты заттардың концентрациясының жоғарылауына байланысты жетекші дискінің бетіне жақын жерде кіріс жиегінің осы дискімен түйіскен жерінде максималды тозуы байқалады (4-сурет). Жетекші диск қабырғасының бетіне жақын жерде ағынның төмен жылдамдығымен шекаралық қабат пайда болатындығын есте ұстаған жөн. Сондықтан пышақтардың кіріс жиектерінің максималды тозу аймағы артқы дискінің қабырғасынан біршама алшақтайды.

Сорғы корпусы аз дәрежеде тозады (4, б-



4-сурет – 8Гр-8Гр сорғысының броньды дискісі: а – операциядан кейін, б – жаңа

сурет). Перифериялық қабырғалар абразивті бөлшектердің ең үлкен әсеріне ұшырайды, ал ең кішісі – сорғы корпусының арнасының бүйір қабырғалары. Тозуға мында пульпаның құбырға шығар алдындағы жерлері бейім, онда оның ағыны ең үлкен жылдамдық-

ты дамытады [8].

Жетек дискінің бетіндегі қатты бөлшектер концентрациясының артуына байланысты кіре беріс жиек осы дискімен оның интерфейс нүктесінде барынша киіледі. Жетекші диск қабырғасының бетінде ағын жылдамдықтары төмен шекара қабаты қалыптасатынын ескеру керек. Сондықтан қалақшалардың ішкі жиектерінің максималды тозу аймағы артқы дискінің қабырғасынан біршама алшақтап кетеді [9].

Екінші топқа гидравликалық қоспаның жоғары қысымды қуыстан төмен қысымды қуысқа ағуы нәтижесінде тозатын бөлшектер жатады: броньды дискілер (4-сурет), дөңгелектердің сыртқы дискілері, сору жағынан да, тығыздағыш бөлшектері де, тығыздағыш жинағы. Бұл бөлшектердің тозуы бірінші топтағы бөлшектермен салыстырғанда ұсақ қатты қосындылары бар гидравликалық қоспаларды тасымалдау кезінде артады.

Тозу тесіктер арқылы көрінеді (5-сурет). Ағызу қабырғаларының тозуы ондағы қоспаның ағу жылдамдығының таралуына және бөлшектердің концентрациясына байланысты.

Нәтижелер мен талқылаулар. Түбін тереңдету сорғыларын пайдалану проблемаларын талдау нәтижесінде қазіргі уақытта тау-кен байыту кәсіпорындарымен жабдық-



5-сурет – 8Гр-8 тереңдету сорғысының гильзасының тозуы

талған түбін тереңдету сорғыларының энергияның сенімділігі мен шығынына, пайдалану параметрлерін реттеу мүмкіндігіне қазіргі заманғы талаптарға сай келмейтіндігі анықталды. Түбін тереңдету сорғыларының негізгі кемшілігі сужелілік және кавитациялық тозу нәтижесінде сорғы ағынды бөліктерінің қызмет ету мерзімінің төмендігі болып табылады.

Алғыс білдіру. Авторлар ұжымы эксперименттік жұмыстарды жүргізу үшін ұсынылған зертханалық база үшін Балқаш мыс балқыту зауытына алғысын білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ломакин А.А. Орталықтан тепкіш және осьтік сорғылар. – 2-ші басылым., қайта өңдеу. және қосымша. – Мәскеу. Ленинград: Машинажасау. [Ленингр. бөлім], 1966. – 364 б.
2. Поветкин В.В., Лем В.П. Топырақ сорғысы. Пат. 23554 ҚР. 2010.
3. Поветкин В.В., Лем В.П. Топырақ сорғысы. Пат. 24120 ҚР. 2011.
4. Лем В.П. Топырақ сорғыларының жұмыс бөлшектерінің беттерінің тозуын талдау // Халықаралық ғылыми-практикалық конференция. Жаңа мыңжылдықтағы сәулет және құрылыс. – Алматы. – 2008. – 227-231 б.
5. Поветкин В.В., Лем В.П. Топырақ және құм сорғыларының Гидроабр тозуы // ҚазҰТУ хабаршысы. – Алматы. – 2008. – № 6 (69). – 51-54 б.
6. Лем В.П., Кабулов А.А. Бронедисктің тозуы және бронедисктің қызмет ету мерзімін ұзарту әдісі // Халықаралық конференция. Металлургиядағы үдемелі индустриялық-инновациялық даму. – ҚазҰТУ Хабаршысы. – Алматы. – 2010. – 182-184 б.
7. Донченко А.С., Донченко В.А. Кен байыту фабрикасының механигі анықтамалығы. – М.: Жер қойнауы. 1975. – 543 б.
8. Поветкин В.В., Лем В.П. Жер сорғыларының жұмыс бөлшектерінің гидроэрозиясы мәселесі // Бірінші халықаралық ғылыми-техникалық конференция. Машинажасау, материалтану және машина жасау өндірісін автоматтандырылған жобалаудағы жаңа. – 2010. – Т 1. – Алматы. – 53-55 б.
9. Smirnov N.I., Grigoryan E.E. Study of the Impact of Wear of Movable Interfaces on Failures of an Immersible Electrically Operated Vane Pump for Oil Extraction // Journal of machinery manufacture and reliability, 2019, Vol. 48, No. 1, pp. 79-83. <https://doi.org/10.3103/S105261881901014X>

Технологии восстановления изношенных деталей насосных систем

¹**ТАТЫБАЕВ Мухтарбек Калмурзаевич**, к.п.н., ассоциированный профессор, Mukhtar_t.k@mail.ru,

^{1*}**АБІЛҚАЙЫР Жасталап Наурызғали**, PhD, ассоциированный профессор, jastalap81@mail.ru,

¹**АЛЬПЕИСОВ Азамат Турусбекович**, к.т.н., ассоциированный профессор, alpeisov73@mail.ru,

¹**МАНКЕШЕВА Олимпиада Таукеевна**, докторант, mankesheva@mail.ru,

²**ЕГЕМОВА Шынар Батырбеккызы**, PhD, ассоциированный профессор, sinar_86@mail.ru,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан,

²АО «Алматинский технологический университет», ул. Толе би, 100, Алматы, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Статья посвящена анализу эксплуатационных характеристик и износостойкости грунтовых насосов, используемых для перекачки гидросмесей, состоящих из твердых частиц и жидкости. В ней рассматриваются основные технические требования к насосным системам, включая прочность и плотность соединений, а также необходимость обеспечения износостойкости деталей в условиях интенсивного гидроабразивного изнашивания. Подробно обсуждаются факторы, влияющие на надежность насосов, такие как частота вращения рабочего колеса, которая вызывает динамические нагрузки и дисбаланс из-за неравномерного износа комплектующих. Статья подчеркивает важность оптимизации проектирования насосов с учетом увеличенных размеров каналов и толщины стенок для повышения их долговечности. Особое внимание уделяется мерам, направленным на снижение износа уплотнительных поверхностей сальниковых устройств, включая подачу промывочной воды для увеличения срока службы. Также выделяются группы деталей, подверженных наибольшему износу, что позволяет определить приоритетные области для восстановления и ремонта. Визуальные материалы, такие как рисунки, дополняют текст и способствуют лучшему пониманию процесса износа. Статья является ценным ресурсом для инженеров и специалистов по обслуживанию насосных систем, стремящихся улучшить эксплуатационные характеристики и увеличить срок службы насосов в условиях агрессивной эксплуатации.

Ключевые слова: грунтовые насосы, износ деталей, восстановление, рабочее колесо, абразивность, гидросмеси.

Technologies for Restoring Worn Parts of Pumping Systems

¹**TATYBAYEV Mukhtarbek**, Cand. of Ped. Sc., Associate Professor, Mukhtar_t.k@mail.ru,

^{1*}**ABILKAIYR Zhastalap**, PhD, Associate Professor, jastalap81@mail.ru,

¹**ALPEISOV Azamat**, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, alpeisov73@mail.ru,

¹**MANKESHEVA Olimpiada**, Doctoral Student, mankesheva@mail.ru,

²**EGEMOVA Shynar**, PhD, Associate Professor, sinar_86@mail.ru,

¹NPJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Satpayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan,

²JSC «Almaty Technological University», Tole Bi Street, 100, Almaty, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the operational characteristics and wear resistance of soil pumps used for pumping hydraulic mixtures consisting of solid particles and liquid. It discusses the main technical requirements for pumping systems, including the strength and density of joints, as well as the need to ensure wear resistance of parts in conditions of intense waterjet wear. The factors affecting the reliability of pumps, such as the speed of rotation of the impeller, which causes dynamic loads and imbalances due to uneven wear of components, are discussed in detail. The article emphasizes the importance of optimizing the design of pumps, taking into account the increased channel sizes and wall thickness to increase their durability. Special attention is paid to measures aimed at reducing wear on the sealing surfaces of stuffing boxes, including the supply of flushing water to increase service