

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор
_____ Н.В. Белоусова

« _____ » _____ 2020г.

Магистерская диссертация

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Разработка конструкции штыря и способу его введения в лунку

Научный руководитель	_____	<u>к.т.н., доцент</u> <u>С.А Храменко</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень
Выпускник	_____	<u>Д.С Повилайтис</u>
	подпись, дата	
Рецензент	_____	начальник цеха <u>ООО «ИСО»</u> <u>Н.В Шиндорилов</u>
	подпись, дата	должность, место работы
Консультант экономического раздела	_____	<u>к.э.н., доцент</u> <u>Т.В. Твердохлебова</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень

Красноярск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЫ С САМООБЖИГАЮЩИМИСЯ АНОДАМИ	8
1.1 Электролизер Содерберга	8
1.2 Сырье для производства анодной массы	12
1.3 Технология анода	16
1.4 Процессы, протекающие при коксовании анодной массы.....	20
1.5 Формирование вторичного анода.....	22
1.6 Экологические аспекты.....	27
ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	28
2.1 Воздействие вибрации на сыпучие и вязко-пластичные среды.....	28
2.2 Вибрационные машины для погружения свай, штырей и геологического бурения	31
2.3 Способы возбуждения колебаний	34
2.4 Модель процесса вибрационного погружения	40
2.5 Расчет параметров вибрационных машин	44
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	Error! Bookmark not defined.
3.1 Описание физической модели виброустановки анодных штырей	Error! Bookmark not defined.
3.2 План экспериментов на лабораторной физической модели.....	Error! Bookmark not defined.
3.3 Погружение лабораторного штыря в массив ПАМ под собственным весом при разных температурах	Error! Bookmark not defined.
3.4 Вибропогружение лабораторного штыря в массив ПАМ.....	Error! Bookmark not defined.
3.5 Структура ПАМ после установки штыря	Error! Bookmark not defined.
ГЛАВА 4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	Error! Bookmark not defined.
4.1 Техничко-экономическое обоснование применение вибрационного погружателя при перестановке штырей.....	Error! Bookmark not defined.

4.2 Расчёт экономической эффективности с применением вибрационного погружателя.....	Error! Bookmark not defined.
4.3 Расчет экологических показателей.....	Error! Bookmark not defined.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	Error! Bookmark not defined.
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	Error! Bookmark not defined.

АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации – «Разработка конструкции штыря и способу его введения в лунку». Диссертация представлена в объеме 73 страницы, включает в себя 15 таблиц, 28 иллюстраций, а также список использованной литературы, состоящий из 52 источников.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЛИЗЕР СОДЕРБЕРГА, ВИБРАЦИЯ, ВИБРАЦИОННЫЙ ПОГРУЖАТЕЛЬ, ВТОРИЧНЫЙ АНОД.

Цель: сокращение выбросов ПАУ при перестановке токоподводящих штырей на аноде Содерберга.

Задачи: 1) провести анализ теоретических основ вибропогружения свай в сыпучие и вязкопластичные среды; 2) определить способ и конструктивное решение лабораторной установки для моделирования вибропогружения анодного штыря в анод; 3) разработать конструкторскую документацию на лабораторный образец виброустройства для введения штыря в анод; 4) изготовить лабораторную физическую модель виброустройства для установки токоподводящих штырей в анод Содерберга; 5) определение оптимальных амплитудно-частотных характеристик вибрационного воздействия, обеспечивающее свободное погружение штыря в массив ПАМ при 50-150°C.

Основные выводы и результаты исследования:

1. Максимальные скорости погружения достигаются при температуре 80°C-100°C при частоте 30 – 40 Гц, что позволяет снизить время перестановки штыря на 3-4 минуты.
2. Сокращение времени перестановки штыря позволяет оптимизировать порядок перестановки штырей и снизить трудоемкость, а так же снижает выбросы ПАУ в 2 раза.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой экологии анода Содерберга является эмиссия полиароматических углеводородов (ПАУ) в рабочую зону цехов электролиза. Источником ПАУ является каменноугольный пек, который входит в состав анодной массы. В технологии Содерберга выделяют два основных источника ПАУ: поверхность анода и открытая подштыревая лунка при перестановке токоподводящих штырей. Подштыревая лунка является более интенсивным источником выделения бенз(а)пирена, чем поверхность. После извлечения штыря в лунку загружается подштыревая анодная масса (ПАМ). В течение от 8 до 24 минут ПАМ плавится и достигает температуры в верхней части лунки 200-300⁰С. При таких температурах из открытой лунки в атмосферу корпуса интенсивно выделяются канцерогенные ПАУ. Показано, что при скорости карбонизации до 70⁰С/мин в несколько раз увеличивается выделение наиболее канцерогенных ПАУ: бенз(а)пирена, бенз(а)антрацена и дибензантрацена [1]. Количество и состав ПАУ, которые выделяются при плавлении и коксовании анодной массы зависят от содержания пека-связующего, температуры и скорости карбонизации. По данным работы [2] выделение канцерогенных ПАУ при карбонизации пека происходит при 600–800⁰С и наиболее вероятно при коксовании ПАМ в высокотемпературной зоне подштыревой лунки. Предполагают, что при 700–800⁰С возможен синтез дополнительного количества ПАУ в газовой фазе [3]. С другой стороны, по данным китайских исследователей ПАУ наиболее интенсивно выделяются в интервале 150–450⁰С [4], что соответствует жидкопластичной зоне анода, а выделение канцерогенных ПАУ до 650⁰С не превышает по абсолютным значениям количества ПАУ в исходном пеке. Эти результаты согласуются с работой [5], где показано, что основное количество ПАУ при карбонизации пека выделяется до 500⁰С и зависит от скорости карбонизации, при этом дополнительный синтез тяжелых ПАУ может происходить в жидкой фазе при 270–440⁰С. Исследования, проведенные в Норвегии, показывают, что выделение ПАУ с поверхности анода нелинейно зависит от температуры [6]. Оценку выбросов

при перестановке токоподводящих штырей проводили в корпусе электролиза ОАО «РУСАЛ Красноярск». Отбор проб проводили с помощью выносного коллектора локальной эвакуации газов из открытой подштыревой лунки. В коллектор для отбора пробы газа вводили трубку проботборного устройства (ПУ-4Э) с кассетой, содержащей целлюлозный фильтр грубых частиц, тефлоновый фильтр с диаметром пор 2 мкм и сорбционную трубку с наполнителем Supelpack 20и ORBO-43. При отборе проб регистрировали длительность перестановки, расход и температуру газа в коллекторе. После окончания отбора ПАУ экстрагировали из составляющих частей кассеты ацетонитрилом, растворы усредняли и использовали для хроматографического анализа. Показано, что увеличение длительности перестановки штырей в 1,5 раза повышает в 2,5 раза общее выделение ПАУ, а эмиссию БаП почти в 2 раза. Чем больше времени открыта лунка, тем выше температура расплавленной ПАМ и тем больше эмиссия высококипящих токсичных ПАУ [7]. На электролизере С8-БМ в среднем ежедневно осуществляют перестановку трех токоподводящих штырей. Полученные данные показывают, что перестановка токоподводящих штырей является более интенсивным источником выделения БаП, чем поверхность анода. Открытая подштыревая лунка, в которой при температуре >300 С плавится и коксуется ПАМ, выделяет в атмосферу корпуса большое количество высококипящих канцерогенных ПАУ. Чем дольше открыта лунка, тем выше температура поверхности ПАМ и тем выше эмиссия ПАУ. Снижение времени открытой лунки в 2 раза, снижает эмиссию бензапирена в два раза, а выделение ПАУ в 2,5 раза. Минимальное время установки штыря определяется временем перехода ПАМ в жидко-пластичное состояние, которое позволяет установить штырь на горизонт под действием собственного веса. Это время можно сократить наложением на штырь вибрационного воздействия. Способ вибропогружения свай, труб, колодцев в песчаные и водонасыщенные глинистые грунты известен давно и успешно применяется в строительстве [8]. Различают два режима погружения:

вибрационный и вибрационно-молотковый. В работе будет рассматриваться вибрационный механизм, как более щадящий для анода.

Предполагается, что перевод вибрацией в псевдосжиженное состояние прилегающего к штырю слоя ПАМ позволит установить штырь в лунку при температуре поверхности ПАМ не более 150°C, т.е. закрыть лунку в течение 3-4 минут, и не допустить интенсивного выделения ПАУ в атмосферу корпуса.

Целью данной выпускной квалификационной работы является сокращение выбросов ПАУ при перестановке токоподводящих штырей на аноде Содерберга.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие поставленные задачи:

- Провести анализ теоретических основ вибропогружения свай в сыпучие и вязкопластичные среды;
- Определить способ и конструктивное решение лабораторной установки для моделирования вибропогружения анодного штыря в анод;
- Разработать конструкторскую документацию на лабораторный образец виброустройства для введения штыря в анод;
- Изготовить лабораторную физическую модель виброустройства для установки токоподводящих штырей в анод Содерберга;
- Определить оптимальные амплитудно-частотные характеристики вибрационного воздействия, обеспечивающее свободное погружение штыря в массив ПАМ при 50-150°C.

При решении задач будут использованы следующие методы исследования:

- Изготовлена физическая модель виброустройства;
- Проведены эксперименты в лабораторных условиях.

ГЛАВА 1 ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЫ С САМООБЖИГАЮЩИМИСЯ АНОДАМИ

1.1 Электролизер Содерберга

Производство алюминия осуществляется в электролизерах. Глинозем растворяется в расплавленном криолите приблизительно при 960°C [9]. Большой ток при малом напряжении постоянного тока проходит через аноды, которые погружены в электролит, затем – через слой расплавленного алюминия, далее – через катод.

В настоящее время используется два вида анодов – обожженные аноды и аноды Содерберга. Обожженные аноды производятся из смеси 50-65% нефтяного кокса, 14-17% каменноугольного пека (в качестве связующего) и 15-30% рециркулируемых анодных огарков. Из данной смеси формируются блоки, которые затем обжигаются в специализированных печах обжига анодов при температуре около 1100°C. Так как углерод является одним из компонентов вступающим в реакции в процессе электролитического разложения глинозема и получения алюминия и расходуется с течением времени. В связи с этим обожженные аноды приходится регулярно заменять, как правило, через 25 дней, когда они становятся в три раза меньше по размеру, чем были изначально. Остающиеся анодные огарки очищаются, разрушаются и используются в качестве сырья для производства новых анодов. Электролизер с обожженными анодами в разрезе представлен на рисунке 1.

Электролизер Содерберга – самообжигающиеся аноды непрерывного действия. Брикетты из анодной массы, состоящие из нефтяного кокса и каменноугольного пека (около 30 %), подаются с верхней части анода. По мере того, как анод расходуется у рабочей поверхности, анодная масса продвигается вниз по стальному кожуху и спекается при прохождении горячей части анода. Максимальная температура самообжига - от 950 до 980 °C [10]. Электролизер с само-обжигающимся анодом в разрезе представлен на рисунке 2.

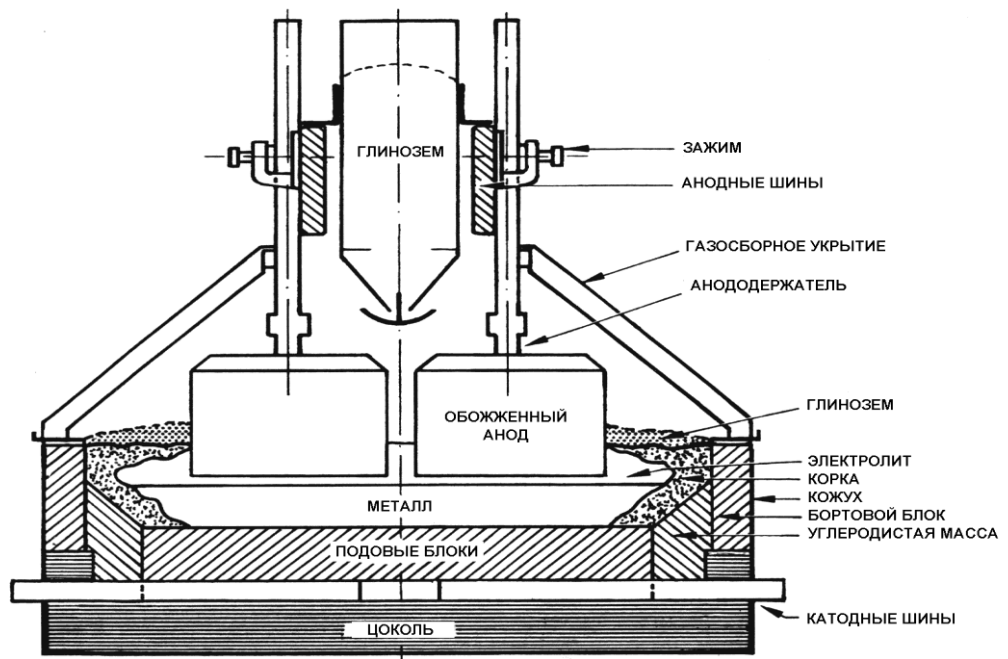


Рисунок 1 - Электролизер с обожженными анодами

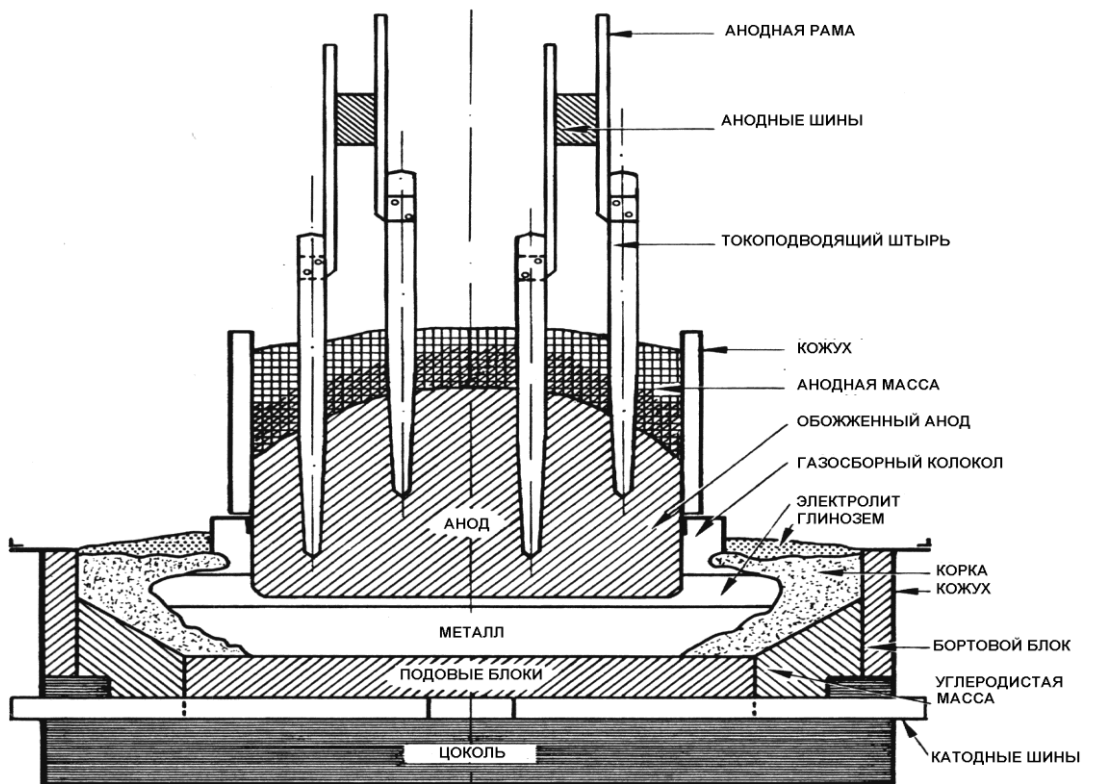


Рисунок 2 - Электролизер с самообжигающимся анодом

Процесс электролиза происходит в слое расплавленного электролита между анодом и расплавленным металлом. Основными компонентами электролита являются криолит (Na_3AlF_6), фторид алюминия (AlF_3). В действительности, состав электролита более сложен. В нем всегда присутствует 2–3% фторида кальция, поступающего в электролизер как примесь в исходных материалах (в глиноземе, криолите, фториде алюминия, анодах и др.). Кроме того, CaF_2 иногда специально вводят в ванну для понижения температуры плавления электролита и уменьшения потерь алюминия. Для этих же целей, наряду с фторидом кальция, применяются добавки фторида магния. Ионы алюминия восстанавливаются до металла, накапливающегося на подине, а ионы кислорода взаимодействуют с анодом, приводя к образованию углекислого газа.

Первый электролизер с самообжигающимся анодом был испытан в 1923 г. Анод был оснащен алюминиевым кожухом, в верхнюю часть которого загружалась анодная масса. Спекание массы происходило за счет джоулева тепла, выделяющегося в аноде [11]. Токоподвод осуществлялся по образцу подвода тока к электродам рудно-термических печей: с помощью контактных плит, прижатых к алюминиевому кожуху. Однако из-за большого перепада напряжения контакта плита — кожух, достигающего 1,5 В, стали применять ребристый токоподвод. При такой конструкции токоподвода кожух анода собирался из листов алюминия, соединенных алюминиевыми ребрами, к которым крепились тонкие железные листы — «перья», заходившие в массу анода и осуществлявшие подвод тока от ребер к угольному аноду. Ребра были связаны с домкратами и служили одновременно для подвески и перемещения анода [12]. Падение напряжения в этой конструкции удалось снизить до 0,8 В, однако частые оплавления алюминиевых ребер и рубашки вызывали серьезные осложнения в технологии. В 1925 г. впервые были применены стальные штыри, которые вбивались в жидкую массу выше конуса спекания и извлекались при снижении их до уровня электролита. Перепад напряжения в анодах снизился до 0,5–0,6 В.

До 1930 г. самообжигающиеся аноды имели цилиндрическую форму, мощность электролизеров составляла не более 30 кА при анодной плотности тока $0,9 \text{ А/см}^2$. Дальнейший рост мощности электролизеров сдерживался сравнительно большим диаметром анодов (до 2 м), при увеличении которого возникали серьезные проблемы с распределением тока. В 1931 г. были пущены первые электролизеры с прямоугольными анодами, что позволило быстро наращивать двух и даже трехкратную мощность против существующей [13].

Электролизеры ранних конструкций оснащались двумя или тремя параллельно работающими анодами. Однако их основной недостаток — обгорание анода в смежных плоскостях убедил в целесообразности использования единого анода, что и было осуществлено практически повсеместно уже к 1940 г. С этого времени конструкция анода с боковым токоподводом принципиально не изменялась. Важнейшим преимуществом электролизера с боковым токоподводом (БТ) является возможность удачно разместить укрытие рабочей зоны и с высокой эффективностью собрать анодные газы, смолистые углеводороды, газообразные соединения фтора и направить их в газоочистку. Первые успешные испытания электролизеров с верхним токоподводом (ВТ) были проведены в 1940 г. на заводах Италии и Швейцарии, а в нашей стране — в 1946 г. на Уральском и Новокузнецком алюминиевых заводах [14].

Алюминиевые ванны с непрерывными анодами обладают следующими преимуществами перед ваннами с обожженными анодами:

1) Применение непрерывных анодов исключает процесс прессования и специального обжига, отчего снижается стоимость анодов;

2) Благодаря непрерывности анода отсутствуют анодные огарки, составляющие не менее 15—20% от массы прессованного анода;

3) Алюминиевый кожух предохраняет находящуюся внутри него углеродистую анодную массу от окисления на воздухе и механических разрушений;

4) Повышается тепловой коэффициент полезного действия ванны, так как определенная доля тепла, излучаемого поверхностью ванны, используется для обжига анода;

5) Многочисленные прессованные аноды заменяются только одним анодом, что упрощает обслуживание ванны;

6) Ванну с непрерывными анодами легче герметизировать для отсоса и улавливания газов, содержащих фтористый водород;

Недостаток ванн с непрерывными самообжигающимися анодами — значительное образование газообразных продуктов коксования (пиролиза) каменноугольного пека при обжиге анодной массы [15]. Реакции, которые не связаны с восстановлением алюминия, определяют избыточный расход анода, который не выгоден экономически и наносит вред окружающей среде [16].

В настоящее время западной алюминиевой промышленностью из экологических соображений сделан решительный выбор в пользу технологии обожженных анодов. Работы в области совершенствования технологии Содерберга, практически прекратились, за исключением отдельных работ по снижению экологической опасности существующих производств. Тем не менее, в свете развития техники и технологии приготовления анодной массы, вполне обоснованным представляется развитие технологии Содерберга по двум направлениям:

- Совершенствование существующей технологии «сухого» анода развитием инженерных решений по локализации и нейтрализации выбросов с поверхности анода и при перестановке токоподводящих штырей.
- Разработка и внедрение в производство новой технологии с использованием анодной массы со сниженным содержанием связующего.

1.2 Сырье для производства анодной массы

Для производства анодной массы используются пековые либо нефтяные коксы, которые выполняют функцию наполнителя и формируют «скелет» анода, и каменноугольный пек, который является связующим материалом,

соединяющим частицы кокса в единую структуру (анодную массу) [17]. Качественные характеристики используемого сырья всегда являлись одним из определяющих факторов качества анода. Соответствие сырья требованиям технологии это залог хорошего технологического состояния анода [18].

Каменноугольный пек, используемый для производства анодной массы, должен удовлетворять определенным требованиям - температура размягчения должна быть относительно постоянной и находится в пределах, которые позволяют вести процесс смешения при изготовлении массы и обеспечивают максимальный выход кокса при коксовании связующего в аноде. Свойства пека, при выдержке в течение нескольких суток при высокой температуре, не должны меняться, а именно вязкость. Это необходимо для того, чтобы анодная масса сохраняла свои пластические свойства при загрузке в анод, равномерно распределялась по поверхности анода при плавлении и в то же время не расслаивалась. Требования, предъявляемые к пекам указаны в таблице 1 [19].

В практике пек условно разделяют на фракции:

- Свободный углерод или высокомолекулярные соединения;
- Летучие или низкомолекулярные соединения;
- Коксующийся углерод или сумма высоко и средне-молекулярных соединений;
- Связанный (связующий) углерод или сумма низко и средне-молекулярных соединений.

Таблица 1 Требования к пеку

Показатель	Значение
------------	----------

	Пек марки «Б1»	Пек марки «В»
Температура размягчения, °С (метод КиС)	72-80	85-90
Выход летучих веществ, %	56-59	53-57
Массовая доля веществ нерастворимых в хинолине, %	5-10	6-10
Массовая доля веществ нерастворимых в толуоле, не менее %	26	31
Коксовый остаток, не менее %	50	55
Дистилляция, не более %	6,0	4,0
Содержание золы, не более %	0,30	0,30
Содержание серы, не более %	0,50	0,50
Содержание натрия, не более %	0,20	0,20
Вязкость при температуре 155 °С, сП	400-500	1500-4500
Вязкость при температуре 185 °С, сП	100-300	300-500

Свободный углерод увеличивает коксовый остаток и уменьшает усадку кокса, образующегося при обжиге. С увеличением этой группы уменьшается пористость анода, но до определенного предела, после которого она возрастает. Это объясняется тем, что при значительном увеличении свободного углерода повышается вязкость пека, а это приводит к тому, что пек не заполняет все пустоты в зернах кокса и между ними.

При чрезмерном содержании низкомолекулярных веществ происходит их испарение с поверхности анода, и могут изменяться свойства массы во времени, что является негативным моментом [20].

Коксы поставляются разными поставщиками и различаются по гранулометрическому составу, структурно пористым характеристикам, содержанию серы и микропримесей [21]. В связи с этим, коксы разных

поставщиков хранят в складе отдельно по видам, в условиях, исключающих их смешение, т.к в зависимости от дозировки того или иного кокса влияет на состав анодной массы.

При поступлении кокса осуществляется входной контроль, согласно требованиям к качеству сырья, используемого при производстве анодной массы. Требования к качеству поступающего кокса представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Требования к качеству поступающего кокса

Показатель	Значение
Массовая доля влаги, %	<5,0
Зольность, %	<0,5
Массовая доля серы, %	<3,0
Действительная плотность, г/см ³	2,02-2,065
Массовая доля железа, %	<0,08
Массовая доля кремния, %	<0,06
Массовая доля ванадия, %	<0,06
Массовая доля натрия, %	<0,02

К нефтяному коксу предъявляются следующие требования:

- минимальное содержание золы и серы, т.к. это влияет на сортность металла и срок службы деталей анодной конструкции;
- однородность структуры и постоянство свойств, т.к. при частом изменении свойств кокса качество анодной массы и анодов ухудшается;
- реакционная способность кокса по возможности должна быть одинаковой или меньше, чем у кокса, образующегося из связующего при обжиге анода;
- определенное термическое расширение;
- максимально возможная тепло и электропроводность;
- хорошая смачиваемость связующим, это способствует пропитке зерен кокса пеком, уменьшает пористость анода и улучшает его качество.

Основной целью сушки прокаленных коксов для производства анодной массы является удаление из них влаги. Сушка прокаленного кокса осуществляется в прокалочной печи. Сжигание мазута осуществляется с помощью форсунки, установленной в камере топки, сжатый воздух является распылителем [22].

Основной проблемой существующей технологии анода Содерберга является нестабильность свойств анодной массы, обусловленная изменчивостью сырьевой базы и технологией непрерывного смешения. К недостаткам сырьевой базы следует отнести низкую термостабильность российских пеков и большое количество типов коксов, вовлекаемых в производство на алюминиевых заводах [23].

1.3 Технология анода

Технология анода, в целом, делится на два класса:

- технология «жирного» анода (32-34% пека).
- технология «сухого» анода(26-29% пека).

Классическая технология «жирного» анода предусматривает наличие жидкой фазы на поверхности анода. Жидкая фаза в этом случае состоит из жидкого пека и мелкой фракции коксовой шихты. Лунки при перестановке штырей заполняются за счет свободного течения жидкой массы с поверхности анода [24].

Положительные факторы использования – сухой - анодной массы:

- Исключить отстой пека;
- Заполнить поверхность жидкой фазы слоем твердой анодной массы и предотвратить эмиссию смолистых веществ в атмосферу;

«Сухая» анодная масса производится на основе различных сортов пеков, среднетемпературных (марки Б), пеков с повышенной температурой размягчения (марки В) и высокотемпературных пеков. При повышении температуры размягчения применяемого пека наблюдаются положительные сдвиги в составе качества анодной массы, при этом область оптимальных значений лежит в интервале температур размягчения 98 - 105 °С, т. е.

высокотемпературных пеков. Химическая устойчивость в атмосфере CO_2 снижается при повышении температуры размягчения пека до $130\text{ }^\circ\text{C}$.

Применение «сухой» массы снижает селективность окисления анодов и соответственно образование угольной пены с $50 - 70$ до $4 - 30$ кг/т в зависимости от марки используемого пека. Фактор «сухого» анода достигается за счет повышения температуры его размягчения [25].

Использование технологии «сухого» анода на крупных алюминиевых заводах имеет свои особенности. Кроме технических трудностей связанных с переработкой более вязкого пека, ужесточаются требования к стабильности сырья и параметрам технологии. Основным показателем пригодности анодной массы для технологии становится пластичность, которая оценивается по величине коэффициента относительного удлинения (КОУ). Сложность технологии «сухого» анода заключается в том, что зависимость пластичности анодной массы от количества связующего не является линейной. На рисунке 1 приведены экспериментальные данные зависимости КОУ сухой анодной массы, от содержания связующего. [26]

Из рисунка 3 видно, что технология сухого анода реализуется в узком интервале концентраций связующего. Изменение величины КОУ в технологическом интервале от 15% до 65% происходит при изменении содержания связующего менее чем на 1%. Очевидно, что технология сухого анода работает в зоне технологической неустойчивости по содержанию связующего. Это определяет сильную зависимость состояния пластичной зоны анода от характеристик сырья таких как: вибронасыпная плотность кокса, вязкость пека, содержание в пеке веществ нерастворимых в хинолине, смачиваемость кокса пеком и других микроструктурных и термодинамических параметров, которые не имели особого значения в технологии жирного анода. [27]

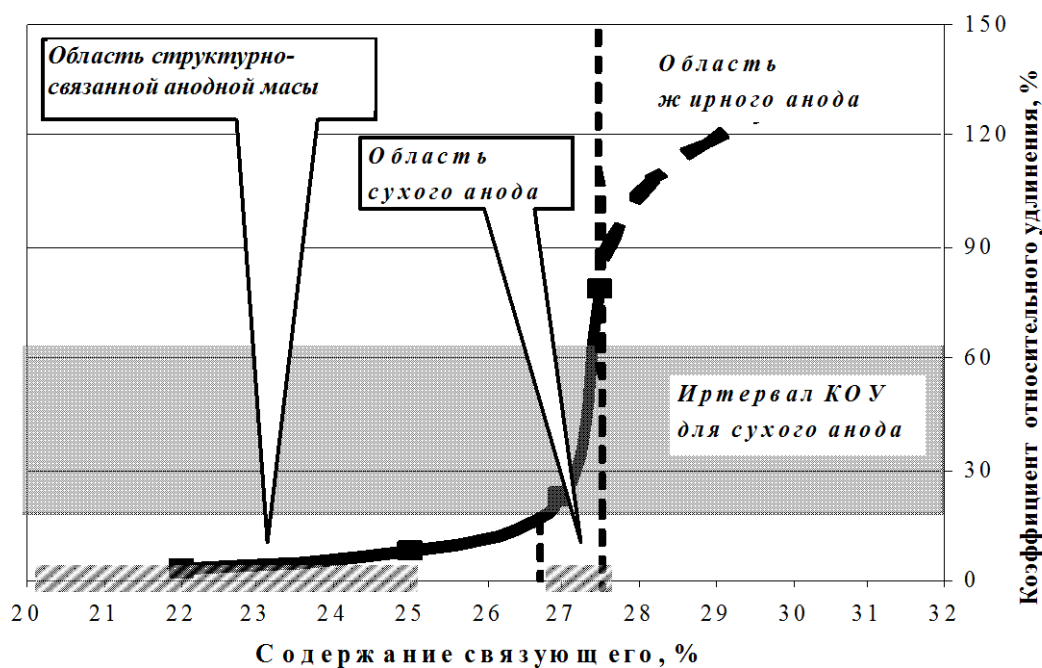


Рисунок 3 Реологическая кривая анодной массы

Наличие обширной сырьевой базы для крупных алюминиевых заводов создает трудности в получении анодной массы со стабильной пластичностью. Зависимость пластичности сухой анодной массы от качества сырья вынуждает технологов поддерживать избыточное количество пека в анодной массе, при переходе с одного вида сырья на другой. На практике, поддержание необходимой пластичности сухой анодной массы может потребовать до 31% содержания пека в зависимости от качества сырья. [28]

Для технологии «сухого» анода характерно отсутствие жидкой фазы на поверхности, поверхность упругая, для поддержания нужного уровня пластичного слоя используется несколько типов анодной массы, для заполнения лунок при перестановке штырей используется специальная подштыревая масса. На рисунке 4 схематично представлены зоны «сухого» анода [29].

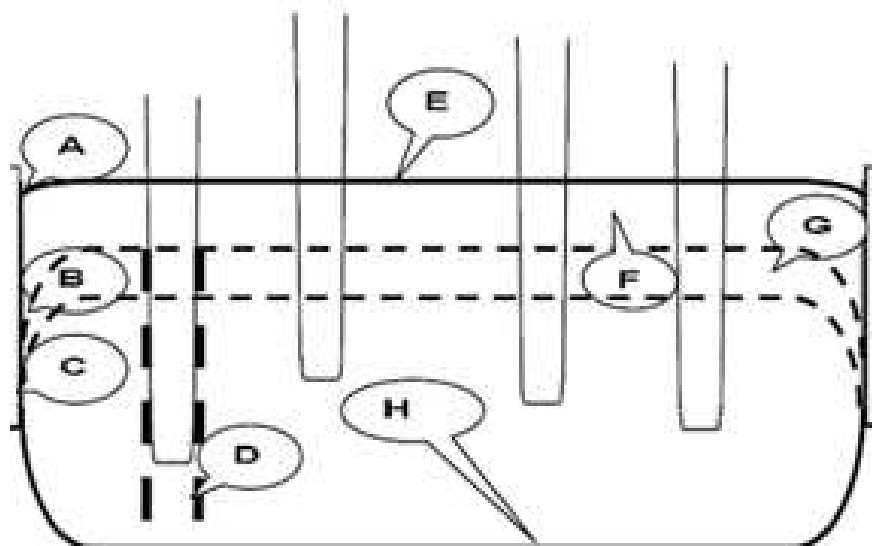


Рисунок 4 - Зоны «сухого» анода где, “А” Анодный кожух и анодная масса, “В”

Граница раздела между полупластичной зоной и кожухом, “С” Граница раздела между зоной коксования и кожухом, “D” Вторичный анод, “Е” Анодная масса, “F” Полупластичная зона анода, “G” Зона полукоксования в аноде (конус спекания), “H” Подошва анода.

Зона полупластичной массы должна составлять более 35 см. Обычно при нормальной работе анода высота зоны полупластичности примерно равна 40 – 45 см. [30]

Высокая вязкость «сухой» массы создает многие проблемы при ее использовании (трудность заполнения подштыревого отверстия, намерзание в виде «козырьков» на верхней грани анодного кожуха, особенно по углам и в торцах). Для предотвращения намерзания верхнюю часть кожуха оснащают слоем тепловой изоляции. Однако в зимнее время этого оказывается недостаточно, и технологи вынуждены проводить принудительную прорезку козырьков различными методами, включая виброножи, горячие пластины или штыри.

Применение сухой массы на основе марки В в жидкой фазе теряет способность течь и свободно заполнять подштыревые отверстия при перестановке штырей. В таких случаях применяется только принудительная подача подштыревой массы в виде дозированных порций гранулированного материала [31].

1.4 Процессы, протекающие при коксовании анодной массы

Процесс самообжига анода, прежде всего, определяется химическими и физическими процессами, а во вторых, процессом коксования пека. Для того чтобы процесс протекал, необходимо тепло, которое вырабатывается в электролизере и в аноде за счет падения напряжения.

Как происходит процесс коксования анодной массы?

Процесс начинается с момента пополнения анода новой порцией анодной массы, при этом масса должна быть равномерно распределена по поверхности.

Сначала брикеты массы размягчаются и начинают оседать. Примерно через сутки их состояние должно быть таким, что невозможно поднять с поверхности анода более чем два брикета (два слоя). Такое состояние анода обеспечивает герметизацию поверхности, т.к. в дальнейшем при нагреве пека происходит выход летучих веществ и возникает давление газа. Отсутствие хорошего изолирующего слоя на поверхности анода способствует возникновению нарушений, связанных с образованием трещин и пустот. Кроме этого высота пластичного слоя является так же важным параметром для анода. Если верхний изолирующий слой создает требуемое давление, герметизацию, то выделяющиеся газы направляются к низу анода.

По мере роста температуры массы начинается испарение органических веществ с низким молекулярным весом, и давление начинает расти. Зоны самого высокого давления в аноде создаются в зоне полукоксования и в зоне подштыревой массы. Пластичная верхняя зона служит для предотвращения выхода газов через поверхность анода и способствует повышению плотности анода. Если состояние верхнего слоя обеспечивает требуемые условия, то происходит вынужденная миграция газов (рисунок 5), образовавшихся при полимеризации, что способствует формированию хорошего конуса спекания. При достижении температуры в зоне коксования примерно 550 °С начинается усадка материала.

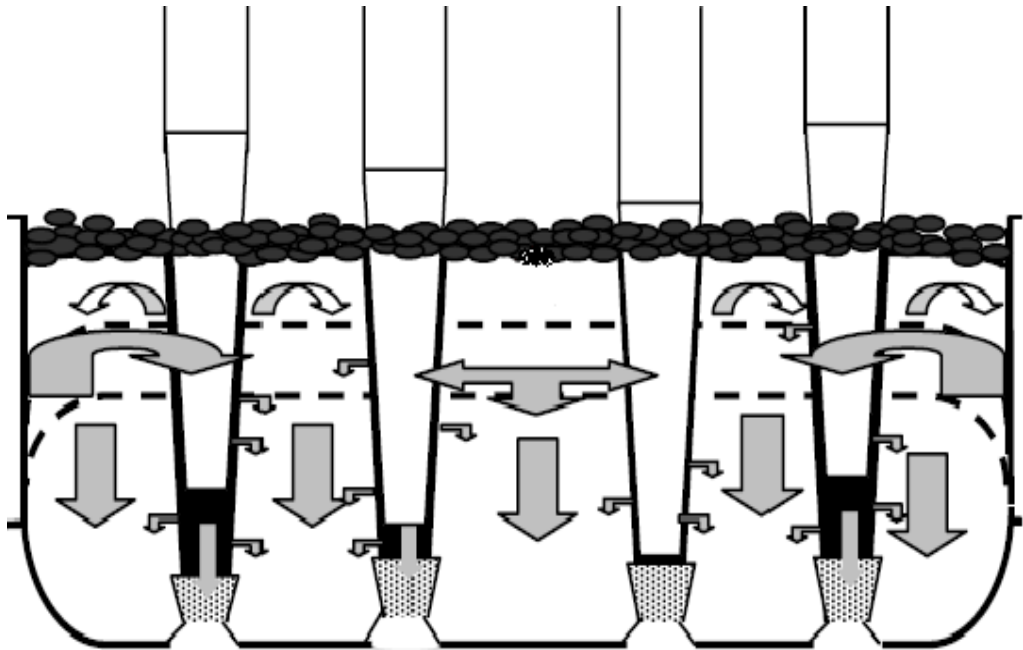


Рисунок 5 - Миграция газов в аноде.

Некоторая часть усадки материала анода компенсируется за счет теплового расширения штырей. Тепловое расширение штырей вызывает образование микротрещин в углеродном материале в зоне вокруг штыря. Некоторые трещины заполняются при полимеризации газа поступающего сверху, что повышает плотность анода.

Основные этапы процесса обжига анода:

- Плавление анодной массы на поверхности анода
- Изменение вязкости анодной массы:
 - происходит допропитка кокса пеком
 - формируются силы, уплотняющие анодную массу в пластичном верхнем слое анода
- Выход летучих веществ из пека:
 - повышение вязкости
 - увеличение микропористости материала анода
- Полимеризация пека.

С ростом температуры (до 250 – 350 °С) свойства анодной массы перестают меняться, т.к. происходит полимеризация пека, которая приводит:

- к росту вязкости

- к прекращению пропитки кокса пеком
- к прекращению уплотнения анодной массы
- Процесс коксования.

Процесс коксования начинается при 500-550 °С

- начинается усадка
- в аноде формируются трещины

- Процесс обжига завершается в контакте с электролитом при температуре процесса электролиза ≈ 960 °С.

Процесс обжига вторичного анода имеет те же основные этапы, но происходит намного быстрее, из-за этого этот процесс называют - «взрывное коксование». При перестановке штырей ПАМ засыпают в открытую лунку с температурой на дне около 800 – 850 °С, при этом выделяется большое количество смолистых веществ и ПАУ в атмосферу корпуса.

1.5 Формирование вторичного анода

Вторичный углерод формируется при коксовании подштыревой анодной массы в подштыревых лунках под штырями анода Содерберга и должен обладать высокой плотностью, низким удельным электрическим сопротивлением, обеспечивая низкое контактное сопротивление между штырем и первичным анодом. Ухудшение качества вторичного углерода приводит к возникновению отклонений в технологии анода и росту падения напряжения. Регламент перестановки штырей и время между загрузкой подштыревой массы и установкой холодного штыря оказались весьма важными факторами, определяющими качество вторичного анода. Это было установлено в ходе лабораторных экспериментов и промышленных испытаний, выполненных на заводе Elkem Aluminium Mosjoeen (EAM). Для внедрения результатов экспериментов в корпусах электролиза была разработана новая система визуализации времени замены штырей.

Новая технология анода Содерберга на заводе Elkem Aluminium Lista (EAL), которая представляет собой технологию сухого анода в комбинации с АПГ, позволила снизить концентрации ПАУ (полиароматических углеводородов) в

выбросах, сбрасываемых в море, до 0,019 кг/тонну Al (по методу РАН-Boneff 6) и атмосферных выбросов до 0,085 кг/тонну Al (по методу РАН-16). Частота анодных эффектов на уровне менее 0,135 АЭ/сутки. Расход углерода за 2003 год составил 490 кг/тонну произведенного Al, а количество снятой пены оценивается на уровне 7,5 кг/тонну Al. В аноде Содерберга происходит непрерывающийся обжиг анодной массы, которая загружается в виде брикетов на поверхность анода. Обжиг происходит медленно и примерно через три месяца масса расходуется [32]. По мере сгорания анода токоподводящие штыри опускаются и достигают заранее определенного нижнего уровня, после чего они должны быть переставлены на более высокие горизонты. При выполнении этой операции штыри извлекаются, в лунку добавляется подштыревая анодная масса и устанавливается чистый штырь на более высокий горизонт. В течение нескольких минут происходит “взрывное коксование” и полученный таким образом обожженный материал подштыревой лунки называется вторичным анодом. Обожженный в ходе ускоренной полимеризации материал в подштыревой лунке должен иметь свойства, аналогичные свойствам первичного обожженного анода, например, высокую кажущуюся плотность, низкую УЭС, низкую проницаемость на воздухе и, вдобавок к этому, обеспечивать низкое контактное сопротивление между штырем и телом анода. Обычно на подошве анода Содерберга имеются трещины как в зоне между штырями, так и между штырями и боковыми сторонами анода. Кроме этого можно наблюдать кольца вокруг штырей на подошве и выемки под штырями в середине вторичного анода, либо даже открытые сквозные отверстия. Трещины образуются вследствие усадки первичного анода при его формировании в комбинации с тепловым расширением стали штырей. Чем шире и глубже трещины, тем больше поверхность реакции для окисления углерода газом CO_2 , который образуется при электролизе. Кольца, которые можно наблюдать вокруг вторичного анода, образуются вследствие выдавливания подштыревой анодной массы между штырем и первичным анодом. Отверстие в центре вторичного анода получается

в результате образования пустоты или пористого материала во вторичном аноде при неправильно выбранном времени замены штыря, то есть когда новый штырь устанавливается в лунку слишком рано или слишком поздно. Низкое качество вторичного анода или трещины могут приводить к протекам подштыревой анодной массы в электролит, что обычно приводит к появлению неровностей (отставание в сгорании анода) и "козырьков" на подошве анода. В общем, в числе отклонений в технологии анода на заводе Elkem Aluminium Lista можно упомянуть отставания в скорости сгорания анода, "козырьки" на подошве и наличие кусков анода в электролите. Принципиальная разница между неровностями и "козырьками" на подошве состоит в том, что неровности устраняются вручную, однако удаление "козырьков" обязательно должно выполняться с использованием механического оборудования. Количество протекнов анодной массы на подошву обычно является хорошим индикатором состояния анодов в целом. Хорошее состояние анода характеризуется предсказуемым поведением поверхности анода, когда на перестановке штырей "стягивается" минимальное количество лунок, а также общим низким уровнем расхода анодной массы, при этом обеспечиваются нормальные условия труда технологического персонала, занятого на перестановке. Кроме свойств подштыревой массы на состояние технологии анода оказывали влияние регламенты, определяющие график перестановки штырей, минимальное расстояние, шаг перестановки, время установки нового штыря, износ штырей, точность расстановки штырей на горизонт и методы устранения протекнов под штырями. Такие факторы, как сила тока, состояние штырей, работа АПГ и методы удаления углеродистой пены и устранения отклонений в работе анода могут в большой степени определять общее состояние технологии, однако эти факторы нельзя назвать основными при определении причин отклонений в работе анода отдельно взятого электролизера или группы ванн. На работу отдельных ванн влияют отличия в конструкции электролизеров, установленных в одной серии, что определяет качество анода, а также регламент операции замены штырей. В регламенте замены штырей определяются цели для времени

замены штыря, шага перестановки, тока через штырь, распределения тока между штырями, а также количества отклонений в работе анода за неделю. Все указанные параметры кроме времени замены штыря регулярно измеряются на ограниченном количестве электролизеров. Результаты этих измерений распространяются между технологическим персоналом индивидуально, а итоги обсуждаются на общих собраниях через каждые 5 - 7 недель. В лаборатории компании в городе Кристиансанд были выполнены эксперименты по сравнению разных составов анодной массы, разных регламентов перестановки и времени замены штырей, а промышленные испытания проводились на заводе Elkem Aluminium Mosjøen (EAM). Кроме этого, одному мастеру и пяти операторам штыревого крана было поручено проанализировать описание регламента и определить отличия, возникающие при его реальном применении в корпусах. Это позволило создать схему, обеспечивающую "горячую линию" для оказания помощи в обучении остальных оператор методам устранения основных отклонений, возникающих в работе анода. После внедрения данной системы количество отклонений в технологии анода стало резко сокращаться [33].

Было выполнено сравнение подштыревой массы от четырех разных производителей. При сравнении время замены штырей принималось равным 8,5 минутам, а температура в лунке соответствовала 800°C. Предварительный нагрев осуществлялся за счет подвешивания штыря над лункой. В Таблице 3 и на Рисунке 5 представлены результаты данных по грансоставу и содержанию пека в подштыревой анодной массе после выполнения экстракции обожженного образца в хиолине. Все полученные вторичные аноды были сформированы без пустот. Был выполнен анализ кернов вторичного анода. Оказалось, что значения средней кажущейся плотности обожженного образца были самыми высокими для подштыревой массы типа А, для которой была подобрана "прямолинейная" кривая синтетического грансостава, а самые низкие показатели плотности были получены для подштыревой массы типа D с укрупненным грансоставом и S-образной синтетической кривой. Значения УЭС

были самыми низкими для подштыревой массы типа А, а самые высокие для массы типа D.

Таблица 3: Сравнение разных типов подштыревой массы при времени "замены" штыря 8,5 минут и температуре 800°C.

Тип ПАМ	А	В	С	Д
Высота подъема ПАМ в лунке	59	57,5	68	45,5
Высота вторичного анода, см	14	20	18,5	27
Плотность, геом., г/см ³	1,506	1,376	1,425	1,374
УЭС, мкОм	81	118	90	138
Процент пека, %	39,5	40,8	38,6	35,4

В массе типа D процент пека был самым низким, кроме этого ее грансостав был самым крупным из всех и высота подъема массы в лунке вдоль штыря была наименьшей при самой низкой плотности обожженной массы. В массе типа А пек имел температуру размягчения на 10°C ниже, чем в массе типа D и этим можно объяснить отличия в высоте подъема массы в лунке. По всей видимости, грансостав подштыревой массы имеет большее значение для получения оптимального вторичного анода, чем процент пека. Результаты экспериментов по сравнению поведения подштыревой массы одного типа они подтверждают, что более крупный грансостав и низкое содержание пека, как в массе №2 (табл.4) дают в результате вторичный анод с пониженной плотностью и подъем массы в лунке при установке штыря для этой массы наименьший. Расстояние между штырем и телом первичного анода уменьшалось по мере увеличения погружения штыря в лунку и со снижением крупности грансостава подштыревой массы, что расширяет диапазон и обеспечивает более точную установку штыря на заданный горизонт [34].

Таблица 4: Эксперименты при времени "замены штырей" 10 минут и температуре 800°C. Сравнение для определения влияния грансостава и процента пека

Время выдержки перед установкой штыря 10 минут, температура 800°C		
Грансостав ПАМ	1	2
Процент пека, %	34,4	33,3

Высота подъема ПАМ в лунке	47	44
Высота вторичного анода, см	30	33

1.6 Экологические аспекты

Наиболее экологически опасным фактором, сопровождающим получение алюминия по технологии Содерберга, являются выбросы канцерогенных полиароматических углеводородов (ПАУ), источником которых является связующее анодной массы — каменноугольный пек [35]. Для снижения экологических рисков в 1970-х гг. была разработана технология «сухого» анода Содерберга. Особенностью технологии является использование каменноугольных пеков с повышенной температурой размягчения и «сухой» анодной массы с содержанием связующего 26–28 % (в обычной 30–32 %). Внедрение технологии «сухого» анода позволило значительно снизить выделение ПАУ с открытой поверхности анода Содерберга. Кроме «сухой» анодной массы в технологии используется подштыревая анодная масса (ПАМ) с повышенным содержанием пека до 39 %. Основной функцией ПАМ является создание так называемого вторичного анода, который обеспечивает качественный электрический контакт между телом анода и токоподводящим штырем. При установке штыря на новый горизонт расплавленная ПАМ должна заполнить свободное пространство под штырем, а также зазор между его конической частью и телом анода. Поскольку зазор достаточно узкий, то ПАМ для его заполнения должна обладать высокой текучестью и не содержать частиц крупнее 3–4 мм. Высокая текучесть ПАМ обеспечивает заполнение трещин в аноде, установку токоподводящих штырей на необходимый горизонт, а также хороший электрический контакт «штырь—анод». Текучесть ПАМ обеспечивается избыточным по отношению к основной массе содержанием пека, который, с другой стороны, является источником неконтролируемых выбросов в атмосферу корпуса. Перед установкой токоподводящего штыря ПАМ загружается в подштыревую лунку, где попадает в зону высоких температур до 800 °С. Быстрое плавление и коксование массы сопровождаются

залповым выбросом смолистых веществ и канцерогенных ПАУ. Поэтому операция перестановки токоподводящих штырей в технологии «сухого» анода считается наиболее экологически неблагоприятной [36].

ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Воздействие вибрации на сыпучие и вязко-пластичные среды

Подштыревая анодная масса представляет собой композицию нефтяного кокса и каменноугольного пека. В подштыревой лунке в зависимости от температуры слоя и времени нахождения состояние ПАМ будет меняться от сыпучего в верхней части лунки, до пластичного в средней и жидкого в нижней части. Анодный штырь устанавливается в лунку, когда поверхностный слой ПАМ нагреется до жидко-пластичного состояния. Это может занять от 8 до 24 минут. Поверхность расплавленной ПАМ является источником канцерогенных ПАУ, причем, чем выше температура поверхности, тем выше токсичность выделяемых газов. Установка штыря сразу после засыпки массы затруднено сопротивлением сыпучего и высоковязкого слоя ПАМ в верхней части лунки. Для сокращения времени установки штырей и открытой лунки можно использовать вибрацию [37].

Под воздействием вибраций в сыпучих продуктах и вязко-пластичных средах происходят превращения, особенности которых обусловлены интенсивностью вибрации. С увеличением интенсивности вибрации, в пределах ускорения, не превышающего ускорения свободного падения, сыпучий материал приобретает подвижность, псевдотекучесть. Это состояние окружающей среды обычно называют состоянием текучести. В этом состоянии адгезия между частицами ослабевает, они приближаются друг к другу, уменьшается количество пор (достигается более плотная укладка частиц), рыхлое тело уплотняется. Наибольшее уплотнение достигается при амплитудных ускорениях, близких к ускорениям свободного падения. С дальнейшим увеличением интенсивности колебаний частицы начинают терять контакт с вибрирующим рабочим органом,

уменьшаются и периодически нарушаются связи между частицами, рыхлое тело как бы переходит в состояние кипения.

При температурах выше температуры размягчения пека ($> 90^{\circ}\text{C}$) ПАМ из сыпучего состояния переходит в жидко-пластичное с высокой концентрацией твердой фазы. Свойства высококонцентрированных дисперсных сред обусловлены наличием пространственной структуры, которая определяет их тиксотропный характер. Т.е. течение такой среды начинается при приложении некоторого усилия – напряжения сдвига. Величина напряжения сдвига определяются поверхностными явлениями на межфазной границе и типом контактов между частицами твердой фазы. Наименее прочные коагуляционные контакты.

Псевдооживление наиболее благоприятный режим погружения, так как затрагивает только близлежащие к поверхности вибрирующего тела слои. Монослой, соприкасающийся с вибрирующим штифтом, получает от него силовые импульсы. Из нижнего монослоя импульсы передаются в вышележащие монослои. Из-за инерции, трения и необратимых деформаций импульсы по мере их передачи от монослоя к монослою постепенно ослабевают, а степень их ослабления определяется свойствами среды, а также типом и величиной силовых импульсов. Энергия колебательного движения источника вибрации во время прохождения волны тратится на ускорение обработанной среды и восполнение потерь при необратимых деформациях. Часть рассеянной в материале энергии переходит в тепло. Вследствие этого при вибрации значительной интенсивности наблюдается саморазогрев. Результатами саморазогрева является появление виброползучести и релаксации напряжений.

Под ползучестью понимается явление увеличения деформации $\sigma(t)$ при постоянном уровне напряжений. Если на постоянную нагрузку, вызывающую ползучесть, наложить вибрационную силу, то процесс ползучести протекает значительно быстрее (рис.б). На рис.ба показана программа нагружения. При $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ наблюдается ползучесть, которая изображается на рис.бб кривой 1.

Добавление знакопеременной составляющей $\sigma_a \sin \omega t$ приводит к тому, что среднее значение деформации (см. кривую б на рис. 6б) в тех же точках по времени больше, чем при σ_0 .

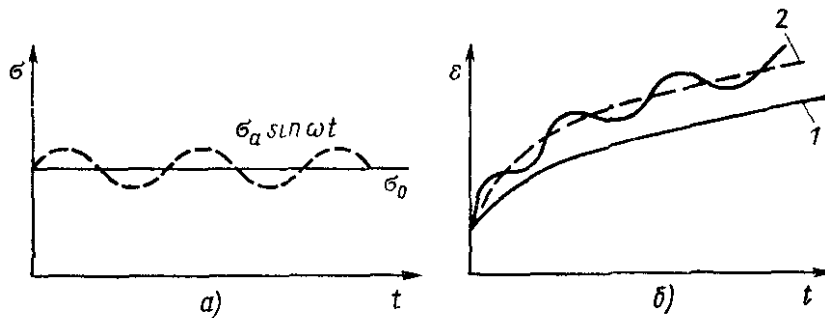


Рисунок 6 - Виброползучесть: а — программа нагружения; б — изменение деформации во времени: 1 — при $\sigma_0 = \text{const}$; 2 — при $\sigma = \sigma_0 + \sigma_a \sin \omega t$.

Релаксацию напряжений наблюдают, измеряя напряжение (кривая 1 на рис. 7б) при постоянной деформации ϵ_0 . Накладывая на среднее значение ϵ_0 симметричные колебания (например, $\epsilon_0 \sin at$, рис. 7а), наблюдают более интенсивную релаксацию среднего значения напряжения (кривая 2 на рис. 7б).

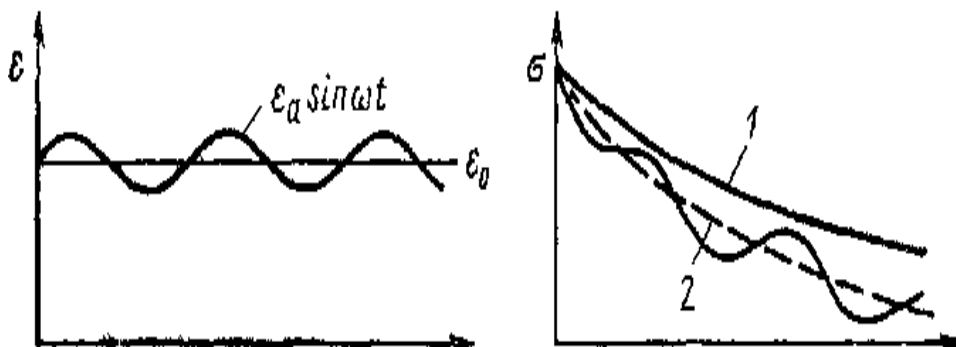


Рисунок 7 - Виброрелаксация: а — программа нагружения; б — изменение напряжений во времени: 1 — при $\sigma_0 = \text{const}$; 2 — при $\sigma = \sigma_0 + \sigma_a \sin \omega t$.

Затухание колебаний и релаксация колебаний в вязко-пластичных средах объясняют разрушением пространственной структуры под воздействием вибраций. Это связано в феноменологических моделях с элементами, учитывающими распределение энергии и нагревание, или просто постулирующими, что коэффициент вязкого элемента зависит от интенсивности колебаний, или на основе понятия псевдо-оживления.

Существуют также некоторые статистические причины, которые обосновывают зависимость вязкости от частоты [38].

Появление виброползучести в прилегающих к поверхности штыря слоях способствует подъему расплавленной ПАМ и заполнению зазора штырь-тело анода, что очень важно для создания хорошего электрического контакта штырь-анод.

Вибрационные воздействия порождают не только колебательные, но и односторонне направленные движения [39]. Кроме того, они обуславливают возникновение в объеме, занятом многофазной средой, равновесных положений элементов мелкодисперсных фаз и их устойчивость.

В реальных условиях многофазная среда всегда находится под действием некоторых внешних сил невибрационной природы, например гравитационных. Режим движения среды при вибрационных воздействиях определяется соотношением между величинами этих и вибрационных сил. Величины последних определяются амплитудами и частотами внешних периодических воздействий. Для создания мощных вибрационных силовых полей могут быть использованы резонансные эффекты, которые позволяют даже при незначительных внешних воздействиях создать вибрационные силы, сравнимые по величине или иногда значительно превосходящие внешние силы другой природы [40].

В частности, при вибропогружении анодного штыря можно создать условия расслоения ПАМ, когда крупные частицы будут концентрироваться в нижней части лунки, а мелкодисперсные заполнять узкий промежуток между штырем и анодом.

2.2 Вибрационные машины для погружения свай, штырей и геологического бурения

Вибрационные машины широко используются при внедрении твердого тела в сопротивляющуюся среду под действием постоянной и знакопеременной сил. Наиболее отработанными являются методы погружения свай, труб, штырей, колодцев и пр. в песчаные и глинистые грунты.

При вибрации колебания сопротивления среды уменьшаются в зависимости от условий среды и режима. Таким образом, силы динамического бокового сопротивления среды уменьшаются по сравнению со статическими в 2-10 раз. Динамическое сопротивление во влажных почвах остается примерно равным статическому, а в почвах, насыщенных водой, уменьшается до 2 раз. Происходит погружение в слабые почвы при гидродинамическом давлении под верхними сваями, что приводит к разуплотнению частиц почвы и их последующему сжижению. В этом случае сопротивление грунта уменьшается как на боковых, так и на торцевых поверхностях.

Различают два типа погружения: вибрационное и ударно-вибрационное. При ударно-вибрационном режиме погружения вибровозбудитель воздействует на погружаемый элемент в основном ударами. Такие устройства называются вибромолотами. Применение вибромолотов для погружения анодного штыря нецелесообразно из-за опасности появления трещин в аноде.

Вибрационный метод целесообразно применять при погружении элементов со сравнительно малой площадью поперечного сечения. Наибольшее распространение вибрационный метод получил при погружении металлических штырей, свай-оболочек, а также при буровых работах. Масса элемента, погружаемого вибрационным способом, практически не ограничивается. Известен опыт вибрационного погружения колодцев-оболочек с массой свыше 200 т.

При колебательном погружении или снятии анодного штыря, когда динамическое воздействие на штырь жестко с ним связано, эффективность процесса будет определяться, прежде всего, нанесением на штырь значительных периодических сил, что вместе с гравитацией системы обеспечит движение штыря в массиве ПАМ. При погружении анодного штыря может быть эффективен продольный эластичный резонансный режим, в котором частота принудительной силы выбирает близкую собственную частоту упругих колебаний погруженного тела.

Существует несколько видов вибропогружателей. Вибрационные погружатели простейшего типа (рис.6а) представляют собой вибровозбудитель, жестко соединяемый с погружаемым элементом, а вибропогружатели с подрессоренным пригрузом (рис.6б) отличаются от вибрационных погружателей простейшего типа наличием безынерционного пригруза, осуществляемого через пружины путем установки дополнительных плит на вибровозбудитель или передачи части силы тяжести копровой установки, обеспечивающих оптимальное давление торца погружаемого элемента на грунт. В вибропогружателях продольно-вращательного действия (рис.6в), применяемых для погружения трубчатых элементов, одновременно возбуждаются два вида колебаний — продольные, направленные вдоль оси погружаемого трубчатого элемента, и вращательные, направленные по касательной к окружности поперечного сечения элемента, В зависимости от сдвига фаз между продольной и вращательной составляющими колебаний, вибропогружатели продольно-вращательного действия подразделяют на собственно продольно-вращательные (угол сдвига фаз равен $\pi/2$) и винтовые (сдвиг фаз равен нулю).

Ударно - вибрационные погружатели разделяют на пружинные и беспружинные вибромолоты. Беспружинные ударно - вибрационные погружатели на погружаемый элемент могут воздействовать либо одним (рис.8г), либо двумя ударами (рис.8д). В двухударном вибромолоте один удар является основным, а второй вспомогательным, предназначенным для стабилизации режима.

Беспружинные вибромолоты могут также работать в ударно-вращательном режиме, сочетающем продольные и вращательные удары (и те, и другие могут наноситься как в одном, так и в двух направлениях) или продольные удары и вращательные колебания (рис.8е).

Пружинные вибромолоты могут быть свободными (передающими на погружаемый элемент только одностороннее возмущение) или скрепленными с погружаемым элементом. Свободные пружинные вибромолоты выполняют с

приложением дополнительной статической силы либо через пружины вибровозбудителя (рис.8ж), либо непосредственно к погружаемому элементу (рис.8з). Возможно сочетание обеих статических сил.

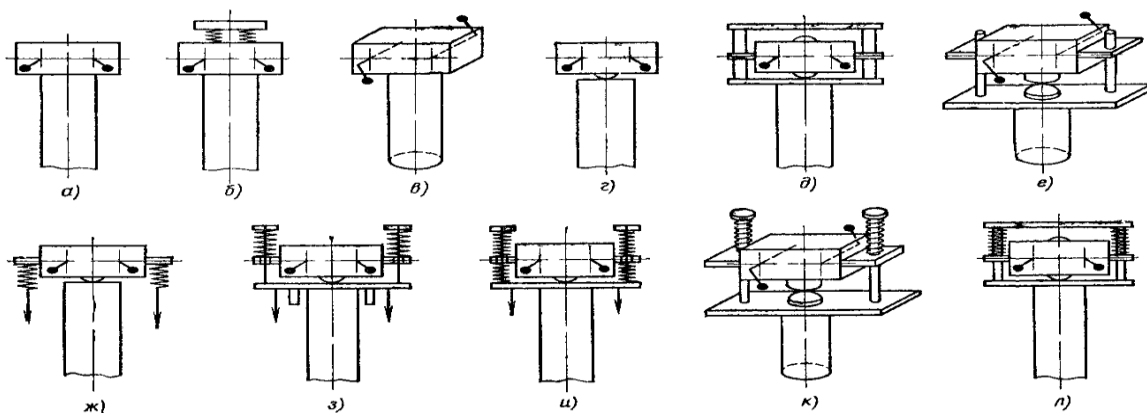


Рисунок 8 - Принципиальные схемы вибрационных погружателей

Пружинные вибромолоты, соединенные с погружаемым элементом, могут быть продольного действия как с приложением статической силы к погружаемому элементу (рис.8и), так и без нее, а также ударно-вращательными (рис.8к) и двух-ударными (рис.8л).

2.3 Способы возбуждения колебаний

Большинство современных вибрационных машин работают в режимах вынужденных колебаний. Существует три способа стимуляции вибрации неавтономных динамических систем: силовая, кинематическая и параметрическая. Использование вынужденных колебаний открывает большие возможности для развития вибрационного привода, реализующего колебания различных амплитудных и фазовых спектров. Возможна работа в обычном резонансе (когда частота равна частоте колебаний вынуждающего воздействия), в режиме супергармонического резонанса.

С помощью синхронных центробежных вибровозбудителей можно создавать любые одночастотные вынуждающие воздействия. На рис.9 приведены некоторые из схем центробежного возбуждения таких воздействий [41].

Схемы на рис.9 а-з плоские, т. е. дебалансы имеют только статическую неуравновешенность. Одиночный дебаланс (рис.9а) создает круговую принудительную силу. Одна и та же сила будет вращаться в фазе в одном направлении два одинаковых (рис.9б) или три (рис.9б) вращаться вокруг параллельных осей дебаланса, причем в последнем случае боковые дебалансы равны.

Синусоидально колеблющуюся прямолинейно направленную вынуждающую силу можно возбуждать вращением в противоположные стороны двух одинаковых дебалансов вокруг общей оси (рис.9г) или вокруг параллельных осей (см.рис.9б), причем в последнем случае ось симметрии должна быть перпендикулярной линии, соединяющей оси вращения. Действительно, равномерно вращающийся с угловой частотой ω со вектор постоянного модуля F_a может быть представлен комплексным числом $F_a e^{i\omega t}$, где t — время, а вращающийся в противоположном направлении с угловой частотой ω вектор такого же модуля — комплексным числом $F_a e^{-i\omega t}$. Равнодействующий вектор:

$$F = F_a (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) = 2F_a \cos \omega t$$

Такого же результата можно добиться вращением трех дебалансов (см. рис.4в), из которых средний вращается в одном направлении, а боковые — в противоположном при указанной на рисунке начальной фазировке, причем статический момент массы каждого из боковых дебалансов вдвое меньше статического момента среднего дебаланса, боковые дебалансы расположены симметрично относительно среднего, и оси вращения всех трех дебалансов лежат на одной прямой, перпендикулярной оси симметрии. С помощью одного вращающегося дебаланса в шарнире маятникового вибровозбудителя можно получить (рис.9д) направленную синусоидальную силу, действующую вдоль среднего положения оси симметрии маятника.

Эллиптическая вынуждающая сила, которую можно рассматривать как сумму круговой и прямолинейно направленной синусоидальной сил, может быть получена вращением в противоположные стороны вокруг одной оси двух

дебалансов с различными статическими моментами массы (рис.9е). Такой же результат может быть получен по рис.9в, если симметричные боковые дебалансы вращаются в одну сторону, а средний — в противоположную, причем сумма статических моментов массы боковых дебалансов не равна статическому моменту массы среднего дебаланса.

Если два одинаковых дебаланса вращаются в одном направлении противофазно вокруг параллельных осей (рис.9ж), то они возбуждают синусоидальный колебательный вектор-момент, направленный перпендикулярно плоскости рисунка. При синхронном вращении в противоположных направлениях во время начальной фазы, указанной на рисунке, в дополнение к указанному векторному моменту вы создаете горизонтально направленную синусоидальную силу. При тех же условиях и начальной фазировке, показанной на рис.9з, будет получено сочетание направленных синусоидальных вектор-момента и силы, причем сила действует под углом $0,25\pi$ к горизонтали в первом и третьем квадратах. Если два одинаковых дебаланса вращаются в одном направлении при начальной фазировке, показанной на рис.9з, то будет получено сочетание колеблющегося вектор-момента и круговой силы.

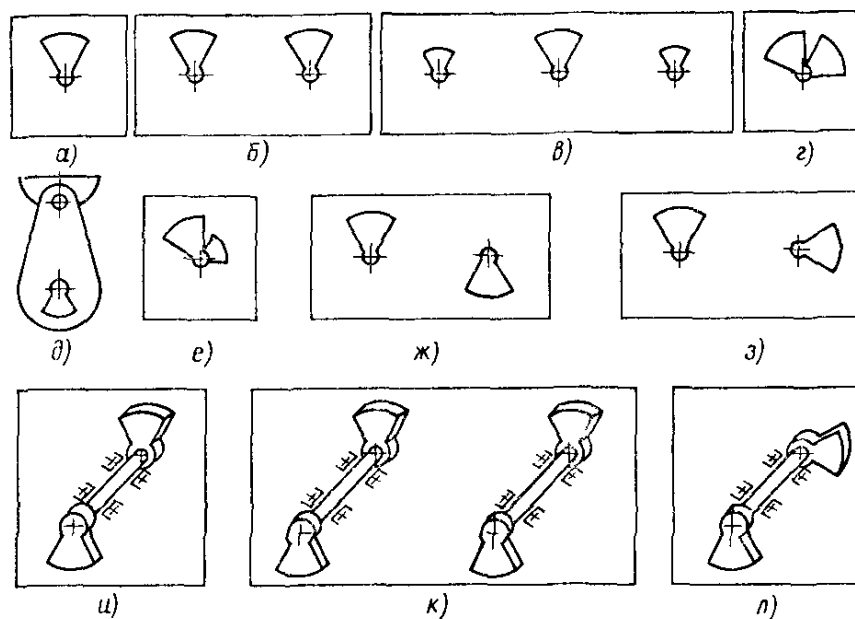


Рисунок 9 - Схемы центробежного возбуждения одночастотных воздействий

Моментно неуравновешенный дебаланс (рис.9и) при своем вращении порождает круговой вынуждающий вектор-момент, перпендикулярный вращающейся плоскости разбаланса. Два таких дебаланса, вращающихся вокруг параллельных осей (рис.9к) в одинаковом направлении, создают вектор-момент такого же вида. Если же дебалансы вращаются в противоположных направлениях и обладают одинаковыми по модулю моментами дисбаланса, то они создают синусоидально колеблющийся вектор-момент, который перпендикулярен осям вращения дебалансов и при указанной на рисунке начальной фазировке лежит в плоскости осей вращения.

Вращение дебаланса, обладающего как статической, так и моментной неуравновешенностью (рис.9л), приводит к появлению сочетания круговой силы и кругового момента. Вращение в противоположные стороны вокруг параллельных осей двух таких одинаковых дебалансов при начальной фазировке, показанной на рис.9м, создает колеблющийся динамический винт, т. е. сочетание синфазно или антифазно колеблющихся вдоль одной прямой силы и вектор-момента.

Среди всех имеющихся возбудителей, наиболее распространенными являются центробежные, электромагнитные и пневматические:

Центробежные вибрационные возбудители делятся на дебалансные и планетарные [42]. Демпфер колебаний имеет инерционный элемент, который в данном случае называется дисбалансом, установлен в подшипниках, Соединенных с корпусом качателя, и неуравновешен по отношению к оси вращения, определенной подшипниками. Вращение дебаланса выполняет привод [43].

Планетарные вибровозбудители могут быть с наружной или внутренней обкаткой.

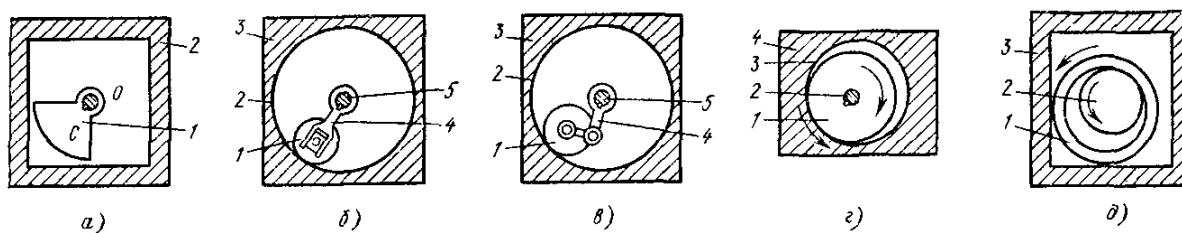


Рисунок 10 - Плоские схемы центробежных вибровозбудителей с одним инерционным элементом.

На рис.10 приведены наиболее распространенные плоские схемы центробежных вибровозбудителей с одним инерционным элементом, которые обладают только статической неуравновешенностью. Дебалансный вибровозбудитель (рис.10а) состоит из дебаланса 1 (центр массы которого расположен в точке С), жестко связанного с валом, вращающимся вокруг оси О в подшипниках, соединенных с корпусом 2. Развиваемая дебалансом инерционная сила передается на корпус через подшипники [44].

На рис.10б, в показаны схемы поводково-планетарных вибровозбудителей с наружной обкаткой. Бегунок 1 обкатывается по беговой дорожке 2 корпуса 3 с помощью поводка 4, вращению которому сообщает вал 5. Поводок в первом случае вилочный, а во втором шарнирно-рычажный. Фрикционно-планетарный вибровозбудитель с наружной обкаткой (рис.10г) состоит из бегунка 1, собственное вращение которого поддерживает двигатель через вал 2. Бегунок обкатывается по беговой дорожке 3 корпуса 4. В случае внутренней обкатки (рис.10д) бегунок 1 обкатывается по беговой дорожке, образуемой боковой поверхностью пальца 2, жестко связанного с корпусом 3. Собственное вращение бегунку сообщает двигатель через вал (на схеме не показан). Обкатку в обоих случаях поддерживают силы сухого трения между бегунком и беговой дорожкой, возникающие под действием центробежной силы, прижимающей бегунок к дорожке, и передаваемого валом момента.

В электромагнитных вибрационных возбуждителях силы, стимулирующие колебания, генерируются воздействием изменяющегося во времени магнитного поля на ферромагнитные тела. Пример системы с электромагнитной вибрационной сигнализацией показан на рис.11а. система состоит из

сердечника электромагнита с обмоткой, якоря и опертого тела, с которым жестко связан якорь. Когда ток проходит через обмотку, возникает магнитное поле, линии электропередачи которого закрыты. В магнитном поле на торцевые секции сердечника и якоря действуют поверхностные нагрузки, показанные по рис.11 Б. Если ток переменный, то нагрузки изменяются во времени, возбуждая колебания якоря и связанные с ним тела, например, рабочего органа вибратора.

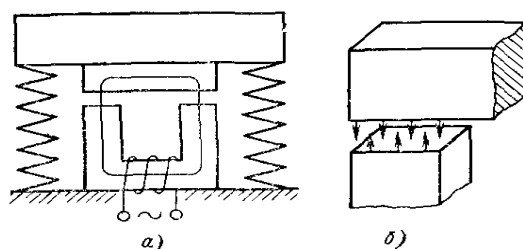


Рисунок 11 - Электромагнитный вибровозбудитель

По некоторым показателям электромагнитные вибровозбудители уступают вибровозбудителям других типов:

- Большая масса на единицу амплитуды создаваемой силы;
- Увеличенный расход электротехнических материалов;
- Низкая амплитуда перемещения.

В результате патентного поиска было найдено одно изобретение касающееся наложения вибрационного поля на анодный штырь. На Братском алюминиевом заводе в 2001 году зарегистрировано изобретение [45]. Сущность изобретения заключается в следующем. Прежде чем извлечь штырь из корпуса анода, его подвергают воздействию магнитного переменного поля магнитострикционным преобразователем, который прочно закреплен для автоматического захвата штыревым краном. Это действие разрушает связь штыря с телом анода и освобождает его от тела анода, расход потребляемой энергии в этом случае в 8 раз меньше, чем та, которая требуется при выполнении этой операции известным способом.

В данном способе переменное магнитное поле вызывает поперечные деформации штыря. Предполагается, что при этом разрушается приповерхностный контактный к штырю слой анодной массы, который

обеспечивает механический контакт между штырем и телом анода. Относительная величина магнитострикции у большинства ферромагнитных материалов, в том числе у железа, мала: $\Delta L/L \sim 10^{-5}$. При диаметре штыря $d=138$ мм амплитуда магнитоскрипции $\Delta d=138 \cdot 10^{-5}=0,0014$ мм, т.е. чуть больше одного микрона. Такие малые амплитуды вряд ли будут эффективны в среде со средним размером частиц 200-300 мкм. К тому же, для установки анодного штыря необходимо создать продольную вибрацию [46].

Таким образом, из рассмотренных способов возбуждения колебаний наиболее подходящим с нашей точки зрения является дебалансный центробежный возбудитель непосредственно сочлененный с корпусом электродвигателя. Такие вибраторы развивают большие центробежные силы и позволяют регулировать амплитуду колебаний в зависимости от размеров и веса рабочего тела (штыря). В настоящее время промышленность предлагает широкий спектр таких электровибраторов с величиной развиваемой центробежной силы от 5кг до 9000кг и, соответственно, мощностью от 100Вт до 10кВт (табл.5)

Таблица 5 - Технические характеристики вибраторов фирмы "Vibrator motors"

Код	Тип	Размер	Механические характеристики						Электрические характеристики							
			об/мин		Статический момент, кНм		Центробежная сила, кг		Вес, кг		Потребляемая мощность, Вт		Номинальный ток, А		IS/IN коэф.	
			50 Гц	60 Гц	50 Гц	60 Гц	50 Гц	60 Гц	50 Гц	60 Гц	50 Гц	60 Гц	400 В, 50 Гц	460В, 60 Гц	50 Гц	60 Гц
BS30-0005	BM 50/3	00			4,8	3,8	48	52	4	3,8	100	110	0,23	0,20	2,7	3,0
BS30-0008	BM 85/3	01			8,57	5,28	88	76	4,55	4,45	150	185	0,30	0,28	2,9	3,2
BS30-0013	BM 130/3	01			12,4	9,3	125	135	4,75	4,6	180	190	0,35	0,32	2,7	3,0
BS30-0020	BM 200/3	01			18,8	12,4	187	180	5,1	4,75	180	190	0,35	0,32	2,7	3,0
BS30-0030	BM 300/3	02			30,8	20,5	310	297	8,5	8,1	270	300	0,58	0,60	3,15	3,7
BS30-0065	BM 650/3	03			66,4	47,4	668	687	21	20,4	500	600	0,98	0,85	4,45	4,8
BS30-0085	BM 850/3	04-A			85,4	58,9	859	825	32	31,4	600	700	1,0	1,0	3,9	4,0
BS30-0110	BM 1100/3	04-B			104,4	75,9	1050	1100	34	33,2	720	800	1,2	1,18	3,8	4,1
BM30-0160	BM 1800/3	15-A	3000	3600	180	110	1810	1594	45	44	1500	1500	2,4	2,1	5,0	8,1
BM30-0200	BM 2000/3	15-B			199	138	2002	2000	47	48	2000	2000	3,3	2,9	4,5	5,5
BM30-0250	BM 2500/3	20			248	173	2500	2500	75	73	2300	2400	3,8	3,5	4,9	5,4
BM30-0330	BM 3300/3	30			328	221	3300	3200	102	99	3800	4000	6,2	5,8	4,5	5,2
BM30-0500	BM 5000/3	50			497	331	5000	4800	140	138	5000	5000	8,2	7,1	4,3	4,9
BM30-0650	BM 6500/3	70-A			626	414	6300	6000	203	193	8000	8000	13,3	12,0	4,8	5,4
BM30-0900	BM 9000/3	70-B			890	615	8974	8697	238	235	10000	9500	17,0	13,5	4,4	4,8

2.4 Модель процесса вибрационного погружения

В природе практически нет идеально упругих материалов. Поведение всех материалов в большей или меньшей степени зависит от времени, от скорости нагрузки [47].

Зависимости, описывающие физические соотношения для материалов, отсутствуют и в практических задачах используют выражения, полученные на основе экспериментальных результатов. Стремление описать результаты эксперимента более простыми выражениями часто приводят к тому, что эти явления не полностью раскрываются. Например, приведем определение коэффициента трения скольжения:

$$f' = \frac{S}{N}$$

зависит от частоты ω и интенсивности вибрационной силы.

Так, при перпендикулярной вибрации основания по закону $A \sin (at$ для тела массой m имеем является функцией A и ω).

$$f'_1 = f_1 \left(1 - \frac{mA\omega^2}{N} \right)$$

Практически такую же ситуацию имеем, наблюдая эксперименты, в которых вибрация действует на сплошные среды. Только здесь отсутствуют теории, позволяющие дойти до зависимостей, в которых характерные коэффициенты были постоянными и независимыми от частоты и амплитуды колебаний.

Вибрационные машины широко используются при внедрении твердого тела в сопротивляющуюся среду под действием постоянной и знакопеременной сил. Наиболее отработанными являются методы погружения свай, труб, штырей, колодцев и пр. в песчаные и глинистые грунты.

При вибрационном погружении, когда динамическое воздействие на штырь осуществляется жестко соединенным с ней вибровозбудителем, эффективность процесса определяется главным образом приложением значительных периодических сил, которые совместно с постоянными силами обеспечивают перемещение штыря в массиве грунта ПАМ [48].

С увеличением амплитуды колебаний начинается проскальзывание элемента относительно грунта. При полном «срыве» элемента амплитуда его колебаний превосходит амплитуду прилегающего грунта в десятки и сотни раз и деформации грунта приобретают в основном пластический характер. Вязкая составляющая проявляется при проскальзывании элемента относительно среды,

и ее зависимость от скорости колебаний носит существенно нелинейный характер [49].

Наиболее распространены две апробированные расчетные схемы механизма сопротивления среды:

- 1) Чистопластическая - представлена на рисунке 12а;
- 2) Комбинированная - представлена в виде диаграммы Прандтля (рис.12б).

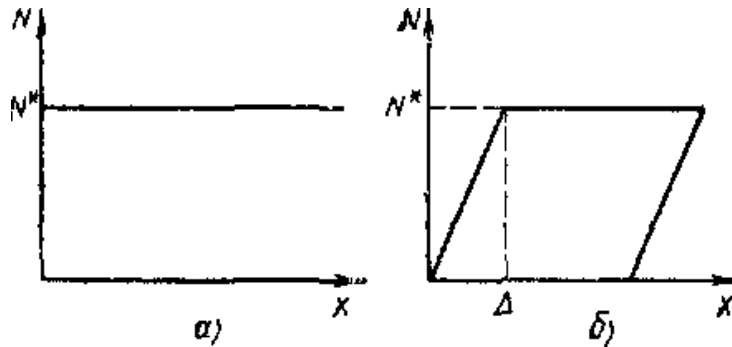


Рисунок 12 - Расчетный график «сопротивление — осадка»: а — для чистопластической модели сопротивления грунта; б — для упругопластической модели лобового сопротивления грунта

Кроме этих двух основных моделей в некоторых исследованиях используют более сложные модели механизма сопротивления грунта — упругопластическую по боковой и лобовой поверхностям, упруговязкопластическую с учетом присоединенной массы грунта и т.д [50].

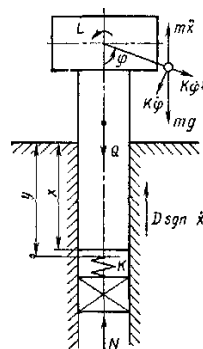


Рисунок 13 - Расчетная схема вибрационного погружения (m — масса дебалансов)

Расчетная схема вибрационного погружения при использовании комбинированной модели механизма сопротивления среды изображена на рисунке 10.

Соответствующая математическая модель имеет вид

$$\left. \begin{aligned} J_0 \ddot{\varphi} &= L - Kg \sin \varphi + K\dot{x} \sin \varphi, \\ M\ddot{x} &= Q - D \operatorname{sgn} \dot{x} - N + K\dot{\varphi}^2 \times \\ &\times \cos \varphi + K\ddot{\varphi} \sin \varphi, \end{aligned} \right\}$$

$$\operatorname{sgn} \dot{x} = \begin{cases} +1 & \text{при } \dot{x} > 0; \\ 0 & \text{при } \dot{x} = 0; \\ -1 & \text{при } \dot{x} < 0. \end{cases}$$

Динамическое сопротивление среды по лобовой поверхности:

$$N = \begin{cases} k_r (x - y) & \text{при } 0 < x - y < \Delta, \\ N^* & \text{при } x - y > \Delta = \frac{N}{k_r}; \\ 0 & \text{при } x - y < 0, \end{cases}$$

здесь k_2 — коэффициент упругой жесткости среды; y — координата нейтрального положения элемента, при которой $N = 0$; Δ — смещение, соответствующие переходу от упругих деформаций к пластическим.

Исследование изображенной на рис.13 полной динамической системы обычно выполняют при анализе динамики вибрационных погружателей (для уточнения затрат энергии, определения нагрузок на детали и т. п.).

Для расчетов основных параметров погружения вынуждающая сила в соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований может быть принята изменяющейся по синусоидальному закону [51].

Для вибрационного погружения характерна высокая скорость процесса, при которой преобладает пластическая составляющая сопротивления. Поэтому в большинстве случаев имеются основания для использования в расчетах чистопластической схемы механизма сопротивления грунта. При таких упрощающих допущениях вибрационное погружение может быть описано уравнением:

$$M\ddot{x} = Q - D \operatorname{sgn} \dot{x} - N - K\omega^2 \sin \omega t;$$

здесь

$$N = \begin{cases} 0 & \text{при } x - y < 0; \\ N^* & \text{при } x - y > 0; \end{cases}$$

ω — угловая скорость вращения дебалансов (принимают const).

Соответствующая математическая модель имеет вид

$$\left. \begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + cx_1 &= Q_1 + cx_n - K\omega^2 \sin(\omega t + \psi) \text{ при } 0 \leq t \leq t_1; \\ (M_1 + M_2) \ddot{x}_2 &= Q_1 + Q_2 + Q_{\text{пр}} - D - N^* - K\omega^2 \times \\ &\times \sin(\omega t + \psi) \text{ при } t_1 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}, \end{aligned} \right\}$$

где c — коэффициент упругой жесткости рабочих пружин вибромолота; M_2 и Q_2 — масса и сила тяжести вибромолота; x_1 — координата, отсчитываемая от верхнего торца погружаемого элемента; cx_n — предварительное натяжение рабочих пружин вибромолота; ψ — начальный фазовый угол вынуждающей силы; M_2 и Q_2 — масса и сила тяжести погружаемого элемента; $Q_{\text{пр}}$ — сила пригруза к погружаемому элементу; x_2 — координата погружаемого элемента, отсчитываемая от его положения, достигнутого в предыдущем цикле.

2.5 Расчет параметров вибрационных машин

Ниже приведена методика расчета параметров вибрационных машин для погружения свайных элементов.

Расчет параметров вибропогружателя производят в следующем порядке.

1. На основании исходных данных определяют расчетную величину критического сопротивления срыву $T_{\text{кр}}$ элемента при заданной максимальной глубине h_{max} его погружения.

$$T_{\text{кр}} = \Omega \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i h_i;$$

где i — порядковый номер слоя грунта мощностью h_i , проходимого элементом при погружении, n — общее число слоев; Ω — периметр поперечного сечения сваи.

Удельное сопротивление срыву τ определяют по табл. 6.

Таблица 6 - Удельное сопротивление срыву

Грунты	τ				
	тс/м ²		тс/м		
	Деревянные сваи, стальные трубы	Железобетонные сваи	Открытые сваи-оболочки и колодцы, погружаемые с выемкой грунта	Шпунт	
легких профилей				тяжелых профилей	
Водонасыщенные песчаные и мягкопластичные глинистые	0,6	0,7	0,5	1,2	1,4
Те же, но с прослойками плотных глинистых или гравелистых	0,8	1	0,7	1,7	2,0
Глинистые тугопластичные	1,5	1,8	1,0	2,0	2,5
То же, полутвердые	2,5	3,0	2,0	4,0	5,0

2. Определив ориентировочно массу M элемента рассчитывают статический момент массы дебалансов вибровозбудителя:

$$K = \mu AM,$$

где $\mu = 1,25$ для железобетонных свай; $\mu = 1$ для остальных погружаемых элементов.

Рекомендуемые амплитуду перемещений A и частоту f , необходимые для эффективного погружения шпунта и свай, определяют по табл. 7.

3. Необходимая минимальная сила тяжести вибрирующей системы :

$$Q \geq p_0 F,$$

где F —площадь поперечного сечения сваи, см²; p_0 — рекомендуемое необходимое давление для свай, погружаемых в водонасыщенные песчаные слабые глинистые грунты.

Таблица 7 - Амплитуды перемещений A (мм) в зависимости от частоты f (в числителе — для песчаных грунтов, в знаменателе — для глинистых)

Сваи	f, Гц		
	5—12	13—17	18—25
Стальной шпунт, стальные открытые снизу трубы и другие элементы с площадью поперечного сечения до 100—150 см ²	—	$\frac{8-10}{10-12}$	$\frac{4-6}{6-8}$
Деревянные и трубчатые с закрытым концом с площадью поперечного сечения до 800 см ²	—	$\frac{10-12}{12-15}$	$\frac{6-8}{8-10}$
Железобетонные квадратного или прямоугольного сечения площадью до 1600 см ²	$\frac{12-15}{15-20}$	—	—
Железобетонные оболочки большого диаметра, погружаемые с выемкой грунта из полости свай	$\frac{6-10}{8-12}$	$\frac{4-6}{6-10}$	—

Таблица 8 - Необходимое давление для свай, погружаемых в водонасыщенные песчаные слабые глинистые грунты.

Элемент	P_0 , кгс/см ²
Стальные трубы малого диаметра и другие элементы с площадью поперечного сечения до 150 см ²	1,5—3,0
Деревянные и трубчатые стальные (с закрытым кондом) сваи с площадью поперечного сечения до 800 см ²	4,0—5,0
Железобетонные сваи квадратного и прямоугольного сечения площадью до 1600 см ²	6,0—8,0

4. Проверяют отношение силы тяжести Q к амплитуде вынуждающей силы:

$$\frac{K}{\mu Q} \geq A,$$

1. Мощность приводного двигателя (кВт)

$$\omega = 25K f^3 10^{-2} \left(1,1 d + 3,2 \frac{K}{Q} \right),$$

где d — диаметр цапф валов вибровозбудителя, см.

В формуле учтены КПД передачи от двигателя к вибровозбудителю = 0,9, коэффициент трения качения в подшипниках вибровозбудителя, = 0,01, и дополнительный расход мощности на колебания грунтового массива, принятый 15 % от мощности, расходуемой на преодоление сопротивления грунта [52].

[Изъято 25 страниц]

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

 Н.В. Белоусова

« 10 » 07 2020г.

Магистерская диссертация

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Разработка конструкции штыря и способу его введения в лунку

Научный руководитель


10.06.2020


подпись, дата

к.т.н., доцент

С.А Храменко

должность, ученая степень

Выпускник


7.07.2020

подпись, дата

Д.С Повилайтис

Рецензент


07.07.2020

подпись, дата

начальник цеха

ООО «ИСО»

Н.В Шиндорилов

должность, место работы

Консультант экономического
раздела


07.07.2020

подпись, дата

к.э.н., доцент

Т.В. Твердохлебова

должность, ученая степень

Красноярск 2020