

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669.002.8

На правах рукописи

Ю. С. Трофимова

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА GAMI 320 кА И
NEUI 330 кА НА АО «КАЗАХСТАНСКИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЙ ЗАВОД»**

Магистерская диссертация на соискание
академической степени магистра техники и технологии
по специальности 6М070900 - Metallургия

ПАВЛОДАР – 2014

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Инновационный Евразийский университет

Допущен (а) к защите:
зав. кафедрой «Химия и металлургия»,
кандидат химических наук,
_____ А.Н. Жакупова

«___» _____ 20__ г

Магистерская диссертация

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА GAMI 320 кА И
NEUI 330 кА НА АО «КАЗАХСТАНСКИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЙ ЗАВОД»**

специальность: 6М070900 – Металлургия

Магистрант _____ Ю.С. Трофимова

Научный руководитель,
кандидат технических наук _____ А.К. Жунусов
и.о. доцента

ПАВЛОДАР – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

	ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
	ВВЕДЕНИЕ	5
1	АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОЖЖЕННЫХ АНОДОВ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДАХ	8
1.1	Ведущие страны-производители алюминия	8
1.2	Анализ выбранной технологии на АО «КЭЗ»	1
1.3	Конструкция электролизера	1
1.3.1	Катодное устройство	1
1.3.2	Анодное устройство	2
1.4	Анализ состава и качества глинозема	2
1.5	Анализ технико-экономических показателей	2
2	УЗЛЫ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА	3
2.1	Измерение обратной электродвижущей силы	3
2.2	Анодный узел	4
2.3	Электролит	4
2.3.1	Состав электролита и возможности его оптимизации	4
2.3.2	Предложение по применению калиевых электролитов	5
2.4	Ошиновка и магнитогидродинамические параметры электролизера	5
2.4.1	Конструкция ошиновки	5
2.4.2	Магнитогидродинамические характеристики электролизеров	5
3	КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	6
3.1	Электрический баланс	6
3.2	Тепловые и энергетические характеристики	6
3.2.1	Температурные характеристики поверхностей электролизеров	7
3.2.2	Параметры формы рабочего пространства	7
3.2.3	Энергетический баланс	8
4	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	9
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	10
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	10
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	110
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	113
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	114

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В магистерской диссертации применяются следующие термины в соответствии с определениями:

Стандарт – это нормативно-технический документ, устанавливающий основные требования к качеству продукции.

Технические условия – это нормативно-технический документ, устанавливающий дополнительные к государственным стандартам, а при их отсутствии самостоятельные требования к качественным показателям продукции, а также приравняемые к этому документу техническое описание, образец-эталон.

Технологическая инструкция – нормативное печатное издание, регламентирующее последовательность операций конкретного технологического процесса, а также условия и режимы его проведения.

В настоящей диссертации применяются следующие сокращения:

ОА – обожженные аноды

АПГ – автоматическая подача глинозема

МГД – магнитогидродинамическая неустойчивость

КО – криолитовое отношение

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

ЭДС – электродвижущая сила

МПР – межполюсное расстояние

ТЭП – технико-экономические показатели

УПР – условно постоянные расходы

АТР – анодное токораспределение

ФРП – форма рабочего пространства

КПД – коэффициент полезного действия

АУ – анодное устройство

КК – катодный кожух

ЦЗЛ – центральная заводская лаборатория

КПП – кремне-преобразовательная подстанция

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

КЭЗ – Казахстанский электролизный завод

ПАЗ – Павлодарский алюминиевый завод

УАЗ – Ульяновский автомобильный завод им. В.И. Ленина

РЕФЕРАТ

В современной алюминиевой промышленности принята стратегия строительства новых производственных мощностей с установкой электролизеров с обожженными анодами на силу тока 300 кА и выше, а также по интенсификации существующего производства путем увеличения силы тока. С повышением плотности тока увеличивается приход тепла от электроэнергии и возникает необходимость создания условий рационального распределения тепловых потерь, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии, создания оптимальной формы рабочего пространства, снижения температуры конструктивных элементов катодного кожуха.

Актуальность темы исследования. Республика Казахстан имеет огромные производственные мощности по производству глинозёма, но до недавнего времени это сырьё, необходимое для производства алюминия, приходилось экспортировать на металлургические заводы других стран. В 1992 году правительство республики приняло решение об организации алюминиевого производства в Казахстане с использованием китайской технологии. В качестве наиболее приемлемого был принят вариант строительства завода по производству и переработке алюминия в Павлодаре на основе действующего здесь глинозёмного производства.

До недавнего времени главной целью разработки электролизера было достижение максимального выхода по току при минимальных капитальных вложениях. Стоимость электроэнергии была небольшой и в избытке, и электролизеры чаще проектировались для их использования в интенсифицированном режиме с получением максимальной производительности. Однако, с 1973 года стоимость электроэнергии возросла в большей степени, чем другие затраты на производство, и стала сопоставима с остальными составляющими себестоимости. Современные электролизеры в основном эксплуатируют и проектируют в расчете на низкое электропотребление и высокий выход по току, что обеспечивает экономичное производство первичного алюминия.

12 декабря 2007 года состоялся запуск первой очереди КЭЗ, получен первый Казахский алюминий. АО «КЭЗ», как одно из молодых и современных предприятий Республики Казахстан – первенец алюминиевой промышленности, постоянно стремится соответствовать тенденциям мирового развития в данной отрасли.

АО «КЭЗ» создавался практически с нуля. В Казахстане отсутствует система подготовки кадров для алюминиевого производства, поэтому все экспериментальные работы, проводимые на промышленных электролизерах имеют первостепенное значение для воспитания собственных квалифицированных специалистов электролизного производства.

Завод достаточно успешно работает с начала эксплуатации. Тем не менее руководство и ведущие специалисты завода стремятся не только сохранить высокие технико-экономические показатели, но и обеспечить развитие технологического процесса и повышения технико-экономических показателей

электролизного производства на основе внедрения современных прогрессивных технологий.

Цель работы - интенсификация технологического процесса и совершенствование конструкции электролизеров с целью увеличения силы тока для обеспечения требуемых тепловых и энергетических параметров.

Задачи исследования:

1. Определить возможность изменения конструкции ошиновки электролизеров с применением обожженных анодов на базе Казахстанского электролизного завода;

2. Произвести измерение электрического, теплового и энергетического балансов, обратная электродвижущая сила, форма рабочего пространства и других параметров электролизера;

3. Произвести статистический анализ технико-экономических показателей электролизеров;

4. Произвести расчеты теплоэнергетических и МГД-характеристик электролизеров при изменении технологических и энергетических параметров агрегата.

5. На основании комплексных измерений и расчетов выполнить технологические рекомендации по оптимизации технологических параметров и путям повышения существующих технико-экономических показателей.

Объект исследований – промышленные электролизеры GAMI-320 кА и NEUI-330 кА на базе АО «Казахстанский электролизный завод».

Научная новизна исследования. В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Среднее напряжение электролизеров составило 4,14 %, выход по току 92-93 %, удельный расход электроэнергии 13200-13500 кВт·ч/т;

2. Значение $E_{обр}$ составило - по первой очереди 1,786 В, по второй 1,780 В, по заводу в целом – 1,783 В.

3. По совокупности параметров, электролизеры 2 очереди предпочтительнее электролизеров 1 очереди по возможности получения более высоких показателей электролиза;

- По совокупности параметров аноды марок «Джининг» и «Орион ДТО» предпочтительнее других и могут быть опробованы для испытаний при цикле замены анодов 29 дней, особенно для анодов марки «Джининг»;

- Энергетический коэффициент полезного действия электролизеров составил 51,6-51,9 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности электролизеров.

Практическая значимость исследований:

- результаты, полученные в работе, представляют научную и практическую значимость при применении обожженных анодов на электролизерах типа GAMI-320 кА и NEUI-330 кА;

- результатами расчетов показано, что улучшение технико-экономических показателей без изменения конструкции электролизеров 1 и 2 очереди возможно за счет увеличения уровня металла на 1-2 см, увеличения содержания CaF_2 до 5,5-5,8 %, снижения криолитового отношения до 2,2-2,25;

- магнитно-гидродинамическая нестабильность - характеристики электролизеров 1 и 2 очереди достаточно высоки и не ограничивают величину силы тока по верхнему пределу до расчетных значений силы тока 340-360 кА. Электролизеры 2-й очереди обладают лучшими характеристиками по сравнению с электролизерами 1 очереди;

- основные направления по совершенствованию и интенсификации технологического процесса и конструкции электролизера, лимитирующей стадией для увеличения силы тока показало обеспечение требуемых тепловых и энергетических параметров;

- увеличение силы тока на 5-7 кА допустимо без изменения конструкции электролизера и существующих технологических параметров;

- применение силы тока 335 кА и выше требует изменений в конструкции электролизера, предусматривающих возможное применение подовых блоков с содержанием графита 70-80 % и изменение состава футеровки.

Апробация работы:

Диссертация была обсуждена и рекомендована к защите кафедрой «Химия и металлургия». Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ой международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии» (г. Темиртау, 2013 г., том 1), научный журнал «Магистрант» (г. Краснодар, № 7-8 2013 г.), а также опубликована статья в научном журнале Вестник ИнЕУ (г. Павлодар, №3 2013 г.).

Структура диссертации:

Структура диссертации определена задачами, поставленными перед исследованием, и состоит из введения, трех разделов – теоретико-методологического, аналитического и прикладного. Первый раздел состоит из пяти разделов и двух подразделов, второй раздел состоит из четырех разделов и четырех подразделов, в свою очередь третий состоит из двух разделов и трех подразделов. Также в состав структуры диссертации входят заключение и список использованных источников.

Магистерская диссертация содержит 114 страниц, количество иллюстраций – 57, таблиц – 25, использованных литературных источников – 60.

1 Анализ энергетической эффективности применения обожженных анодов на алюминиевых заводах

В настоящее время в алюминиевой промышленности мира повсеместно используется электролиз криолитоглиноземных расплавов при силе тока на ваннах от 50 до 300 кА и выше. При этом применяются два основных типа электролизеров: с самообжигающимися (верхним или боковым токоподводом) и с обожженными анодами.

Вновь строящиеся корпуса алюминиевых заводов, как в России, так и за рубежом, оснащаются электролизерами большой мощности с предварительно обожженными анодами. Использование систем автоматического питания глиноземом, эффективного укрытия и «сухой» газоочистки, а также системы автоматического управления процессом электролиза, позволяют достичь следующих преимуществ по сравнению с технологией Содерберга:

- повышения съема металла с 1 м² производственной площади и, как следствие, снижения удельных капитальных затрат и сроков окупаемости при создании нового алюминиевого производства;
- уменьшения затрат электроэнергии;
- снижения трудозатрат;
- уменьшения удельного расхода углерода;
- снижения выбросов в атмосферу фтористых соединений, ароматических углеводородов и пыли.

Таким образом, актуальным является применение современных подходов к анализу энергетического состояния мощных электролизеров для получения алюминия с обожженными анодами.

1.1 Ведущие страны-производители алюминия

Одним из крупнейших производителей алюминия в мире является США. В 1980 году в этой стране выпущено максимальное количество первичного алюминия – 4652,9 тыс. тонн, вторичного – 1576,4 тыс. тонн. Потребление алюминия составило 4593,9 тыс. тонн, экспорт – 1345,1 тыс. тонн, импорт – 647,7 тыс. тонн мощность действующих заводов – около 5 млн. тонн.

Ведущими фирмами-производителями алюминия являются: “Alcoa”, “Reynolds”, “Kaiser”.

Алюминиевая компания Америки “Alcoa” – является самой крупной, старейшей и процветающей компанией в мире. В 1995 году она произвела 10600 тыс. тонн глинозема и около 2600 тыс. тонн алюминиевой продукции. “Alcoa” – постоянно развивающаяся международная корпорация, имеющая в 1999 году 165 объектов в 25 странах, внедряющая по всему миру новые технологии, обеспечивающие высокую эффективность и качество продукции. Практически на всех заводах фирмы установлены электролизеры с обожженными анодами большой единичной мощности. Фирма одна из первых в мире разработала и внедрила электролизеры на силу тока 170 кА (заводы в городах Массина, Поинт-Генри, Бадин), 230 кА (заводы в Алкоа Теннесси, Массине) и 280 кА (завод в

Портленде, Австралия). На этих заводах достигнуты высокие технико-экономические показатели производства алюминия: выход по току – более 92 %, удельный расход электроэнергии – 13000 – 13200 кВт·ч/т.

В США фирма “Alcoa” является единственным производителем металла с содержанием алюминия 99,99 % и 99,999 %. “Alcoa” - разработчик технологии получения алюминия путем электролиза хлористого алюминия.

Канада является третьей в мире страной (после США и России) по объему производства алюминия. Значительная доля алюминия этой страны производится фирмой “Alcan”. Крупнейшие заводы этой фирмы на территории Канады расположены в городах Арвид (мощностью 432 тыс. тонн), Китимат (272 тыс. тонн), Гранд-Бей (171 тыс. тонн), Латерьер (294 тыс. тонн). Из зарубежных филиалов фирмы следует отметить заводы Кури-Кури в Австралии (150 тыс. тонн, электролизеры с обожженными анодами на силу тока 175 кА), Сибири в США (180 тыс. тонн, электролизеры с обожженными анодами на силу тока 170 кА), в Великобритании Лайнмаус (130 тыс. тонн, электролизеры с обожженными анодами на силу тока 150 кА) и Холихед (126 тыс. тонн, электролизеры с обожженными анодами на силу тока 133 кА).

Наиболее современными, построенными фирмой “Alcan” в Канаде являются заводы Латерьер (электролизеры с обожженными анодами на силу тока 275 кА) и Гранд-Бей (электролизеры с обожженными анодами на силу тока 170 кА). Разработанные фирмой электролизеры на силу тока 275 кА и 170 кА, снабженные обожженными анодами, характеризуются высокими технико-экономическими показателями работы: удельным расходом электроэнергии 13140 кВт·ч/т, выходом по току более 92 %. Контроль технологического процесса полностью автоматизирован. Электролизеры снабжены устройствами точечного питания глиноземом. В последние годы в Канаде построены современные алюминиевые заводы по проектам и научным разработкам других передовых фирм “Pechiney” (Франция), “Reynolds” и другие. Это заводы в Беканкуре (360 тыс. тонн алюминия в год; обожженные аноды; сила тока 180 кА), в Сент-Айлесе (215 тыс. тонн алюминия в год; обожженные аноды; сила тока 180 кА), в Дешамбо (215 тыс. тонн алюминия в год; обожженные аноды).

В Европе ведущими фирмами по уровню технологии и объему производства алюминия являются “Pechiney” (Франция), “VAW” (Германия), “Hydro Aluminium” (Норвегия). Фирма “Pechiney” является одним из крупнейших в мире производителей глинозема, фтористых солей, алюминия и полуфабрикатов из него. В настоящее время фирма ориентирует свою деятельность на расширение выпуска специальных сортов глинозема, увеличение выпуска алюминиевой фольги, продаже технологических новшеств, в частности, технологии получения алюминия в электролизерах в силу тока 300 кА и более. Фирма “Pechiney” в течение многих лет занимает лидирующее положение в мире по уровню технологии и технико-экономическим показателям работы серии электролиза алюминия, которые построены как во Франции, так и в других странах мира.

Электролизеры с обожженными анодами в силу тока 170-180 кА фирмы “Pechiney” установлены на алюминиевых заводах Беканкура, Бе-Комо в Канаде, Флиссинген в Нидерландах, Талчер в Индии. Электролизеры с обожженными

анодами в силу тока 280-300 кА этой же фирмы пущены в недалеком будущем на заводах Сен-Жан-де-Морьенн во Франции, Алуэтт и Дешамбо в Канаде, Джамби в Саудовской Аравии и других странах.

В Сен-Жан-де-Морьенн группа из 120 электролизеров работает на силе тока 285 кА. Система автоматического питания обеспечивает содержание глинозема в электролите на уровне 2-3 % избыток фтористого алюминия – 11,5 %, содержание фтористого лития – 1 %. В данном случае температура электролиза не превышает 925 °С, выход по току составляет 94,6 %, среднее напряжение на ванне 4,27 В, частота возникновения анодных эффектов 0,14 раза в сутки, удельный расход электроэнергии 13400 кВт·ч/т. Глинозем, содержащий AlF_3 , транспортируется к электролизерам в псевдожиженном состоянии со скоростью порядка 0,05 м/сек. Система питания электролизера включает восемь точек загрузки глинозема.

В ноябре 1991 года в Дюнкере введен в эксплуатацию алюминиевый завод, оснащенный электролизерами с обожженными анодами на силу тока 300 кА. Одна серия электролиза включает 264 электролизера, расположенных в двух корпусах каждый длиной 850 метров. Капиталовложения в строительство составило 5500 млн. франков. Завод потребляет 400 МВт·ч электроэнергии от атомной электростанции, расположенной в 3 километрах. Производительность завода 215 тыс. тонн алюминия в год, из них 80 % выпускается в виде слитков для последующего проката и изготовления тары, остальные, в виде чушек. Удельный расход электроэнергии на производство алюминия в условиях данного завода составляет 13000 кВт·ч/т.

Крыша и стены электролизных корпусов облицованы алюминиевыми листами. В каждом электролизере установлены 12 угольных анодов массой 800 кг с размерами в плане 1,45×2,31 метров. Электролизеры на силу тока 300 кА в корпусах расположены перпендикулярно стенам. Поперечное расположение электролизеров в корпусах электролиза способствует существенному снижению затрат на производство алюминия, за счет снижения скорости циркуляции электролита и сокращения потерь металла посредством вторичного растворения. Глинозем в ванну загружается через четыре точечных питателя. Особенности конструкции электролизеров заключены в новой конфигурации ванны, устройстве защитных укрытий, ошиновки и электрических соединений, что составляло ноу-хау фирмы.

Силосные башни для сырья заполняются автоматически с помощью порталных кранов, оборудованных пневматическими транспортными устройствами.

Управление производством осуществляется с помощью 150 ЭВМ, объединенных в единую заводскую сеть, которая включает также большое количество автоматических устройств и исполнительных механизмов. За счет стандартизации оборудования вдвое сокращено количество запасных частей на складах.

На заводе в Дюнкере достигнуты самые низкие в мире выбросы фторидов – 0,7 кг на тонну алюминия (европейские нормы для новых заводов 0,8 кг/т, для старых – 1-3 кг/т). На долю систем газоочистки приходится до 15 % капитальных затрат и до 10 % эксплуатационных расходов.

Предприятие обслуживает 550 человек, производительность труда составляет 400 тонн алюминия в год на одного работающего. Завод является образцом, как с точки зрения технологии, так и организации труда.

Производство алюминия в мире в 2007 году достигло нового абсолютного рекорда – 37,41 млн. тонн. При этом среднесуточное производство алюминия в мире в 2007 году также в шестой раз достигло нового рекордного значения – 102,5 тыс. тонн/день.

1.2 Анализ выбранной технологии на АО «КЭЗ»

Алюминиевая промышленность является наиболее крупной отраслью цветной металлургии. Объем производства алюминия намного опережает выпуск всех остальных цветных металлов и уступает только производству стали. Высокие темпы прироста алюминия обусловлены его уникальным физико-химическими свойствами, благодаря которым он нашел широкое применение в электротехнике, авиа- и автостроении, транспорте, производстве бытовой техники, строительстве, упаковке пищевых продуктов и прочее.

Алюминиевая промышленность Казахстана занимает третье место по выпуску алюминия среди стран СНГ.

Доминирующее положение в производстве алюминия в постсоветском пространстве занимает Россия (РУСАЛ) с годовым выпуском 4,2 миллион тонн, на втором месте Таджикистан – 350 тысяч тонн в год.

В настоящее время в алюминиевой промышленности мира повсеместно используется электролиз криолитоглиноземных расплавов при силе тока на ваннах от 50 до 400 кА. Поскольку электролитические процессы протекают на поверхности раздела «электрод-электролит», а не во всем объеме электролизера, электролизные ванны являются аппаратами низкой единичной производительности. Алюминиевая промышленность по этой причине отличается большей емкостью капитальных вложений и относительно низкой рентабельностью производства.

В поисках новых направлений развития техники производства алюминия в последние годы выполнен большой объем научных исследований и проектно-конструкторских работ, направленных на широкое промышленное использование электролизеров с обожженными анодами. Промышленная эксплуатация таких электролизеров способствует улучшению санитарно-гигиенических условий труда в электролизных корпусах в результате более эффективной работы систем газоотсоса от укрытий, а также отсутствия вредных для здоровья продуктов коксования анодной массы, выделяющихся при формировании самообжигающихся анодов и позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели производства алюминия.

Основной показатель технического уровня процесса – катодный выход по току – не превышает 92-94 % даже по лучшим в мировой практике новым сериям электролизеров с обожженными анодами. На заводах, оснащенных ваннами с самообжигающимися анодами (аноды Содерберга), значение этого показателя не превышает обычно 87-88 %. А на старых заводах СНГ, оборудованных

электролизерами с верхним токоподводом, в последние годы выход по току составляет только 83-84 %.

Конструктивные особенности анодного устройства электролизера с обожженными анодами позволяют значительно увеличить его единичную мощность, что является одним из главных путей снижения удельных капитальных вложений в новое строительство и роста производительности.

Важным преимуществом эксплуатации электролизеров этого типа перед электролизерами с непрерывными самообжигающимися анодами, которые длительное время служили основными агрегатами отечественных алюминиевых заводов, можно считать более высокую экономическую эффективность, достигаемую за счет меньших эксплуатационных затрат электроэнергии и сырья при условии применения относительно дешевых и хорошего качества анодов.

Поэтому одновременно с широким внедрением электролизеров с обожженными анодами в мировой алюминиевой промышленности организуется массовое производство обожженных анодов, основанное на применении новых современных образцов производственного оборудования и высокоэффективной технологии.

Исходя из этого, для строительства АО «КЭЗ» был выбрана современная технология GP-320 китайского института ГАМИ, основанная на использовании высокоамперных электролизеров. Эта технология, самостоятельно разработана ГАМИ, применяется на нескольких алюминиевых заводах Китая. Она также использована на алюминиевом заводе Sterlite Industries BALCO в Индии.

Серия электролизеров размещается в двух параллельных корпусах электролиза длиной около 1000 метров и состоит в общей сложности из 288 электролизеров, включаемых последовательно. Номинальный ток серии электролизеров составил 325 кА.

Расположение электролизеров в корпусе современное – однорядное, поперечное. Такое расположение электролизеров в корпусе по сравнению с двухрядным, позволяет существенно снизить магнитогидродинамические возмущения на слой металла, в катодном устройстве, так как отсутствует влияние соседнего ряда электролизеров.

При поперечном расположении электролизеров за счет одностороннего подвода тока к анодным шинам, наличия пяти перемычек между анодными шинами, двухстороннего секционирования съема тока катодной ошиновки наличия катодных перемычек под днищем катодного устройства удастся создать близкое к симметричному магнитное поле и снизить волнения расплавленного алюминия под действием магнитных полей.

В отношении электролизеров и вспомогательного оборудования корпусов электролиза проектом предусмотрены следующие особенности:

- механизированная подача глинозема и растворимых солей с автоматическим управлением процесса (с микропроцессорным управлением);
- автоматическое регулирование напряжения;
- механизированное оборудование для манипулирования анодами;
- вакуумная выливка металла из электролизеров;

– оснащение электролизеров укрытиями для эффективного улавливания вредных веществ.

1.3 Конструкция электролизера

На АО «КЭЗ» оснащено двумя типами электролизеров: GAMI-320 (1-я очередь) и NEUI-330 (2 очередь). Это два типа электролизеров имеют отличия как по конструкции самих электролизеров, так и по конструкции ошиновки.

Отличительным моментом является также разный срок службы электролизеров этих двух типов, что важно в условиях работы всей серии электролиза в течение первых нескольких лет до начала массового капитального ремонта электролизеров.

Конструктивные характеристики приводимых электролизеров GAMI-320 и NEUI-330 приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Конструктивные характеристики электролизеров

Тип электролизера	GAMI-320	NEUI-330
Расположение электролизёров	поперечное	поперечное
Расстояние между осями электролизеров, м	6,4	6,4
Положение «нулевой» отметки	+1,0	+2,5
Анодное устройство		
Количество анодных блоков, мм	40	40
Размеры анодного блока, мм	1600x700x550	1600x700x550
Расстояние между:		
- анодами в ряду, мм	40	40
- рядами анодов, мм	180	180
Расстояние от анодного массива:		
- до продольных стенок, мм	310	310
- до торцевых, мм	420	420
Высота перетяжки анодной рамы, мм	не менее 400	не менее 400
Скорость перемещения анодной рамы, мм/мин	99,3	99,3
Анододержатель	4-х ниппельный	4-х ниппельный
Диаметр ниппеля, мм	140	140
Соединение с угольным блоком	Чугунная заливка	Чугунная заливка
Катодное устройство		
Тип кожуха	Шпангоутный	Шпангоутный составным поясом поднятым фланцем
Верхний фланец	Не набит	С набойкой карбидкремниевой смесью

Окончание таблицы 1.1

Количество шпангоутов, штук	26	26
Ориентация стенок:	вертикальные	вертикальные с угловым
- продольные	угловым скосом	скосом
- торцевые	вертикальные	вертикальные
Габаритные размеры кожуха (внутри), мм		

- длина	15780	15780
- ширина	4180	4180
- высота	1407	1407
Внутренние размеры шахты, мм		
- длина	15600	15600
- ширина	4000	4000
- высота	550	550
Высота/ширина набойки, мм	200/290	200/290
Подина		
Размер подовых блоков, мм	450x515x3420	450x515x3420
Количество подовых секций, штук	27	27
Подовый блок	сплошной	сплошной
Содержание графита в блоке, %	30	30
Количество бдюмсов, штук	27x2	27x2
Сечение бдюмсов, мм	65x180	65x180
Расположение бдюмсов в блоке	сплошное	с центральным швом
Заделка бдюмсов в пазе блока	углеродистая масса	углеродистая масса
Система питания глиноземом и фторсолями		
Тип питателя	Точечный	Точечный
Тип дозатора	Клапанный	Клапанный
Система ЦРГ	есть	есть
Количество точек питания:		
- глиноземом	5	5
- фторсолями	1	2
Система газоотсоса и вентиляции		
Тип газоотсоса	Односторонний верхний	Односторонний верхний
Объем газоотсоса, м ³ /ч	13600	13600
Тип укрытия	Прямого типа с съемными крышками	Сегментного типа с съемными крышками
КПД, укрытия, не менее %	98	98
Величина неплотностей, не более, м ²	1,0	1,0

1.3.1 Катодное устройство

Катодное устройство электролизера состоит из катодного кожуха, опорных конструкций и футеровки. Катодный кожух включает в себя обечайку (борта и днище), выполненную из стального листа, и силовые элементы (шпангоуты, ребра жесткости, фланцевый лист и другое), обеспечивающие необходимую жесткость конструкции.

Жесткость конструкции рассчитывается при проектировании с учетом термических и механических нагрузок, возникающих в процессе работы электролизера. Например, катодные блоки в процессе работы меняют свои свойства (пропитываются фтористыми соединениями), а также в условиях высокой температуры подвергаются термическому расширению. Это приводит к возникновению усилий от блока к бортовой стенке катодного кожуха. Поэтому задачей является создание такой конструкции, которая бы обеспечила оптимальную жесткость, т.е. была бы достаточной, чтобы не деформировался катодный кожух, и в то же время чтобы не была слишком жесткой, чтобы в самом блоке не возникла такая сила сжатия, которая привела бы к разрушению блока.

Правильный расчет конструкции и выбор применяемых материалов футеровки должен обеспечивать плановый срок службы электролизеров – не менее 5 лет.

Деформацию продольных стенок катодного кожуха можно наблюдать визуально. Со временем стенка становится выпуклой, конструкция приобретает бочкообразную форму. В настоящее время этот вид деформации наиболее заметен на электролизерах 1-й очереди, на середине продольной стороны выпуклость достигает 5-7 см, в то время как на электролизерах 2-й очереди – 1-3 см. это может быть связано как с меньшей жесткостью конструкции, так и со значительно большим сроком службы электролизеров 1-й очереди.

Естественно, не только конструкция катодного кожуха и футеровки и качество применяемых материалов влияют на срок службы. Немаловажными факторами являются также качество монтажа катодного устройства, качество обжига и пуска электролизеров и стабильная работа электролизера в последующий период без технологических нарушений.

Кроме функции обеспечения необходимой жесткости, конструкция катодного кожуха, совместно с конструкцией футеровки, должна обеспечить оптимальный отвод тепла от электролизера, что имеет исключительное значение для технологии.

Общие виды конструкций электролизеров приведены на рисунках 1.1 и 1.2. Основными отличиями конструкций катодных кожухов электролизеров 1-й и 2-й очередей являются разная высота шпангоутов и разная толщина обортовочного листа. Высота шпангоутов 1-й очереди ограничивается верхним уровнем среднего пояса жесткости борта кожуха. Выше шпангоутов жесткость обеспечивают ребра жесткости верхнего пояса и фланцевый лист. На электролизерах же 2-й очереди шпангоуты выполнены на всю высоту борта катодного кожуха. С логической точки зрения конструкция катодного кожуха 2-й очереди является более жесткой и теплоотдающей, так как мощные шпангоуты, как радиаторы, лучше отдают тепло.

Толщина обортовочного листа электролизеров 1-й очереди составляет 16 мм, а электролизеров 2-й очереди – 12 мм. Целесообразность данного конструктивного изменения вызывает сомнения, однако окончательный вывод можно будет сделать после более длительного периода работы 2-й очереди.

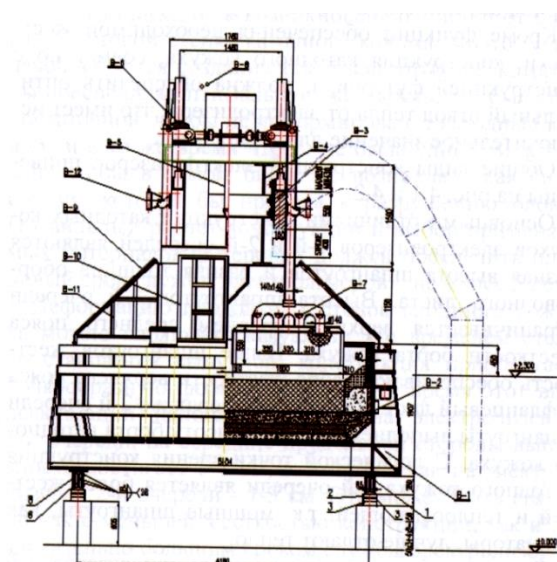


Рисунок 1.1. Конструкция электролизера 1-й очереди

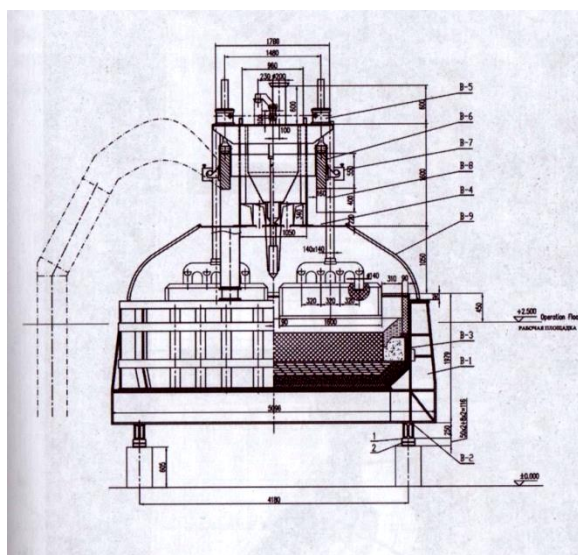


Рисунок 1.2. Конструкция электролизера 2-й очереди

Рассмотрим более подробно материальный состав и конструкцию футеровок электролизеров. Футеровку катодного кожуха следует подразделять на футеровку бортовую, цокольной части и бровки (между кожухом и торцевой поверхностью подового блока) в соответствии с рисунками 1.3, 1.4.

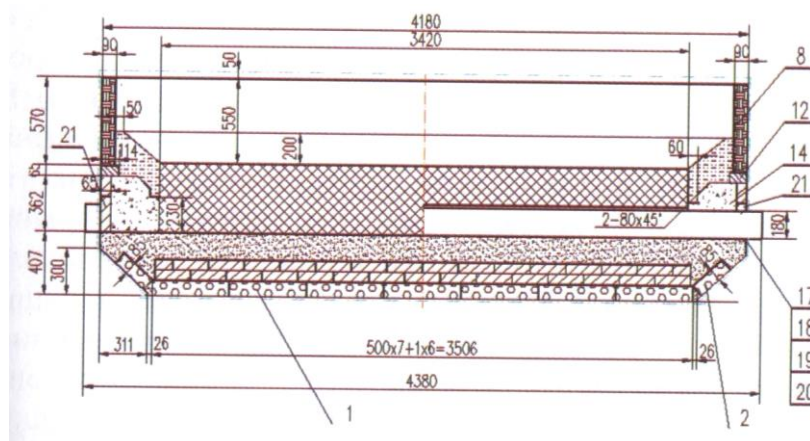


Рисунок 1.3. Футеровка электролизера 1-й очереди

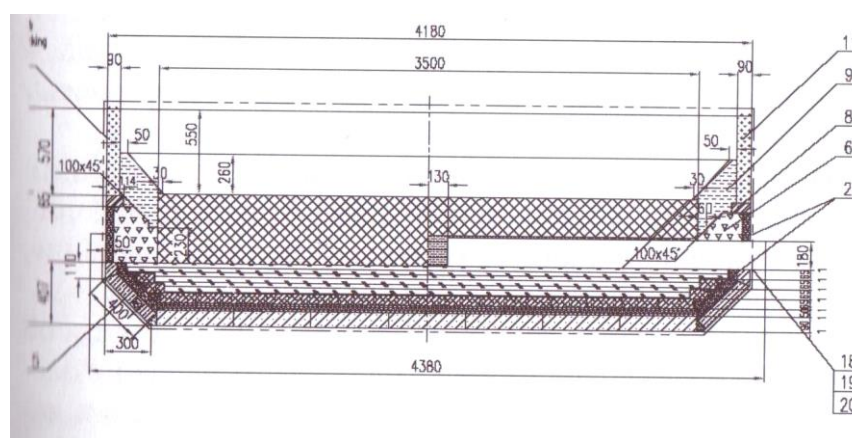


Рисунок 1.4. Футеровка электролизера 2-й очереди

Бортовая футеровка обоих типов электролизеров выполнена из карбидкремниевых (SiC) плит толщиной 90 мм. На электролизерах 1-й очереди SiC плиты были установлены вплотную к обечайке кожуха без применения клеящего материала. В процессе работы электролизеров SiC плиты стали отходить от кожуха, образуя пустоты. Эти пустоты создают дополнительное тепловое сопротивление и препятствуют отводу тепла от бортов электролизера. В результате чего может резко уменьшаться толщина гарниссажа, и произойти контакт расплавленного электролита с кожухом, что может вызвать «прорыв» расплава. Кроме того, уменьшение отвода тепла нарушает тепловой баланс электролизера, что отрицательно влияет на технологию. Причины образования пустот легко объяснить: на деформацию горизонтальных плит в верхних участках бортовой стенки влияют очень жесткая угловая область и продольная бортовая стенка. Из-за жесткости при изгибе горизонтальные плиты производят изгиб, который выталкивает бортовую стенку, смежную с угловой зоной, к наружной стороне, тем самым образуя зазор между SiC плитами и стальными бортовыми стенками.

При монтаже электролизеров 2-й очереди по инициативе технического руководства завода были внесены изменения в конструкцию, предусматривающие приклейку SiC плит к кожуху.

Если коснуться истории применения в бортовой футеровке плит из карбида кремния, то можно отметить следующее. До появления этого материала в качестве бортовой футеровки использовались угольные блоки толщиной от 110 до 250 мм. Установка этих блоков производилась не вплотную к кожуху, а через слой шамотной засыпки для выравнивания неровностей стенки кожуха. Естественно, применение такой конструкции резко сокращало теплоотвод от стенок кожуха, и поддержание необходимой формы рабочего пространства представляло большую проблему. Угольные блоки разрушались, что очень часто приводило к прорывам расплава через борт. Приходилось производить ремонт бортовой футеровки «на ходу». Место расположения ремонта замораживалось кусковым оборотным электролитом, срезался фланцевый лист, выбивался разрушенный участок блока, и это место заполнялось подовой массой, которая утрамбовывалась.

С появлением материалов из карбида кремния (значительно более стойких к расплавам фтористых солей) появилась возможность значительно повысить срок службы бортовой футеровки. Первоначально использовались комбинированные блоки из склеенных угольных и карбидкремниевых плит, а затем только карбидкремниевые плиты.

Кроме того, проводились испытания бортовых блоков из угольного материала с добавками в него карбида кремния (до 17 %).

Верхний слой футеровки цокольной части электролизера состоит из угольных подовых блоков с содержанием графита 30 %. По качеству блоки 1-й и 2-й очереди одинаковы, лишь длина блоков 2-й очереди больше на 80 мм.

Существует отличие в конструкции подовых секций (подовый блок с закрепленными в нем с помощью электродной массы блямсами). Если на электролизерах 1-й очереди применены сплошные, длинные (около 4-х метров) блямсы, то на электролизерах 2-й очереди – разрезные блямсы (около 2-х метров) с разрывом между ними 200 мм. Сплошной, длинный блямс довольно жестко закреплен в пазах блока и окнах кожуха. При эксплуатации в условиях высокой температуры (900 °С) при термическом расширении блямса могут возникнуть усилия, изгибающие блямс. Эти условия могут передаваться подовому блоку и привести к его разрушению.

Огнеупорная и теплоизоляционная часть футеровки цоколя электролиза состоит:

1. Электролизер 1-й очереди (сверху вниз):
 - слой сухой барьерной смеси Н=175 мм;
 - теплоизоляционный кирпич, 2 ряда по Н=65 мм;
 - слой силиката кальция Н=100 мм.
2. В футеровке электролизера 2 очереди применено:
 - слой сухой барьерной смеси Н=195 мм,
 - теплоизоляционный кирпич Н=65 мм,
 - слой керамоволокна Н=50 мм,

- слой силиката кальция Н=90 мм.

Отличия в цокольной части футеровки не носят принципиального характера, за исключением замены одного ряда теплоизоляционного кирпича на ряд плит из керамоволокна примерно вдвое ниже, чем у теплоизоляционного кирпича. Однако общее тепловое сопротивление футеровки за счет уменьшения толщины силиката кальция и керамоволокна осталось примерно на том же уровне.

В процессе электролиза футеровочные материалы пропитываются фтористыми соединениями и меняют свои теплофизические и механические свойства. Происходит это в течение 6-12 месяцев (для футеровок использующих такие материалы, как на АО «КЭЗ»), а общая масса фтористых соединений в футеровке достигает нескольких десятков тонн. Особенно восприимчивы к пропитке фтористыми соединениями подовые блоки. В процессе пропитки ионы натрия проникают в кристаллическую решетку углерода, что приводит к так называемому «натриевому расширению» (натриевой деформацией). Причем чем меньше количество графита в материале блока, тем больше блок подвержен этой деформации. Уменьшить это вредное воздействие можно применением блоков с содержанием графита 50-70 %, у которых коэффициент линейного расширения (тест Раппопорта) меньше в 2-3 раза.

В результате удлинения блоков от натриевого воздействия и температуры возникают усилия между блоком и кожухом. Поскольку напрямую они не соприкасаются, это усилие передается через футеровочные материалы, находящиеся в промежутке. Эта часть футеровки называется бровкой. Материалы, которые закладываются в бровку, должны обеспечить нужную теплоизоляцию, а также должны играть демпфирующую роль при расширении подового блока. Поэтому этот участок футеровки так важен в конструкции. Сама конструкция футеровки бровки электролизеров 1-й и 2-й очереди одинакова. Изменены только материалы, заложенные в футеровку электролизера 1-й очереди. Изменен состав бетона, а вместо теплоизоляционного кирпича между кожухом и бетоном установлена плита из керамоволокна. Целесообразность данного конструктивного изменения можно будет оценить позднее.

На наш взгляд, одним из дальнейших этапов работы по совершенствованию конструкции футеровок обоих типов электролизеров. Одинаковые внутренние размеры катодных кожухов делают эту задачу насущной. Это важно и с точки зрения работы цеха капитального ремонта, а в большей степени важно для ведения технологии. Ведь у электролизеров с разными конструкциями футеровок разные и теплоэнергетические характеристики. Это вынуждает подбирать технологические параметры под каждую конструкцию. Унификация конструкции футеровки в значительной степени снимет этот вопрос. С 2011 года на заводе начата работа в этом направлении.

1.3.2 Анодное устройство

Анодное устройство предназначено для подвода тока в межполюсное пространство для осуществления процесса электролиза. Оно состоит из анодов

анодной шины и балки-коллектора которая опирается на катодный кожух по торцевым сторонам.

Балка-коллектор – мощная металлическая конструкция, предназначена для сбора и эвакуации отходящих газов. Помимо механизмов перемещения анодной ошиновки (домкраты, редукторы) в балку-коллектор установлены бункера для глинозема и фтористого алюминия, которые подаются в зону электролита с помощью пробойников и дозаторов. Принцип действия пробойников и дозаторов основан на использовании пневмоцилиндров. Воздух, направляемый в пневмоцилиндры, предварительно проходит через установку осушки от содержащейся в нем влаги.

Анодная ошиновка состоит из двух связанных между собой алюминиевых шин. Поскольку ток подается только на анодную шину со стороны А, то для передачи тока на анодную шину со стороны В используются перемычки, выполненные из набора алюминиевых пластин. Для размещения перемычек анодной ошиновки в конструкции балки-коллектора предусмотрены окна.

Рассмотрим конструкцию самого анода на рисунке 1.5. Анод состоит из анодного блока и анододержателя. В аноде при прессовании сделаны четырех отверстия глубиной 100 мм для установки в них ниппелей.

Анододержатель состоит из вертикальной алюминиевой штанги и стальной траверсы (кронштейна) с четырьмя ниппелями. Поскольку алюминиевая штанга и стальной кронштейн не могут быть сварены напрямую, для их соединения применена специальная вставка – биметаллическая пластина, которая представляет собой две соединенные между собой сваркой взрывом пластины стальную и алюминиевую.

Перед сваркой взрывом между этими пластинами помещают титановую фольгу для предотвращения химического взаимодействия железа и алюминия. Затем со стороны алюминиевой пластины приваривается алюминиевая штанга, а со стороны стальной пластины – стальной кронштейн. Соединение анодного блока с кронштейном осуществляется с помощью чугуна, который заливается в пазы между анодным блоком и ниппелями. Перед заливкой чугуном ниппеля обрабатываются водно-графитовой суспензией, которая облегчает процесс снятия чугуна с ниппеля при демонтаже анода. Особые требования предъявляются к составу чугуна. Заливочный чугун должен обладать минимальной усадкой, чтобы создать хороший контакт железо-углерод для обеспечения минимального электрического сопротивления. На АО «КЭЗ» применяется литейный чугун следующего состава согласно таблице 1.2.

или ручной очистки огарков от электролита. Огарки очищаются от электролита в машине автоматической очистки огарков или в машине ручной очистки, затем в машине дробеструйной очистки огарков. Снятый с огарков электролит системой ленточных конвейеров направляется на участок дробления электролита. Измельченный электролит с грануляцией измельчения менее 5 мм отправляется в корпус электролиза для повторного использования.

4. Анодные огарки толщиной менее 300 мм, с которых был очищен электролит, направляются на станцию автоматического снятия анодных огарков, а толщиной более 300 мм направляются на станцию ручного снятия огарков.

5. Чугунная заливка с ниппелей снимается на станции снятия чугунной заливки. Удаленная чугунная заливка направляется на станцию очистки чугунного скрапа, после очистки чугунная заливка используется вновь.

6. Штанги после прохождения через станцию дробеструйной очистки ниппелей, станцию правки анодных штанг, станцию правки ниппелей, станцию щеточной очистки анодных штанг и станцию нанесения графита поступают на литейную станцию.

Подробная технологическая схема передела представлена на рисунке 1.6.

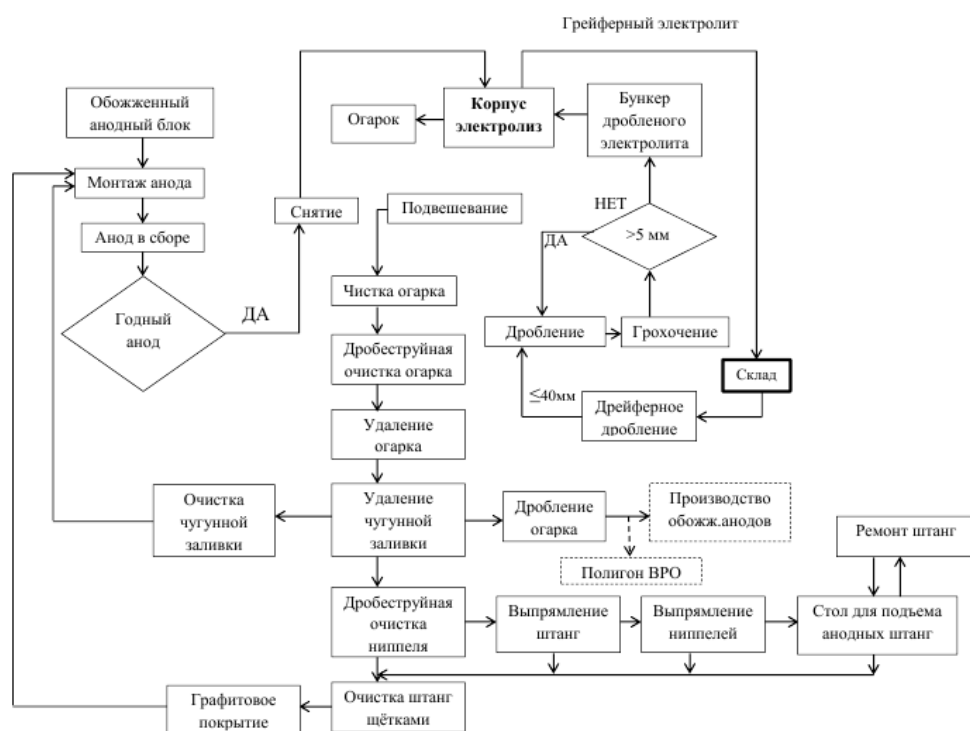


Рисунок 1.6. Технологическая схема цеха производства электродов

1.4 Анализ состава и качества глинозема

АО «КЭЗ» были предоставлены сертификаты качества на используемый глинозем. Завод полностью использует глинозем, выпускаемый Павлодарским алюминиевым заводом, расположенным в том же регионе, что значительно снижает транспортные расходы и его стоимость. Весь глинозем, поступающий в электролизное производство, проходит через систему сухой очистки газов и подается

в электролизер через систему АПГ. «Свежий» глинозем частично используется для укрытия анодного массива и при замене анодов. Основные физико-химические характеристики поступающего на завод «свежего» глинозема приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Физико-химические характеристики «свежего» глинозема

Значение характеристики	Марка	Примеси, %			Наличие посторонних включений	Потеря массы при прокаливании	Угол естественного откоса	Влага %
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O пересчете на Na ₂ O				
Нормируемое	Г-00	Не бол 0,02	Не бол 0,03	Не более 0,4	Отсутств у	Не более 1	30-35	Не бол 0,5
Фактическое	Г-00	Не бол 0,02	Не бол 0,03	Не более 0,4	Отсутств у	0,8	Соотв.	0,0
Значение характеристики	Насыпная плотность г/см ³	Удельная поверхность м ² /г	Содержание α-оксида алюминия, %	Содержание фракции				
				-32мкм %	-45мкм %	40-60 мкм, %	+63мкм %	125мкм %
Нормируемое	0,9-1,0	Не менее 70-80	Не более 15-20	10-36	Нет данных	20-55	13-50	Нет данных
Фактическое	Соотв.	Более 70	Менее 20	Соотв.	40	Соотв.	Соотв.	3

Данные сертификатов и таблицы показывают следующее:

- глинозем характеризуется постоянным химическим составом и по химическому составу глинозем соответствует марке Г-00 российского ГОСТ 30558-98;
- содержание фракции – 45 мкм составляет 40 %, что характеризует его как глинозем «мучнистого» типа;
- по содержанию основных примесей (SiO₂, Fe₂O₃), определяющих сортность глинозема, такой глинозем соответствует высокосортной марке Г-00. При этом содержание Fe₂O₃ значительно ниже предельно допускаемого (0,03 %) в ГОСТе 30558-98;
- содержание Na₂O в глиноземе в среднем (0,37 %) на 0,03 % ниже предельно допустимого значения 0,40 %, что позволяет снижать расход AlF₃ примерно на 0,5 кг/т Al;
- содержание примесей (TiO₂+V₂O₅+Cr₂O₃+MnO), ZnO и P₂O₅ отвечает требованиям ГОСТ 30558-98.

Таким образом, можно констатировать, что применение глинозема ПАЗа данного типа позволяет КЭЗу выпускать высокосортный алюминий-сырец.

Также следует отметить следующие моменты:

- приведенные характеристики относятся к глинозему до поступления его на систему сухой очистки газов. В то же время многочисленные испытания показали, что глинозем в системе сухой очистки подвергается истиранию и содержание фракции - 45 мкм увеличивается в среднем на 5 – 6 %.
- содержание фтора в глиноземе после сухой очистки газов на КЭЗе составляет в среднем 1,31 %. Снижение фракции - 45 мкм до 15 – 20 % должно привести к увеличению содержания фтора во фторированном глиноземе до 1,8–

2,1 %. При этом также увеличивается содержание СаО примерно на 30 % от исходного содержания.

Характерной особенностью применения фторированного глинозема в электролите является то, что при контакте его с расплавом начинается выделение фторсодержащих компонентов. Последние диспергируют глинозем в расплаве, что значительно ускоряет процесс растворения глинозема, вследствие увеличения суммарной поверхности. Необходимо особо подчеркнуть, что в случае с АПГ точечного типа, когда отсутствует по сути дела предварительный подогрев глинозема, эти фторсодержащие (летучие) компоненты сохраняются до тех пор, пока доза глинозема не вступит в контакт с расплавом. Чем выше содержание летучих компонентов, тем выше скорость растворения глинозема. Адсорбционная способность глинозема относительно F/HF тем выше, чем крупнее размеры частиц. И в этом случае, гранулометрический состав глинозема имеет решающее значение и, прежде всего, снижение содержания фракции -45 мкм от 40 % до 15 %.

Глинозем, применяемый на АО «КЭЗ» относится к обычным глиноземам «мучнистого» типа, в то время как все алюминиевые заводы зарубежных фирм используют в автоматизированных сериях электролиза глинозем «песчаного» типа. Главным достоинством этого глинозема является повышенная скорость растворения из-за низкого содержания фракции -45 мкм (в пределах 5-15 %) и α - Al_2O_3 (10-15 %). Отметим тот факт, что песочный глинозем характеризуется пониженным пылеуносом и не зависает в бункерах и дозаторах АПГ. Кроме того, криолито-глиноземная корка, сформированная из низкопрокаленного глинозема, как показывают результаты испытаний, не зависает при перемещениях анодного массива.

Испытания низкопрокаленного глинозема были проведены в 2003-2005 годах на УАЗе на ваннах с обожженными анодами 160 кА и показали следующее:

- содержание α - Al_2O_3 (10-15 %) в низкопрокаленном глиноземе составило 6,47 %, против 15,7 % в рядовом;
- содержание фракции -45 мкм в низкопрокаленном глиноземе составило 15,7 %, против 21,97 % в рядовом;
- содержание фтора во фторированном глиноземе 1,61 %, при использовании низкопрокаленного глинозема 2,06 %.

При этом в целом по корпусу, при применении низкопрокаленного глинозема выход по току увеличился на 0,72 %, а расход технологической электроэнергии практически не изменился.

Аналогичные результаты были получены и при применении низкопрокаленного глинозема на электролизерах других типов и мощностей. Выход по току увеличивался на 0,8-1,2 %, расход технологической электроэнергии снижался на 200-400 кВт·ч/т.

В любом случае, применение низкопрокаленного глинозема ведет к стабилизации технологического процесса, уменьшает количество проблем, связанных с управлением АПГ и осадкообразованием на катоде, что способствует интенсификации процесса и повышению его технико-экономических показателей.

1.5 Анализ технико-экономических показателей

Проведен статистический анализ зависимостей технологических и технико-экономических показателей от различных параметров работы электролизеров. Для бригад 1,2,7,8 показатели рассматривались с июня 2008 года по август 2010 года, бригады с более поздним сроком пуска через три месяца после ввода в эксплуатацию. Технологические показатели по очередям и по бригадам приведены в таблицах 1.4 и 1.5. Отметим, что сравнение показателей электролизеров 1 и 2 очередей не вполне корректно, поскольку в течение 2010 года продолжался пуск электролизеров 2 очереди (4 и 5 бригады) и полная стабилизация технологического режима произошла примерно в июне 2010.

Для анализа, в основном, использовались показатели выхода по току (η), среднего напряжения ($U_{\text{ср}}$) и удельного расхода электроэнергии ($W_{\text{уд}}$), как интегральные и наиболее полно отображающие процессы, происходящие в электролизере. Несмотря на условность усредненных показателей (очередь, бригада), статистические зависимости во многом верно определяют общие и стратегические положения, которые позволяют выделить основные проблемы и тенденции их усовершенствования.

Таблица 1.4. Технологические показатели 1 и 2 очередей (годовые)

№ п/	Параметр	Обозн.	Разм.	1 очередь			2 очередь
				2008	2009	2010	2010
1	Сила тока	I	кА	320,7	322,3	320,4	319,8
2	Напряжение уставки	$U_{\text{уст}}$	В	4,185	4,171	4,134	4,127
3	Рабочее напряжение	$U_{\text{раб}}$	В	4,190	4,178	4,131	4,134
4	Среднее напряжение	$U_{\text{ср}}$	В	4,202	4,182	4,134	4,140
5	Тем-ра электролита	T	°C	952,5	953,2	953,3	954,6
6	Криолитовое отношение	КО	%	2,28	2,32	2,33	2,31
7	Уровень металла	H_{Al}	см	22,0	22,0	22,8	18,8
8	Уровень электролита	$H_{\text{эл}}$	см	20,6	20,0	19,7	19,5
9	Содержание в эл-те	CaF_2	%	4,47	4,69	5,22	4,95
10	Содержание в эл-те	MgF_2	%	1,20	0,91	0,74	0,87

Окончание таблицы 1.4

11	Сумма добавок в эл-те	CaF ₂ +M		5,66	5,60	5,95	5,81
12	Концентрация в эл-те	Al ₂ O ₃	%	2,35	2,56	2,07	1,90
13	Сут. производительность	в/с	кг	2369,	2356,7	2365,8	2356,3
14	Выход по току	ВТ	%	91,66	90,75	91,62	92,17
15	Уд.расход эл.энергии	W	кВт·ч/т	13656	13728	13437	13378
16	Греющая мощность	I·U _{ср}	кВт	1348	1348	1324	1324
	Примечание: показатели 2010 год учтены по август (включительно)						

Таблица 1.5. Технологические показатели по бригадам 1 очереди (годовые)

№	Параметр\бригада\год	Обозн.	Разм.	1 бригада			8 бригада		
				2008	2009	2010	2008	2009	2010
1	Сила тока	I	кА	320,1	322,3	320,4	320,3	322,2	320,4
2	Напряжение уставки	U _{уст}	В	4,175	4,185	4,134	4,170	4,168	4,135
3	Рабочее напряжение	U _{раб}	В	4,176	4,193	4,129	4,171	4,175	4,132
4	Среднее напряжение	U _{ср}	В	4,193	4,199	4,132	4,190	4,179	4,134
5	Тем-ра электролита	T	°C	957,1	953,1	953,6	958,3	952,7	952,9
6	Криолитовое отношение	КО	%	2,34	2,33	2,33	2,32	2,34	2,37
7	Уровень металла	H _{Al}	см	21,8	22,2	22,6	21,5	21,9	22,8
8	Уровень электролита	H _{эл}	см	20,8	20,4	19,7	20,7	20,0	19,7
9	Содержание в эл-те	CaF ₂	%	3,86	4,66	5,25	3,91	4,67	5,35
10	Содержание в эл-те	MgF ₂	%	0,81	0,96	0,72	0,81	0,94	0,73
11	Сумма добавок в эл-те	Ca+Mg		4,68	5,62	5,97	4,72	5,61	6,08
12	Концентрация в эл-те	Al ₂ O	%	2,31	2,64	2,07	2,28	2,58	2,06
13	Сут. производительн.	в/с	кг	2342	2344	2369	2356	2344	2355
14	Выход по току	ВТ	%	90,80	90,20	91,76	91,28	90,23	91,22
15	Уд.расход эл.энергии	W	кВт·ч/т	13759	13867	13413	13673	13795	13499
16	Греющая мощность	I·U _{ср}	кВт	1342	1353	1324	1342	1346	1325
№	Параметр\бригада\год	Обозн.	Разм.	2 бригада			7 бригада		
				2008	2009	2010	2008	2009	2010
1	Сила тока	I	кА	320,2	322,3	320,4	320,1	322,2	320,5
2	Напряжение уставки	U _{уст}	В	4,182	4,167	4,132	4,182	4,161	4,134
3	Рабочее напряжение	U _{раб}	В	4,183	4,174	4,130	4,18	4,170	4,134
4	Среднее напряжение	U _{ср}	В	4,202	4,178	4,132	4,201	4,173	4,136
5	Тем-ра электролита	t	°C	958,7	953,6	953,5	957,8	953,5	953,4
6	Криолитовое отношение	КО	%	2,34	2,30	2,30	2,35	2,29	2,31
7	Уровень металла	H _{Al}	см	21,8	22,1	22,8	21,6	21,7	23,0
8	Уровень электролита	H _{эл}	см	20,8	20,0	19,7	20,5	19,5	19,8
9	Содержание в эл-те	Ca	%	3,72	4,75	5,10	3,68	4,69	5,18
10	Содержание в эл-те	Mg	%	0,80	0,93	0,79	0,85	0,79	0,70
11	Сумма добавок в эл-те	Ca+Mg	%	5	6	6	5	5	6
12	Концентрация в эл-те	Al ₂ O ₃	%	2,26	2,55	2,05	2,31	2,45	2,08
13	Сут. производительн.	в/с	кг	2286	2374	2372	2310	2365	2366
14	Выход по току	ВТ	%	88,5	91,5	91,9	89,6	91,1	91,6
15	Уд.расход эл.энергии	W	кВт·ч/т	13816	13608	13395	13700	13643	13442
16	Греющая мощность	I·U _{ср}	кВт	1345	1347	1324	1345	1345	1326

Таблица 1.6. Технологические показатели по бригадам 2 очереди (годовые)

№	Параметр\бригада\год	Обозн.	Разм.	3 бригада		6 бригада		4 бр.	5 бр.
				2009	2010	2009	2010	2010	2010
1	Сила тока	I	кА	321,8	319,8	321,8	319,8	319,8	319,8
2	Напряжение уставки	U _{уст}	В		4,126		4,130	4,133	4,136
3	Рабочее напряжение	U _{раб}	В		4,132		4,13	4,141	4,144
4	Среднее напряжение	U _{ср}	В		4,137		4,14	4,151	4,156
5	Тем-ра электролита	t	°С		953,2		952,1	957,9	958,6
6	Криолитовое отношение	КО	%		2,26		2,26	2,36	2,41
7	Уровень металла	H _{Al}	см		19,1		19,1	18,2	18,1
8	Уровень электролита	H _{эл}	см		19,2		19,2	20,0	20,1
9	Содержание в эл-те	Ca	%	6,26	5,06	5,85	5,03	4,77	4,82
10	Содержание в эл-те	Mg	%	1,34	0,84	1,33	0,81	0,89	0,89
11	Сумма добавок в эл-те	Ca+Mg	%	7,61	5,90	7,19	5,85	5,66	5,71
12	Концентрация в эл-те	Al ₂ O ₃	%	2,4	1,9	2,3	1,9	2,0	1,9
13	Сут. производительн.	в/с	кг	2248	2383	2327	2379	2309	2320
14	Выход по току	ВТ	%	86,76	92,40	89,79	92,25	89,61	90,03
15	Уд.расход эл.энергии	W	кВт·ч/т		13336		13376	1385	13797
16	Греющая мощность	I·U _{ср}	кВт		1323		1325	1328	1329

С начала пуска завода основные технологические параметры изменялись незначительно. Величина выхода по току находилась в пределах от 89-92,7 % и ее значение стабилизировалось с января 2009 года для электролизеров обеих очередей на уровне 92 %.

Среднее напряжение в процессе эксплуатации снижалось с 4,215 В и к июню-августу 2010 года составляет 4.15-4,20 В

Удельный расход электроэнергии в марте 2009 года достиг максимума 13938 кВт·ч/т по 1 очереди, после чего устойчиво снижался, и в настоящее время стабилизировался на уровне 13300 кВт·ч/т для электролизеров 1 и 2 очередей.

В целом, по показателям выхода по току, среднего напряжения и удельного расхода энергии на ваннах 1 и 2 очереди, достигнутым в июне-августе 2010 года, можно сказать, что технико-экономические показатели обеих конструкций электролизеров примерно одинаковы, с некоторым преимуществом электролизеров 2 очереди.

На рисунках 1.7, 1.8 приведены зависимости выхода по току и расхода электроэнергии от различных параметров, построенные по среднемесячным значениям. Зависимости данных параметров от среднего напряжения приведены на рисунке 1.7.

Как видно, технические показатели для разных бригад значительно отличаются. В то же время отчетливо просматривается минимум выхода по току при напряжении уставки 4,16-4,17 В. При этом расход электроэнергии однозначно снижался при снижении среднего напряжения. Аналогичные зависимости приведенных параметров получены от рабочего напряжения и напряжения уставки, поскольку малое количество анодных эффектов не дает их значительного отличия между собой. Отметим, что при снижении уставки в интервале 4,12-4,20 В среднее напряжение снижалось практически адекватно ее изменению.

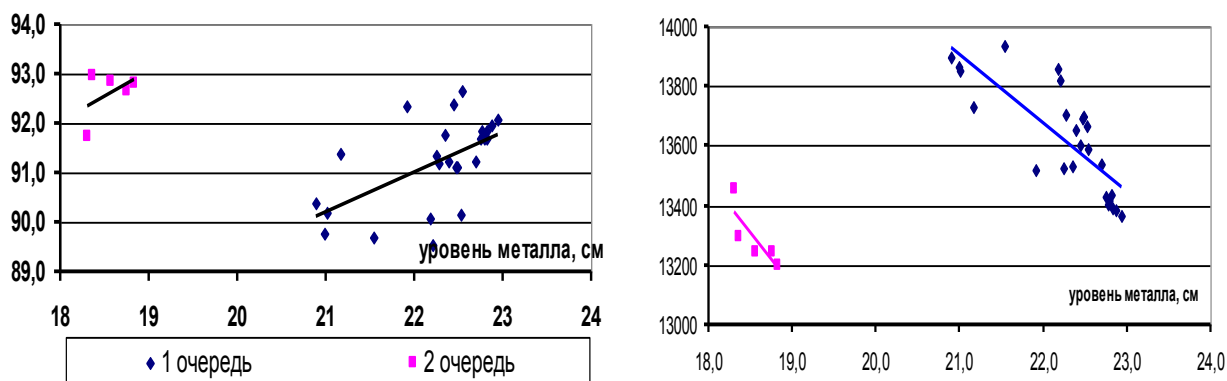


Рисунок 1.7. Зависимость данных параметров от среднего напряжения

Со времени начала эксплуатации электролизеров 1 очереди уровень металла увеличился с 20 до ~ 23 см, а уровень электролита снизился с 20,5 до 19,5-20,0 см. На электролизерах 2 очереди уровни металла и электролита сохраняются на уровне 19 см. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от уровней металла и электролита носит однозначный характер для обеих серий. При увеличении уровня металла выход по току увеличивался (градиент 0,8-1,0 % на 1см), а расход электроэнергии снижался (на 228-354 кВт·ч/т на 1 см) (рис. 1.8, 1.9). Среднее напряжение электролизера также снижалось при увеличении уровня металла на величину 31-44 мВ на 1 см. Это может быть обусловлено снижением температуры и улучшением МГД-стабильности ванн при повышении уровня металла, что приводит к общему улучшению технологического состояния ванн.

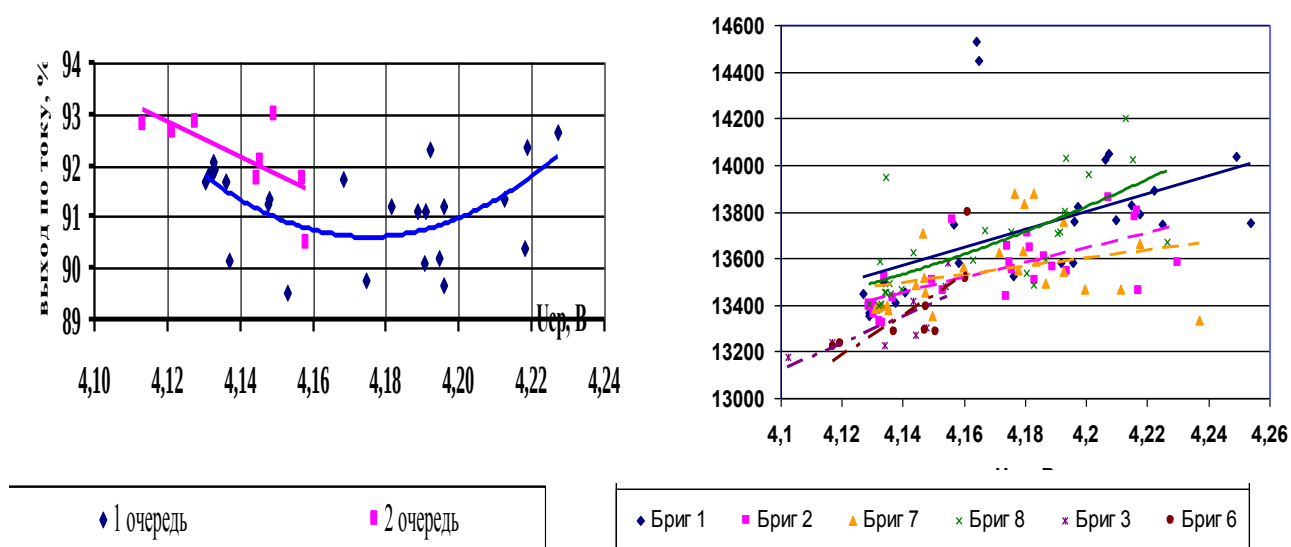


Рисунок 1.8. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от уровней металла и электролита

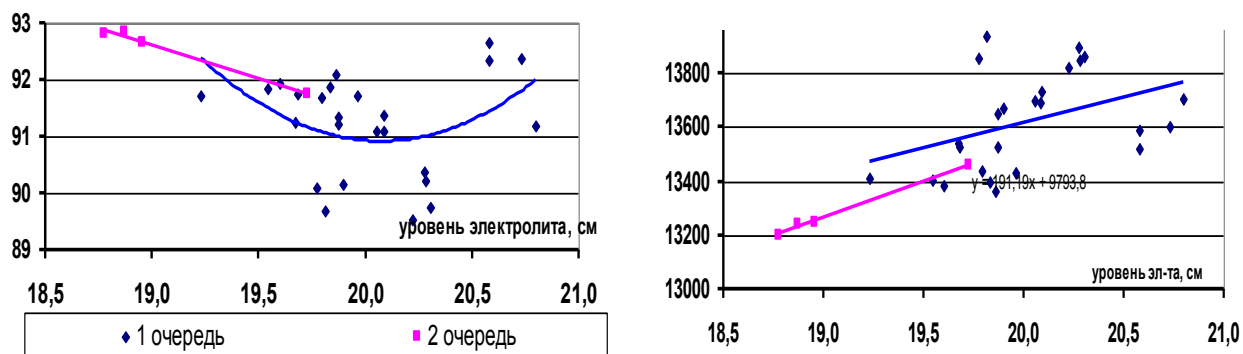


Рисунок 1.9. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от уровня электролита

Расчеты на тепловой модели и экспериментальные данные на электролизерах 160 кА показывают, что увеличение уровня металла на 1 см соответствует приросту напряжения примерно на 2-5 мВ, которое необходимо для компенсации греющего напряжения при увеличении уровня и объема расплава. При этом загрязнение подины оказывает на технологический режим ванн с АПГ больший отрицательный эффект, нежели положительный эффект от увеличения стабильности ванны, что обычно лимитирует предел его увеличения. Для условий КЭЗа на данный момент, увеличение уровня металла на 1-3 см не представляется опасным с этой позиции.

Для зависимости выхода по току от уровня электролита имеется минимальное значение, что не имеет логических обоснований. Скорее всего, наличие минимума связано с малыми изменениями данного параметра и неточностями его измерения. Удельный расход электроэнергии и среднее напряжение электролизера однозначно увеличивались при увеличении уровня электролита, что обусловлено увеличением высоты и объема расплава, а также общих энергозатрат на поддержание нормальной температуры. Градиент прироста при увеличении на 1 см составил: по напряжению 40-60 мВ/1 см; по удельному расходу электроэнергии 173-260 кВт·ч/т/1 см.

Наибольшее влияние на величину выхода по току, согласно теоретических положений, оказывают температура электролита и концентрация глинозема в электролите.

Для условий электролизеров КЭЗа, выход по току увеличивался при снижении концентрации глинозема в электролите на рисунке 1.10. При этом среднее напряжение и расход электроэнергии увеличиваются. Градиент прироста составляет: по напряжению 75 мВ на 1 %; по расходу электроэнергии 263 кВт·ч/т на 1 %.

Полученные выводы согласуются с теоретическими представлениями, а тенденция на поддержание минимальной концентрации глинозема в электролите является одной из основных задач по ведению оптимальной технологии.

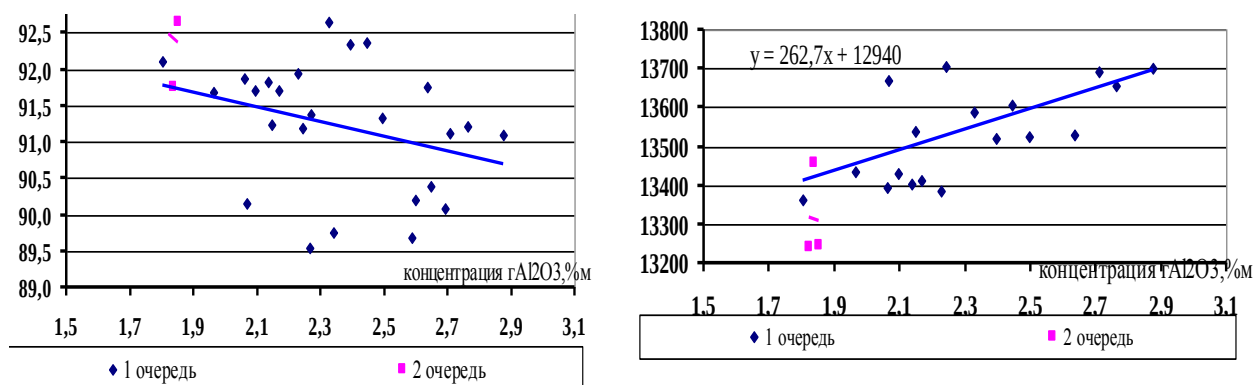


Рисунок 1.10. Зависимость выхода по току и удельного расхода электроэнергии от концентрации глинозема

На рисунке 1.11 приведены зависимости выхода по току и расхода электроэнергии от температуры электролита.

Выход по току увеличивается, а расход электроэнергии снижается при снижении температуры электролита в интервале ее изменения 950-956 °С. Градиент изменения параметров электролизеров КЭЗа составляет на 1 градус температуры электролита: по выходу по току 0,35-0,38 %/градус; по расходу энергии 30-70 кВт·ч/т/градус.

Температура электролита является одним из важнейших параметров электролиза. К ее поддержанию на минимально возможном уровне направлены практически все действия технологов и системы АСУТП. Из основных факторов, влияющих на нее, выделим криолитовое отношение и добавки CaF_2 и MgF_2 .

На рисунке 1.11 представлена зависимость выхода по току и температуры от криолитового отношения (КО).

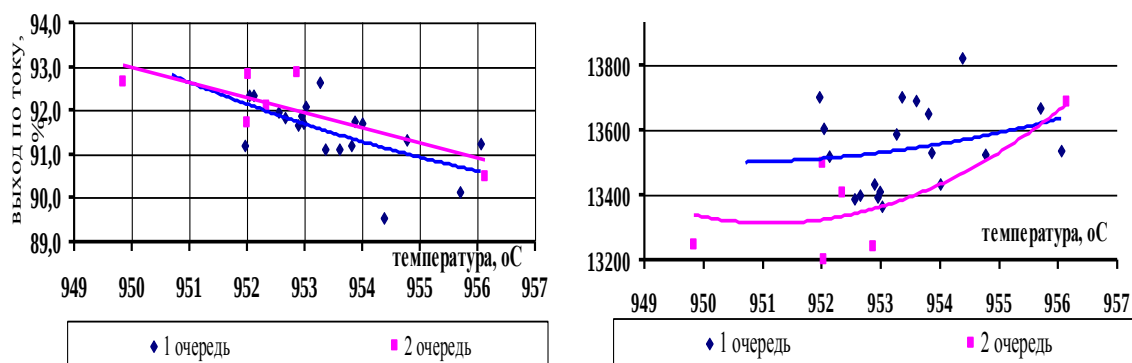


Рисунок 1.11. Зависимость выхода по току и удельного расхода электроэнергии от температуры

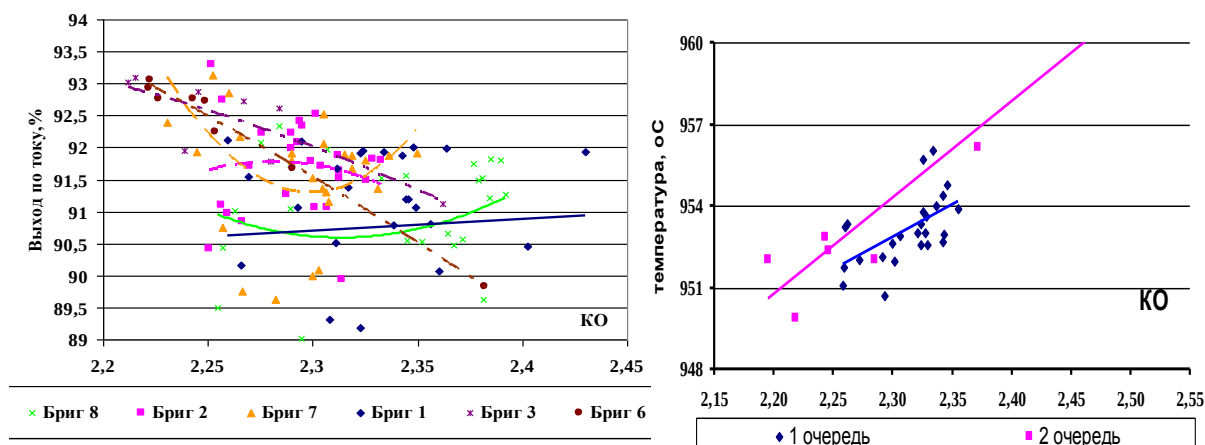


Рисунок 1.12. Зависимость выхода по току и температуры от электролита

Имеется корреляция между выходом по току и криолитовым отношением. Чем ниже криолитовое отношение, тем выше выход по току. Это обусловлено снижением температуры электролита и температуры ликвидуса, что при сохранении температуры перегрева электролита обеспечивает повышение выхода по току (рисунок 1.12). По среднему напряжению и расходу электроэнергии однозначного вывода о влиянии криолитового отношения не выявлено, поскольку для электролизеров 1 и 2 очереди получены противоположные результаты (рисунок 1.13).

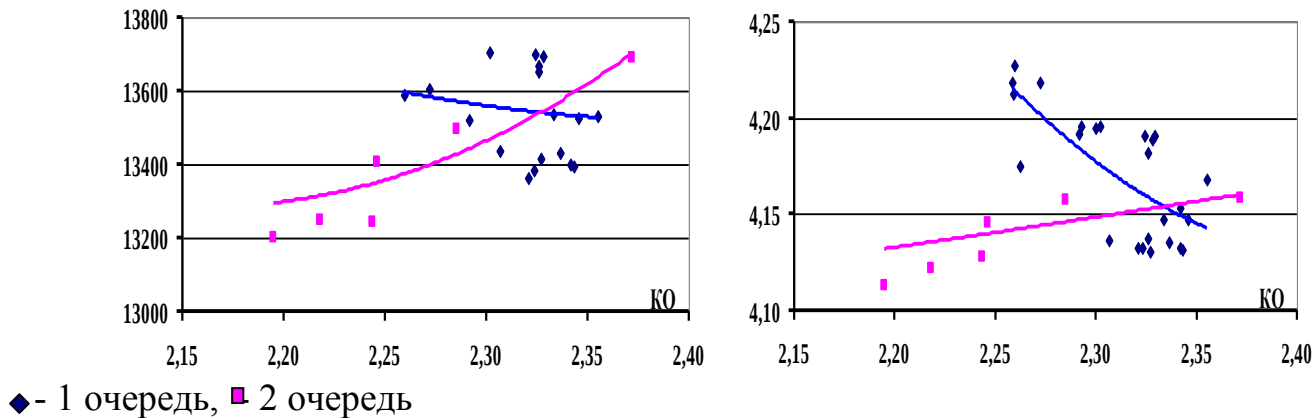


Рисунок 1.13. Зависимость удельного расхода электроэнергии и среднего напряжения от криолитового отношения

Теоретически, криолитовое отношение, в реальном диапазоне его изменения, незначительно влияет на электропроводность и удельный расход электроэнергии.

На рисунках 1.14 и 1.15 представлены зависимости выхода по току и расхода электроэнергии от содержания CaF_2 и MgF_2 . Отмечу, что с начала эксплуатации на электролизерах 1 очереди имелось увеличение содержания CaF_2 с 4,5 % до 5,3 % при снижении содержания MgF_2 с 1,2 % до 0,7 %. При этом сумма добавок увеличилась с 5,5 % до 6,0 %.

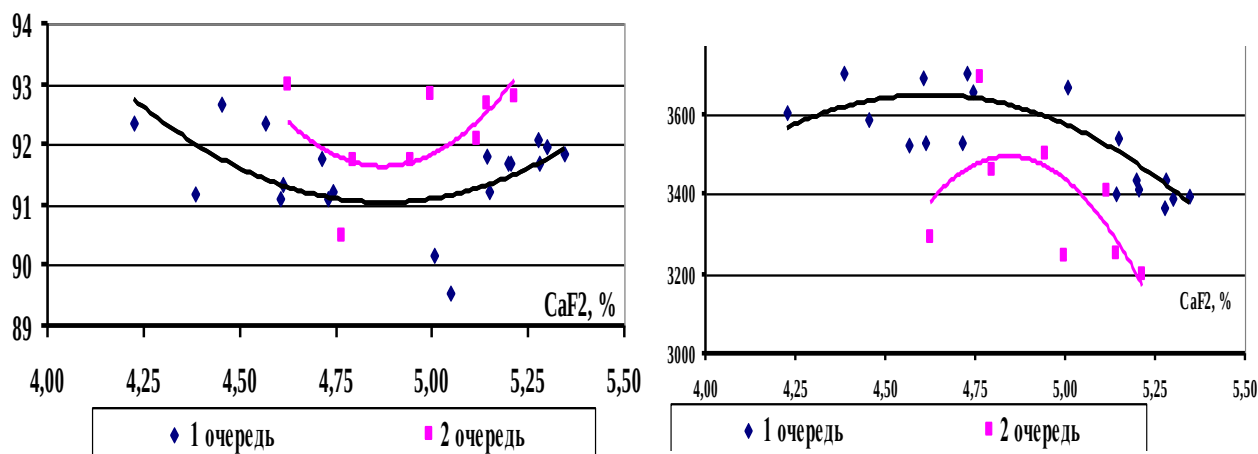


Рисунок 1.14. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от содержания CaF_2

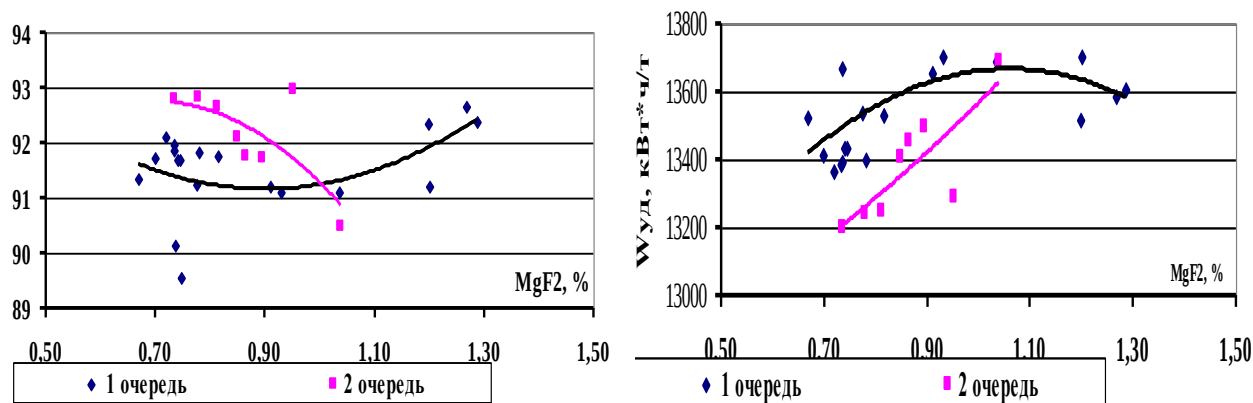


Рисунок 1.15. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от содержания MgF_2

Имеется минимум выхода по току и максимум расхода электроэнергии при содержании CaF_2 4,5-4,75 %. Больше этого значения выход по току увеличивается, а расход электроэнергии снижается. Аналогичные экстремумы имеются для содержания MgF_2 около 1 %. По всей вероятности, данные диапазоны параметров несовместимы со свойствами существующего электролита (концентрация глинозема и криолитового отношения).

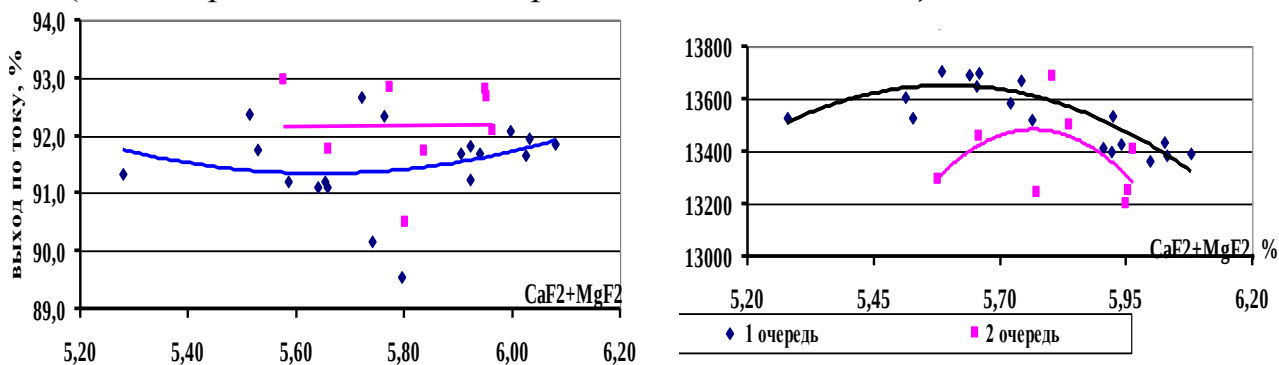


Рисунок 1.16. Зависимость выхода по току и расхода электроэнергии от суммы добавок $\text{CaF}_2 + \text{MgF}_2$

Указанные зависимости носят характер аналогичный каждой из составляющих. Наиболее плохие показатели получаются при сумме добавок около 5,6 % для 1 очереди и 5,8 % для электролизеров 2 очереди. Выше этих диапазонов показатели улучшаются. Из практики ведущих зарубежных фирм известно, что содержание MgF_2 поддерживается на минимально возможном уровне, в основном за счет поступления из сырья. Содержание CaF_2 в электролите поддерживается на уровне 5,2-6,0 %, но не выше 7 %, а сумма добавок кальция и магния не превышает 7,0 %. Здесь для электролизеров КЭЗа имеется небольшой резерв по улучшению показателей.

Интерес представляет зависимость основных показателей очередей КЭЗа от силы тока. С ноября 2008 года до апреля 2009 года происходило увеличение силы тока на 1-5 кА. На рисунках 1.17 и 1.18 представлены средние показатели выхода по току (η) и удельного расхода электроэнергии ($W_{уд}$) для электролизеров обеих очередей.

Для действующих электролизеров выход по току (η), при увеличении силы тока, падает примерно на 0,4 % на 1 кА, а удельный расход электроэнергии ($W_{уд}$) увеличивается примерно на 100 кВт·ч/т на 1 кА.

Как видно, при повышении силы тока на действующих электролизерах происходит ухудшение показателей.

По результатам проведенного анализа, можно выделить следующие перспективные тенденции по увеличению выхода по току и улучшению других технико-экономических показателей:

- увеличение уровня металла на 1-2 см по сравнению с существующим уровнем;
- поддерживать уровень электролита не более 20 см;
- поддержание температуры электролита на уровне 953 ± 2 °С;
- увеличение суммы добавок $CaF_2 + MgF_2$ до 6,0-6,3 %, за счет увеличения содержания CaF_2 до 5,3-5,8 %.

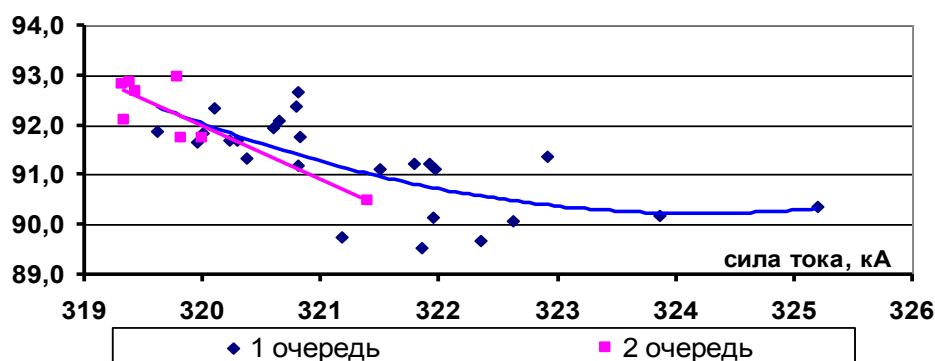


Рисунок 1.17. Зависимость средних показателей выхода по току (η)

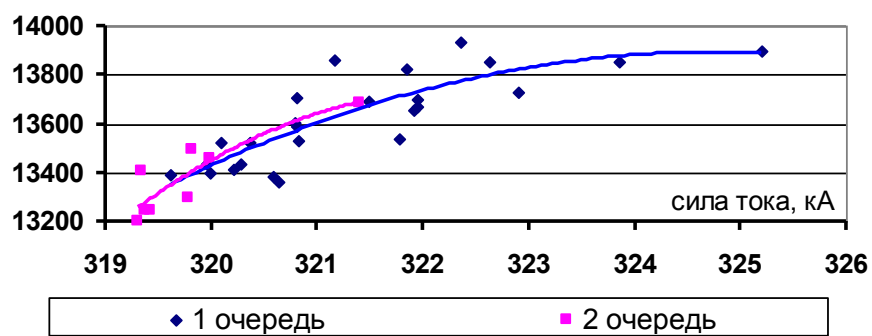


Рисунок 1.18. Зависимость средних показателей от удельного расхода электроэнергии ($W_{уд}$) для электролизеров обеих очередей.

2 Узлы и основные элементы электролизера

2.1. Измерение обратной электродвижущей силы

В системах управления электролитического производства алюминия для контроля технологического состояния электролизеров используется величина обратной электродвижущая сила (ЭДС ($E_{обр}$)), а точнее электрохимическая составляющая. В общем виде величина обратной ЭДС в основном зависит от плотности тока (силы тока и площади анода), температуры, концентрации глинозема в электролите, его состава и др.

При ошибке в задании компенсирующего значения ЭДС в системе АСУТП в 200 мВ и изменении тока серии на 15 %, что весьма вероятно на серии мощных электролизеров при одновременном возникновении нескольких анодных эффектов, ошибка в напряжении, которое поддерживается на заданном уровне составит 30 мВ.

Несоответствие заданного в АСУТП значения обратной ЭДС реальным величинам снижает эффективность работы системы, а в некоторых случаях приводит к технологическим нарушениям. Например, на электролизерах, у которых рост рабочего напряжения вызван увеличением обратной ЭДС при приближении анодного эффекта, система регулирования перемещает анод вниз. Уменьшение междуполусного расстояния в этих случаях может вызвать «тусклые», «мигающие» вспышки или «зажатие» электролизера, что особенно важно для ванн с большой силой тока. Сопротивление электролизеров, на которых возрастает сопротивление электролита за счет его науглероживания (при повышении температуры расплава, «зажатия» междуполусного расстояния или применения анодов с повышенной осыпаемостью), может восприниматься системой АСУТП как увеличение МПР, что приводит к опусканию анодного массива и способствует дальнейшему расстройству технологического режима, вплоть до появления «шумов», для ликвидации которых требуется подъем МПР выше номинального значения.

По этой причине, компенсирующую ЭДС на электролизере желательно устанавливать равной величине электрохимической составляющей падения напряжения, но ввести ее отдельно для каждого электролизера, при отсутствии оперативного индивидуального контроля обратной ЭДС, практически невозможно. В связи с этим компенсирующую ЭДС в системах АСУТП обычно принимают одинаковой и равной среднему значению обратной ЭДС для данной конструкции и особенностей технологического процесса. Как правило, это значение выбирается на основании имеющихся практических данных и периодически уточняется экспериментальным способом.

Знание точных значений обратной ЭДС и сопротивления необходимо также для решения других задач теоретического и прикладного значения, в том числе, для правильного составления и анализа энергетических балансов, расчета оптимальной силы тока, более точного выбора междуполусного расстояния и т.п.

Измерение величины обратной ЭДС в промышленных условиях представляет сложную задачу. По существу, единственным методом определения

обратной ЭДС нашедшим практическое применение на производстве, является метод измерения «I-U кривой» при ступенчатом изменении тока серии. Экспериментальное определение ЭДС заключается в определении кривой ток (I) – напряжение (U_p), а именно к одновременной регистрации величины рабочего напряжения при различных значениях силы тока

Рабочее напряжение электролизера (U_p) может быть выражено как:

$$U_p = E_{\text{обр}} + U_{\text{оэ}} + U_{\text{к}}, \quad (1)$$

где: $U_{\text{оэ}}$ – омическое падение напряжения в электролите;

$U_{\text{к}}$ – падение напряжения в конструктивных элементах (анод, катод, ошиновка), линейно зависящих от силы тока.

При изменении силы тока величина рабочего напряжения изменяется нелинейно вследствие нелинейного изменения обратной ЭДС от плотности тока. По этой причине измерение обратной ЭДС должно производиться в интервале не менее 10 % от номинального значения силы тока.

2 июня 2010 года на электролизерах КЭЗ было произведено плановое снижение силы тока – с номинальной силы тока 320 кА до 270 кА. Снижение тока производилось ступенчато по ≈ 5 кА с последующим подъемом до номинального значения и выдержкой на каждой ступени ~ 3 мин для регистрации данных. Рабочее напряжение и сила тока на каждой ступени регистрировались с помощью системы АСУТП для отдельных электролизеров. Диаграмма изменения силы тока и рабочего напряжения на примере одного из электролизеров приведена на рисунке 2.1.

При обработке данных по единичным электролизерам была произведена выборка значений на достоверность. Как недостоверные принимались значения $E_{\text{обр}}$ менее 1.1 В (напряжение разложения глинозема на угольном аноде) и выше 2.1 В (напряжение разложения глинозема на инертном аноде), а также значения с коэффициентом корреляции линейной зависимости менее 0.9 (возможные ошибки регистрации системой, ванны с волнением металла, «больные» и др.).

Среднее значение обратной ЭДС электролизеров КЭЗ при силе тока 320 кА составило по единичным ваннам:

- для первой бригады – 1,830 В;
- для второй бригады – 1,781 В;
- для третьей бригады – 1,833 В;
- для четвертой бригады – 1,804 В;
- для пятой бригады – 1,693 В;
- для шестой бригады – 1,786 В;

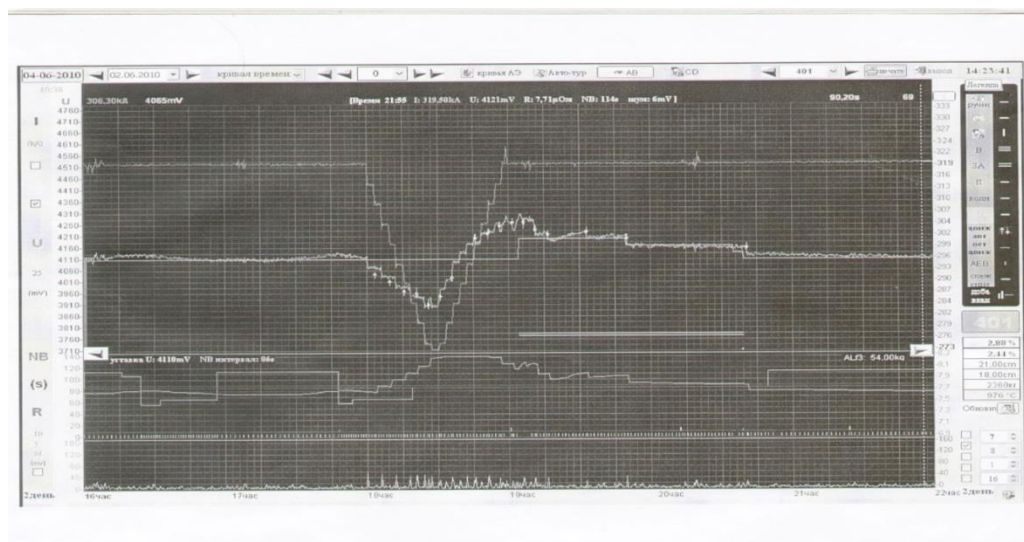


Рисунок 2.1. Диаграмма изменения силы тока и напряжения электролизера по данным АСУТП

- для седьмой бригады – 1,759 В;
- для восьмой бригады – 1,773 В.

Среднее значение $E_{обр}$ составило:

- по первой очереди 1,786 В;
- по второй очереди – 1,780 В;
- по заводу в целом – 1,783 В.

Среднее значение обратной ЭДС при измерениях, определенное по напряжению корпусов по вольтметрам, установленными на КПП, составило в среднем по заводу-1,747 В. При определении обратной ЭДС исключалась величина падения напряжения в общей серийной ошиновке, которая составила 17 В на корпус или 59 мВ на 1 электролизер.

Измеренная величина обратной ЭДС имеет достаточно высокое значение, что свидетельствует о хорошем и стабильном технологическом состоянии ванн при применяемых технологических параметрах (температура электролита, криолитовое отношение, уровни металла и электролита, концентрация глинозема) и качестве управления АСУТП.

Распределение обратной ЭДС в интервале его изменения приведены на рисунке 2.2.

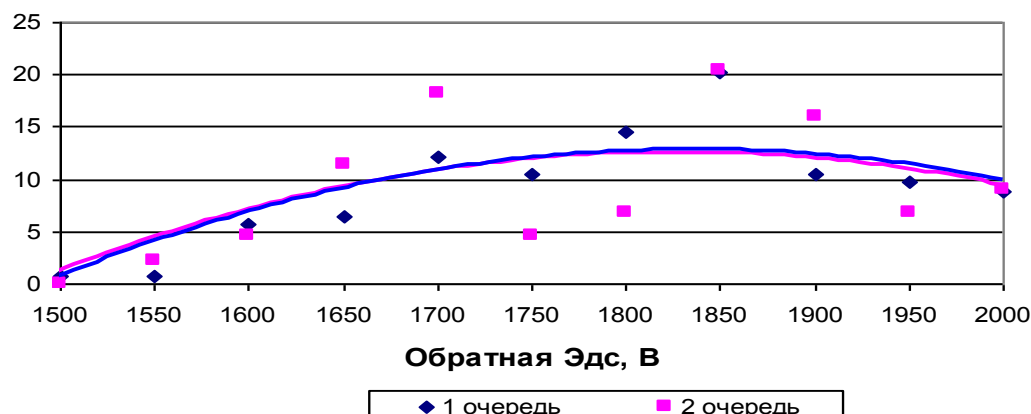


Рисунок 2.2. Распределение обратной ЭДС электролизеров 1 и 2 очереди

На рисунке 2.3 приведены гистограммы распределения $E_{обр}$ по первой и второй очереди.

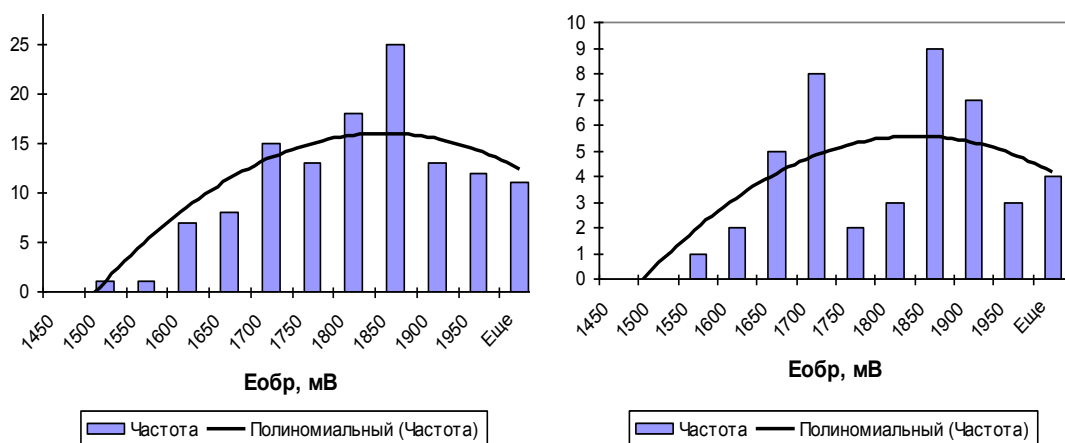


Рисунок 2.3. Гистограмма распределения $E_{обр}$ по 1-ой и 2-ой очереди

Средние характеристики распределения обратной ЭДС на электролизерах 1 и 2 очереди примерно одинаковые.

С учетом измеренной площади огарков для каждой из бригад, получена зависимость $E_{обр}$ от анодной плотности тока (рис. 2.4). Измеренная площадь огарков изменялась от 84 % (бригада № 3) до 95 % (бригада № 6) при среднем значении по всем бригадам 91 % от номинального значения. В этом интервале изменения средней площади анода, изменение $E_{обр}$ составило 50 мВ, что свидетельствует о значимости данного фактора.

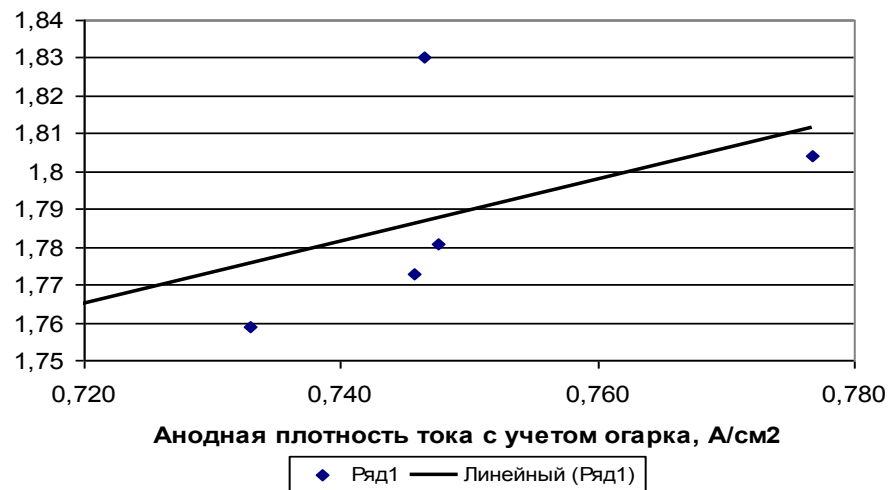


Рисунок 2.4. Зависимость $E_{обр}$ от анодной плотности тока (с учетом площади огарка)

На момент измерения $E_{обр}$ на заводе применяются аноды 3 различных марок: Джининг (бригады №1,2), Ван-Фанг (бригада 8), Орион ДТО (бригады № 3-7). В среднем для каждого типа анодов, сьем угольной пены в мае 2010 г. составил соответственно: 1,25 кг/т, 1,2 кг/т, 9,4 кг/т.

Средние значения $E_{обр}$ для анодов различного качества составили:

- для анодов Джининг (бригады № 1,2) – 1,802 В;
- для анодов Ван-Фанг (бригада № 8) – 1,773 В;
- для анодов Орион ДТО (бригады № 3-7) – 1,776 В.

Построена зависимость величины $E_{обр}$ от количества снимаемой пены на рисунке 2.5.

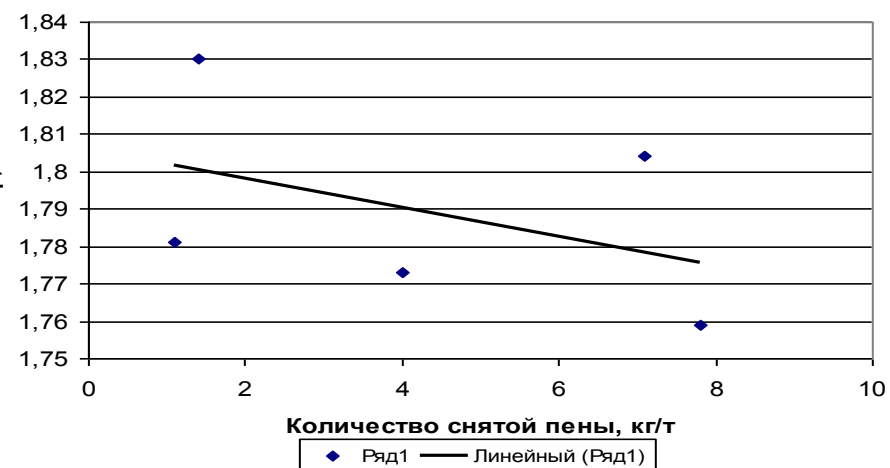


Рисунок 2.5. Зависимость величины $E_{обр}$ от количества снимаемой пены

Количество снимаемой пены для разных бригад изменялось от 1,2 кг/т (аноды Ванг-Фанг, бригада № 8) до 7,8 кг/т (аноды Орион ДТО, бригада № 6). В этом интервале изменения съема угольной пены, изменение $E_{обр}$ составило 25 мВ, что свидетельствует о неопределяющем влиянии данного фактора.

Центральная заводская лаборатория (ЦЗЛ) КЭЗа выполнила анализ проб электролита, отобранных с 8 электролизеров № 716, 717, 728, 729, 816, 817, 830, 831 (бригады № 7,8). В отобранных пробах электролита заметного количества углерода не обнаружено. Можно предположить, что углерод, поступающий в электролит от осыпания анодов, в основном, всплывает на поверхность электролита в неполяризованном состоянии и в электрохимических процессах на подошве анода не участвует. По этой причине, значение обратной ЭДС от качества анодов не имеет определяющего значения.

Выявлена существенная зависимость $E_{обр}$ от криолитового отношения и температуры электролита. Изменение обратной ЭДС в составило:

- 80 мВ для интервала изменения температуры электролита 945-967 °С;
- 90 мВ для интервала изменения КО 2,15-2,40.

Наименьшие значения $E_{обр}$ получены на ваннах с высоким криолитовым отношением и высокой температурой электролита (рисунки 2.6, 2.7).

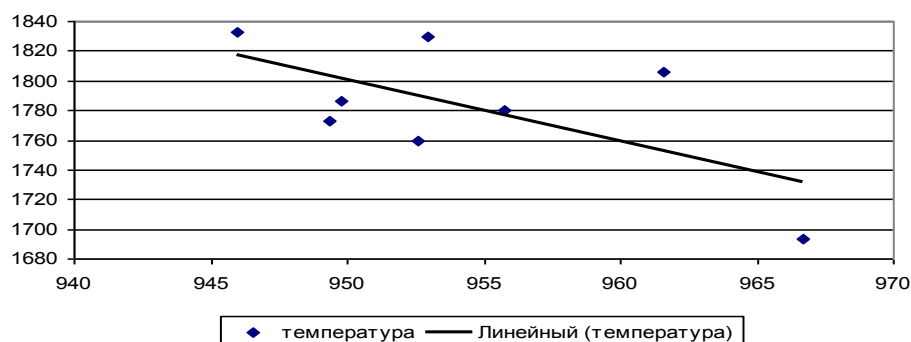


Рис.2.6 Зависимость $E_{обр}$ от температуры электролита

Величину обратной ЭДС можно также определить расчетным методом. Наиболее близкие к реальным значениям $E_{обр}$ получаются при использовании формулы У.Хаупина. Данная формула является наиболее полной, т.к. в ней задействовано наибольшее количество «влияющих» факторов, в том числе не только состав электролита и технологические параметры, но геометрия электролизера и др.

Расчетное значение обратной ЭДС для электролизеров КЭЗ, полученное с использованием формулы У.Хаупина с учетом фактических технологических параметров и силе тока 320 кА составило:

- для первой очереди – 1,736 В;
- для второй очереди – 1,755 В.

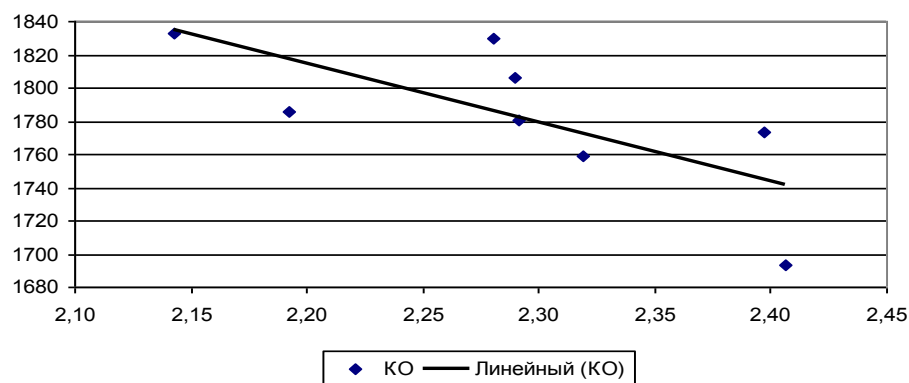


Рис.2.7 Зависимость $E_{обр}$ от криолитового отношения

При увеличении силы тока с 320 кА до 350 кА, при расчетной концентрации 1,5-3,0 %, изменение обратной ЭДС составит 1,715-1,769 В и 1,724-1,778 В соответственно. Увеличение обратной ЭДС составляет около 9 мВ, что не является определяющим фактором.

Сравнительные данные расчетов и измерений обратной ЭДС, выполненные на различных заводах и типах электролизеров, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Измеренная и расчетная величина обратной ЭДС, В

Тип эл-ра	Завод		Сила тока, кА	Плотность тока, А/см ²	$E_{обр}$, В измеренная	$E_{обр}$, В рассчитанная при е концентрации глинозема 1,5-3 %
БТ	КАЗ	1К	84,5	0,83	1,639	1,694 - 1,721
	КАЗ	2К	84,5	0,83	1,642	
ВТ	ВгАЗ	С-2	133,3	0,72	1,472	1,686 - 1,712
ОА	КАЗ	КАЗ-90	92,2	0,77	1,888	1,691 - 1,717
	УАЗ	1Н	167,0	0,73	1,697	1,680 - 1,705
	УАЗ	1Н	167,0	0,73	1,728	
ОА	УАЗ	СУАЛ-300	302,4	0,68	1,762	1,708 – 1,762
ОА	УАЗ	СУАЛ-300	329,4	0,74	1,792	1,717 – 1,771
ОА	КЭЗ	GAMI-320	320,0	0,71	1,786	1,715 – 1,769
ОА	КЭЗ	NEUI-330	320,0	0,71	1,780	

Как видно, измеренная величина обратной ЭДС на КЭЗе, в соответствующем диапазоне анодной плотности и силы тока, соответствует ее значениям на других заводах, в том числе на заводах, работающих с высокими технико-экономическими показателями и выходе по току более 92 %.

2.2 Анодный узел

Состояние анодного узла электролизеров, для всех типов применяемых анодов, можно оценить как удовлетворительное. С момента установки анодов высота глиноземной засыпки на них составляет 3-6 см, которая по мере срабатывания анодов увеличивается. Основная часть рабочих анодов засыпана под уровень середины ниппеля, а суммарная высота криолито-глиноземной корки и свежего глинозема составляет 36-45 см, из которых высота слоя свежего глинозема в среднем составила 5,3 см. В результате подобного ведения

технологии, температура засыпки на анодах и корке составляет 180-230 градусов, что обеспечивает минимальное количество бесполезного тепла отдаваемого верхом анодного массива, сохраняя его в объеме, в котором ведется процесс электролиза.

С начала пуска завода на электролизерах применялись аноды различных марок. Наибольшие проблемы с эксплуатацией электролизеров вызывали аноды марок «Аохай» и «Тианли», при использовании которых удельный съём пены достигал 30 кг/т. От применения таких марок отказались достаточно быстро. На начало июня 2010 года на заводе используются аноды 3 марок: Орион ДТО (бригады № 3-7), Джининг (бригады № 1, 2) и Ван Фанг (бригада № 8). Основные свойства анодов данных типов, по предоставленным сертификатам качества, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Свойства анодов по сертификатам качества

№	Свойства	Ед. изм.	«Джининг»	«Орион ДТО	«Ван-Фанг»
1	Действительная плотность	кг/дм ³	2,075	2,072-2,074	
2	Кажущаяся плотность	кг/дм ³	1,580-1,581	1,58-1,59	1,56
3	Уд. электросопротивление	мкОм·м	52,6-56,1	53,2-53,5	55
4	Предел прочности на изгиб	МПа	9,84-10,34	11,6-11,7	9,5
5	Предел прочности на сжатие	кг/см ²	38,3-38,5	43,3-43,5	35
6	Теплопроводность	Вт/(м·К)	3,95-4,08	4,1-4,2	4,5
7	Реакционная способность в токе CO ₂ :				
7.1	остаток	%,	88,31-88,59	90-91	88
7.2	осыпаемость	%	2,76-3,18	3,4-3,5	6
7.3	окисление	%	8,51-8,65	5,3	6
8	Реакционная способность в токе воздуха:				
8.1	остаток	%,	90,17-90,23	94	92
8.2	осыпаемость	%	1,48-1,58	4,2-4,5	5
8.3	окисление	%	8,25-8,29	2,4-2,7	3
9	Зольность	%	0,35-0,37	0,34-0,39	0,5
10	Открытая пористость	%	23,7-24,3	23,27-23,82	
11	Коэффициент теплового расширения	10-6, К	4,02-4,20	4,1	

По данным сертификатов, отметим следующие характеристики:

- наименее плотные аноды марки «Ван-Фанг», наиболее плотные – «Орион ДТО». Данный показатель не всегда отражает качество анода (пористость), поскольку во многом зависит от способа его изготовления, а именно от слоистости получаемой структуры;

- аноды «Орион ДТО» имеют меньшее удельное электросопротивление по сравнению с «Ван-Фанг», аноды «Джининг» занимают среднее положение по этому показателю. Можно ожидать меньшего падения напряжения в анодах марки

«Орион ДТО», однако определяющим фактором для этого является температура анодов, т.е. степень их утепления глиноземом;

- аноды «Джининг» имеют наименьшую, а «Ван-Фанг» наибольшую теплопроводность, что способствует снижению бесполезных потерь тепла через анодный массив при применении анодов «Джининг»;

- окисляемость в токе CO_2 и на воздухе наибольшая, а осыпаемость наименьшая у анодов марки «Джининг», аноды других марок примерно одинаковы;

- по совокупности характеристик аноды «Джининг» и «Орион ДТО» имеют преимущество перед анодами «Ван-Фанг».

Практический интерес представляет сравнение эксплуатационных характеристик применяемых типов анодов. Первичные результаты измерения огарков за период февраль-май 2010 г. В таблице 2.3 приведены результирующие характеристики работы разных типов анодов за данный период.

Таблица 2.3. Характеристики анодов

Тип анода	Площадь огарка исх, %	Ср. площадь анодов, м ²	Выход току, %	Съем пены, кг	Суточная скорость сгорания, см/сут	Расстояние ниппеля подошвы огарка анода, см	Расстояние ниппеля подошвы огарка анода, (цикл дней, расчет), см
Орион ДТО	90,4	42,65	,60	7,85	1,39	5,16	3,78
Джининг SD	91,1	42,82	,65	1,90	1,35	6,29	4,95
Ван-Фанг	92,1	43,02	,00	2,73	1,36	5,86	4,50

Наибольший выход по току достигнут на анодах марок «Джининг» и «Орион ДТО» и он выше, чем на электролизерах с анодами «Ван-Фанг» на 0,6-0,65 %.

На анодах этих же марок отмечена и наибольшая суточная скорость сгорания анода, составляющая 1,36-1,39 см/сут, что свидетельствует о высокой поверхностной активности анодов данного типа на рисунке 2.8.

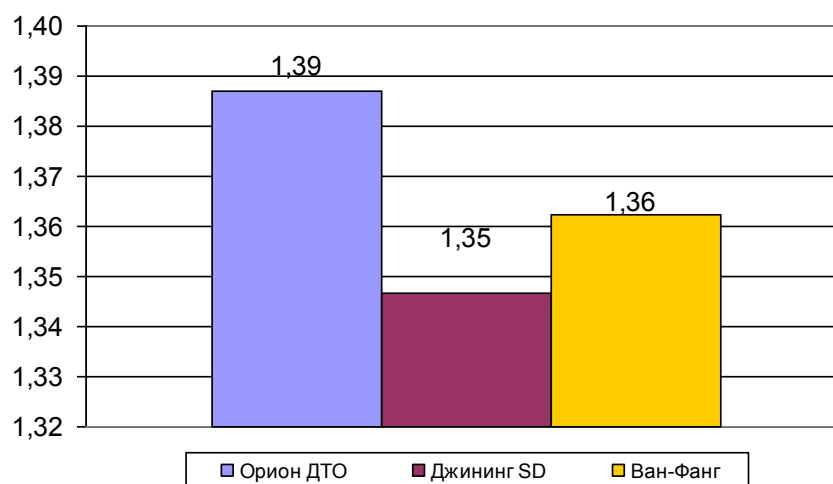


Рисунок 2.8. Расчетная суточная скорость сгорания анодов при электролизере для различного типа анодов, см/1сутки

В тоже время на анодах марки «Орион ДТО» отмечен наибольший съем угольной пены составляющий 7,85 кг/т, в то время как на анодах других марок он составляет 1,9-2,73 кг/т (рисунок 2.9). Выделим тот факт, что минимальный съем пены 1,9 кг/т отмечен у анодов марки «Джининг», имеющих наибольшую окисляемость, но и наименьшую осыпаемость в токе CO_2 и на воздухе. Полученные показатели по количеству снятой пены не корректируются с показателями плотности анодов (таблица 2.3). С остальными характеристиками анодов явных зависимостей также не имеется.

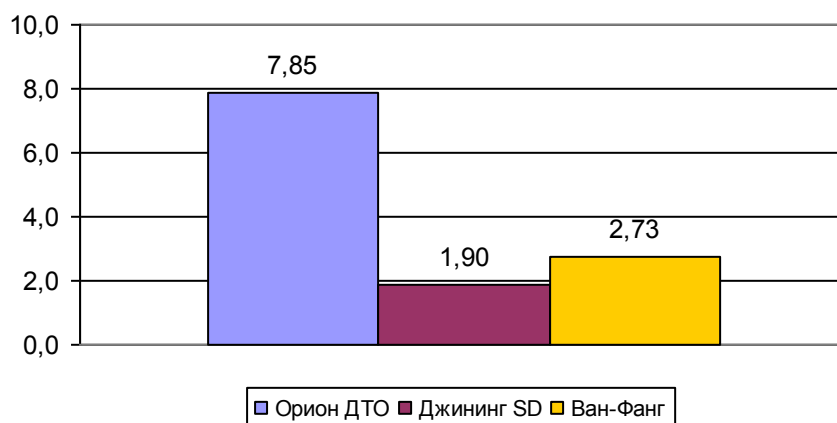


Рисунок 2.9. Количество снятой пены для различного типа анодов, кг/т

Гистограммы распределения расстояния между низом ниппеля и подошвой анодов, построенная для всех огарков за период февраль-май 2012 г. приведена на рисунке 2.10.

Как видно, около 13 % анодов имеют расстояние до нижней поверхности ниппеля менее 5 см, что на наш взгляд свидетельствует о критичности работы таких анодов при цикле 28 дней.

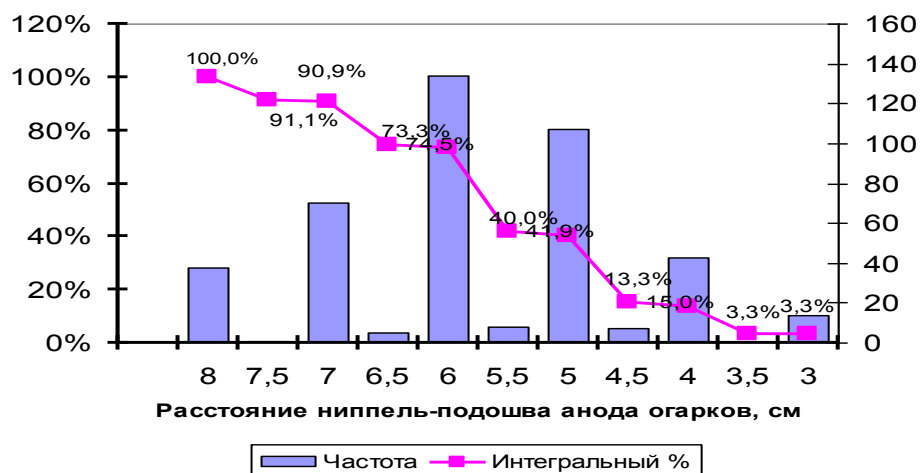


Рисунок 2.10. Распределение расстояния от ниппеля до подошвы огарков анодов

Анализ высоты огарков различных типов анодов за тот же период показал на существенное их отличие. Диаграмма распределения расстояния между низом ниппеля и подошвой анодов, построенная по средним размерам огарков для разных типов анодов приведена на рисунке 2.11.

Аноды марки «Джининг», имея минимальное количество снятой пены и достаточно высокую реакционную способность, имеют заметно больший размер огарка и максимальное расстояние от подошвы до ниппеля, по сравнению с другими типами.

Аноды марки «Орион ДТО» имеют минимальную высоту огарка и, соответственно, наименьшее расстояние от подошвы до ниппеля. При этом для анодов данного типа отмечен наибольший съём пены и наименьшая площадь огарка (таблица 2.3). Можно предположить, что высокая реакционная способность и высокий выход по току на этих анодах вызваны также и большей фактической анодной плотностью тока на них, по сравнению с другими типами анодов. Это в принципе допустимо, но создает большую предрасположенность электролизеров, оснащенных анодами данного типа, к развитию МГД-неустойчивости («шумы») при приближении к ее критическому значению.

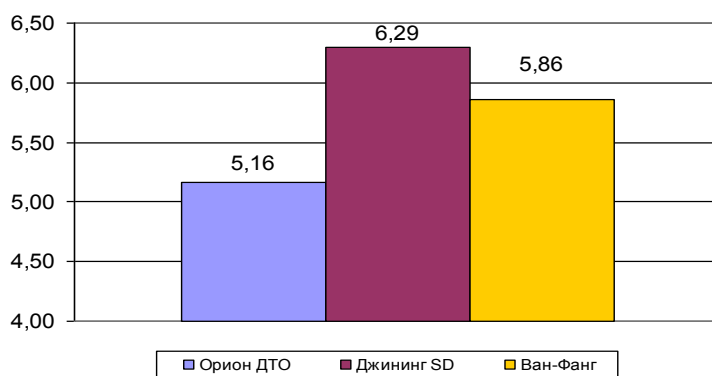


Рисунок 2.11. Расстояние ниппель – подошва анода (по огарку) для разных типов анодов

Аноды марки «Ван-Фанг» занимают по этим показателям промежуточное положение. В то же время аноды данной марки имеют наибольшую площадь огарка и небольшую осыпаемость (таблица 2.3), но при этом и наиболее низкий показатель выхода по току из применяемых типов анодов. Следовательно, реакционная способность на анодах данного типа понижена, что вероятно связано с особенностями структуры анодов (слоистость), несмотря на их меньшую плотность по сравнению с другими типами анодов (таблица. 2.2).

Представляет интерес сравнение анодов различных типов при возможном увеличении цикла замены анодов. Сравнительная диаграмма расстояния от ниппеля до подошвы огарка анода для существующего цикла 28 дней (факт) и циклов 29 и 30 дней (расчет) приведена на рисунке 2.12.

Если считать минимально допустимым расстоянием от подошвы огарка анода до ниппеля 4,0-4,5 см, то из расчетов следует, что цикл 30 дней для

применяемых типов анодов недопустим. Можно с большой долей вероятности предположить, что аноды марки «Джининг» могут работать при цикле 29 дней без осложнений технологического процесса. Можно рекомендовать на электролизерах, оснащенных анодами марки «Джининг», перевод на цикл замены анодов 29 дней. Перевод на цикл 29 дней на электролизерах с анодами марок «Ванг-Фанг» и «Орион ДТО» проблематичен.

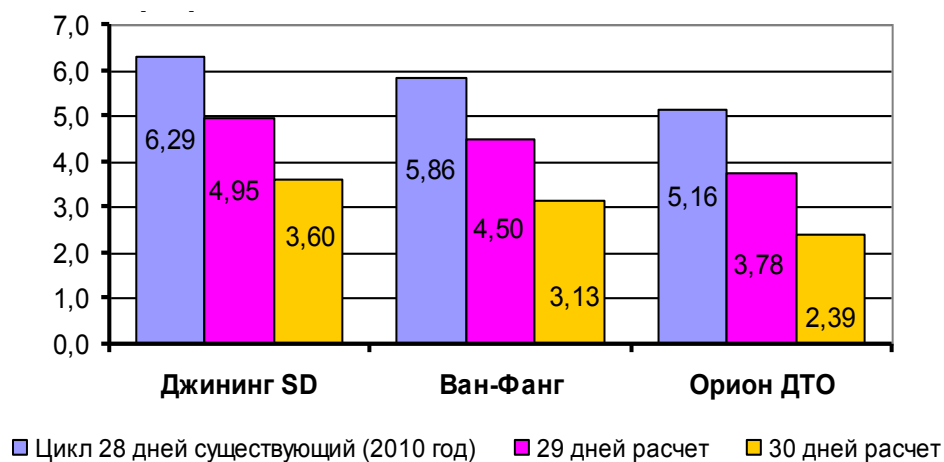


Рисунок 2.12 Расстояние ниппель-подошва огарка анода при различных циклах замены анодов

При исследовании огарков в анодно-монтажном отделении завода обнаружено достаточно много огарков с сильно скошенными гранями. Фотография таких анодов приведена на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13. Огарки (фотография)

Подобные огарки – обычное явление для поверхностей анодов, обращенных к середине электролизера, особенно в зоне пробойников АПГ. Различные

исследовательские работы по защите данной области (напыление алюминием, предварительный нагрев анодов, увеличение расстояния между рядами анодов и др.) не дали практических, достаточно экономических решений. Наиболее эффективным способом защиты анодов, устанавливаемых в зоне пробойников, остается их оплескивание электролитом, которое производится вручную или кратковременным опусканием анодов в электролит перед их установкой, применение которых можно рекомендовать и для КЭЗа.

Проанализирована схема замены анодов на электролизерах КЭЗ. В настоящее время применяется следующая очередность замены анодов (начиная с 1 анода на стороне А):

А1; В6; А8; В3; А5; В10; А2; В7; А9; В4; А6; В1; А3; В8; А10; В5; А7; В2; А4; В9 и т.д. Данная схема предусматривает одновременную замену 2 анодов и рассчитана на цикл 28 дней. Для анализа схемы замены применены следующие параметры:

$T_{нс}$ – время замены между напротив стоящими анодами, сутки и $T_{рс}$ – время замены между рядом стоящими анодами, сутки. Результаты приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Схема замены анодов

Параметр	Сторона	Номер анода									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{нс}$	А	15	15	15	16	15	16	16	15	16	16
	В	13	13	13	12	13	12	12	13	12	12
$T_{рс}$	А	9	8	8	9	8	8	9	8	8	
	В	9	8	9	8	9	8	8	9	8	

Приведенные параметры свидетельствуют о правильной и близкой к оптимальной применяемой схеме замены анодов. Время замены напротив стоящих анодов составляет 12-16 дней, что практически соответствует «идеальному» времени 14 суток, т.е. половина полного цикла замены. Замена торцевых противостоящих анодов также производится через 12-16 дней. Время замены рядом стоящих анодов составляет 8-9 дней, что вполне достаточно для их прогрева и работы в нормальном токовом режиме.

Применение данной схемы замены анодов, наряду с другими факторами, в первую очередь схемой ошиновки, обеспечивают достаточно равномерное распределение токов по анодам и сторонам электролизера. По результатам измерений получено следующее распределение тока по сторонам:

- электролизеры 1 очереди: сторона А-50,4 % (интервал 48,3-51,9 %), сторона В-49,6 % (интервал 48,1-51,7 %);
- электролизеры 2 очереди: сторона А-49,9 % (интервал 45,5-52,9 %), сторона В-50,1 % (интервал 47,1-54,5 %).

2.3 Электролит

2.3.1 Состав электролита и возможности его оптимизации

Электролит – важнейшая составляющая электролизера для получения алюминия. Он проявляется практически во всех аспектах работы электролизера, важнейшими из которых являются технологический и энергетический режим.

Поскольку различные составы электролита по-разному влияют на параметры и показатели электролиза, одновременно улучшая одни из них и ухудшая другие, то фактически не существует оптимального состава электролита пригодного для всех конструкций и определяемого качеством сырья, условиями обслуживания и эксплуатации, энергетическими и магнитогидродинамическими характеристиками присущими для данной конкретной конструкции. Из анализа технико-экономических показателей (глава 3) следовало, что для электролизеров КЭЗа, существующие уровни металла, электролита и МПР близки к оптимальным значениям. Возможные резервы по улучшению ТЭП могут быть использованы при оптимальном соотношении силы тока, состава электролита и технологических параметров электролиза.

Температура электролита на всех ваннах изменялась от 945 до 964 °С, хотя наилучшие показатели для этих ванн получены при температуре 950-955 °С.

Состав электролита поддерживается достаточно устойчиво и разброс характеристик электролита по его составляющим находится в допустимых пределах.

Расходные коэффициенты по фтористому алюминию электролизеров 1 очереди составляют около 15 кг/т Al.

На электролизерах КЭЗ 1 и 2 очереди расходы фтористого кальция близки по своим значениям (1,2-1,45 кг/т Al). При стабильной технологии электролиза это соответствует практическим потребностям.

Криолитовое отношение выдерживается довольно равномерно по электролизерам (среднее около 2,35). Применяется схема корректировки электролита фтористым алюминием по температуре электролита. Для более качественного и достоверного контроля криолитового отношения и состава электролита, на мой взгляд, целесообразно отбирать пробы электролита два раза в неделю.

Как показала практика, получение максимальных технико-экономических показателей возможно только при снижении температуры ликвидуса и температуры перегрева электролита. При этом сама температура электролита также снижается адекватно изменению температуры ликвидуса.

На обследованных электролизерах КЭЗа, прибором «ТЕМП» были проведены измерения температуры ликвидуса и температуры перегрева электролита. Результаты достоверных измерений после анализа кривых охлаждения (всего 17) приведены в приложении А.

Получены следующие результаты:

- на электролизерах 1 очереди температура ликвидуса составила в среднем 948,9 °С (диапазон 946,1-953,2 °С), перегрев электролита 8,9 °С (диапазон 5,0-12,6 °С);

- на электролизерах 2 очереди температура ликвидуса составила в среднем 934,6 °С (диапазон 927,0-949,9 °С), перегрев электролита 13,8 °С (диапазон 8,5-20,9 °С).

Измеренная величина перегрева электролита 13,8 градусов на электролизерах 2 очереди представляется завышенной. Несмотря на большой перегрев на этих ваннах, общее впечатление о работе электролизеров 2 очереди было иным. Возможно, это связано с недостаточным количеством измерений, поскольку значения перегревов, получаемые технологической группой в более массовом количестве, в среднем ниже измеренной.

В целом величина перегрева электролита и разброс значений по ним на ваннах КЭЗ достаточно велики. Ведущие зарубежные фирмы в своих рекламных проспектах указывают на оптимальную величину перегрева 5-8 °С, на практике она составляет 6-10 °С и является реально достижимой.

Наибольшее влияние на температуру перегрева оказывают криолитовое отношение (КО) и концентрация глинозема в электролите. По измеренным данным, построены зависимости перегрева электролита от указанных параметров (рисунки 2.14 и 2.15)

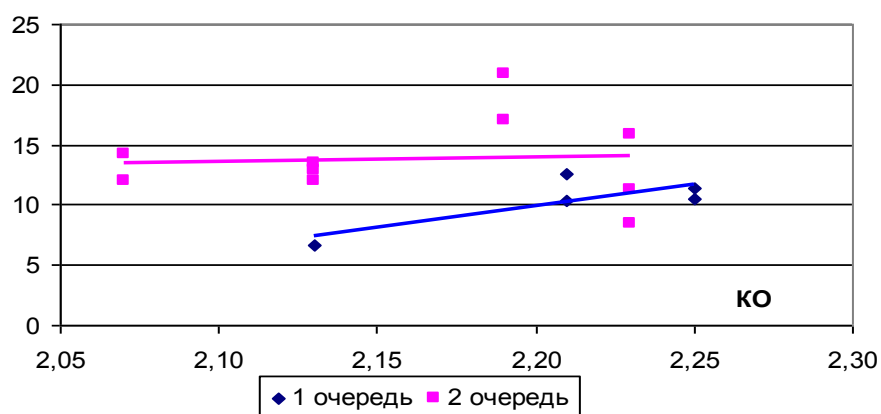


Рисунок 2.14. Зависимость перегрева электролита от криолитового отношения

Как видно, в целом зависимость перегрева от криолитового отношения проявляется и в наших измерениях. С уменьшением криолитового отношения температура ликвидуса и перегрева электролита уменьшается.

В главе 3 по показателям 1 и 2 очередей показано, что при снижении криолитового отношения, в существующем интервале значений криолитового отношения 2,25-2,36, температура электролита уменьшается, что приводит к увеличению выхода по току.

По литературным источникам известно о применении электролитов с криолитовым отношением 2,1-2,15 (избыток AlF_3 более 10 %), на которых выход по току достигает 94 %. Однако известно также, что имеется предельное нижнее значение криолитового отношения для получения максимального выхода по току, поскольку при его снижении происходит некоторое увеличение напряжения, а также зарастание рабочего пространства электролизера с соответствующими негативными последствиями.

Тем не менее, по величине криолитовое отношение для ванн КЭЗ 1 и 2 очередей, на мой взгляд имеется определенный резерв по его снижению до уровня 2,2-2,25. Снижение КО до таких величин целесообразно проводить группами

электролизеров с наблюдением за изменением их технологического и энергетического режимов.

Зависимость перегрева электролита от концентрации глинозема в электролите приведена на рисунке 2.15.

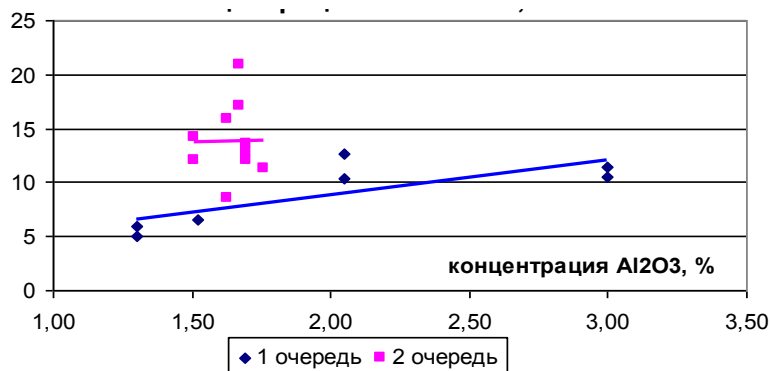


Рисунок 2.15. Зависимость перегрева электролита от концентрации глинозема, °С

Аналогично зависимости от криолитового отношения, при уменьшении концентрации глинозема температура ликвидуса и перегрева электролита падает. Эффективность поддержания минимальной концентрации глинозема в электролите полностью зависит от режимов работы АПГ и алгоритмов системы АСУТП, обеспечивающих работу АПГ на левой ветви зависимости сопротивления электролизера от концентрации.

Значительное влияние на окончательные показатели электролиза, оказывают добавки CaF_2 и MgF_2 в электролит, доля которых в общем составе имеет оптимум. Эти добавки снижают температуру плавления электролита, улучшают поверхностные свойства на границе с металлом, угольными материалами и газовой фазой, но повышают вязкость и плотность электролита, снижают его электрическую проводимость и растворимость в нем глинозема. Другие добавки, содержащие Li , $MgCl_2$ и т.д., как правило, по экономическим соображениям не используются.

На электролизерах КЭЗ 1 и 2 очереди с начала эксплуатации наблюдалось увеличение содержания CaF_2 до 5,3 % при снижении содержания MgF_2 до 0,7 %. При этом сумма добавок увеличилась с 5,5 % до 6,0 %. В главе 3 показано, что имеется минимум выхода по току и максимум расхода электроэнергии при

содержании CaF_2 4,5-4,75 %. Больше этого значения выход по току увеличивается, а расход электроэнергии снижается.

Известен состав электролита «Пешине» при котором содержание CaF_2 составляет 5-8 %, а MgF_2 не добавляется и рассматривается как фон. Следует иметь в виду, что при относительно больших содержаниях CaF_2 , сохранить плотность электролита, достаточную для обеспечения МГД-стабильности электролизера, возможно только при снижении криолитового отношения.

На мой взгляд для электролизеров КЭЗ целесообразно увеличить содержание CaF_2 в электролите до значений 5,5-6,5 %. При этом следует ожидать некоторого увеличения напряжения до 10-15 мВ, но увеличения выхода по току на 0.1-0,2 %. При выборе и корректировке состава электролита необходимо выбрать какой технологический режим предусматривается, как правило это энергоемкий или интенсифицированный режимы.

Для более точного выбора состава и корректирующих добавок к нему целесообразно пользоваться расчетными формулами для расчета его физико-химических свойств.

Для оценки эффективности применения существующих формул, проведен их анализ с учетом измеренных значений температуры ликвидуса и перегрева электролита.

В результате проведенного анализа установлено, что все известные нам формулы расчета, например, температуры ликвидуса (11 штук, в том числе формула Семьянинова) недостаточно точно соответствовали полученным результатам. Возможно это связано с малым количеством проведенных измерений (17 измерений) и несоответствием рассчитываемых составов реальному, в первую очередь КО, анализ которого производится 1 раз в неделю. Более точные результаты могут быть получены при соответствии измерений и отбора проб для большего массива данных. В конечном счете, могут быть получены формулы расчета свойств электролита, разработанные применительно к условиям КЭЗа. Расчет должен предусматривать корректировку существующих (имеющихся) формул, представляющих собой уравнения с линейными или степенными членами уравнения в количестве 5-10 штук. Возможно, достаточным будет введение корректирующей добавки, например -10-18 градусов (как в зарубежных публикациях), но можно разработать и более сложные зависимости, например применение нелинейных членов уравнения, тенденции по корректировке состава фторалюминием и др.

Проведены единовременные измерения температуры электролита в отдельных точках по сторонам и торцам на 3 электролизерах (всего 14 точек). Схема и результаты измерений представлены на рисунке 2.16 и в таблице 2.6. Измерениями установлено, что разность температур в отдельных точках значительно отличается между собой. Даже для напротив стоящих анодов разность температур доходила до 10-12 градусов. Максимальный размах температур составил на 3 ваннах 12-16 градусов. Несмотря на возможные погрешности измерений, локальные перегревы и переохлаждения в отдельных зонах, температурное поле неоднородно по своей структуре, вследствие различной нагрузки по анодам, теплоотдачи по отдельным точкам, перекоосу и

циркуляции металла. По этой причине ее среднее значение может в значительной степени не соответствовать значению температуры, измеренной в 1 точке, например в зоне выливного торца.

Возможно, внедрение контроля и регулирования только по температуре электролита требует тщательного подхода с обеспечением более точного методического обоснования ее применения для корректировки. Это может быть более широкое использование измеренных или расчетных значений перегрева, построение динамики и анализа отклика предыдущих корректировок фтористым алюминием на температуру электролита и другие факторы.

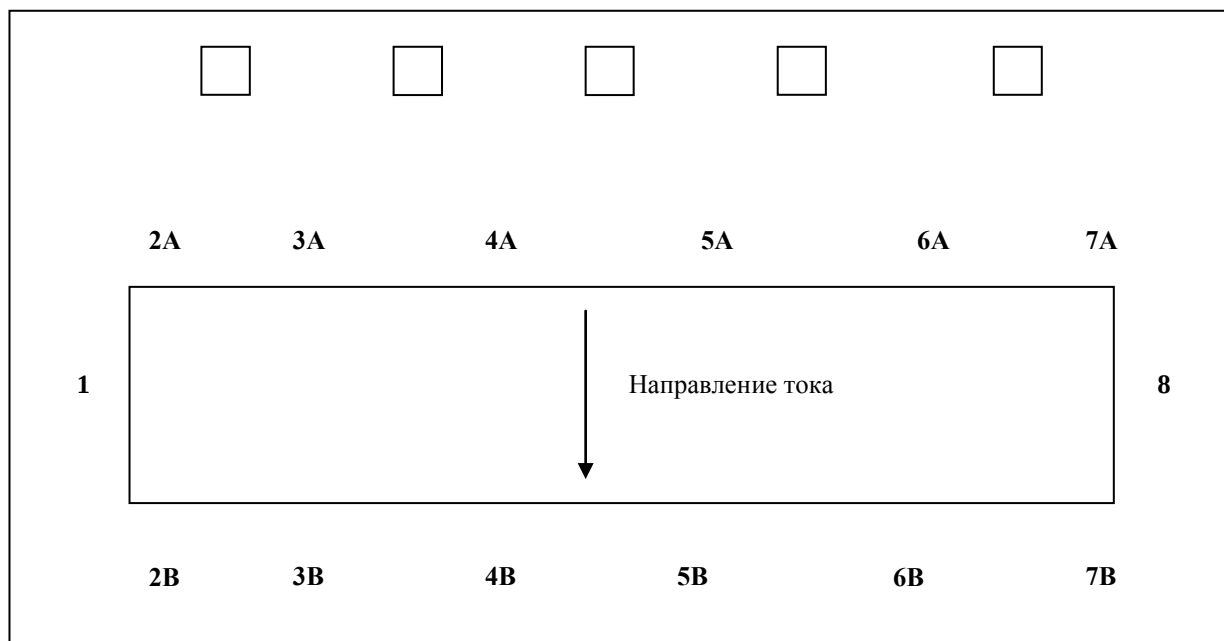


Рисунок 2.16. Схема измерений температурного поля электролизера

Таблица 2.5. Результаты измерений температуры электролита

№	Сторона	1	2	3	4	5	6	7	8	Размах
716	A	-	930	937	927	933	931	932	937	13
	B			935	931	940	940	933		
717	A	936	931	925	922	931	926	929	933	16
	B		931	932	934	938	933	-		
816	A	952	951	951	950	946	941	940	941	12
	B		940	941	940	942	942	940		
717A-717B			-	2	-4	-7	-9	-1		
716A-716B			0	-7	-12	-7	-7	-		
816A-816B			11	10	10	4	-1	0		

2.3.2 Предложение по применению калиевых электролитов

Применение солей калия в современных условиях обеспечения электролитического производства алюминия позволит заметно улучшить технико-экономические показатели процесса электролиза алюминия. Теоретически сущность положительного влияния добавок фтористого калия в

электролит заключается в снижении температуры процесса электролиза, что будет способствовать снижению затрат на производство алюминия.

-снижается поверхностное натяжение на границе раздела электролит-анод и смачиваемость анода газовыми пузырьками, в результате чего снижается газонаполнение в междуполюсном пространстве, улучшается отделение угольной пены от электролита и, как результат, происходит снижение падения напряжения в электролите и улучшение массообмена между пространствами борт-анод и междуполюсным зазором;

-улучшается растворимость глинозема в электролите, что особенно важно в условиях автоматизированного питания электролизеров глиноземом.

Увеличение межфазного натяжения на границе раздела металл-электролит при снижении криолитового отношения до 2,2 с учетом добавок фтористого калия будет способствовать снижению вероятности эмульгирования алюминия, улучшению сепарации металла и электролита, т.е. благоприятно воздействует на процесс электролиза алюминия. Кроме того, оно повышает стабильность поверхности раздела металл-электролит.

Температура электролита будет ниже температуры типового электролита, что с учетом физико-химических свойств (плотности, вязкости и электропроводности) будет способствовать не только повышению технико-экономических показателей процесса электролиза, но и улучшению экологических параметров работы электролизеров.

На основании вышесказанного считаю весьма перспективным разработать и испытать новый состав электролита с добавками солей калия, обеспечивающих снижение температуры электролиза алюминия и, соответственно, снижение расхода электроэнергии, увеличение силы тока, улучшение экологии производства.

В качестве сырья возможно использование отходов магниевого производства Усть-Каменогорского титано-магниевого комбината, а именно обезвоженный карналлит ($KCl \cdot MgCl$). Добавка карналлита в электролит составит около 5-8 %, при этом содержание KF в электролите составит до 2 %. Испытания целесообразно осуществить на 1-2 сравнительно “старых” электролизерах (со сроком службы >2лет), где графитизация угольной футеровки прошла полностью.

2.4 Ошиновка и магнитогидродинамические параметры электролизера

2.4.1 Конструкция ошиновки

Электролизеры 1 очереди (GAMI-320) и 2 очереди (NEUI-330) оснащены ошиновками различного типа. При этом конструкции ошиновок предусматривают использование следующих общих технических решений.

Межосевое расстояние между электролизерами равно 6.4 м и соответствует расстоянию, применяемому ведущими зарубежными фирмами.

Ошиновка асимметричная относительно центральной поперечной оси ванны.

Подвод тока к анодной ошиновке осуществляется 5 (пятью) стояками, расположенными на входной стороне в проекции анодного массива. Стояки в

плане расположены равномерно между 2-3, 6-7, 10-11, 14-15, 19-18 анодами или 3-4, 8-9, 15, 19-20, 24-25 блюмсами.

Проектное распределение тока по стоякам при номинальной силе тока 325 кА следующее:

- крайние стояки – 20.4 % (по 11 сдвоенных блюмсов). Сила тока по стоякам – 65,2 кА;
- средние стояки – 20.4 % (по 11 сдвоенных блюмсов). Сила тока по стоякам – 65,2 кА;
- центральный стояк – 18.5 % (10 сдвоенных блюмсов). Сила тока по стояку – 59,3 кА.

Анодная ошиновка цельная с 5 (пятью) перемычками, расположенными на одной оси со стояками в местах подключения их гибкой части.

Стояки выполнены из вертикальной жесткой части, горизонтальной жесткой и гибкой частей, обеспечивающих верхнее положение оси головки стояка на уровне среднего положения анодной ошиновки. Соединение элементов ошиновки выполнено с помощью аргонно-дуговой сварки при ее монтаже. Видимых дефектов контактных соединений не отмечено.

Конструкция стояка обеспечивает замену анодов краном-манипулятором.

Схемы ошиновки и способы подвода подключенных блюмсов к стоякам для электролизеров 1 и 2 очереди различны.

Схема ошиновки 1 очереди (GAMI-320) приведена на рисунке 2.17.

Пакеты катодной ошиновки располагаются параллельно продольным сторонам электролизера на разных уровнях. Пакеты входной стороны расположены на 7-ми уровнях относительно уровня подины (мм): Z= -442; -535; -665; -782; -1122; -1132; -1172. Пакеты выходной стороны расположены выше пакетов входной стороны и имеют 3 уровня относительно подины Z= -185; -215; -245 мм. Катодная ошиновка секционированная:

- с входной стороны (А) - 7 секций,
- с выходной стороны (В) - 5 секций.

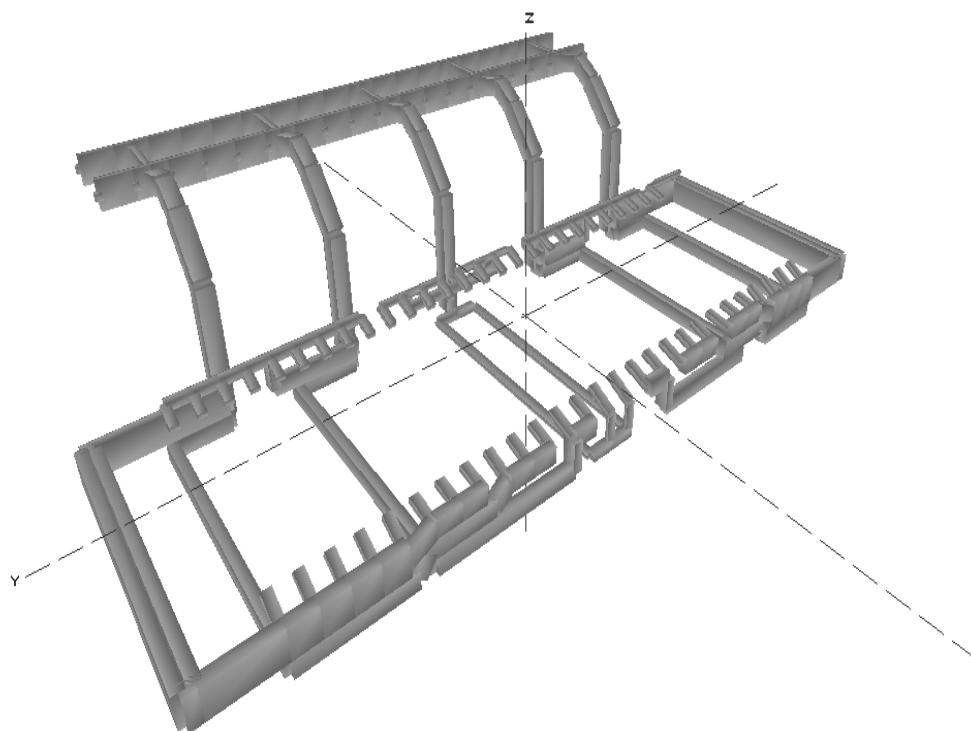


Рисунок 2.17. Схема ошиновки электролизеров 1 очереди

Сборные пакеты ошиновки входной стороны имеют 3 (три) пакета (8+3 подключенных сдвоенных бجومсов) по глухому торцу и 2 (два) пакета (3+7 сдвоенных бجومсов) по выливному торцу, а также и 4 (четыре) пакета (2+1+1+2 сдвоенных бجومсов) под днищем электролизера.

Пакеты под днищем расположены между шпангоутами днища. Доля тока по пакетам под днищем – 22,2 % от тока входной стороны.

Обводные пакеты с входной стороны огибают торец на уровне $Z = -665$ мм и на той же отметке проходят вдоль выходной стороны до соединения с крайними стояками следующего электролизера. Доля тока по пакетам: по глухому торцу 40,8 %, по выливному торцу 37,0 %, всего по торцевым пакетам 77,8 % тока входной стороны.

Сборные пакеты ошиновки выходной стороны имеют 5 (пять) пакетов (9+4+4+9+1 подключенных сдвоенных бجومсов), выполненных с противоточными участками.

Подвод тока к стоякам осуществляется следующим образом:

1. Ток к крайним стоякам (11 сдвоенных бجومсов) подводится:
 - с глухой стороны обводными пакетами 8+3 бجومса входной стороны;
 - с выливной стороны обводными пакетами 7+3 бجومса входной стороны.
2. Ток к средним стоякам (11 сдвоенных бجومсов) подводится от 9 бجومсов выходной стороны с противоточными участками и пакетом под днищем (2 бجومса) с входной стороны электролизера.
3. Ток к центральному стояку (10 сдвоенных бجومса) подводится от 2 пакетов центральных бجومсов выходной стороны (по 4 бجومса с противоточными участками) и пакетом под днищем (2 бجومса) с входной стороны.

Таблица 2.6.Количество подключенных к стоякам сдвоенных бجومсов

№ стояка Сторона	1	2	3	4	5
А	8+3	2	2	2	7+3
В	-	9	4+4	9	1
Всего	11	11	10	11	11

Сечение шин стояков электролизеров:

- крайние стояки – $20 \times 40 \cdot 2$. Плотность тока в шинах стояка – $40,7 \text{ А/мм}^2$.
- средние стояки – $18,5 \cdot 40 \cdot 2$. Плотность тока в шинах стояка – $44,0 \text{ А/мм}^2$.
- центральный стояк – $16,5 \cdot 40 \cdot 2$. Плотность тока в шинах стояка – $44,9 \text{ А/мм}^2$.

Схема ошиновки 2 очереди (NEUI-330) приведена на рисунке 2.18.

Пакеты катодной ошиновки располагаются параллельно продольным сторонам электролизера на разных уровнях. Пакеты входной стороны расположены на 5-ти уровнях относительно уровня подины (мм): $Z = -660$; -910 ; -1010 ; -1260 ; -1285 . Пакеты выходной стороны расположены на одном уровне относительно подины $Z = -970$ мм. Таким образом, катодная ошиновка 2-й очереди более унифицирована чем ошиновка 1-й очереди (меньшее количество уровней по сторонам). Катодная ошиновка секционированная, с входной стороны (А) 8 секций, с выходной стороны (В) 6 секций.

Сборные пакеты ошиновки входной стороны имеют 3 (три) пакета ($5+5+2$ подключенных сдвоенных бجومсов) по глухому торцу и 2 (два) пакета ($3+5$ сдвоенных бجومсов) по выливному торцу, а также 2 пакета, состоящие по 1 сдвоенному крайнему бجومсу и 2 (два) пакета от 3 сдвоенных бجومсов расположенных под днищем электролизера.

Пакеты под днищем расположены между шпангоутами днища. Доля тока по пакетам под днищем – $11,1 \%$ от тока входной стороны, при этом доля тока крайних бجومсов отнесена к торцевым пакетам.

Доля тока по пакетам: по глухому торцу $48,8 \%$, по выливному торцу $40,8 \%$, всего по торцевым пакетам $88,9 \%$ тока входной стороны.

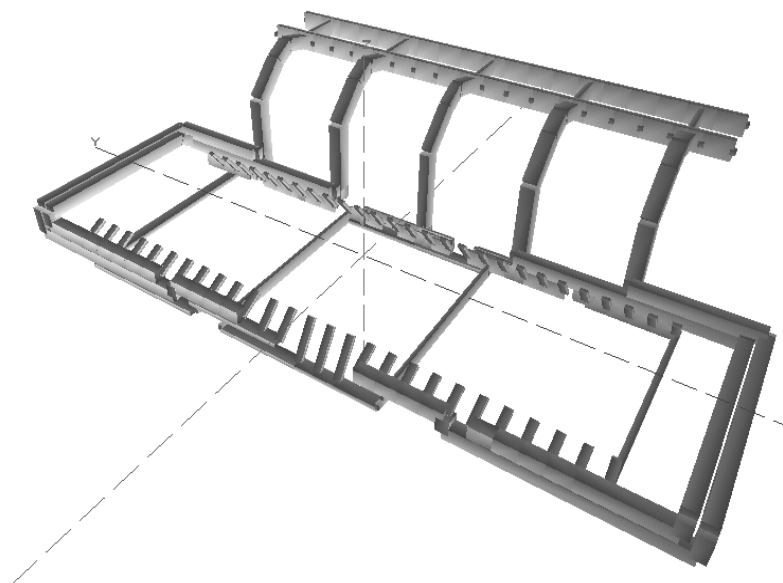


Рисунок 2.18. Схема ошиновки электролизеров 2 очереди

Обводные пакеты входной стороны огибают выливной торец на уровне $Z = -380$ мм и на отметках $Z = -260$; -600 мм проходят вдоль выходной стороны до соединения со стояками следующего электролизера.

Глухой торец обводные пакеты входной стороны для компенсации соседнего корпуса огибают выше, чем на выливном ($Z = -260$ мм) и на отметках $Z = -260$; -600 мм проходят вдоль выходной стороны до соединения со стояками следующего электролизера.

Сборные пакеты ошиновки выходной стороны имеют 6 (шесть) пакетов ($3+6+3+4+6+5$ подключенных сдвоенных бجومсов), выполненных с противоточными участками и петлями.

Подвод тока к стоякам осуществляется следующим образом:

1. Ток к крайним стоякам (11 сдвоенных бجومсов) подводится:
 - с глухой стороны торцевыми пакетами $1+5+2$ бجومса входной стороны и пакет из 3 бجومсов выходной стороны
 - с выливной стороны торцевыми пакетами $1+5$ бجومса входной стороны и пакетом из 5 бجومсов выходной стороны.
2. Ток к средним стоякам (11 сдвоенных бجومсов) подводится пакетом от 5 бجومсов входной стороны, а также пакетом от 6 бجومсов выходной стороны с противоточными участками и петлями.
3. Ток к центральному стояку (10 сдвоенных бجومса) подводится пакетом от 3 бجومсов входной стороны, расположенным под днищем, а также 2 пакетами ($3+4$ сдвоенных бجومса) с выходной стороны с противоточными участками и петлями.

Таблица 2.7. Количество подключенных к стоякам сдвоенных бجومсов

№ стояка Сторона	1	2	3	4	5
А	$1+5+2$	5	3	5	$5+1$
В	3	6	$3+4$	6	5

Всего	11	11	10	11	11
-------	----	----	----	----	----

Сечение шин стояков электролизеров:

- крайние стояки – 20×40×2. Плотность тока в шинах стояка – 40,7 А/мм²;
- средние стояки – 20×40×2. Плотность тока в шинах стояка – 40,7 А/мм²;
- центральный стояк – 15×40×2. Плотность тока в шинах стояка – 49,4 А/мм².

Сравнительный анализ схем ошиновок 1 и 2 очереди показывает следующее:

1. схема ошиновки 2 очереди в большей степени секционирована, так на 1 очереди имеется 12 пакетов (7А+5В), а на 2 очереди 14 пакетов (8А+6В);
2. на электролизерах 2 очереди увеличена доля тока по торцевым пакетам (88,9 % и 77,8 % соответственно 2 и 1 очереди), за счет уменьшения доли тока в пакетах под днищем (11,1 % и 22,2 % соответственно), что способствует лучшей МГД-устойчивости ванн, за счет более полной компенсации вертикальной составляющей магнитного поля в торцах электролизера;
3. На электролизерах 2 очереди увеличена доля тока по глухому торцу (48,8 % и 40,8 % соответственно 2 и 1 очередь), что должно способствовать лучшей компенсации магнитного поля соседнего корпуса;
4. Подвод тока к стоякам, на 2 очереди распределен более равномерно между подключаемыми блоками входной и выходной сторон.

2.4.2 Магнитогидродинамические характеристики электролизеров

На обследованных ваннах проведены измерения распределения тока по стоякам. Результаты приведены в таблицах 2.8 (1очередь) и 2.9 (2 очередь). Расчеты распределения проведены с учетом сечения шин и их температур.

В целом токораспределение по стоякам электролизеров обеих очередей достаточно равномерное и близкое к проектному. В среднем по всем ваннам отклонение от проектного составляло около 1 %, за исключением центральных стояков электролизеров 1 и 2 очередей, где оно составляло 2,4 % и 1,7 %. Отклонения по абсолютному значению составили 5,3 % (1 очередь) и 3,4 % (2 очередь), т.е. высказанное ранее предположение о более равномерном распределении тока на ваннах 2 очереди, вследствие схемы ошиновки, подтверждается их фактическим распределением. Это служит предпосылкой для получения магнитного поля и других магнитогидродинамических характеристик более равномерными параметрами.

Таблица 2.8. Токораспределение по стоякам электролизеров 1 очереди

№ ванны	Стояк	1		2		3		4		5		S
	Номер шины	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	Ср.
	Сечение шин, см	20x40x2		20x40x2		15x40x2		20x40x2		20x40x2		
713 4.06	dU по шинам, мВ	48	47	54	52	56	56	51	51	46	48	509
	Температура, °С	73	111	101	116	121	113	118	93	108	67	102
	TPC по стоякам, %	20,3		21,6		16,7		21,0		20,4		100
714	dU по шинам, мВ	48	47	52	51	57	56	52	50	47	48	508

14.06	Температура, °C	81	108	95	112	105	118	116	93	103	66	100
	TPC по стоякам, %	20,1		21,2		17,1		20,9		20,7		100
715 14.06	dU по шинам, мВ	47	47	55	52	55	57	53	52	47	48	513
	Температура, °C	71	109	93	118	112	107	113	93	107	78	100
	TPC по стоякам, %	20,0		21,7		16,9		21,4		20,0		100
716 14.06	dU по шинам, мВ	47	47	54	52	54	54	51	52	45	46	502
	Температура, °C	63	103	93	112	100	112	113	94	103	76	97
	TPC по стоякам, %	20,6		22,0		16,6		21,3		19,6		100
717 14.06	dU по шинам, мВ	47	47	50	49	53	52	49	49	48	47	491
	Температура, °C	66	103	93	114	103	107	112	105	113	81	100
	TPC по стоякам, %	21,1		21,1		16,7		20,5		20,6		100
813 14.06	dU по шинам, мВ	48	47	53	52	50	49	49	50	45	46	489
	Температура, °C	53	88	76	98	96	86	94	77	91	60	82
	TPC по стоякам, %	21,2		22,3		15,5		21,1		20,0		100
814 14.06	dU по шинам, мВ	48	47	52	52	55	54	49	50	45	46	498
	Температура, °C	69	94	90	106	97	90	99	82	91	64	88
	TPC по стоякам, %	20,6		21,5		17,1		20,9		20,0		100
815 14.06	dU по шинам, мВ	47	48	54	55	62	50	55	49	50	58	528
	Температура, °C	58	93	89	104	97	113	115	111	108	80	97
	TPC по стоякам, %	20,2		21,8		16,4		19,8		21,8		100
816 14.06	dU по шинам, мВ	46	44	51	49	55	54	48	50	47	47	491
	Температура, °C	57	95	83	101	100	107	102	84	95	66	89
	TPC по стоякам, %	20,2		21,3		16,9		20,9		20,7		100
817 14.06	dU по шинам, мВ	48	48	49	50	59	55	48	48	46	47	498
	Температура, °C	72	107	87	110	101	99	101	94	101	59	93
	TPC по стоякам, %	20,7		20,7		17,8		20,2		20,6		10
Среднее знач.	dU по шинам, мВ	47,4	46,9	52,4	51,4	55,6	53,7	50,5	50,1	46,6	48,1	
	Температура, °C	66,3	101	90	109	103	105	108	92,6	102	69,7	95
	TPC по стоякам, %	20,5		21,5		16,8		20,8		20,4		100
Проектное распределение, %		20,4		20,4		18,5		20,4		20,4		100
Отклонение от проекта, %		0,1		1,1		-1,7		0,4		0,1		

Таблица 2.9. Токораспределение по стоякам электролизеров 2 очереди

№ ванны	Стояк	1		2		3		4		5		Ср
	Номер шины	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	Ср.
	Сечение шин, см	20×40×2		18,5×40×2		16,5×40×2		18,5×40×2		20×40×2		
615 27.05	dU по шинам, мВ	6	1	9	0	6	3	0	7	8	0	50
	Температура, °C	9	4	7	9	3	9	9	9	8	2	8
	TPC по стоякам, %	19,1		19,8		22,0		17,5		21,6		100
616 25.05	dU по шинам, мВ	51	46	50	49	68	71	55	61	50	50	551
	Температура, °C	80	96	100	104	114	108	111	104	89	84	99
	TPC по стоякам, %	19,6		17,8		21,7		20,5		20,3		100
616 27.05	dU по шинам, мВ	3	3	1	0	0	1	2	4	0	1	45
	Температура, °C	0	6	0	4	14	8	11	4	9	4	9
	TPC по стоякам, %	19,5		21,9		19,0		18,9		20,6		100
617 25.05	dU по шинам, мВ	5	2	0	0	8	3	7	0	3	8	56
	Температура, °C	6	3	8	9	9	1	2	7	3	8	9
	TPC по стоякам, %	19,5		17,9		20,3		20,3		22,0		100
617 27.05	dU по шинам, мВ	7	0	9	0	5	3	0	7	0	0	21
	Температура, °C	4	2	9	0	7	4	7	1	8	4	7

	TPC по стоякам, %	20,5		18,8		21,3		18,4		21,0		100
618 25.05	dU по шинам, мВ	0	5	5	0	6	5	3	1	7	0	42
	Температура, °C	7	7	9	3	8	7	9	15	7	0	98
	TPC по стоякам, %	19,5		21,0		21,2		18,4		19,8		100
618 27.05	dU по шинам, мВ	40	43	45	62	62	67	64	78	47	54	562
	Температура, °C	8	8	9	9	6	5	4	1	9	4	6
	TPC по стоякам, %	16,6		18,9		19,9		24,8		19,7		100
619 25.05	dU по шинам, мВ	50	52	53	50	68	70	50	47	46	46	532
	Температура, °C	6	2	7	3	9	47	8	2	3	8	103
	TPC по стоякам, %	21,2		19,2		21,6		18,1		19,9		100
620 25.05	dU по шинам, мВ	6	45	52	52	68	65	54	51	50	50	533
	Температура, °C	76	88	101	107	103	111	105	108	94	76	97
	TPC по стоякам, %	19,2		19,1		21,6		19,1		20,9		100
621 25.05	dU по шинам, мВ	50	45	60	53	66	68	47	53	49	48	539
	Температура, °C	80	91	107	109	102	104	107	109	98	72	98
	TPC по стоякам, %	19,7		20,3		21,8		18,0		20,1		100
623 03.06	dU по шинам, мВ	56	50	48	52	67	67	53	52	48	58	551
	Температура, °C	2	06	8	13	12	20	05	13	07	9	103
	TPC по стоякам, %	21,5		17,8		20,8		18,6		21,3		100
624 03.06	dU по шинам, мВ	1	49	57	56	63	67	57	52	53	49	554
	Температура, °C	5	118	108	121	119	119	122	110	113	91	10
	TPC по стоякам, %	20,2		20,0		20,3		19,2		20,2		100
624 04.06	dU по шинам, мВ	52	49	55	52	63	65	53	52	49	49	539
	Температура, °C	79	111	97	115	100	122	120	101	94	82	102
	TPC по стоякам, %	20,6		19,6		20,6		18,9		20,3		100
625 03.06	dU по шинам, мВ	59	55	54	53	65	68	52	55	48	58	567
	Температура, °C	77	119	114	124	123	131	121	108	107	78	110
	TPC по стоякам, %	22,4		18,2		19,8		18,5		21,1		100
625 04.06	dU по шинам, мВ	52	54	50	53	68	72	50	46	47	50	542
	Температура, °C	77	119	114	124	123	131	121	108	107	78	110
	TPC по стоякам, %	21,8		18,5		22,0		17,4		20,3		100
Среднее знач.	dU по шинам, мВ	49,2	49,3	51,9	54,8	66,2	66,3	53,1	53,7	49	52,1	543
	Температура, °C	77,1	98	99,9	106	107	113	107	103	95,1	78,7	94,3
	TPC по стоякам, %	20,1		19,2		20,9		19,1		20,6		1000
Проектное распределение, %		20,4		20,4		18,5		20,4		20,4		1000
Отклонение от проекта, %		-0,3		-1,1		2,4		-1,2		0,3		

Измерен перекося поверхности металла по сторонам (А и В) и торцам электролизера, напротив точек, соответствующих анодам № 2, 5, 9, 12, 16, 19. Перекося рассчитывался по методу «электролита», предусматривающий постоянство суммарной высоты расплава для всех точек. Результаты измерений представлены в таблице 2.10 и на рисунке 2.19.

Средние значения перекося металла по отдельным точкам примерно одинаковы и не превышают 2,5 см для электролизеров обеих серий. Это достаточно хороший показатель для поверхности металла длиной около 15 м и шириной около 4 м, что говорит о достаточно хороших МГД-параметрах обоих типов электролизеров. При этом перекося металла был несколько выше в середине электролизеров и на стороне А (1 очередь) и В (2 очередь) (рис.3.4.3). Максимальные значения перекося по единичным ваннам выше на электролизерах 1 очереди (3,0-3,3 см), по сравнению с электролизерами 2 очереди (2,6-2,8 см).

Таблица 2.10. Перекос поверхности металла по продольной стороне электролизеров 1 и 2 очереди

		Выл	2	5	9	12	16	19	Глух	Max
616	A	2	1	0	1	2		0	2	2,0
	B		0	1	2	1	1	0		2,0
617	A	1,5	1	2	2,5	2	1	0	2,5	2,5
	B		0	1	4	3	5	0		3,0
624	A	2	1	1	2	4	0	2	1	4,0
	B		3	3	3	1	1	4		4,0
625	A	2	0	2	1	2	2	1	1	2,0
	B		2	1	2	2	2	2		2,0
Ср.	A	1,9	0,8	1,3	1,6	2,5	1,0		1,6	2,6
2 очередь	B		1,3	1,5	2,8	1,8	2,3	1,5		2,8
		Выл	2	5	9	12	16	19	Глух	Max
716	A	3	2	1	2	3	3	0	3	3,0
	B		2	3	3	3	2	2		3,0
717	A	2	1	2	3	2	0	2	0	3,0
	B		1	2	3	2	3			3,0
816	A	1,5	1	2	3	2	2	0	2	3,0
	B		1,5	1	1	3	3	1		3,0
817	A	2,5	2	4	1	2	3	1	3	4,0
	B		2	1	1	2	0	3		3,0
Ср.	A	2,3	1,5	2,3	2,3	2,3	2,0	0,8	2,0	3,3
1 очередь	B		1,6	1,8	2,0	2,5	2,0	2,0		3,0

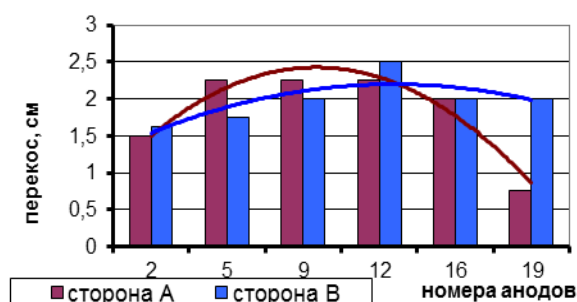
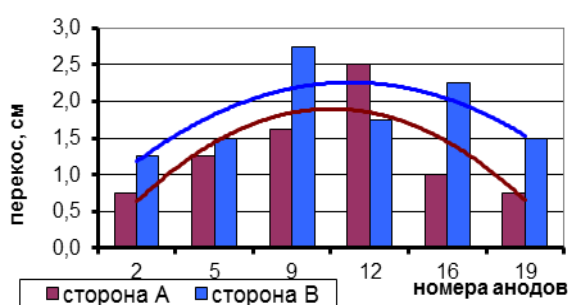


Рисунок 2.19. Результат перекаса металла по продольной стороне электролизеров 1 и 2 очереди

На обследуемых ваннах многократно измерено анодное токораспределение (АТР), по которым рассчитано среднеквадратичное отклонение G . В среднем, для электролизеров 1 очереди оно составило 0,9 кА, а для электролизеров 2 очереди 0,6 кА. Несмотря на непостоянность значений токов по анодам, полученные

значения косвенно свидетельствуют о более высокой устойчивости поверхности металла на электролизерах 2 очереди.

Получена формула расчета выхода по току от анодного токораспределения:

$$\eta = 95,904 - 4,68 \times G, \quad (2)$$

где: η – выход по току, %;

G – среднеквадратичное отклонение токов по анодам, кА.

Данная формула нуждается в уточнении по более масштабным измерениям и может быть использована для оперативной оценки состояния электролизера и его текущего значения выхода по току.

Практически на всех мощных электролизерах верхний предел силы тока и высокие технико-экономические показатели обеспечивались высоким уровнем стабильности электролизера, который определяется в основном параметрами ошиновки и технологическими параметрами. Основными критериями оценки возникновения МГД-неустойчивости являются амплитуда колебаний рабочего напряжения и период их колебаний. Первый характеризует степень волнения металла и амплитуду изменения МПР, второй – тип колебаний, определяемый, как правило, схемой ошиновки.

Проведен анализ случаев возникновения МГД-неустойчивости по данным системы АСУТП. Несмотря на недостаток необходимой информации (большое время усреднения, приоритет шумов и др.) можно сделать следующие предварительные выводы:

- в подавляющем большинстве случаев возникновение МГД-неустойчивости было вызвано одновременной заменой 2 анодов. Максимальная амплитуда при этом составляла 40-80 мВ (максимум 150 мВ), а период колебаний, в основном, около 40 секунд. Все колебания были затухающими, не требующими особого вмешательства системы или обслуживающего персонала. Время колебаний составляло около 30 минут и практически укладывалось в алгоритмы гашения и замены анодов, предусматривающие кратковременный подъем напряжения на 50-100 мВ. Данные параметры колебаний свидетельствуют о локальном возникновении очага неустойчивости, каковым является зона анодов с отсутствующим током по ним и перераспределения их доли (8 кА) на другие аноды, а также переохлаждение зоны замены. В течение определенного времени (до 24 часов), состояние вновь замененных анодов практически выравнивается до состояния остальных. Появление МГД-неустойчивости при замене анодов является неизбежностью и избежать ее практически невозможно. Реальных мер по их минимизации практически не существует и определяются конструкцией ошиновки.

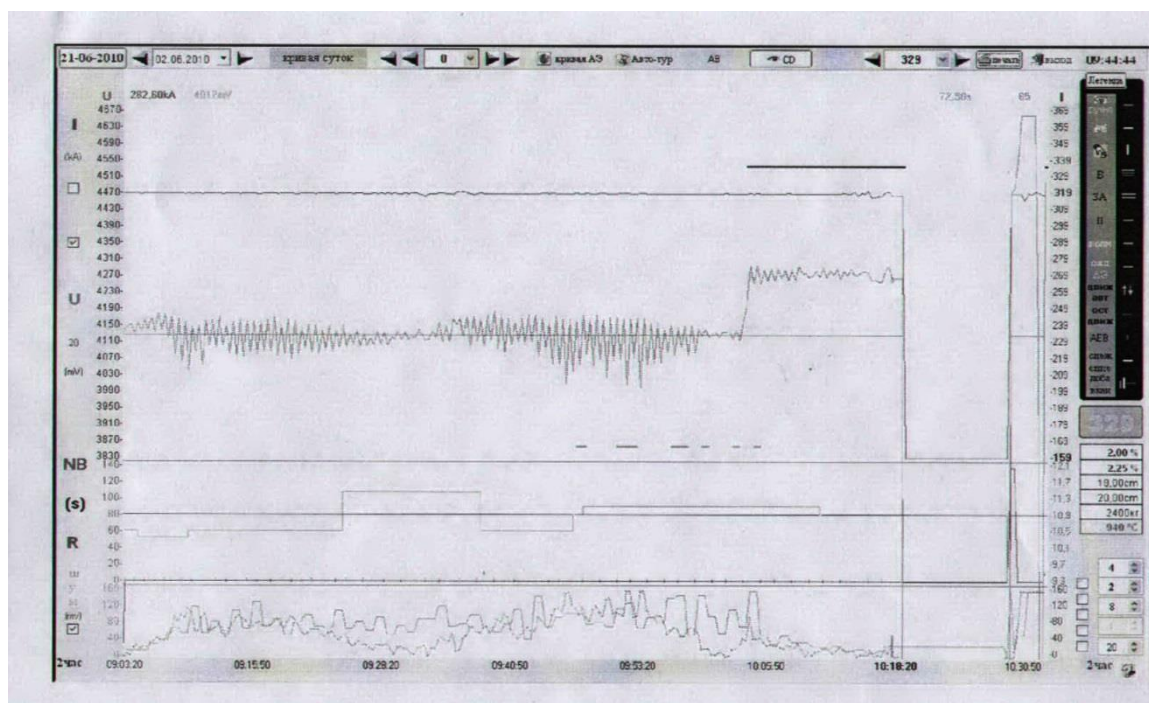
- частым случаем возникновения МГД-неустойчивости являлось приближение анодного эффекта. Как правило, такие колебания не имели периодического характера, а представляли хаотичные колебания напряжения. Этот факт также известен исследователям и связан с увеличением сопротивления электролита вследствие пассивации части анодов анодными газами и резкого

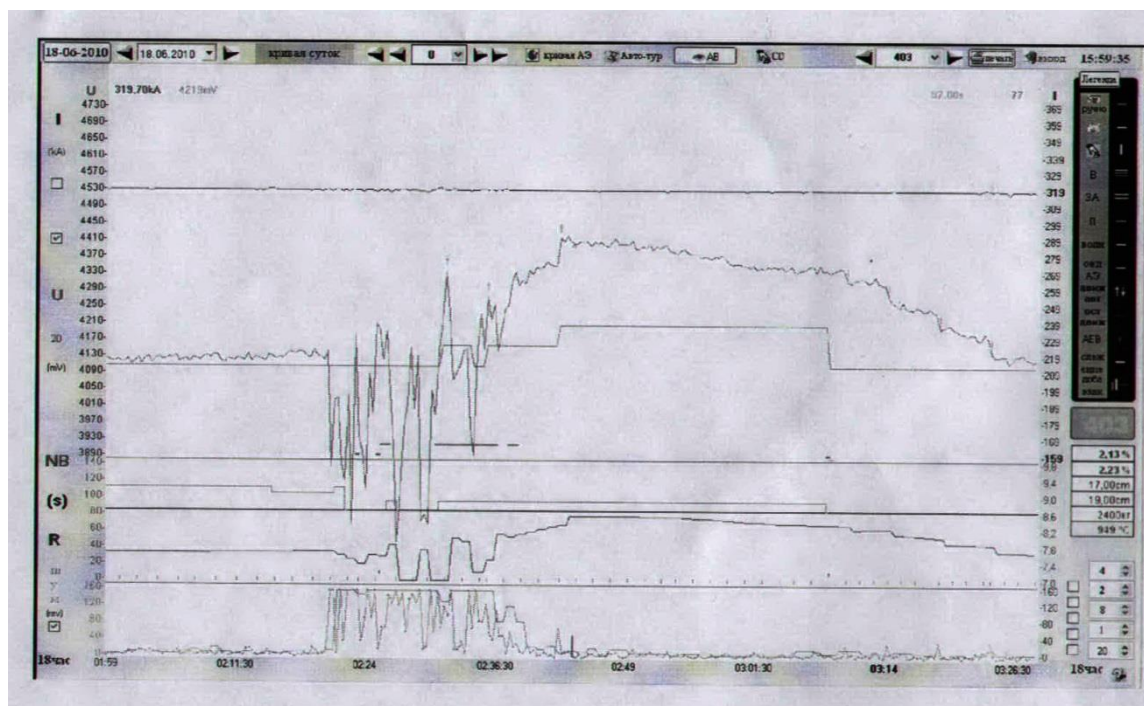
ухудшения распределения тока по анодам, вызывающим появление значительных по величине горизонтальных токов в металле и возникновение волн даже при очень хороших показателях ошеровки. Для их исключения минимизируют возникновение анодных эффектов, а также устанавливают приоритет задачи ликвидации МГД перед алгоритмом прогноза анодного эффекта и питания глиноземом. Применение на отдельных заводах их предварительного нагрева носит неоднозначный характер и не получило широкого распространения.

- наблюдались единичные случаи возникновения МГД-неустойчивости при выполнении технологических операций по обслуживанию электролизера, таких как перетяжка анодной рамы, выливка, съем пены и др. Такие колебания не носили периодического и длительного характера, и, как правило, затухали при окончании выполнения операций на электролизере.

На рисунке 2.20 приведены случаи регистрации волнения металла системой АСУТП, в том числе периодические колебания и их ликвидация и 2-кратное увеличение уставки напряжения по 50 мВ по алгоритму ликвидации волнения металла.

В целом, электролизеры 1 и 2 очереди имеют высокие показатели уровня МГД-стабильности. Серьезных проблем, связанных с появлением заметных колебаний, на текущий момент времени не имеется. Отметим, что наиболее реальными методами их ликвидации и минимизации являются увеличение МПР (в большей степени) и увеличение уровня металла (в меньшей степени). Других управляющих воздействий по их ликвидации в практике не имеется.





А – периодические колебания и их ликвидация; В – 2-кратное увеличение уставки напряжения по 50 мВ при включении алгоритма ликвидации волнения металла.

Рисунок 2.20. Случаи регистрации волнения металла системой АСУТП

3 Комплексные измерения теплоэнергетических и магнитогидродинамических характеристик

Комплексные измерения теплоэнергетических и магнитогидродинамических характеристик были проведены в июне 2013 года на 8 электролизерах 1 очереди (GAMI-320 № 716, 717, 816, 817) и 2 очереди (NEUI-330 № 616, 617, 624, 625).

Работы включали в себя измерения электрического и энергетического балансов, обратной ЭДС, определение ФРП.

Технологические параметры исследуемых электролизеров при проведении измерений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Технологические параметры электролизеров при проведении измерений

Тип электролизера	1 очередь (GAMI-320)					2 очередь (NEUI-330)				
Номер электролизера	716	717	816	817	Ср	616	617	624	625	Ср
Дата измерения	9.06	9.06	10.06	11.06		28.05	31.05	1.06	3.06	
Срок эксплуатации, сут	771	117	63	302	313	1322	1297	1557	408	1087
Напряжение уставки, В	4	4	4	4	4	4.05	4.05	4.05	4	4.04
Уровень металла, см	22,0	21,0	20	20	20,75	20	21	20	20	20,25
Уровень электролита, см	17	17	17	17	17	16	16	17	16	16,25
Температура эл-та, град	950	945	960	958	953,3	959	959	960	954	958
Криолитовое отношение	2,11	2,10	2,17	2,17	2,14	2,28	2,18	2,27	2,17	2,23
Содержание CaF_2 , %	6,07	6,24	6,10	6,17	6,15	6,50	6,64	5,95	6,15	6,31
Содержание MgF_2 , %	0,41	0,38	0,47	0,42	0,42	0,38	0,34	0,38	0,34	0,36
Концентрация Al_2O_3 , %	2,01	1,74	1,34	2,01	1,78	1,24	1,82	1,89	1,45	1,6
Кол-во ан. эффектов, шт/сут	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Выход по току (сумм.), %	92,38	93,15	93,15	92,38	92,77	92,38	92,38	92,77	93,15	92,67

3.1 Электрический баланс

Измерения проводились по стандартным методикам путем прямого измерения падения напряжения в отдельных узлах и токоведущих элементах электролизера. Падение напряжения в электролите определялось суммарно с величиной обратной ЭДС, которая измерялась отдельно. Описание результатов измерения обратной ЭДС приведено в разделе 2.1. Падение напряжения в ошиновке определялось методом потери мощности в основных пакетах и в отдельных шинах. Анодных эффектов за период измерений на исследуемых ваннах не было.

Первичные результаты измерений и вспомогательные расчеты и графики приведены в приложении. Сводные результаты измерений электрического баланса приведены в приложение Б.

По результатам измерений можно сделать следующие выводы.

Падение напряжения в основных токоведущих элементах электролизеров (анод, подина, электролит) 1 и 2 очереди принципиально не отличались между собой, в результате чего итоговые значения рабочего и среднего напряжения были практически одинаковы. Измеренное значение среднего напряжения на

электролизерах 1 очереди составило 4,143 В, на 2 очереди 4,162 В. Греющее напряжение составило 3,866 мВ и 3,912 мВ соответственно.

Распределение составляющих электрического баланса для электролизеров 1 и 2 очереди приведено на рисунках 3.1 и 3.2.

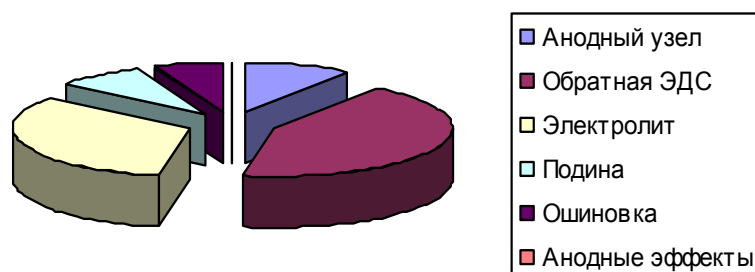


Рисунок 3.1. Распределение составляющих электрического баланса электролизеров 1 очереди

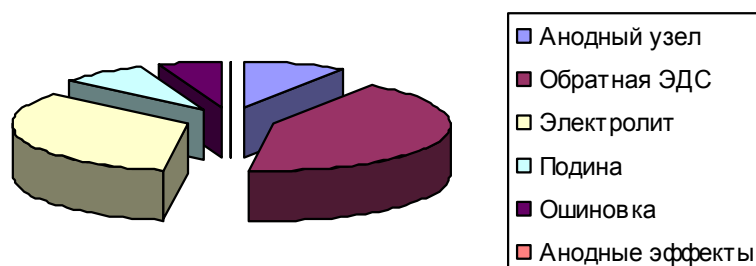


Рисунок 3.2. Распределение составляющих электрического баланса электролизеров 2 очереди

Падение напряжения в анодном узле составило около 400 мВ для всех исследуемых ванн и является нормальным для 4-х ниппельного анода с заливкой чугуном.

- Собственно в угольной части анода падение напряжения в среднем составило около 185 мВ и изменялось в течении эксплуатации по мере его сгорания от 100 до 220 мВ;

- Определено достаточно высокое значение перепада в контакте анодная шина-штанга. В среднем, по исследуемым ваннам, перепад составил 6,2 мВ, при нормативе не более 5 мВ. В нормативном диапазоне 0-5 мВ имеется около 45 %, а в интервале 0-10мВ 92,5 % (рисунок 3.3). На мой взгляд, это вызвано рядом причин – плохой зачисткой контакта, неровностью штанг, недостаточной герметизацией зоны выхода штанги из-под укрытия и др.

- Перепады во всех измеренных контактах биметаллическая пластина-штанга и в контакте в собственно биметаллической пластине составляли менее 5 мВ, что является хорошим показателем. В тоже время перепад в контакте биметаллическая пластина-кронштейн имел средний перепад около 15 мВ, а в отдельных случаях и до 100 мВ. В анодно-монтажном отделении завода имеется достаточно большое количество анодов с обрывом по данной поверхности. Улучшение данного контакта позволит не только снизить перепад в нем на 5-8 мВ, но и снизить вероятность обрывов анодов и затраты на реставрацию анододержателей.

- Контакт ниппель-анод находится в приемлемом состоянии. Среднее значение падения напряжения в нем составило около 123 мВ, что характерно для соединения ниппеля и анода чугуном. Во время эксплуатации величина перепада изменяется от 80-100 мВ в начале и до 150-160 мВ перед заменой анода и, в основном, зависит от степени утепления анодного массива. Случаи искривления и обгорания ниппелей единичны и не представляют проблем по их обслуживанию и реставрации. Дальнейшее улучшение данного контакта и достижение перепада в нем до 80-100 мВ связано с внедрением специализированных электропроводных масс и носит характер исследовательской работы.

Падение напряжения в подине составляет 300-350 мВ, в среднем около 330 мВ, что типично для подин с подовыми блоками с 30 % содержанием графита и находится в пределах, установленных технологической инструкцией. Замечено, что в местах расчистки подины, падение напряжения в ней снижается до величины 280-300 мВ.

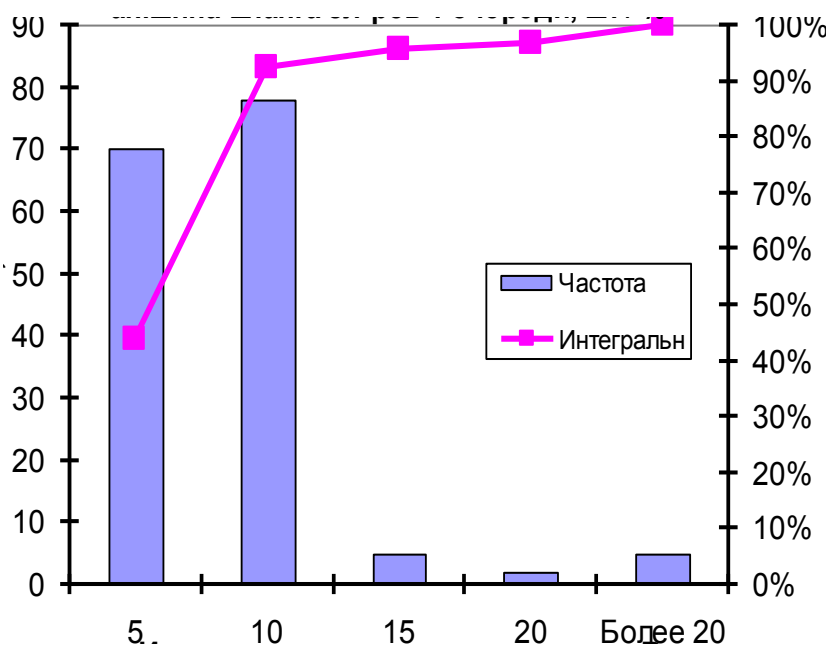
Падение напряжения в ошиновке составляет 270 мВ для электролизеров 1 очереди и 244 мВ для электролизеров 2 очереди соответственно, в том числе:

- в анодной ошиновке 17,2 мВ и 18,6 мВ соответственно;
- в катодной ошиновке падение напряжения составило 73,8 мВ и 100,3 мВ соответственно. Увеличение падения напряжения на 26 мВ на электролизерах 2 очереди связано собственно со схемой ошиновки, то есть наличия противоточных участков и количества параллельных ветвей, которое на электролизерах 2 очереди меньше.

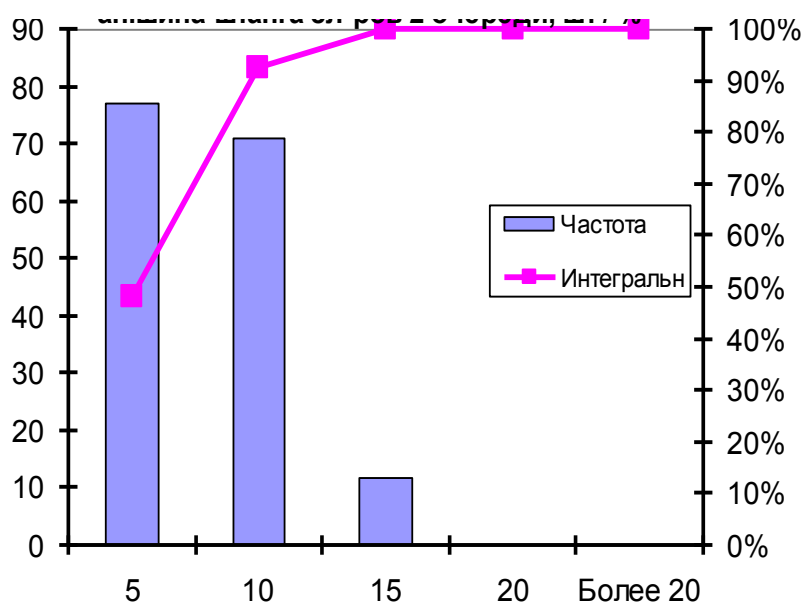
- падение напряжения в стояках составило соответственно 145,2 мВ и 103,0 мВ. Снижение падения напряжения в стояках на электролизерах 2 очереди на 42 мВ связано с увеличением сортамента используемых шин и снижения плотности тока в них, при сохранении равномерного токораспределения по стоякам. Снижение падения напряжения в стояках обуславливает и общее снижение падения напряжения в ошиновке электролизеров 2 очереди на 26 мВ;

- суммарное падение напряжения на участке блюмс-катодная шина (спусках с биметаллической пластиной) составило 33,2 мВ и 22,3 мВ соответственно, в том числе 21,4 мВ и 11,4 мВ собственно в спуске. Разница в перепаде вызвана применением спусков различной длины в ошиновках 1 и 2 очередей. Собственно, в катодной биметаллической пластине и его контактах с блюмсом и спуском падение напряжения не превышало 2-3 мВ.

Инт	вал	(мВ)	Час	Инт	вал
-----	-----	------	-----	-----	-----



Интервал (мВ)	Частота	Интегральный %
5	77	43,8%
10	71	92,5%
15	12	100%
20	0	100%
Более 20	0	100%



Интервал (мВ)	Частота	Интегральный %
5	70	43,8%
10	78	92,5%
15	5	95,6%
20	2	96,9%
Более 20	5	100%

Рисунок 3.3. Распределения падения напряжения в контакте анодная шина – штанга электролизеров 1 и 2 очереди

Суммарное падение напряжения в электролите и обратной ЭДС на исследуемых ваннах составило 3,146 В и 3,188 В соответственно. На отечественных и зарубежных электролизерах ОА с высокими показателями эта величина составляет около 3,0 В, то есть на 0,15-0,20 В ниже. При этом величина Еобр на этих заводах составляет более 1,75 В. Измеренная величина обратной ЭДС на электролизерах КЭЗ при силе тока 320 кА составила 1,783 мВ, что является хорошим показателем.

Средняя величина падения напряжения в электролите за вычетом Еобр составила 1,363 и 1,413 В при измеренном МПР 5,62 и 5,28 см соответственно для электролизеров 1 и 2 очереди. Средняя «цена» 1 см падения напряжения в электролите составила 243 и 266 мВ/1см, что свидетельствует о «чистом» электролите и его хорошем качестве, при достаточно устойчиво-низкой

концентрации глинозема в нем. Отчетная измеренная концентрация глинозема в электролите за 2010 год составила 2,06 % и 1,9 % для электролизеров 1 и 2 очереди. При анализе результатов измерений обнаружен интересный факт. С увеличением МПР «цена» 1 см электролита уменьшается при увеличении МПР для электролизеров обеих серий (рисунок 3.4). При этом суммарное значение падения напряжения в электролите также уменьшается. Это объясняет факт работы электролизеров завода на единой уставке напряжения при различных исходных МПР и его изменениях при работе алгоритмов корректировки уставки системой АСУТП.

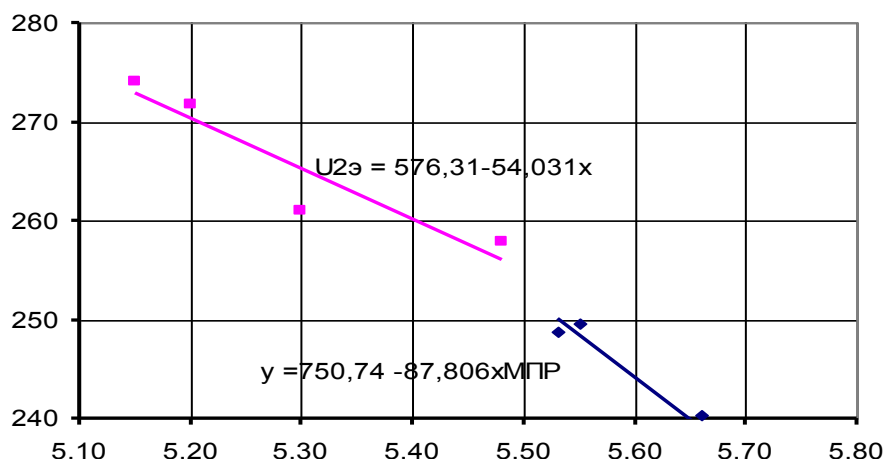


Рисунок 3.4. Зависимость падения напряжения в 1 см электролита от величины межполюсного расстояния

На наш взгляд, данный факт может быть объяснен снижением доли сопротивления прианодного газового слоя (5-10 мм) и газонаполнения электролита в суммарном сопротивлении, включающем также и собственно удаленный объем электролита, при увеличении МПР.

Снижение падения напряжения за счет снижения МПР, не всегда способствует нормализации технологического режима и сохранению высоких показателей вследствие снижения выхода по току и повышения вероятности возникновения МГД-устойчивости. Для электролизеров КЭЗа, более предпочтительным резервом снижения падения напряжения в электролите представляется оптимизация технологических параметров и более точная их корректировка при эксплуатации.

3.2 Тепловые и энергетические характеристики

На тех же 8 электролизерах 1 очереди (№ 716, 717, 816, 817) и 2 очереди (№ 616, 617, 624, 625), производилось измерение тепловых характеристик, формы рабочего пространства и энергетического балансов.

3.2.1 Температурные характеристики поверхностей электролизеров

Измерения проведены бесконтактным прибором «Termopoint» с коэффициентами облученности установленных нами ранее экспериментально. Измерения производились по 6 сечениям по продольным сторонам, а также по торцам, как с наружных поверхностей, на которые приходятся основные потери тепла, так и с внутренних поверхностей (под укрытием), имеющих малую долю в общем расходе тепла. Общее количество измеряемых поверхностей составляло 27 штук. Средняя температура окружающего воздуха в период измерений составила + 23,3 °С, температура в корпусе электролиза + 28,7 °С. Полные результаты измерений приведены в приложении, результирующие температуры основных поверхностей для электролизеров 1 и 2 очереди в таблице 3.2.

Температуры основных элементов конструкции и поверхностей анодного узла соответствуют нормальному состоянию электролизеров. Несколько высоковатой представляется температура глиноземной засыпки на анодах, которая составила около 200 °С. Такая температура определяется высотой глиноземной засыпки на анодах, которая составила в среднем 4,8 и 5,3 см, а на корке 5,1 и 6,1 см для 1 и 2 очереди соответственно. При этом температура основных поверхностей анодного узла (коллектор, укрытие) на электролизерах 1 очереди была выше, чем на 2 очереди, что, очевидно, обусловлено меньшей ~на 1 см высотой засыпки на анодах и корке. Температуры основных наиболее нагретых поверхностей катодного кожуха в среднем для электролизеров 1 и 2 очереди составили.

Таблица 3.2. Результаты измерений температуры основных поверхностей для электролизеров 1 и 2 очереди

Поверхность	1 очередь		2 очередь		Разность 2, °С
	Тем-ра, °С	Интервал Т	Тем-ра, °С	Интервал Т	
Верхняя зона	308	284-335	313	281-334	-5
Средняя зона (верх/низ)	303	283-334	276	245-309	+27
	196	176-231	181	159-193	
Нижняя зона	93	83-97	54	36-79	+39
Верхняя зона торца	313	281-382	269	230-295	+44
Средняя зона торца	317	280-346	232	202-287	+85
Нижняя зона торца	99	84-106	80	58-104	+19
Днище	74	67-82	65	50-83	+9

Таблица 3.3. Температура основных поверхностей электролизеров 1 и 2 очереди

№ электролизера	1 очередь			2 очередь			Разность 1-2		
Название\ Сторона\Среднее	А	В	1 очер	А	В	2 очер	А 1-2	В 1-2	1-2 очер
Бункер АПГ	46,4	46,4	46,4	50,0	50,0	50,0	-3,7	-3,7	-3,7
Бок. Стенка коллектора	49,1	47,4	48,3	62,3	59,8	61,1	-13,2	-12,4	-12,8
Горизонт. Створка	84,5	90,4	87,5	115,2	111,2	113,2	-30,6	-20,8	-25,7
Наклонные створки (верх /середина / низ)	63,9	62,5	63,2	83,5	83,4	83,4	-19,6	-20,9	-20,3
	67,0	63,6	65,3	88,8	98,0	93,4	-21,8	-34,3	-28,1
	64,8	63,8	64,3	106,2	99,9	103,0	-41,4	-36,1	-38,7
Фланцевый лист	131,1	134,0	132,6	131,9	141,7	136,8	-0,8	-7,7	-4,2
Торцевое укрытие	40,8	39,3	40,1	48,1	47,6	47,8	-7,3	-8,3	-7,8
Патрубок	87,3	87,3	87,3	89,4	89,4	89,4	-2,1	-2,1	-2,1
Штанги под укрытием	137,6	140,6	139,1	153,3	158,3	155,8	-15,7	-17,7	-16,7
Биметаллич. Пластина	191,8	190,0	190,9	204,5	203,7	204,1	-12,7	-13,7	-13,2
Кронштейны штанг	254,1	262,8	258,5	285,3	288,5	286,9	-31,2	-25,7	-28,4
Ниппеля анода	335,2	343,8	339,5	332,7	382,3	357,5	2,5	-38,5	-18,0
Глиноземная засыпка: (анодах / на корке)	191,8	185,3	188,5	232,6	221,2	226,9	-40,8	-35,9	-38,4
	160,3	159,9	160,1	195,7	212,3	204,0	-35,4	-52,4	-43,9
Верхняя зона кожуха	298,2	317,8	308,0	302,6	323,5	313,1	-4,5	-5,7	-5,1
Ребро верхней зоны	211,3	229,3	220,3	168,0	182,6	175,3	43,3	46,7	45,0
Средняя зона(верх / середина)	302,5	302,6	302,5	271,0	281,2	276,1	31,5	21,4	26,4
	190,8	200,2	195,5	177,3	184,0	180,7	13,5	16,2	14,8
Шпангоут (верх)	145,0	148,7	146,8	155,0	168,1	161,6	-10,0	-19,5	-14,8
Блюмсы	232,0	243,9	237,9	229,8	237,7	233,7	2,2	6,2	4,2
Нижняя зона	90,8	94,2	92,5	53,9	54,7	54,3	36,9	39,5	38,2
Днище			74,3			64,6			9,7
Ребра днища			45,2			34,4			10,8
Температура поверхностей в торцах электролизеров 1 и 2 очереди									
№ электролизера	1 очередь			2 очередь			Разность 1-2 очер		
Название\ Торец\Среднее	Выл	Гл	1 оч	Выл	Гл	2 оч	Выл	Гл	1-2
Обортов лист сверху	98,5	103,4	101,0	92,9	96,7	94,8	5,6	6,8	6,2
Верхняя зона	318,1	307,7	312,9	268,5	269,6	269,1	49,6	38,0	43,8
Ребро верхней зоны	209,4	216,9	213,1	179,0	182,9	180,6	30,4	34,0	32,5
Площадка верхняя	215,7	217,4	216,6	141,0	146,1	143,5	74,7	71,4	73,0
Средний пояс	121,8	121,6	121,7	96,9	103,6	100,3	24,8	18,0	21,4
Средняя зона	307,3	326,8	317,0	230,1	233,4	231,8	77,1	93,4	85,3
Ребро средней зоны	196,2	202,7	199,4	145,6	151,9	148,8	50,6	50,8	50,7
Площадка нижняя	118,8	111,9	115,3	85,6	88,0	86,8	33,1	23,9	28,5
Нижний пояс	85,4	78,9	82,2	65,4	69,3	67,4	19,9	9,7	14,8
Нижняя зона	98,9	99,1	99,0	78,8	80,2	79,5	20,1	18,9	19,5
Ребро нижней зоны	84,6	83,9	84,3	66,5	70,7	68,6	18,1	13,3	15,7
Т наружная, °С	23,9	24,3	24,1	21,6	23,1	22,4	2,3	1,1	1,7
Т электролита, °С			950,8			949,3			1,5

В целом, температуры наиболее нагретых поверхностей катодного кожуха имеют приемлемые значения и не превышают допустимых пределов.

Наиболее близкой к предельному значению представляется температура верхней и средней зоны боковой и торцевой поверхностей для электролизеров 1 очереди и верхней зоны боковой поверхности для электролизеров 2 очереди. Обращает на себя внимание, что на электролизерах 1 очереди температура выше практически по всем позициям. Во многом это объясняется конструктивными отличиями кожухов 1 и 2 очереди.

На электролизерах 1 очереди, для охлаждения боковой поверхности и наиболее нагретой верхней зоны (зоны расплава) применены шпангоуты высотой до верхнего пояса и 24 ребра в верхней зоне по каждой стороне, общей площадью 9, 1 м². При этом верхняя (зона расплава), средняя (зона подового блока) и нижняя (зона футеровки) зоны разделены горизонтальными поясами с продухами. Несмотря на наличие отверстий в поясах для конвективного воздухообмена, его объема недостаточно для эффективного охлаждения всей боковой поверхности, поскольку в зонах, образованных этими поясами и кожухом, образуются застойные зоны, препятствующие выходу избыточного тепла. Это еще более усугубляется при уменьшении расстояния от пола до электролизера, что наблюдается на электролизерах 1 очереди.

На электролизерах 2 очереди для охлаждения боковой стенки используются шпангоуты на всю высоту кожуха и 50 ребер охлаждения, общей площадью 27 м², без продольных горизонтальных поясов. В результате подобных отличий обеспечивается свободный и более эффективный теплоотвод, в результате чего температура боковых поверхностей катодного кожуха электролизеров 2 очереди ниже, чем на 1 очереди. По этой причине конструкция продольной стенки кожуха 2 очереди более адаптирована к регулированию теплообмена и отводу избыточного тепла, что важно при увеличении температуры электролизера или применения более интенсифицированного режима.

Измеренные средняя температура днища, составляющая не более 83 °С, его максимальные значения, а также распределение температур по площади днища, на данный момент представляются очень хорошими. На момент проведения измерений, на обследованных ваннах не обнаружено значительных локальных очагов разрушения подины, характеризующихся перегревом отдельных участков днища.

Температура днища кожухов электролизеров 2 очереди ниже, чем на 1 очереди на 10 °С. Это также связано с изменениями футеровки кожухов и их оребрением.

В футеровке электролизера 1 очереди применено:

- слой силиката кальция Н=100 мм, $\lambda=0,07$ Вт/м·К;
- изоляционный кирпич Н=132 мм, $\lambda=0,235$ Вт/м·К;
- слой сухой барьерной смеси Н=175 мм, $\lambda=0,354$ Вт/м·К;

Для такой конструкции футеровки эффективный коэффициент теплопроводности составляет $\lambda=0,245$ Вт/м·К. Для охлаждения днища также

применяются 24 шпангоута шириной 400 мм. Коэффициент оребрения днища составляет 2,35.

В футеровке электролизера 2 очереди применено:

- слой силиката кальция $H=90$ мм, $\lambda=0,07$ Вт/м·К;
- слой керамоволокна $H=50$ мм, $\lambda=0,114$ Вт/м·К;
- изоляционный кирпич $H=65$ мм, $\lambda=0,235$ Вт/м·К;
- слой сухой барьерной смеси $H=195$ мм, $\lambda=0,354$ Вт/м·К;

Для такой конструкции футеровки эффективный коэффициент теплопроводности составляет $\lambda=0,241$ Вт/м·К. Для охлаждения днища также применяются 24 шпангоута шириной 500 мм, т.е. шире, чем на электролизерах 1 очереди. При этом коэффициент оребрения днища 2,87.

В результате подобных изменений, утепление днища и лучшее его охлаждение, температура днища электролизеров 2 очереди ниже, чем на электролизерах 1 очереди, и способствует более устойчивому ведению технологического процесса.

3.2.2 Параметры формы рабочего пространства

На исследуемых ваннах были измерены параметры формы рабочего пространства, а также сводные результаты приведены в приложение В.

Поскольку ванны имеют деформацию катодного кожуха, она была учтена при построении ФРП. Деформация измерялась по методу струны. Результаты измерений приведены на рис. 3.4.

Продольные стенки кожухов для всех ванн имеют деформацию в виде бочки с большими значениями в середине электролизера. В торцах ванн деформация практически отсутствовала. По серединам сторон максимальные значения составили: для электролизеров 1 очереди – 4,1 (сторона А) -4,5 см (сторона В) (интервал максимальных значений 1,9-5,6 см), для электролизеров 2 очереди – 1,9 (сторона А) - 2,4 см (сторона В) (интервал максимальных значений 1,3-4,0 см). Как видно, на электролизерах 1 очереди деформация стенок кожуха выше, что вполне логично для ванн проработавших большее время.

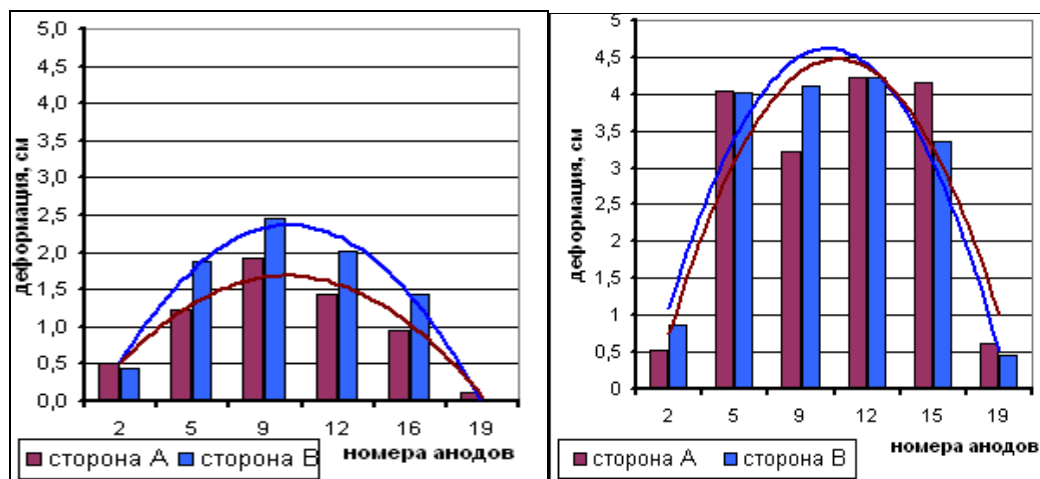


Рисунок 3.5. Гистограмма деформации продольной стенки кожуха электролизеров 1 и 2 очереди

Параметры ФРП на всех исследуемых ваннах (в летний период) были близки к идеальному. Достаточная величина гарниссажа, длина подовой настилы близко расположена к уровню анодного массива, наблюдалась крутопадающая форма и отсутствие пологих площадок, не обнаружено больших скоплений «полужидкого-полутвердого» осадка.

Отличительной особенностью ФРП на всех ваннах была достаточная (более 3 см) толщина гарниссажа, которая в среднем составила 9,3 см для электролизеров 1 очереди и 7,8 см для электролизеров 2 очереди. Искривленность профиля ФРП (на всех ваннах) и достаточно высокое значение гарниссажа в верхней зоне однозначно свидетельствуют о нормальном энергетическом режиме при имеющихся технологических параметрах, температуре электролита 950-955 °С и уставке напряжения 4,13-4,14 В. Это является следствием как применения узкого карбидкремниевых бортового блока, так и принятыми мерами по оребрению верхней зоны катодного кожуха для обоих типов применяемых ванн, которые достаточно эффективно отводят избыточную тепловую нагрузку от верха кожуха и заметно снижают тепловую нагрузку средней и нижней зон боковой стенки.

Средняя длина подовой настилы в среднем составила 4,4 см под анод для электролизеров 1 очереди и -4,1 см до уровня анода для электролизеров 2 очереди. Данные значения близки к идеальному состоянию, что указывает на хорошее тепловое состояние подины и правильный режим питания АПГ, что подтверждается отсутствием значительных осадков и коржей на подине. В днищах электролизеров обеих серий применены плиты из силиката кремния, которые обеспечивают его низкое тепловое сопротивление, что обеспечивает сохранение тепла от тепловыделений блока. Применяемые, в настоящее время, в конструкциях обоих типов ванн подовые блоки с содержанием графита в них около 30 % имеют достаточно высокое электросопротивление, что наряду с утепленным днищем обеспечивает достаточно приемлемые параметры длины настилы. Следует отметить, что при применении блоков с более высоким содержанием графита, тепловыделение от них снижается, что требует

дополнительных мер по их сохранению для обеспечения требуемой формы рабочего пространства.

В этой связи, наличие достаточного гарниссажа и приемлемая длина настывли. Свидетельствуют о возможном резерве по интенсификации процесса для обеих серий. Для применяемых конструкций, по параметрам ФРП, это допустимо производить как увеличением силы тока, так и увеличением МПР.

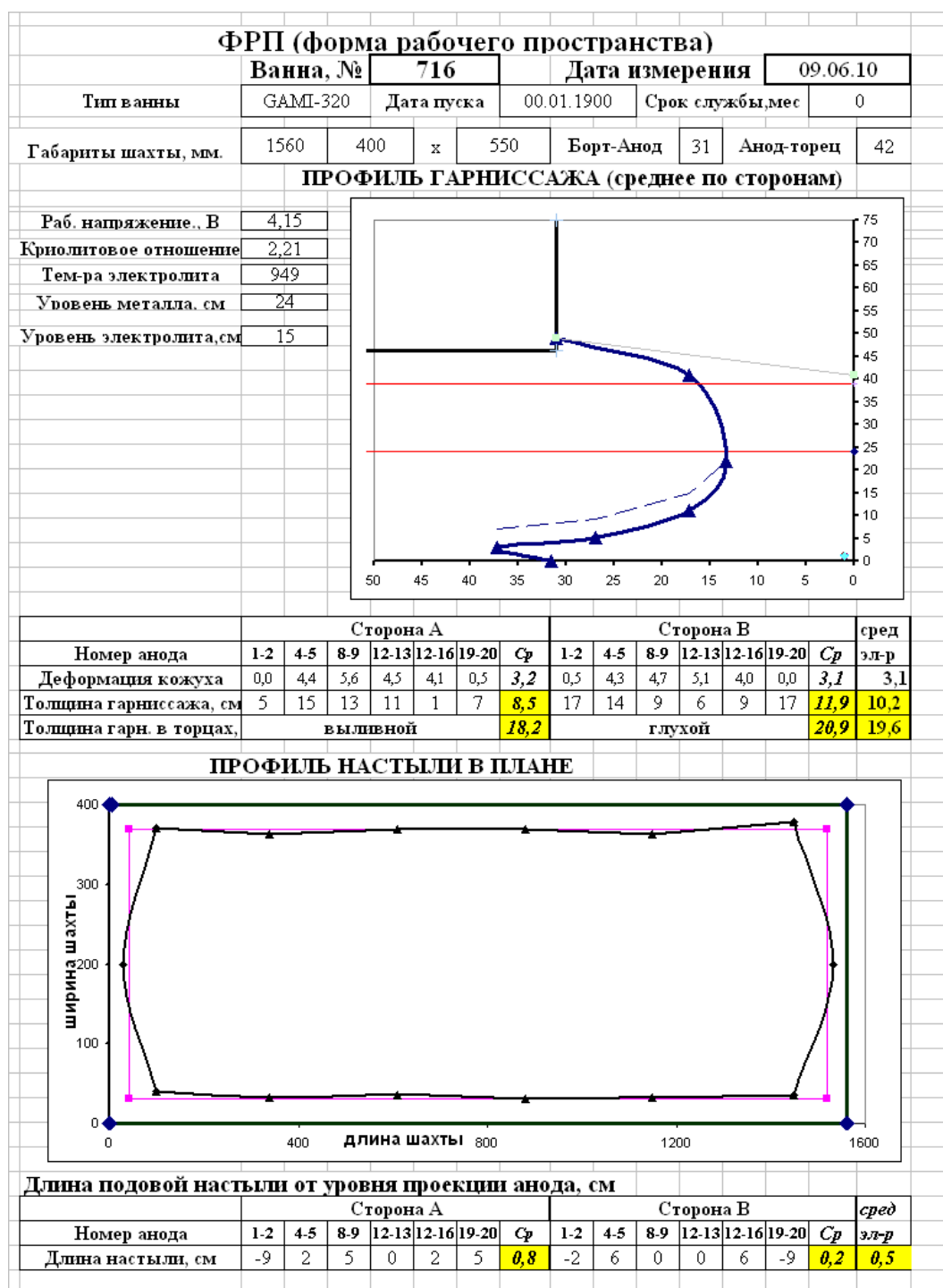


Рисунок 3.6. Форма рабочего пространства электролизера 1 очереди (№ 716)

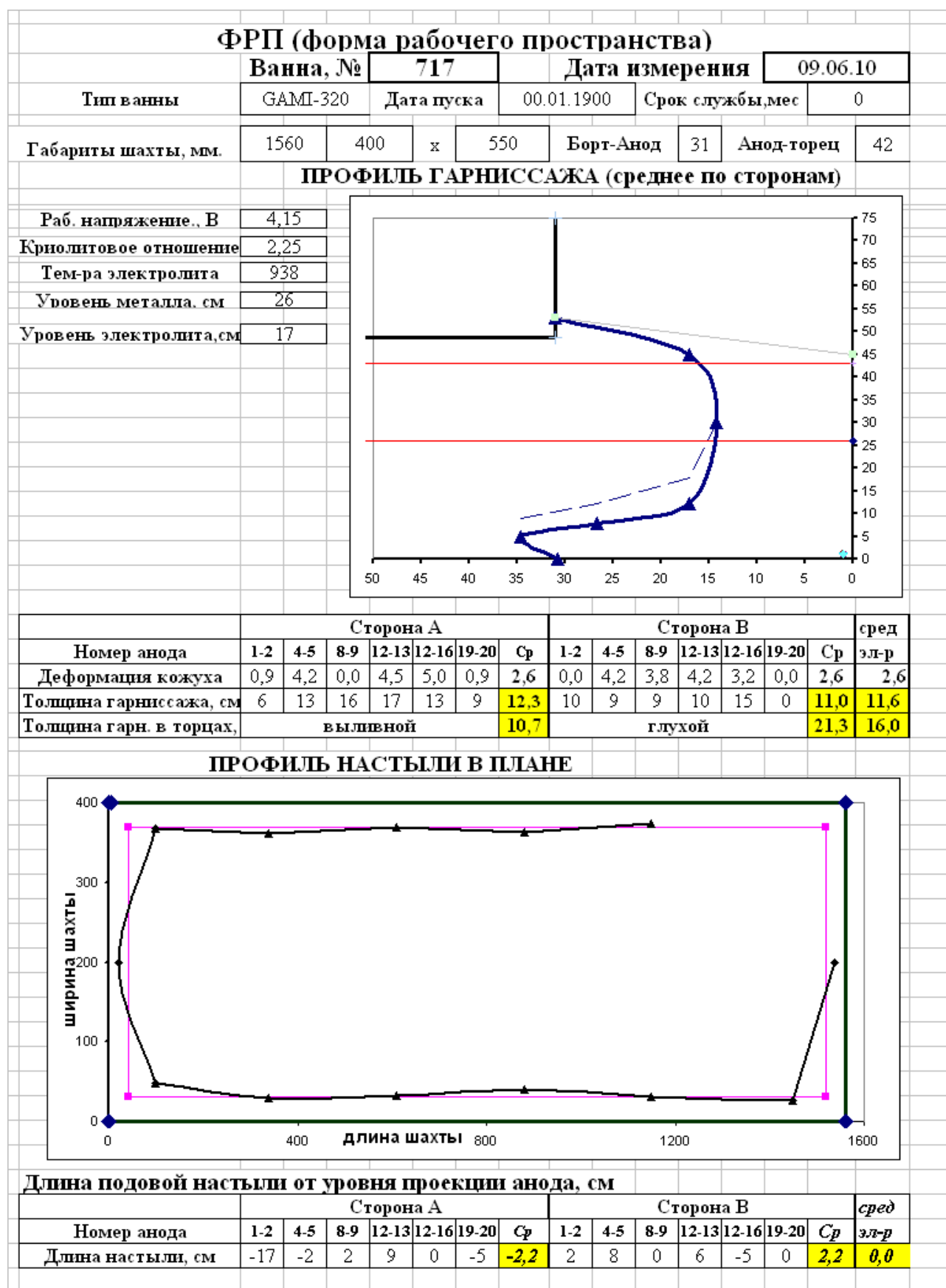


Рисунок 3.7. Форма рабочего пространства электролизера 1 очереди (№ 717)

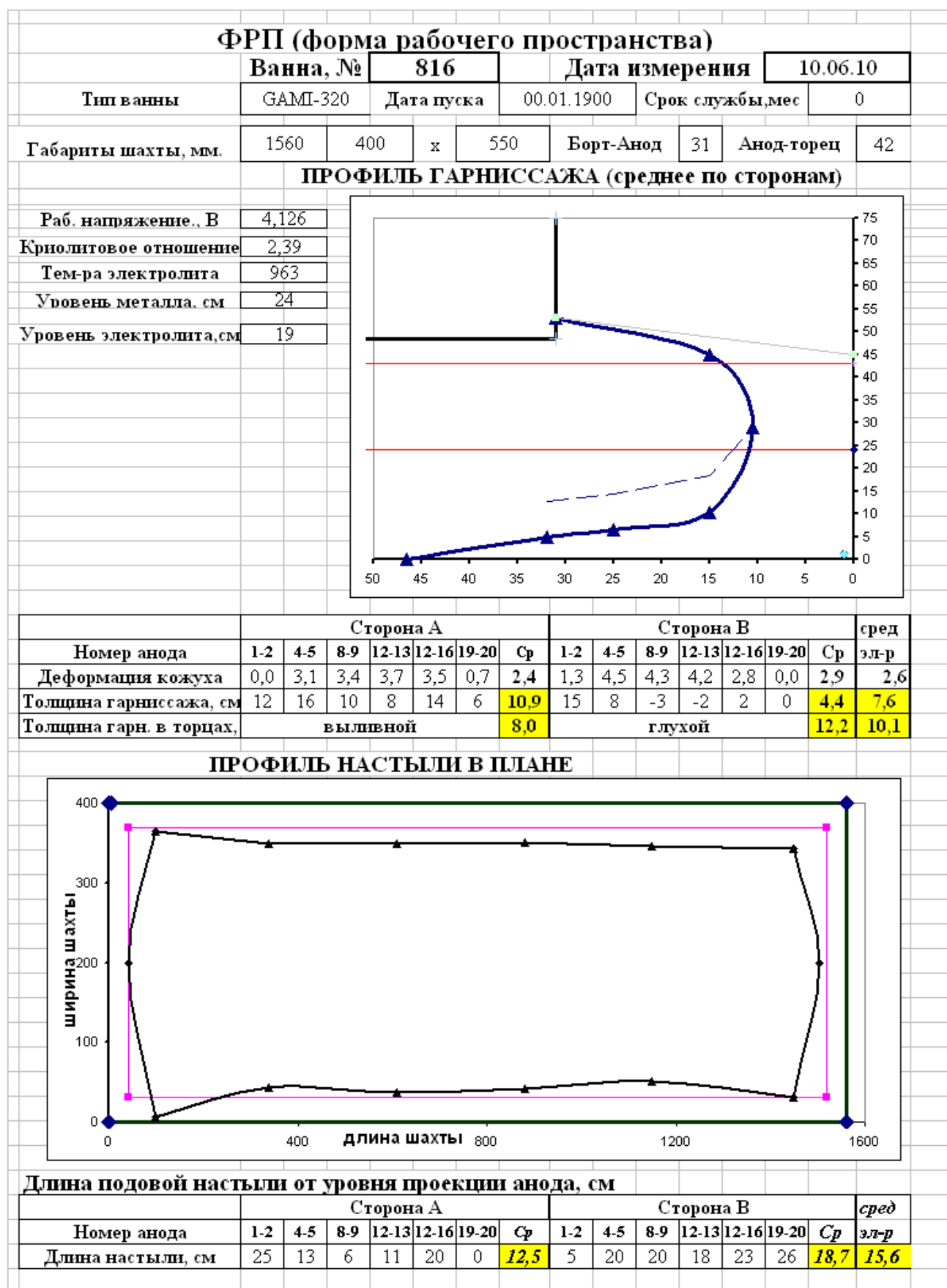


Рисунок 3.8. Форма рабочего пространства электролизера 1 очереди (№ 816)

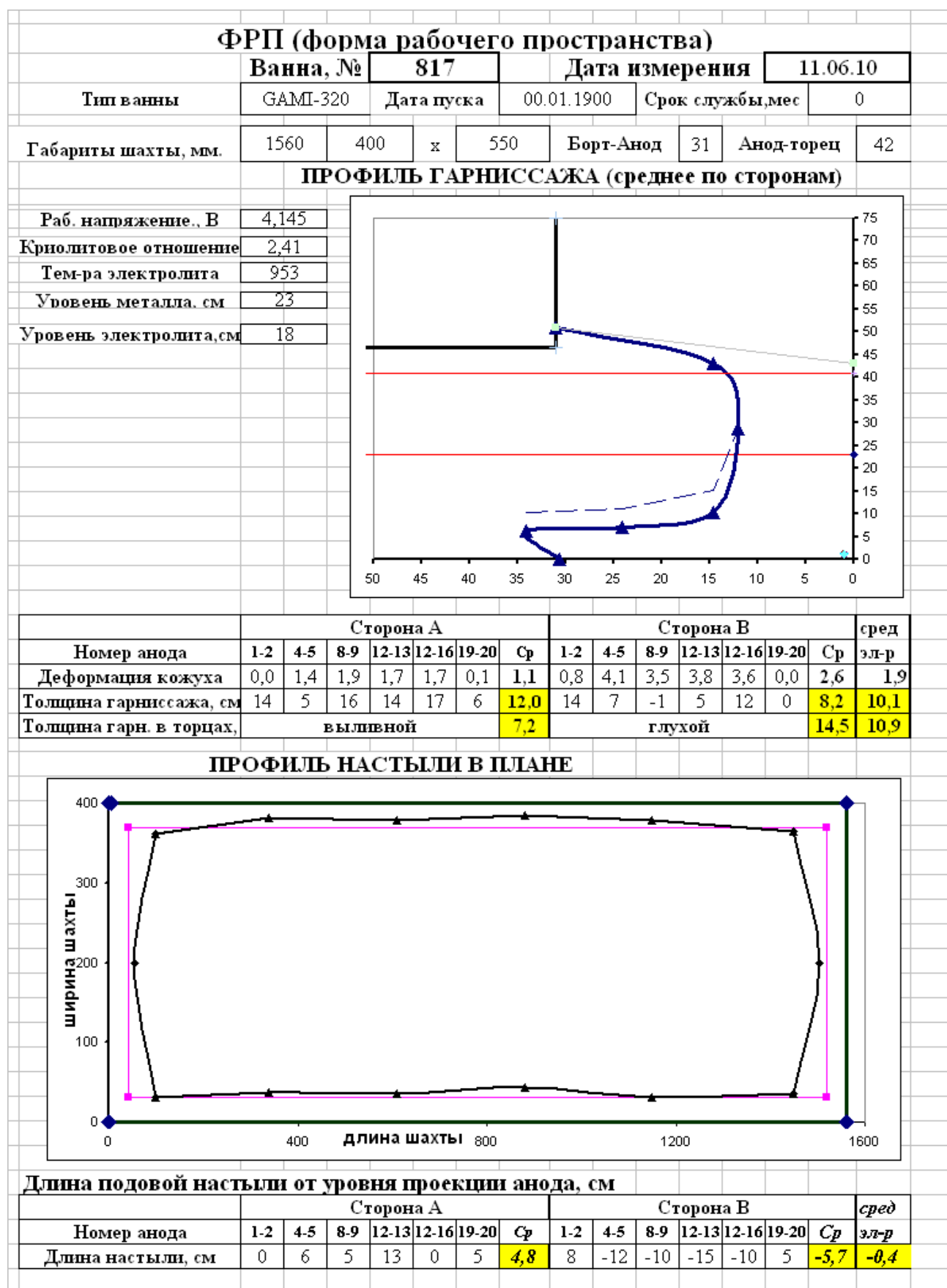


Рисунок 3.9. Форма рабочего пространства электролизера 1 очереди (№ 817)

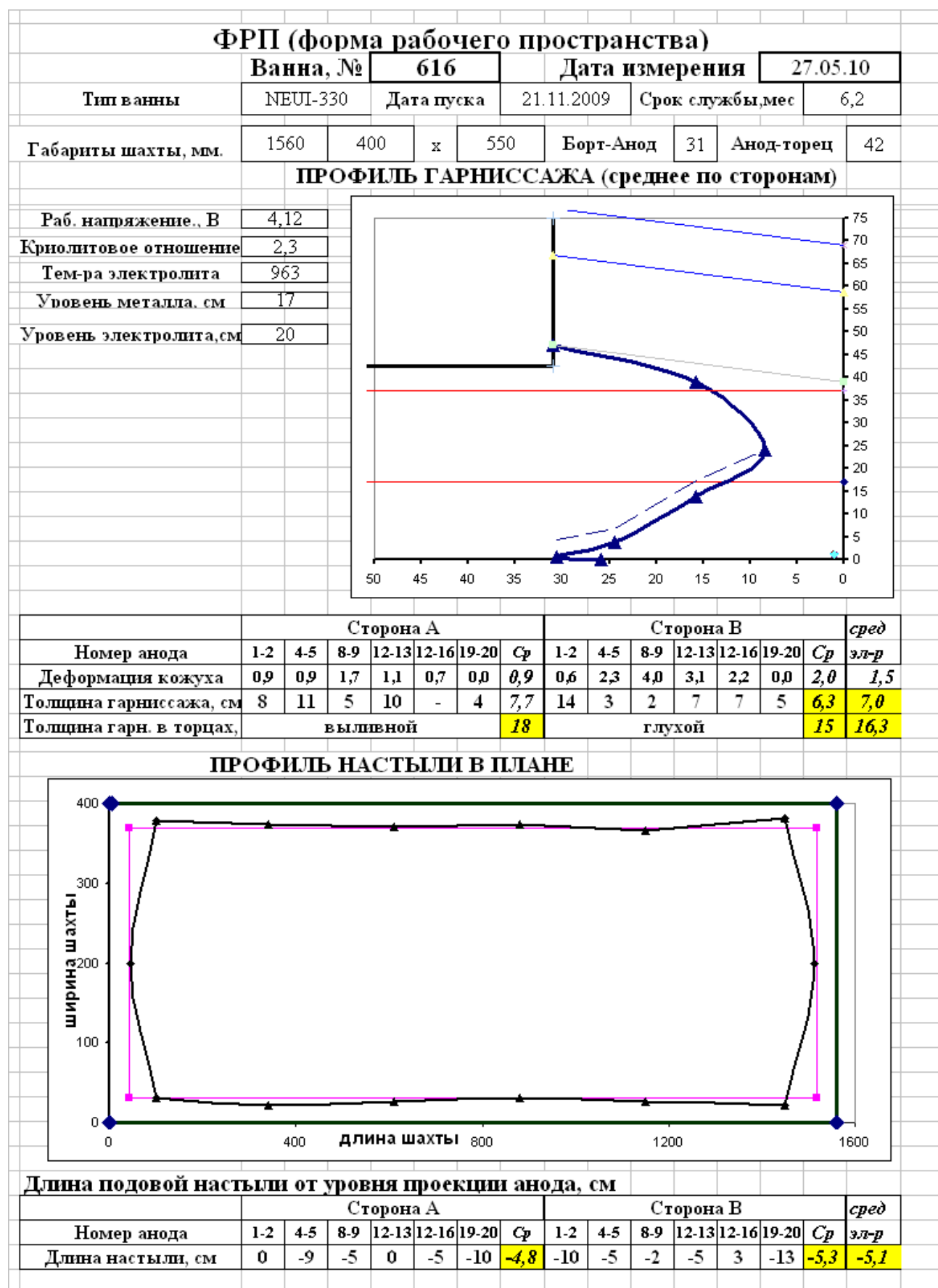


Рисунок 3.10. Форма рабочего пространства электролизера 2 очереди (№ 616)

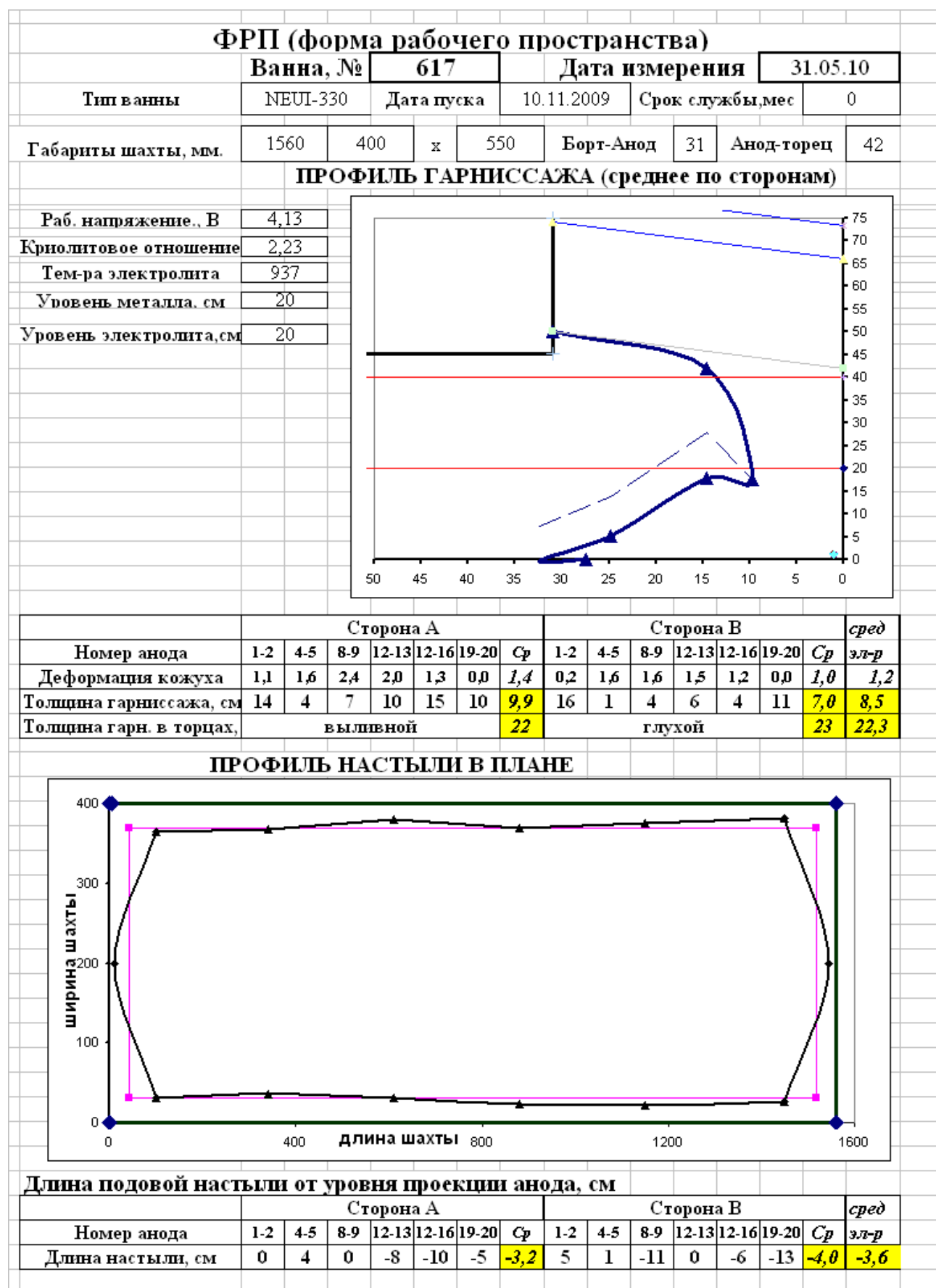


Рисунок 3.11. Форма рабочего пространства электролизера 2 очереди (№ 617)

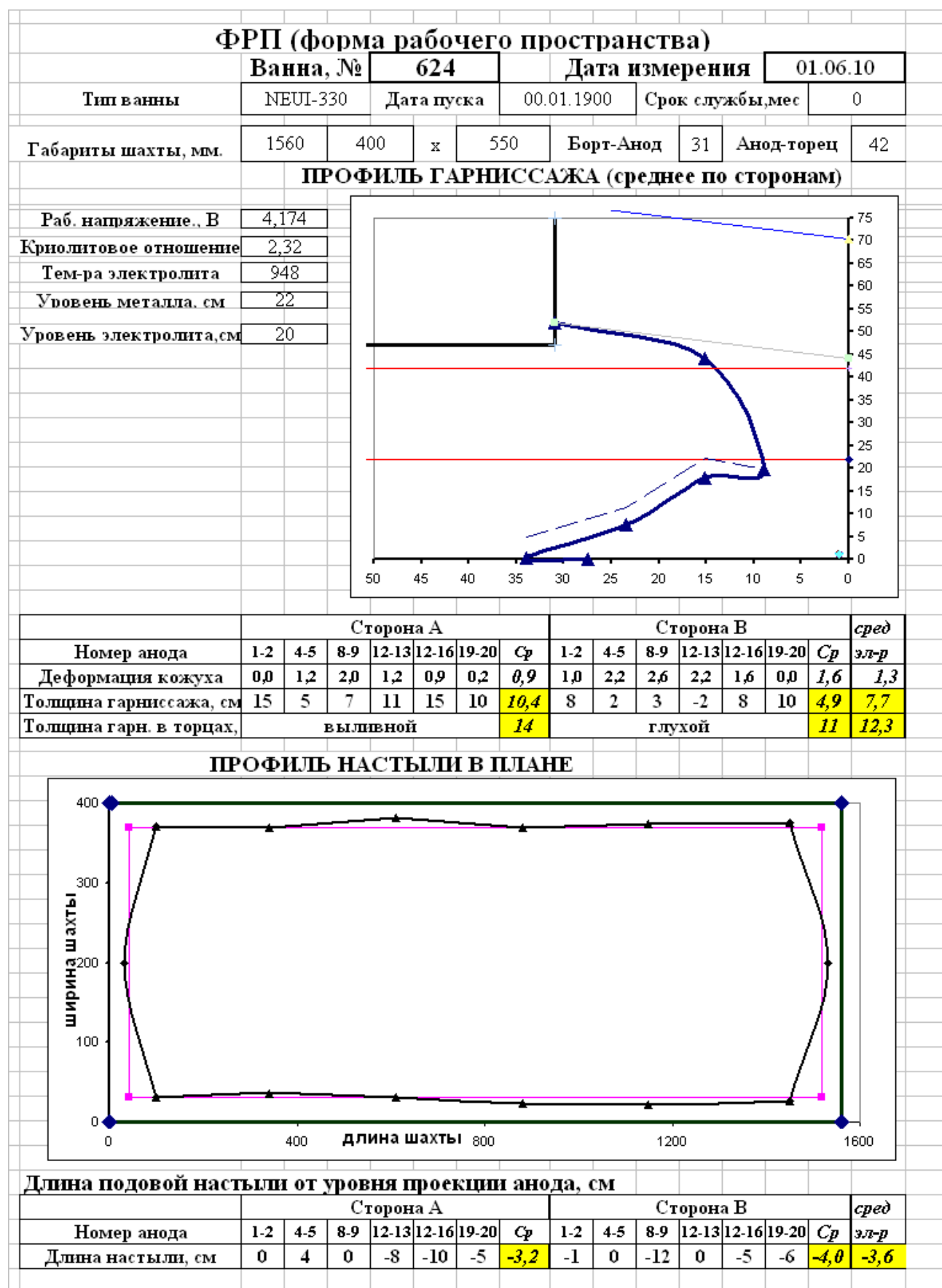


Рисунок 3.12. Форма рабочего пространства электролизера 2 очереди (№ 624)

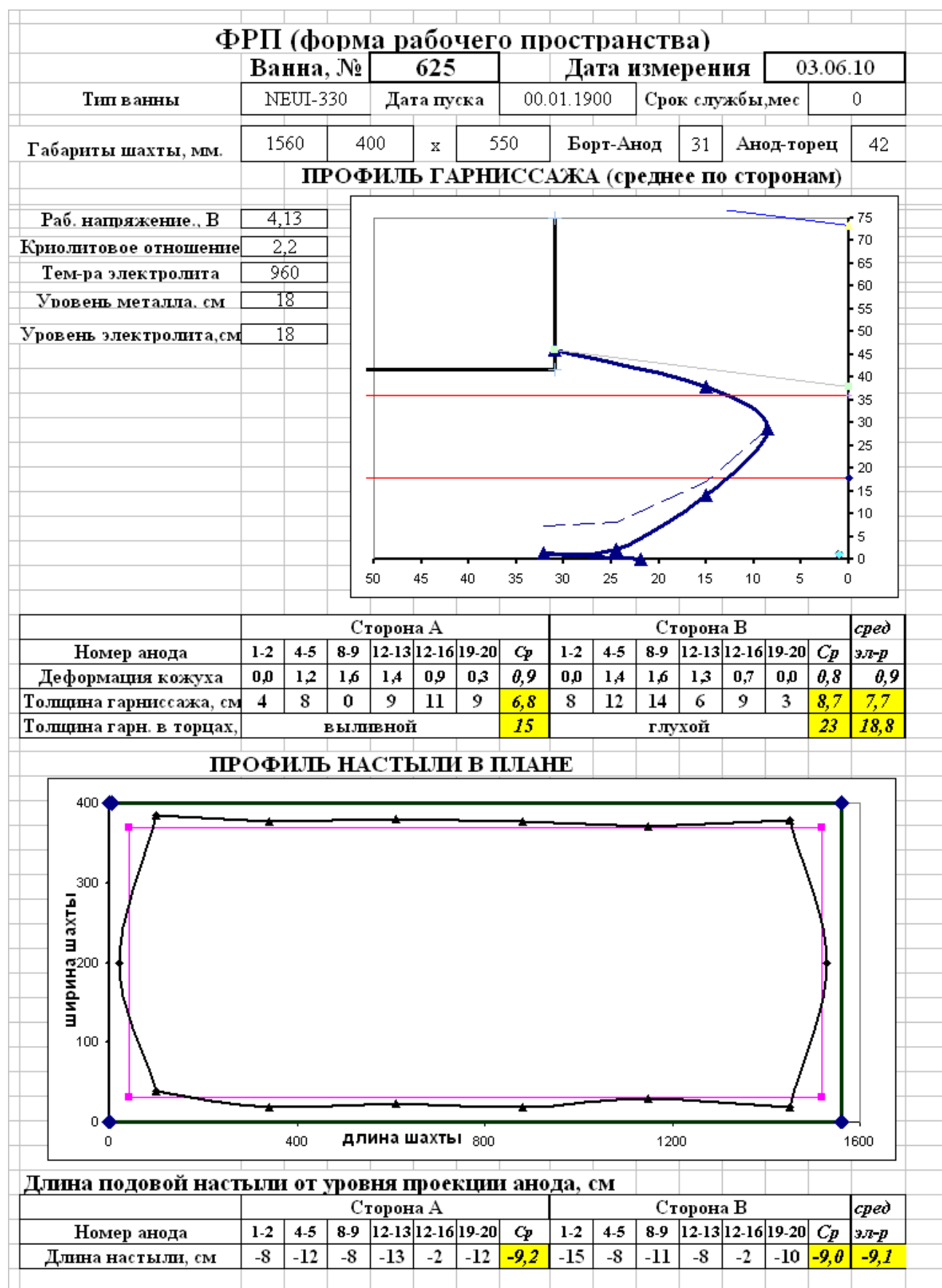


Рисунок 3.13. Форма рабочего пространства электролизера 2 очереди (№ 625)

Таблица 3.4. Деформация продольной стенки кожуха электролизеров 2 и 1 очереди, см

		Выл	2	5	9	12	16	19	Глух	Max
616	A	0,2	0,9	0,9	1,7	1,1	0,7	0	0,2	1,7
	B		0,6	2,3	4	3,1	2,2	0		4,0
617	A	0,2	1,1	1,6	2,4	2	1,3	0	0,2	2,4
	B		0,2	1,6	1,6	1,5	1,2	0		1,6
624	A	0,3	0	1,2	2	1,2	0,9	0,2	0,2	2,0
	B		1	2,2	2,6	2,2	1,6	0		2,6
625	A	0,3	0	1,2	1,6	1,4	0,9	0,3	0,2	1,6
	B		0	1,4	1,6	1,3	0,7	0		1,3
Ср.	A	0,3	0,5	1,2	1,9	1,4	1,0	0,1	0,2	1,9
2 очер.	B		0,5	1,9	2,5	2,0	1,4	0,0		2,4
		Выл	2	5	9	12	16	19	Глух	Max
716	A	0,8	0	4,4	5,6	4,5	4,1	0,5	1,1	5,6
	B		0,5	4,3	4,7	5,1	4	0		5,1
717	A	0,3	0,9	4,2	0	4,5	5	0,9	0,7	5,0
	B		0	4,2	3,8	4,2	3,2	0		4,2
816	A	1	0	3,1	3,4	3,7	3,5	0,7	0,8	3,7
	B		1,3	4,5	4,3	4,2	2,8	0		4,5
817	A	0,8	0	1,4	1,9	1,7	1,7	0,1	0,5	1,9
	B		0,8	4,1	3,5	3,8	3,6	0		3,8
Ср.	A	0,7	0,2	3,3	2,7	3,6	3,6	0,5	0,8	4,1
1 очер.	B		0,7	4,3	4,1	4,3	3,4	0,0		4,4

3.2.3 Энергетический баланс

Расчет энергетического баланса выполнен для температуры электролиза, которая для всех обследованных ванн изменялась в интервале 940 – 963°C. В расчетах учтено время работы с открытым укрытием, принятое 2%. Несмотря на малое количество тепла, отдаваемого напрямую анодным массивом при открытом укрытии. Значения объема газоотсоса приняты по последним результатам измерений, проводимых в целом для группы ванн из 36 электролизеров, что внесло дополнительные погрешности в результаты. Температура отходящих газов принималась равной температуре патрубка газоотсоса. Теплотери от поверхностей рассчитывались по обычным методикам с учетом конвективной и радиационной составляющих теплопередачи. Измеренные составляющие электрического баланса приведены в разделе 3.1, температуры поверхностей в разделе 2.2. Для сравнения различных типов ванн приведены удельные значения теплотери и других составляющих баланса в кВт, кВт·ч/т и в вольтах (В), полученные делением теплотери в кВт на силу тока в кА. Расходные коэффициенты по сырью и выход по току принимались по данным за июнь 2013 г.

Сравнительные результаты расчета энергетических балансов и тепловых потерь по обследованным ваннам приведены в приложении Г, приложении Д) и на рисунках 2.2.1 – 2.2.2.

Расчетные теплотери от электролизеров составили:

Электролизеры 1 очереди:

- суммарные теплотери 668 кВт или 2,089 В, в т.ч:
- от конструкции - 529 кВт (1.652 В);
- с отходящими газами –140 кВт (0.436 В).

Теплотери от конструкции распределились следующим образом:

- теплотери анодным устройством – 38,4 %;
- теплотери катодным кожухом – 61,6 %.

Распределение тепла относительно уровня пола составило:

- теплотери верхом (анодный узел+газоотсос+верхняя зона кожуха) – 48,9 %;
- теплотери низом– 51,1 %.

Электролизеры 2 очереди:

- суммарные теплотери 646 кВт или 2,018 В, в т.ч:
- от конструкции - 476 кВт (1.488 В);
- с отходящими газами –170 кВт (0.531 В) .

Теплотери от конструкции распределились следующим образом:

- теплотери анодным устройством – 52,5 %;
- теплотери катодным кожухом – 47,5 %.

Распределение тепла относительно уровня пола составило:

- теплотери верхом (анодный узел+газоотсос+верхняя зона кожуха) – 62,0 %;
- теплотери низом– 38,0 %.

Таблица 3.5. Сравнительные энергетические характеристики электролизеров

	1 очередь					2 очередь				
Параметр/Номер эл-ра	716	717	816	817	Ср	616	617	624	625	Ср
Среднее напряжение, В	4,222	4,164	4,187	4,233	4,202	4,197	4,224	4,205	4,255	4,220
Греющее напряж., В	3,883	3,833	3,850	3,899	3,866	3,888	3,916	3,898	3,945	3,912
Температура эл-та, °С	949	938	963	953	951	952	937	948	960	949
Выход потоку, %	91,9	92	91,6	91,5	91,7	92,7	93	93,1	93,1	93,10
Общие теплотери, кВт	630	654	687	685	668	674	562	628	731	646
Унос тепла с газами, кВт	130	159	162	104	140	175	163	153	187	170
Потери с конструкции, кВт	501	495	525	581	529	499	399	475	544	476
- от анодного узла	115	104	116	122	117	188	139	161	187	169
- от катодного кожуха	386	391	409	459	412	312	260	313	357	307
Общие теплотери, В	1,97	2,05	2,15	1,97	2,09	2,11	1,76	1,96	2,29	2,02
Погрешность баланса, %	1,4	-1,6	-3,4	-2,0	-1,7	-2,4	6,1	1,0	-5,6	-0,1
Энергетический КПД, %	51,6	52,2	51,9	51,2	51,6	52,0	52,0	52,0	51,5	51,9
Распределение теплотери по узлам, %										

- анодный узел	38,8	40,2	40,5	33,0	38,8	53,7	53,7	50,1	51,2	52,5
- катодный узел	61,2	59,8	59,5	67,0	61,2	46,3	46,3	49,9	48,8	47,5
Распределение теплопотерь, %										
- верхом (выше пола)	48,9	50,0	51,3	44,5	48,9	62,8	63,2	61,9	60,0	62,0
- низом (ниже пола)	51,1	50,0	48,7	55,5	51,1	37,2	36,8	38,1	40,0	38,0

Практика работы электролизеров с низким удельным расходом электроэнергии и высоким выходом по току показывает, что наиболее эффективный режим получается при одновременном соблюдении требований оптимизации параметров по приходу и расходу энергии. Приход энергии, в основном, определяется падением напряжения в электролите, составляющим 70-80 % от величины греющего напряжения. Расход тепла примерно равнозначно зависит от выхода по току (энергия на реакцию) и от потерь с конструкции. Требуемая величина энергии на электрохимическую реакцию остается практически постоянной и зависит от выхода по току, поэтому оптимальная величина удельных теплопотерь должна составлять 1.8-2.2 В.

Суммарные теплопотери от ванн КЭЗа составили 646 кВт или 2,02 В (2 очередь) и 688 кВт или 2,09 В (1 очередь). На лучших зарубежных аналогах эта величина составляет – 2.0-2.1 В, а с удельным расходом электроэнергии менее 13000 кВт·ч/т– 1.8-2.0 В. Следовательно, электролизеры КЭЗа 1 и 2 очереди соответствуют уровню лучших зарубежных аналогов, имеющих достаточно высокие показатели. При этом электролизеры 2 очереди имеют преимущество по сравнению с электролизерами 1 очереди. Это связано с меньшим уровнем металла на 2-3 см, а также конструкцией кожуха электролизеров 2 очереди, в большей мере, обеспечивающей вынос избыточного тепла и сохранение приемлемого теплового баланса при изменениях режима и температуры окружающего воздуха.

Таблица 3.6. Тепловые потери электролизеров 1 очереди

№	Наименование	Q, кВт	q, кВт/м ²	U, мВ	%	t _п -t _в
	Потери с анода					
1	Бункера АПГ	4,517	0,19	14	0,9	16
2	Верх коллектора	2,273	0,18	7	0,4	13
3	Боковая поверхность коллектора	12,935	0,27	40	2,4	18
4	Анодная шина	7,016	0,15	22	1,3	14
5	Штанги над укрытием	0,118	0,38	0	0,0	34
6	Горизонтальная площадка	11,107	0,71	35	2,1	57
7	Наклонные створки	37,997	0,48	119	7,2	39
8	Фланцевый лист сверху	19,054	1,44	60	3,6	102
9	Штанги под укрытием	0,015	0,03	0	0,0	109
10	Биметаллическая пластина	0,811	0,06	3	0,2	160
11	Кронштейны штанг	2,505	0,11	8	0,5	228
12	Ниппеля анодов	2,238	0,18	7	0,4	309
13	Аноды	2,926	0,07	9	0,6	158
14	Глиноземная засыпка-аноды	1,435	0,05	4	0,3	158
15	Глиноземная засыпка борт-анод	0,559	0,04	2	0,1	130
16	Торцевое укрытие	1,991	0,22	6	0,4	10
17	Патрубок газоотсоса	4,096	0,89	13	0,8	57
18	Прочие (5 % от суммы)	5,354		17	1,0	
	Итого с анода	116,947		365	22,1	
	Потери с катода					
1	Верхняя зона	56,161	5,45	176	10,6	278
2	Верхняя зона-ребро	24,507	2,70	77	4,6	190
3	Площадка	28,934	2,94	90	5,5	190
4	Средняя зона	69,502	3,58	217	13,1	219
5	Нижняя зона	9,831	0,75	31	1,9	62
6	Блюмсы	20,549	3,14	64	3,9	207
7	Шпангоут	64,244	0,84	201	12,2	72
8	Торец. Обортов. лист сверху	2,665	0,95	8	0,5	71
9	Торец. Обортов. лист с торца	2,261	0,90	7	0,4	74
10	Торец. Верхняя зона	14,601	5,31	46	2,8	282
11	Торец. Верхняя зона-ребро	9,259	2,66	29	1,8	183
12	Торец. Верхняя зона-ребро торец	0,949	1,13	3	0,2	91

Окончание таблицы 3.6

13	Торец. Площадка верхняя	18,377	2,80	57	3,5	186
14	Торец. Средний пояс	3,602	1,18	11	0,7	91
15	Торец. Средняя зона	19,998	5,18	62	3,8	287
16	Торец. Средняя зона-ребро	11,367	2,40	36	2,1	169
17	Торец. Ср. Зона-ребро торец	1,581	1,07	5	0,3	87
18	Торец. Площадка нижняя	6,044	0,92	19	1,1	85
19	Торец. Нижний пояс	0,893	0,57	3	0,2	52
20	Торец. Нижняя зона	3,619	0,74	11	0,7	69
21	Торец. Нижняя зона-ребро	3,231	0,54	10	0,6	54
22	Торец. Ниж. Зона-ребро торец	0,727	0,35	2	0,1	35
23	Торец. Площадка кожуха	0,579	0,19	2	0,1	24
24	Торец. Подкатодная балка	0,813	0,10	3	0,2	11
25	Днище	20,851	0,37	65	3,9	44
26	Ребра днища	16,139	0,12	50	3,1	15
27	Подкатодная балка	0,495	0,03	2	0,1	6
	Итого с катода	411,778		1287	77,9	
	От конструкции	528,72		1652	100	
	С газоотсосом	139,61		436		
	Всего от электролизера	668,3		2089		

Таблица 3.7. Тепловые потери электролизеров 2 очереди

№	Наименование	Q, кВт	q, кВт/м ²	U, мВ	Потери %	t _п -t _в
	Потери с анода					
1	Бункера АПГ	5,759	0,24	18	1,2	25
2	Верх коллектора	2,407	0,20	8	0,5	17
3	Боковая пов-ть коллектора	21,142	0,44	66	4,4	36
4	Анодная шина	10,311	0,22	32	2,2	25
5	Штанги над укрытием	0,143	0,46	0	0,0	44
6	Горизонтальная площадка	17,689	1,12	55	3,7	88
7	Наклонные створки	62,299	0,79	195	13,1	66
8	Фланцевый лист сверху	20,497	1,54	64	4,3	112
9	Штанги под укрытием	0,018	0,04	0	0,0	131
10	Биметаллическая пластина	0,918	0,06	3	0,2	179
11	Кронштейны штанг	3,058	0,14	10	0,6	262
12	Ниппеля анодов	2,493	0,20	8	0,5	332
13	Аноды	4,043	0,10	13	0,8	202
14	Глин.засыпка-аноды	1,956	0,07	6	0,4	202

Окончание таблицы 3.7

15	Глин.засыпка борт-анод	0,839	0,06	3	0,2	179
16	Торцевое укрытие	2,889	0,32	9	0,6	23
17	Патрубок газоотсоса	4,784	1,04	15	1,0	69
18	Прочие (5 % от суммы)	7,774		24	1,6	
	Итого с анода	169,021		528	35,5	
	Потери с катода					
1	Верхняя зона	58,489	5,67	183	12,3	288
2	Верхняя зона-ребро	17,156	1,89	54	3,6	150
3	Средняя зона	61,019	3,14	191	12,8	203
4	Нижняя зона	3,787	0,29	12	0,8	29
5	Блюмсы	20,278	3,10	63	4,3	209
6	Шпангоут	53,193	0,69	166	11,2	64
7	Торец. Обортов. лист сверху	2,516	0,90	8	0,5	70
8	Торец. Обортов. лист с торца	1,827	0,72	6	0,4	65
9	Торец. Верхняя зона	11,328	4,12	35	2,4	244
10	Торец. Верхняя зона-ребро	7,176	2,06	22	1,5	156
11	Торец. Верх.зона-ребро торец	0,739	0,88	2	0,2	77
12	Торец. Площадка верхняя	9,444	1,44	30	2,0	118
13	Торец. Средний пояс	2,687	0,88	8	0,6	75
14	Торец. Средняя зона	11,839	3,07	37	2,5	207
15	Торец. Средняя зона-ребро	7,146	1,51	22	1,5	124
16	Торец. Ср. зона-ребро торец	1,017	0,69	3	0,2	64
17	Торец. Площадка нижняя	3,861	0,59	12	0,8	62
18	Торец. Нижний пояс	0,666	0,42	2	0,1	42
19	Торец. Нижняя зона	2,591	0,53	8	0,5	54
20	Торец. Нижняя зона-ребро	2,375	0,40	7	0,5	44
21	Торец. Ниж. зона-ребро торец	0,436	0,21	1	0,1	23
22	Торец. Площадка кожуха	0,363	0,12	1	0,1	17
23	Торец. Подкатодная балка	0,350	0,04	1	0,1	5
24	Днище	17,507	0,31	55	3,7	40
25	Ребра днища	9,116	0,07	28	1,9	9
26	Подкатодная балка	0,150	0,01	0	0,0	2
	Итого с катода	307,054		960	64,5	
	От конструкции	476,08		1488	100	
	С газоотсосом	169,77		531		
	Всего от эл-ра	645,8		2,018		

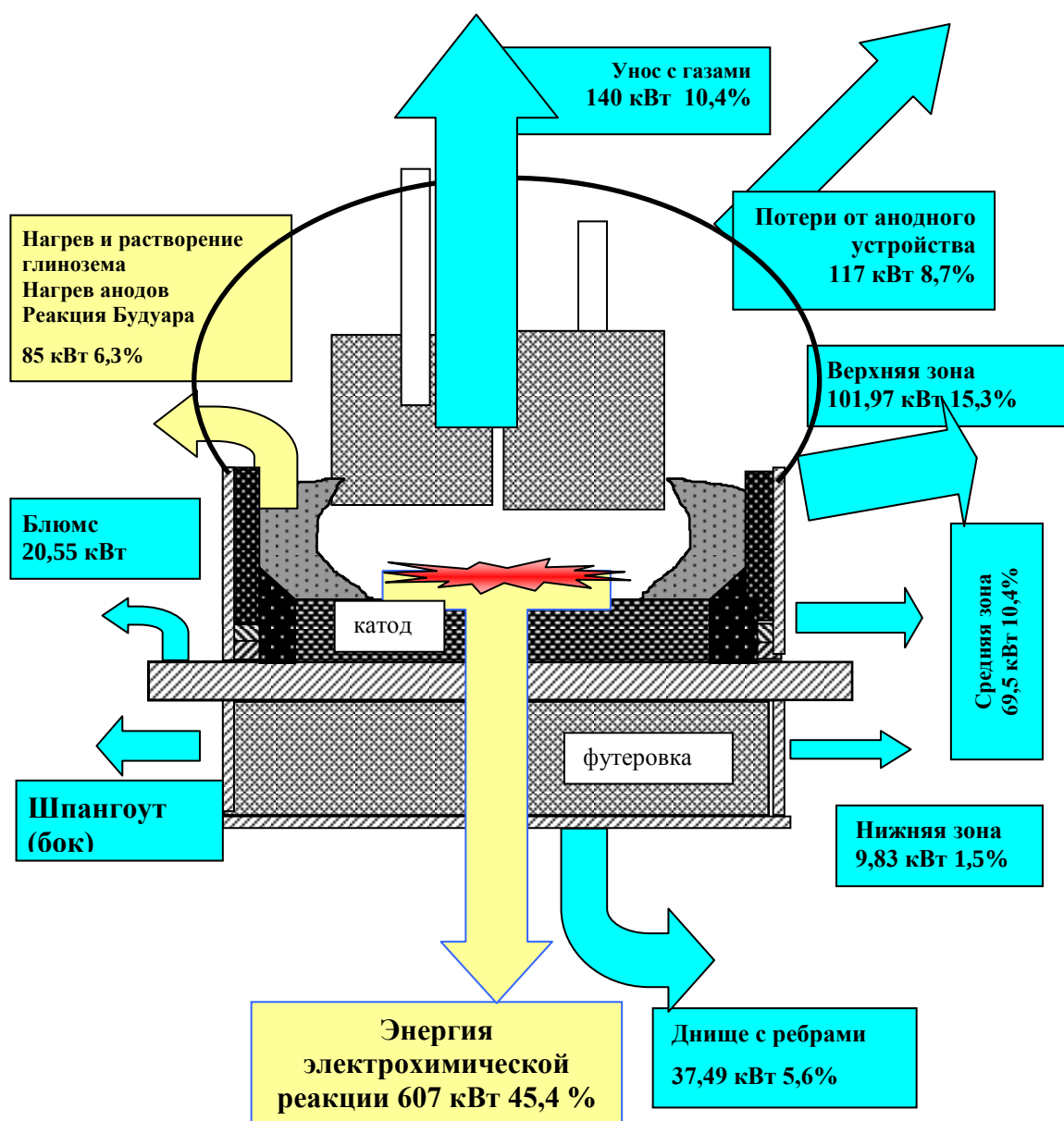


Рисунок 3.14. Схема энергетического баланса (расхода энергии) электролизеров 1 очереди КЭЗа

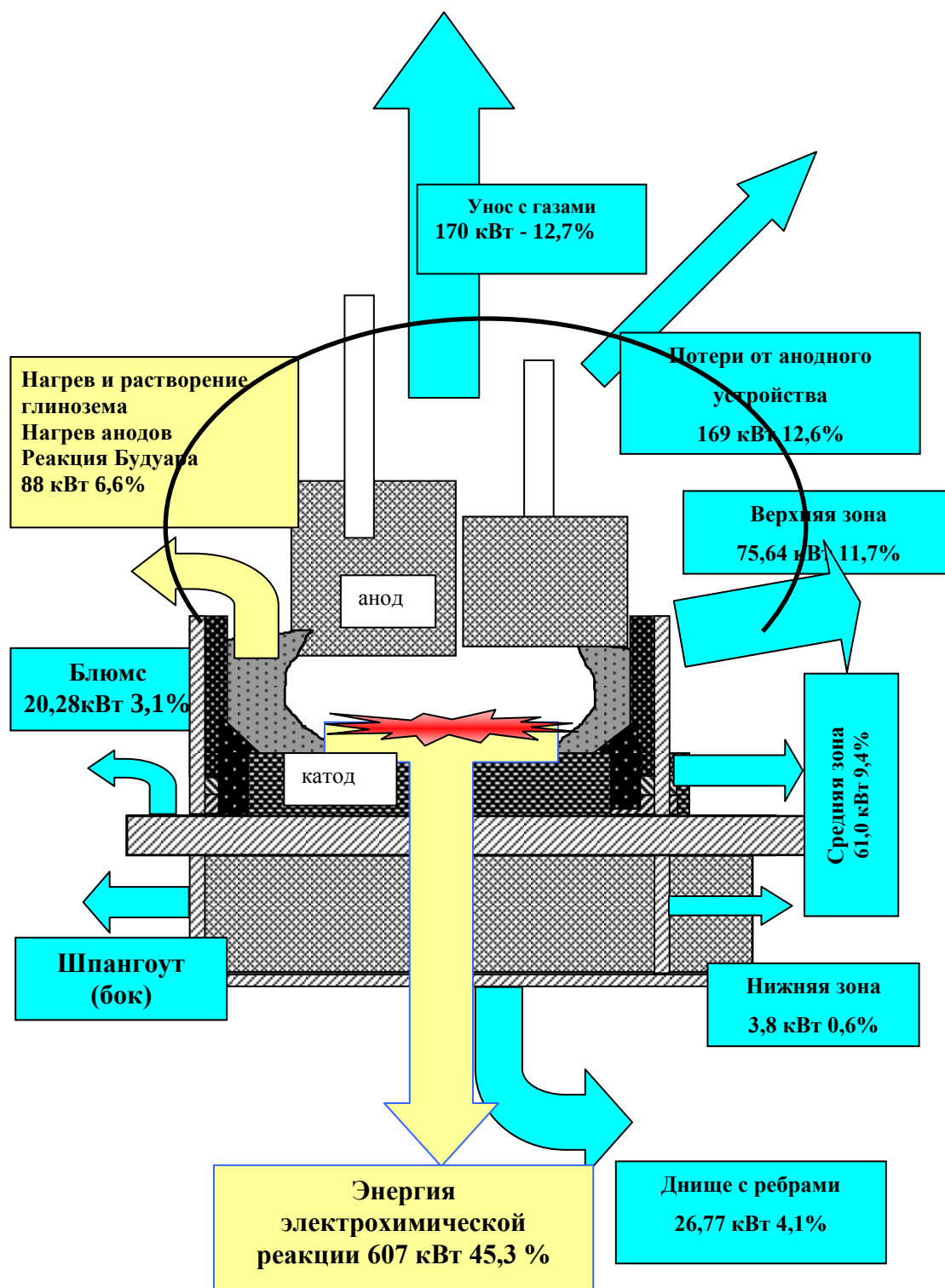


Рисунок 3.15. Схема энергетического баланса (расхода энергии) электролизеров 2 очереди КЭЗа

Сравнительные характеристики распределения тепловых потерь приведены в таблицах 3.6-3.7. Распределение тепла между верхом и низом составляет:

- для электролизеров 1 очереди 48,9 / 51,1 %;
- для электролизеров 2 очереди 62,0 / 38,0 %.

Полученные величины относительного распределения тепла от ванны (анод-катод, верх-низ) представляются типичными для современных ванн ОА большой мощности.

Оптимальное соотношение теплопотерь для них составляет около 55-60% верхом электролизера и 40-45 % нижней частью. Для электролизеров 1 очереди это условие не соблюдается, что, на наш взгляд, связано с 2 причинами – меньшим объемом газоотсоса на исследуемых ваннах (8327 нм³ и 8582 нм³ соответственно), а также ухудшенными условиями конвективной теплопередачи от верхней зоны кожуха, связанными как с конструкцией кожуха в верхней части, так и с более низким расположением электролизера по отношению к уровню земли, что, при прочих равных условиях, уменьшает воздухообмен и теплоотдачу от кожуха.

Тепловые потери с отходящими газами составили 140 кВт (10,4 %) и 170 кВт (12,7 %) для электролизеров 1 и 2 очередей соответственно. При этом доля конвективной и радиационной (излучение) составляющих теплопотерь для верха и низа электролизера примерно одинакова для обеих серий, что говорит о значимости обоих способов теплопередачи. Сокращение теплопотерь с отходящими газами является одним из направлений создания менее энергоемкого производства. Здесь основной проблемой является снижение теплопотерь с отходящими газами без ухудшения экологии. Сокращение этой статьи, за счет некоторого уменьшения объемов газоотсоса (на 5-7 %), позволяет достичь лучшего регулирования теплоотдачи верхом и сократить расходы энергии на эту составляющую (при номинальной силе тока).

Тепловые потери собственно от анодного устройства составили 117 кВт (8,7 %) и 169 кВт (12,6 %) для электролизеров 1 и 2 очередей соответственно. Основные теплопотери в анодном узле приходятся на наклонные створки (26-38% от общих теплопотерь анодным узлом), горячий фланцевый лист (12-15 %), боковую поверхность балки-коллектора (9-13 %) и горизонтальную площадку укрытия (9-12 %). В процессе эксплуатации все они изменяются в значительной степени, поскольку в основном зависят от уровня глиноземной засыпки на анодах и корке.

Таблица 3.8. Сравнительные характеристики распределения теплопотерь основными поверхностями

	1 очередь					2 очередь					Разн.
Параметр/Номер эл-ра	716	717	816	817	Ср	616	617	624	625	Ср	1-2
Среднее напряжение, В	4,222	4,164	4,187	4,233	4,202	4,197	4,224	4,205	4,255	4,220	-0,02
Греющее напряжение, В	3,88	3,83	3,85	3,90	3,87	3,89	3,92	3,90	3,95	3,91	-0,05
Общие теплопотери, кВт	630	654	687	685	668	674	562	628	731	646	22,5
Общие теплопотери, В	1,97	2,05	2,15	2,14	2,09	2,11	1,76	1,96	2,29	2,28	0,07
Температура электролита, °С	949	938	963	953	951	952	937	948	960	949	1,5
Распределение в анодном узле, кВт											
Бок. пов-ть коллектора	10,88	12,66	12,28	15,43	12,94	24,40	15,33	20,25	24,93	21,14	-8,21
Горизонтальная площадка	10,56	11,72	11,13	10,77	11,11	21,29	16,04	15,08	18,46	17,69	-6,58

Окончание таблицы 3.8

Наклонные створки	43,35	27,39	36,28	35,27	38,00	69,56	49,35	61,05	69,51	62,30	-24,30
Фланцевый лист сверху	17,43	17,07	20,38	21,28	19,05	22,54	17,47	19,60	22,42	20,50	-1,44
Распределение в катодном кожухе, кВт											
Боковая поверхность , в т.ч.	174,7	182,1	197,9	201,2	188,9	133,4	127,2	138,6	154,4	140,5	95,58
- верхняя зона с ребром	102,0	109,7	115,6	110,9	109,6	70,39	69,53	75,56	78,14	75,64	81,05
- средняя зона	62,60	62,06	73,99	79,81	69,50	62,90	54,10	58,62	68,79	61,02	8,48
- нижняя зона	10,08	10,34	8,34	10,51	9,83	0,10	3,58	4,45	7,49	3,79	6,04
Блюмсы	17,74	19,61	21,18	23,79	20,55	19,93	17,70	20,98	22,66	20,28	0,27
Шпангоут	60,00	61,89	67,57	66,26	64,24	52,51	41,55	55,85	63,15	53,19	11,05
Торцевая поверхность, в т.ч.	90,64	90,81	98,16	123,9	100,6	82,14	52,13	60,86	72,90	66,36	88,47
Днище, в т.ч:	43,22	36,90	23,76	43,97	37,49	23,81	21,46	19,37	43,78	26,77	10,71
- днище	22,39	19,43	16,74	24,18	20,85	16,92	13,35	13,30	27,39	17,51	3,34
- ребра днища	20,11	16,78	6,92	19,23	16,14	6,80	7,99	6,00	15,89	9,12	7,02
Распределение в анодном узле (от 100 %), %											
Боковая поверхность коллектора	9,5	12,2	10,6	12,6	11,1	13,0	11,0	12,5	13,3	12,5	-1,4
Горизонтальная площадка	9,2	11,3	9,6	8,8	9,5	11,4	11,5	9,3	9,9	10,5	-1,0
Наклонные створки	37,8	26,4	31,4	28,9	32,5	37,1	35,4	37,8	37,1	36,9	-4,4
Фланцевый лист сверху	15,2	16,5	17,6	17,4	16,3	12,0	12,5	12,1	12,0	12,1	4,2
Распределение в катодном кожухе (от 100 %), %											
Боковая поверхность кожуха, в т.ч.	45,22	46,53	48,44	43,83	45,88	42,78	48,92	46,88	43,26	45,74	0,14
- верхняя зона с ребром и поясом	26,4	28,0	28,3	24,2	26,6	22,6	26,7	25,6	21,9	24,6	2,0
- средняя зона	16,2	15,9	18,1	17,4	16,9	20,2	20,8	19,8	19,3	19,9	-3,0
- нижняя зона	2,6	2,6	2,0	2,3	2,4	0,0	1,4	1,5	2,1	1,2	1,2
Блюмсы	4,6	5,0	5,2	5,2	5,0	6,4	6,8	7,1	6,3	6,6	-1,6
Шпангоут	15,5	15,8	16,5	14,4	15,6	16,8	16,0	18,9	17,7	17,3	-1,7
Торцевая поверхность кожуха, в т.ч.	23,5	23,2	24,0	27,0	24,4	26,3	20,0	20,6	20,4	21,6	2,8
Днище, в т.ч:	11,0	9,3	5,8	9,5	9,0	7,6	8,2	6,5	12,1	8,7	0,3
- Днище	5,8	5,0	4,1	5,3	5,1	5,4	5,1	4,5	7,7	5,7	-0,6
- Ребра днища	5,2	4,3	1,7	4,2	3,9	2,2	3,1	2,0	4,5	3,0	1,0

Тепловые потери собственно от катодного кожуха составили 412 кВт (30,8 %) и 307 кВт (22,9 %) для электролизеров 1 и 2 очередей соответственно. Распределение тепловых потерь по элементам катодного кожуха относительно общих потерь кожухом следующее (таблица 3.12):

- боковая поверхность 43-48 % (1 очередь) / 43-49 % (2 очередь), в том числе верхней зоной 24-28 / 22-27 %, средней зоной 16-18 / 19-21 %, нижней зоной 2-2,5 / 1-2 % соответственно;
- шпангоуты 14-17 % (1 очередь) / 16-19 % (2 очередь);
- блюмсы 4,6-5,2 % (1 очередь) / 6,3-7,1 % (2 очередь);
- торцевая поверхность 23-27 % (1 очередь) / 20-26 % (2 очередь);
- днище с ребрами 6-11 % (1 очередь) / 6,5-12 % (2 очередь), в том числе собственно днищем 4,1-5,8 / 5,1-7,7 %, ребрами днища 1,7-5,2 / 2,0-4,2 %.

Здесь прослеживается общая тенденция взаимосвязи тепловых потерь и конструкции катодного кожуха. В кожухах ванн 2 очереди применены шпангоуты

500 мм, вместо 400 мм, используемых на 1 очереди, и дополнительное оребрение верхней зоны (50 ребер по стороне) при отсутствии продольных поясов с продухом. Это создает предпосылки для снижения температуры поверхностей стенок и днища, а также лучшему теплоотводу тепла от кожухов 2 очереди. Несмотря на увеличение площади теплоотдающих поверхностей, выше перечисленные факторы обеспечивают меньшие тепловые потери и более равномерное распределение тепла по наиболее горячим верхней и средней зонам кожуха.

Температура и тепловые потери днища сравнительно невелики, поскольку применяемая теплоизоляция футеровки электролизеров обеих очередей и их малое тепловое сопротивление вполне достаточно, возможно, даже излишне, для сохранения тепла, поступающего от подового блока и предотвращает развитие мощных настылей на подине.

То же относится и к нижней зоне кожуха. Известны случаи, когда при применении скошенной нижней части кожуха и недостаточном ее утеплении, происходил заметный рост боковой настыли. На электролизерах КЭЗА это невозможно, поскольку в футеровке скошенной части применен, кроме всего прочего, лучший на сегодняшний день теплоизоляционный материал - блоки из силикальцита толщиной 80-90 мм, а ее тепловое сопротивление сопоставимо с футеровкой основной нижней части кожуха.

Утепление днищ электролизеров на практике приводит к снижению теплового потока вниз, но к возрастанию теплового потока вбок, с соответствующим уменьшением гарниссажа и росту тепловых потерь через боковые стенки. Измеренная толщина гарниссажа на ваннах КЭЗА даже в летний период составляла 7-10 см, что свидетельствует, что наряду с примененными решениями по конструкции борта кожуха (тонкая карбидкремниевая плита, оребрение верхней зоны), футеровка нижней части кожуха выбрана правильно.

Доля поступающего Джоулева тепла от электроэнергии в общем приходе тепла составляет 92,5 % (1 очередь) и 93,4 % (2 очередь). Это соответствует лучшим ваннам аналогичной мощности и свидетельствует, как и об эффективном ее использовании, так и о достаточно напряженном энергетическом режиме ванн.

В таблицах приведена величина энергетического КПД, рассчитываемого как отношение полезной энергии (на электрохимическую реакцию, нагрев материалов и др.) к суммарному приходу энергии.

В среднем энергетический КПД составил 51,7 % (1 очередь) и 51,9 % (2 очередь), что является очень хорошим показателем. По мнению многих исследователей наиболее эффективным является энергетический режим с уменьшением тепловых потерь кожухом и распределением тепловых потерь верх/низ в пропорции 60/40 %. Это достигается снижением температуры электролита (оптимизация состава, контроль температуры ликвидуса, усовершенствование алгоритмов АСУТП), а также снижением тепловых потерь катодным кожухом, за счет применения, как теплоизоляционных материалов наилучшего качества, так и еще большим его оребрением, что позволяет экономить электроэнергию при сохранении оптимального теплового режима. Все перечисленные мероприятия

актуальны для КЭЗа, как для получения более низких расходов электроэнергии, так и для подготовки к увеличению силы тока.

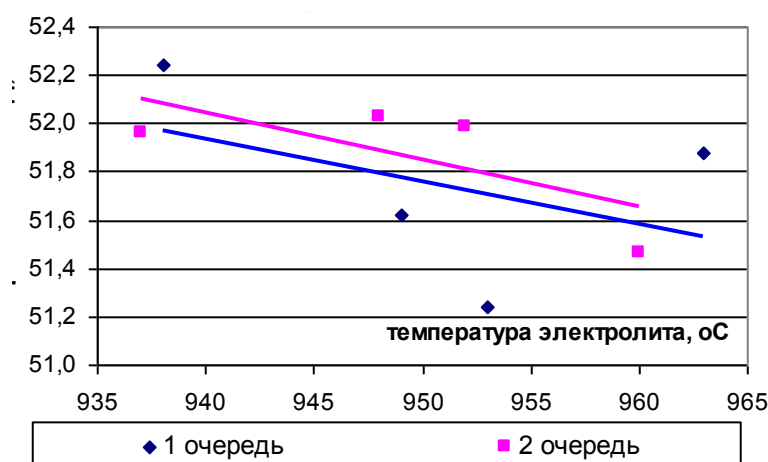


Рисунок 3.16. График зависимости энергетического КПД от температуры электролита

На рисунке 3.16 приведен график зависимости энергетического КПД от температуры электролита, построенный по данным для всех обследованных электролизеров КЭЗа. Полученная зависимость подтверждает изложенные выше выводы. Энергетический КПД увеличивается при снижении температуры электролита вследствие уменьшения тепловых потерь как анодным устройством (АУ), так катодным кожухом (КК) (рисунок 3.17).

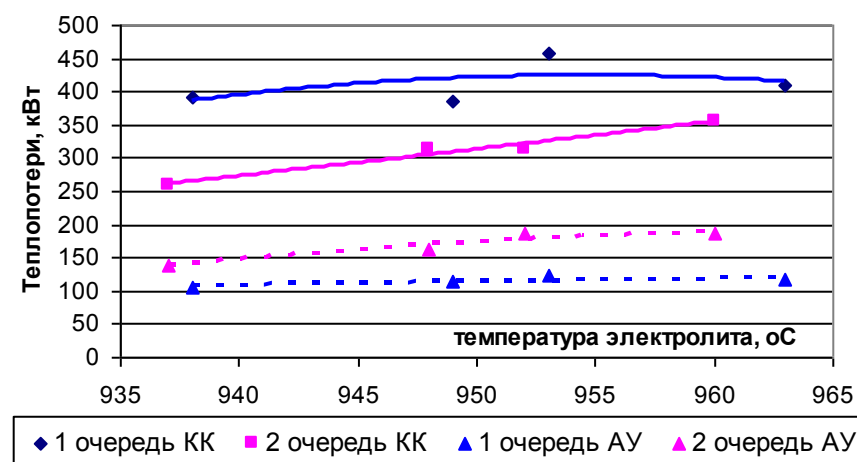


Рисунок 3.17. График зависимости тепловых потерь от температуры электролита

Как видно, повышение энергетического КПД и снижения удельного расхода электроэнергии невозможно без снижения общих тепловых потерь от электролизера.

На рисунке 3.18 приведена зависимость тепловых потерь от выхода по току.

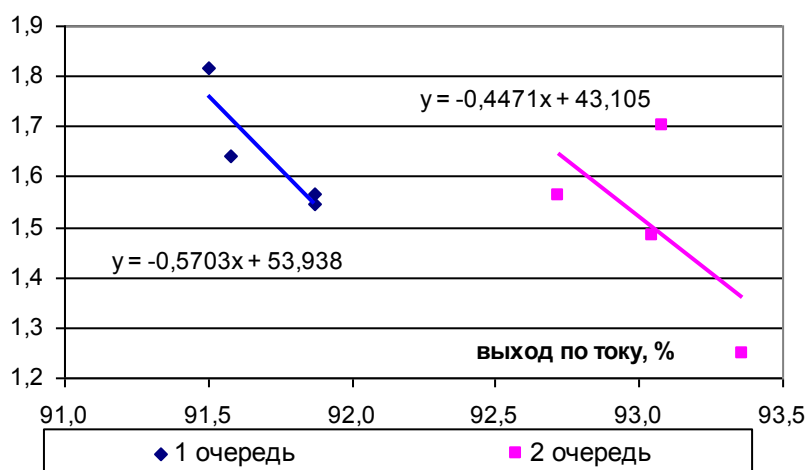


Рисунок 3.18. Зависимость теплопотерь от выхода по току

Стратегией руководства КЭЗа предусматривается отказ от работы по “заданному” приходу тепла (уставка регулирования АСУТП) при управлении тепловым и энергетическим режимом по «заданной» температуре электролита. При достаточно современном техническом оснащении, наличие АПГ обеспечивает технологический режим по минимуму сопротивления электролита, а низкая концентрация глинозема обеспечивает высокий выход по току. Тем не менее, дальнейшее повышение выхода по току является необходимым условием для повышения общей эффективности энергетического режима ванн (рисунок 3.18).

Выбирая дальнейший путь усовершенствования показателей электролизеров КЭЗ, необходимо определить стратегический путь развития: что является приоритетом для введения новой технологии электролиза – увеличение производительности ванн или экономичная работа с пониженным расходом электроэнергии.

Мероприятия по обеспечению того или иного пути развития различаются принципиально. В данной работе предпочтение отдавалось мерам, направленным на интенсификацию процесса электролиза.

Для анализа энергетических балансов и расчета возможной степени интенсификации процесса применяют уравнение Г.А.Абрамова, которое в упрощенном виде выглядит следующим образом:

$$D_{cp} = \sqrt{C/(\rho \cdot L + r)} \quad (3.1)$$

где: D_{cp} - средняя анодная плотность тока, отнесенная к среднему сечению электролита S_{cp} , А/см²;

C , r - удельные теплопотери и сопротивление “греющих” конструктивных элементов, отнесенные к среднему сечению электролита, S_{cp} Вт/см², Ом·см², соответственно;

ρ - электросопротивление электролита, Ом/см;

L - межполюсное расстояние, см.

Для сохранения оптимального температурного режима, интенсификация процесса и повышение анодной плотности и силы тока должно сопровождаться увеличением теплопотерь, снижением электропроводности электролита или МПР, поскольку резервов по снижению сопротивления “греющих” конструктивных элементов (в основном это ошиновка) практически не имеется. В этой связи одним из возможных путей интенсификации является применение электролита усовершенствованного состава, имеющего более низкое электросопротивление и пониженную температуру ликвидуса.

Возможностей по увеличению тепловых потерь от конструкции электролизера, включая газоотсос, также практически не имеется, поскольку большинство из мер подобного рода уже предусмотрены в конструкции.

К увеличению суммарных теплопотерь приводят такие технологические изменения как, например, повышение уровня металла на 2-4 см. Эффективность применения данного мероприятия при интенсификации процесса доказана многократно на электролизерах различного типа и мощностей.

Возможным резервом для увеличения теплопотерь при применении интенсифицированного режима является снижение глиноземной засыпки на анодах с существующих 5-10 см до 3-5 см. Подобные действия обычно приводят к нежелательным побочным явлениям, например повышенному обгоранию анодов, в результате чего желаемый эффект не достигается.

Мероприятия, сопровождающиеся снижением теплопотерь от ванны, способствуют применению интенсифицированной технологии, поскольку позволяют компенсировать недостающее тепло дополнительным приходом тепла от Джоулевой энергии.

К таким мерам можно отнести применение подовых блоков с пониженным тепловым сопротивлением, т.е. при повышении содержания графита в нем. Подобные блоки широко и достаточно успешно применяются при эксплуатации электролизеров ОА на повышенную плотность тока 0,8-0,85 А/см². При более низких плотностях тока, необходимо рассматривать эффективность их применения в каждом конкретном случае, с проведением соответствующих расчетов, поскольку применение «непроектных» подовых блоков требует корректировки технологических параметров и изменений в конструкции футеровки.

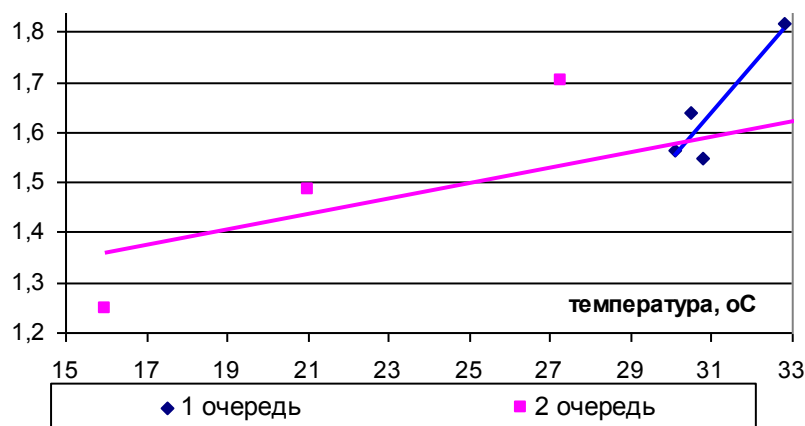


Рисунок 3.19. Зависимость тепловых потерь от температуры наружного воздуха

Наиболее эффективно и безболезненно для технологического режима электролизеров повышение силы тока происходит в зимний период. Охлаждение электролизера и снижение тепловых потерь от него, как правило, компенсируется увеличением МПР, но увеличение прихода тепла при повышении силы тока способствует более полному соответствию оптимального энергетического баланса. На рисунке 3.19 приведена зависимость удельных тепловых потерь обследованных электролизеров КЭЗа от температуры наружного воздуха.

Как видно, ванны 1 и 2 очереди КЭЗа адекватно реагируют на изменение температуры наружного воздуха.

Таким образом, анализ результатов измерений показал следующее:

- энергетический режим обследованных ванн 1 и 2 очереди примерно одинаков;
- меньшие тепловые потери и более высокий энергетический КПД отмечены на ваннах 2 очереди;
- лучшее распределение тепловых потерь по узлам и элементам электролизера получено на электролизерах 2 очереди;
- имеются резервы по повышению силы тока на электролизерах обоих типов.

4 Технико-экономическая оценка предложенных рекомендаций по

оптимизации технологических процессов

В результате проведенной работы, за счет внедрения усовершенствованных алгоритмов корректировки фтористым алюминием, предполагается улучшение основных технико-экономических показателей электролизеров АО «КЭЗ».

Улучшение ТЭП обеспечивается за счет стабилизации технологического режима электролиза со снижением расхода фтористого алюминия. Оптимизация режима также позволяет поднять рабочую силу тока на 0,5 - 1,0 кА, что увеличивает производительность электролизеров.

Расчет ожидаемого экономического эффекта произведен в соответствии с «Методикой по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в цветной металлургии».

Экономический эффект за расчетный период определяется по формуле (4.1).

$$\mathcal{E} = \Delta C \cdot P_r - E_n \cdot K \quad (4.1)$$

где: ΔC – изменение себестоимости алюминия-сырца, \$/т;

P_r – выпуск алюминия-сырца, тыс.т;

K – затраты на внедрение (дополнительные капвложения и НИР), д;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капвложений.

4.1 Исходные данные для расчета. Для расчета эффективности предлагаемых мероприятий принято изменение основных технико-экономических показателей завода за период до и после внедрения. Изменения рассчитаны от условного базового уровня, за который приняты: технические показатели – за первое полугодие 2013 года, экономические показатели – за март 2013 года.

Расчет ожидаемой экономической эффективности выполнен при внедрении предложенных рекомендаций на всех электролизерах завода, т.е. на 288 электролизерах. Расчет произведен в долларах США.

Изменение основных ТЭП (+ увеличение;– уменьшение) принято на основании расчетных и эмпирических данных:

- увеличение силы тока на 0,5 кА (по расчету);
- увеличение выхода по току на 0,22 % (по расчету) исходя из условия снижения температуры электролита на 1 – 3 градуса;
- снижение среднего напряжения на 3 – 5 мВ (по расчету);
- сокращение потребления электроэнергии на 2 – 3 % исходя из увеличения выхода по току и снижения напряжения;
- снижение удельного расхода фтористого алюминия на 1,5 кг/т (по эмпирическим данным);
- сокращение численности производственного персонала – нет.

Условно-постоянные расходы по заводу приняты по бюджету электролизного цеха за март 2013 год и составили 701,966 млн. тенге или 33694,38 \$/т, что составляет 14,1 % от общей себестоимости алюминия.

Суммарные затраты на внедрение новых алгоритмов корректировки составили 150,0 тыс. тенге (1,0 тыс. \$), в том числе – 100,0 тыс. тенге (0,67 тыс. \$)

затраты на НИР и 50,0 тыс. тенге (0,333 тыс. \$) на приобретение дополнительного оборудования (термопары для измерения температуры).

Исходные данные для расчета экономической эффективности при внедрении новых алгоритмов корректировки приведены в соответствии с таблицей 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные для расчета экономической эффективности

Наименование показателя	Обозн	Базовый вариант	Изменен
Сила тока, кА	I	325,0	плюс 0,5
Выход по току, %	η	92,43	плюс 0,22
Суточная производит. эл-ра, кг/сут	$P_{\text{эсут}}$	2421	плюс 10
Годовая производит. завода, т/год	$P_{\text{эсут}}$	251962	плюс 988,3
Среднее напряжение, В	U	4,105	минус 0,005
Удельный расход технологической электроэнергии п.т, кВт/ч · т	W	13226	минус 47,5
Удельный расход AlF_3 , кг/т	$P_{\text{фа}}$	23,2	минус 1,5
Кол-во установленных эл-ров, шт	n	288	–
Коэфф. использования эл-ов, доли.ед.	k	0,99	–
Условно постоянные расходы, \$/т	УПР	219,454	
Затраты на внедрение, тыс.\$, в т.ч:	З	–	1,0
- затраты на НИР	Z_1	–	0,67
- дополнительные капвложения	Z_2	–	0,33
Нормативный коэффициент эффективности капвложений	K_n	0,15	–

4.2 Расчет экономической эффективности. Экономический эффект при внедрении усовершенствованного алгоритма корректировки получен от снижения себестоимости первичного алюминия-сырца за счет:

- увеличения выпуска алюминия-сырца;
- снижения потребления электроэнергии;
- снижения расхода фтористого алюминия;
- уменьшения условно постоянных расходов.

Снижение себестоимости алюминия-сырца за счет увеличения выпуска алюминия

Увеличение суточного выпуска алюминия-сырца $\Delta P_{1\text{сут}}$ одного электролизера за счет увеличения выхода по току и силы тока до (индекс 1) и после внедрения (индекс 2) составит по формуле (4.2), (4.3).

$$\Delta P_{1\text{сут}} = (0,3358 \cdot \eta_1 \cdot I_1 \cdot 24) - (0,3358 \cdot \eta_2 \cdot I_2 \cdot 24) \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{1\text{сут}} = (0,3358 \cdot 92,43 \cdot 325,0 \cdot 24) - (0,3358 \cdot 92,65 \cdot 325,5 \cdot 24) = 9,49 \text{ кг} \quad (4.3)$$

где: η_1 – выход по току, %;

I – сила тока, кА;

0,3358 – электрохимический эквивалент, г/А · ч.

Годовое увеличение выпуска алюминия-сырца $\Delta P_{1\text{год}}$ составит на один электролизер по формуле (4.4)

$$\Delta P_{1\text{год}} = 9,49 \cdot 365 = 3466 \text{ кг/год или } 3,466 \text{ т/год} \quad (4.4)$$

Годовое увеличение выпуска-алюминия сырца $\Delta P_{3\text{год}}$ составит по заводу по формуле (4.5)

$$\Delta P_{3\text{год}} = 3,466 \cdot 0,99 \cdot 288 = 988,248 \text{ т/год} \quad (4.5)$$

где: 288 – количество установленных электролизеров на заводе, штук;
0,99 – коэффициент использования оборудования, доли ед.

Годовой экономический эффект от дополнительного выпуска алюминия-сырца составит по формуле (4.6)

$$\Pi = \Delta P_{3\text{год}} \cdot Ц \cdot K_{\$} = 988,248 \cdot 1877 = 1854941,5 \$ = 1,855 \text{ млн.} \$ \quad (4.6)$$

где: Ц – 1877 – цена алюминия-сырца (на Лондонской бирже металлов на 31.03.2012 года), \$/т.

Годовое снижение себестоимости получения первичного алюминия при увеличении его выпуска по формуле (4.7)

$$C_1 = \Pi / P_r = 1854941,496 / 251962 = 7,36 \$ / \text{т} \quad (4.7)$$

где: P_r – годовая производительность завода до внедрения, т.

Снижение себестоимости алюминия-сырца за счет снижения потребления электроэнергии.

Снижение удельного расхода электроэнергии $\Delta W_{\text{уд}}$ по формуле (4.8), (4.9)

$$\Delta W_{\text{уд}} = (2978,2 \cdot U_2 / \eta_2 - 2978,2 \cdot U_1 / \eta_1) \quad (4.8)$$

$$W_{\text{уд}} = (2978,2 \cdot 4,100/92,65 - 2978,2 \cdot 4,105/92,43) = 47,8 \text{ кВт·ч/т} \quad (4.9)$$

Годовой экономический эффект от сокращения потребления электроэнергии $\Delta W_{\text{год}}$ составит по формуле (4.10), (4.11).

$$\Delta W_{\text{год}} = P_{2r} \cdot \Delta W_{\text{уд}} \cdot Ц_{\text{э}} \quad (4.10)$$

$$\Delta W_{\text{год}} = 252951 \cdot 47,8 \cdot 0,0205 = 247987,6 \$ = 0,248 \text{ млн.} \$ \quad (4.11)$$

где: $P_{2г}$ – годовой выпуск алюминия сырца после внедрения, т/год;
 $\Delta W_{уд}$ – снижение уд. расхода технологической электроэнергии, кВт · ч/т;
 C_2 – цена электроэнергии равная 3,09 тг/кВт · ч или 0,0205 \$/кВт · ч (на 31.03.2013 г.)

Годовое снижение себестоимости получения первичного алюминия при снижении потребления электроэнергии составит по формуле (4.12)

$$C_2 = \Delta W_{год} / P_{г} = 247987,6 / 251962 = 0,984 \$ / т \quad (4.12)$$

Снижение себестоимости алюминия-сырца за счет снижения потребления фтористого алюминия.

Снижение удельного расхода фторалюминия $\Delta P_{фа}$ по формуле (4.13).

$$\Delta P_{фа} = \Delta P_{1фа} - \Delta P_{2фа} = 23,2 - 21,7 = 1,5 \text{ кг / т} \quad (4.13)$$

Годовой экономический эффект от сокращения потребления фтористого алюминия $\Delta P_{фа}$ составит по формуле (4.14), (4.15).

$$\Delta P_{фа} = P_{2г} \cdot \Delta P_{фа} C_{фа} \quad (4.14)$$

$$\Delta P_{фа} = 252951 \cdot 1,5 \cdot 1518,8 = 576274,466 \$ = 0,576 \text{ млн. \$} \quad (4.15)$$

где: $P_{2г}$ – годовой выпуск алюминия сырца после внедрения, т/год;

$C_{фа}$ – цена фторалюминия 228823 тг/т или 1518,8 \$/т (на 31.03.2013 г.).

Годовое снижение себестоимости получения первичного алюминия при снижении потребления фтористого алюминия составит по формуле (4.16).

$$C_3 = \Delta P_{фа} / P_{г} = 576274,466 / 251962 = 2,287 \$ / т \quad (4.16)$$

Снижение себестоимости алюминия-сырца за счет уменьшения условно постоянных расходов (УПР).

Снижение УПР при внедрении новых алгоритмов корректировки электролита происходит за счет снижения эксплуатационных расходов цеха.

Снижение эксплуатационных расходов по цеху $\Delta ЭР$ при внедрении новых алгоритмов корректировки принимаем 1,0 % от общей УПР по формуле (4.17).

$$C_3 = \Delta ЭР_1 = УПР \cdot 0,001 = 219,454 \cdot 0,001 = 0,219 \$ / т \quad (4.17)$$

Общее годовое снижение себестоимости составит по заводу по формуле (4.18).

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 7,36 + 0,984 + 2,287 + 0,219 = 10,85 \$ / т. \quad (4.18)$$

Расчетный годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{фа}$ по заводу с учетом затрат составит по формуле (4.19).

$$\Theta_{\text{фа}} = C \cdot P_r - E_n \cdot K = 10,85 \cdot 252951 - 1000 \cdot 0,15 = 2744518,35 \quad (4.19)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено комплексное исследование электролизеров первой очереди GAMI-320 кА и второй очереди NEUI-330 кА, а

также выполнена оценка существующего технологического состояния и конструкции ванн.

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований

1. Измерены электрические, тепловые и энергетические балансы, обратная электродвижущая сила, форма рабочего пространства и другие параметры электролизера;

2. Проведен статистический анализ технико-экономических показателей электролизеров;

3. Проведены расчеты теплоэнергетических и МГД-характеристик электролизеров при изменении технологических и энергетических параметров;

4. Конструкции электролизеров 1 и 2 очередей обеспечивают высокие технико-экономические показатели: среднее напряжение около 4,14 %. выход по току 92-93 %, удельный расход электроэнергии 13200-13500 кВт·ч/т. По совокупности параметров, электролизеры 2 очереди предпочтительнее электролизеров 1 очереди по возможности получения более высоких показателей электролиза;

5. Значение $E_{обр}$ составило - по первой очереди 1,786 В, по второй 1,780 В, по заводу в целом – 1,783 В;

6. Энергетический коэффициент полезного действия электролизеров составил 51,6-51,9 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности электролизеров;

7. Результатами расчетов показано, что улучшение технико-экономических показателей без изменения конструкции электролизеров 1 и 2 очереди возможно за счет увеличения уровня металла на 1-2 см, увеличения содержания CaF_2 до 5,5-5,8 %, снижения криолитового отношения до 2,2-2,25.

Разработка рекомендаций и исходные данные по конкретному использованию результатов исследований.

Таким образом, проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы при использовании обожженных анодов:

- по совокупности параметров аноды марок «Джининг» и «Орион ДТО» предпочтительнее других и могут быть опробованы для испытаний при цикле замены анодов 29 дней, особенно для анодов марки «Джининг»;

- МГД-характеристики электролизеров 1 и 2 очереди достаточно высоки и не ограничивают величину силы тока по верхнему пределу до расчетных значений силы тока 340-360 кА. Электролизеры 2-й очереди обладают лучшими характеристиками по сравнению с электролизерами 1 очереди;

- определены основные направления по совершенствованию и интенсификации технологического процесса и конструкции электролизера, лимитирующей стадией для увеличения силы тока является обеспечение требуемых тепловых и энергетических параметров;

- увеличение силы тока на 5-7 кА допустимо без изменения конструкции электролизера и существующих технологических параметров. Целесообразно опробовать данное мероприятие в «зимний период с возможным сохранением силы тока 325-327 кА и в «летний» период;

- применение силы тока 335 кА и выше требует изменений в конструкции электролизера, предусматривающих возможное применение подовых блоков с содержанием графита 70-80 % и изменение состава футеровки.

Конструктивные особенности анодного устройства электролизера с обожженными анодами позволяют значительно увеличить его единичную мощность, что является одним из главных путей снижения удельных капитальных вложений в новое строительство и роста производительности.

Важным преимуществом эксплуатации электролизеров этого типа перед электролизерами с непрерывными самообжигающимися анодами, которые длительное время служили основными агрегатами отечественных алюминиевых заводов, можно считать более высокую экономическую эффективность, достигаемую за счет меньших эксплуатационных затрат электроэнергии и сырья при условии применения относительно дешевых и хорошего качества анодов.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения

В результате проведенной работы за счет корректировки технологического процесса, предполагается улучшение основных технико-экономических показателей электролизеров АО «КЭЗ». Расчетный ожидаемый годовой экономический эффект составил в целом по заводу 27,443 млн. \$/год

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баймаков Ю.В. Электролиз в металлургии. Т.2, - М.: Металлургиздат, 1944.
2. Баймаков Ю.В., Ветюков М.М. Электролиз расплавленных солей. - М.: Металлургия, 1966.- 560 с.

3. Бегунов А.И. Проблемы модернизации алюминиевых электролизеров. Монография. - Иркутск.: ИрГТУ, 2000. - 105 с.
4. Бегунов А.И., Цымбалов С.Д.. Макрокинетика потерь металла в алюминиевых электролизерах. - Санкт-Петербург.: Наука, 1994.- 75 с.
5. Березин А.И., Пискажова Т.В., Попов Ю.А. Способ управления теплоэнергетическим режимом электролизера для получения алюминия. Русская Инжиниринговая компания – Заявка № 2006122140, Заявл. 20.06.2006.
6. Берх В.И., Казаков Д. Р., Калужский Н. А.Способ управления процессом электролитического получения алюминия в электролизере. Патент РФ № 2023058, Заявл. 12.11.1990 // Бюллетень изобретения (Заявки и патенты),- 1994. - №21.
7. Боднер В.А., Алферов А.В., Измерительные приборы (теория, расчет, проектирование): Учебник для ВУЗов. Том 2. - М.: Издательство стандартов. - 1986.- 244 с.
8. Борисоглебский, Ю.В. Металлургия алюминия / Ю.В. Борисоглебский, Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, Г.А. Сиразутдинов. Издание 2-е. - М.: Наука, 2000. - 438 с.
9. Буркат, В.С. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия. - СПб.: 2005. - 275 с.
10. Васюнина И.П. Свойства электролита. Высшие алюминиевые курсы. - 2005. - 229 с.
11. Веселков В.В., Рагозин Л.В., Ларин В.В. Способ эксплуатации электролизера для производства алюминия СУАЛ. Патент № 2359071, Заявл.17.08.2007.
12. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния. - М.: Metallurgy, 1987. - 319 с.
13. Вольфсон Г.Е., Ланкин В.П. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами. - М.: Metallurgy, 1974. -136 с.
14. Глинозем металлургический. Технические условия. ГОСТ 30558-98. - Издательство стандартов, 1999. - 8 с.
15. Гопиенко Г.Н. Физико – химические свойства различных видов глинозема применяемого на отечественных и зарубежных заводах. М.: Metallurgy, 1986. - 39 с.
16. ГОСТ 30558-98. Глинозем металлургический. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1999. -8 с.
17. Гринберг И.С. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами. - М.: Иркутск. 2001. - 317 с.
18. Гроле. Лекции о современном состоянии техники производства алюминия во Франции. - М.: ЦИИН ЦМ, 1963.
19. Громов Б.С., Пак Р.В., Веселков В.В., Черных А.Е., Зельберг Б.И. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами. - М.: МАНЭБ, 2002. -220 с.
20. Громыко А.И. Шайдуров Г.Я. Автоматический контроль технологических параметров алюминиевых электролизеров. - М.: Красноярск. Издательство Красноярского университета, 1984. - 240 с.
21. Дерягин В.Н., Янко Э.А., Гульдин И.Т. //Цветные металлы. - 1971. - №8.

22. Дмитриев А.А., Кулеш М.К. // Цветные металлы. - 1991.- №9.- С. 34-36.
23. Ершов В.А., Богданов Ю.В., Кондратьев В.В. Влияние гранулометрического состава глинозема на экологические и технико – экономические показатели электролизного производства. Материалы региональной научно-практической конференции «Перспективы развития технологии экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств». ИрГТУ.: Иркутск, 2005. - С. 50-52.
24. Ершов В.А., Богданов Ю.В., Мехнин А.О. Опыт эксплуатации электролизеров с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом в режиме АПГ. Электрометаллургия легких металлов. Сборник научных трудов ОАО «СибВАМИ». - Иркутск.: 2006. С. 66-74.
25. Ершов В.А., Евсеев Н.В., Сираев Н.С., Грибков К.А., Стариков О.Г. Определение эффективности работы алюминиевых электролизеров при переходе на использование укрупненного глинозема марки Г – 00К. // Цветные металлы. - 2006. - №12. - С. 51-55.
26. Ершов В.А., Камаганцев В.Г., Богданов Ю.В. Опыт эксплуатации низкопрокаленного и рядового глиноземов на электролизерах с обожженными анодами на силу тока 300 кА. Материалы Северо – западной конференции. - М.: Волхов, 2007. - С. 78-84.
27. Ибрагимов А.Т., Будон С.В. Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана. - М.: Павлодар, 2009. - 261 с.
28. Ибрагимов А.Т., Будон С.В. Технология производства алюминия на электролизерах АО «Казахстанский электролизный завод». - М.: Павлодар, 2012. -286 с.
29. Исаева Л.А., Поляков П.В. Глинозем в производстве алюминия электролизом. Свойства и поведение в электролизере. - М.: Краснотурьинск, 2000. - 199 с.
30. Исаева Л.А., Поляков П.В. Текучесть глинозема с различными физико – химическими свойствами // Цветные металлы.- 1996. -№ 11. - С.33-35.
31. Калужский Н.А., Эпштейн А.М., Деркач А.С. Промышленные испытания электролизеров с обожженными анодами на силу тока 260 кА. // Цветные металлы. - 1976. - №2. - С.27-31.
32. Камзин Ж.Ж., Сенин В.Н. Исследование свойств различных типов глинозема применительно к Казахстанскому электролизному заводу // Цветные металлы. - 2011.- №7. – С. 32-35.
33. Качановская И.С. // Цветные металлы. - 1971.- №10. - С. 40-42.
34. Колобов Г.А. Металлургия цветных металлов. - М.: ДонНТУ, 2007. - с. 189.
35. Костюков А.А., Киль И.Г., Никифоров В.П. Производство алюминия: Справочник металлурга по цветным металлам. - М.: Металлургия, 1971. -559 с.
36. Лайнер А.И., Еремин Н.И., Певзнер И.З. Производство глинозема. Москва: Металлургия, 1978. - 13 с.
37. Лакерник М.М., Севрюков Н.Н. Металлургия цветных металлов. - М.: Металлургиздат, 1957. - 535 с.
38. Машовец В.П. Форсблом Г.В. Электролитическое производство алюминия. - М.: Металлургиздат, 1951. - 185 с.

39. Ни Л. П., Райзман В. Л., Халяпина О. Б. Производство глинозема. Справочник. - М.: Алматы, 1998.
40. Панов Е.Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства. - М.: ГГУПИД «Руда и металлы», 1998.
41. Паперный Е.А. Эндельштейн И.Л. Погрешности контактных методов измерения температур. - М.: Энергия. - 1966. - 96 с.
42. Подгайская М.Н., Гопиенко Г.Н., Захарицкая Т.А. Производство глинозема. Сборник трудов ВАМИ. - 1969. - С.229-233.
43. Подгайская М.Н., Захарицкая Т.А. Производство глинозема. Сборник трудов ВАМИ. -1970. - С. 172-173.
44. Прюво. Лекции по теории электролиза алюминия. - М.: Проектмонтажалюминий, 1934.
45. Савинов В.И., Фризоргер В.К., Бузунов В.Ю., Козьмин Г.Д. // Цветные металлы. -1997.- №4.- С. 23-26.
46. Семенов В.С. Исследование особенностей теплопередачи в катодном устройстве алюминиевого электролизера: автореферат диссертации кандидата технических наук. - 1976.
47. Сенин В.Н. Использование различных типов глинозема в производстве алюминия // Сборник трудов ВАМИ. - 1988. - 4 с.
48. Сенин В.Н. Снижение содержания основных примесей в электролитическом алюминии и повышение его качества: автореферат диссертации кандидата технических наук. - ВАМИ, 1969.
49. Сенин В.Н., Сираев Н.С. Разработка методических указаний нормирования расхода глинозема при электролитическом получении алюминия. - Санкт – Петербург, 2001. - 71 с.
50. Сираев Н.С. Влияние физико – химических свойств глинозема на процесс электролиза алюминия // Цветных металлы. - 1986. - №11. С. 37-41.
51. Сираев Н.С. Изучение процессов циркуляции электролита и растворения глинозема в алюминиевом электролизере: автореферат диссертации кандидата технических наук. – ВАМИ. – 1974. - 146 с.
52. Справочник металлурга по цветным металлам. Производство алюминия - М.: «Металлургия», 1971. - 560 с.
53. Справочник металлурга по цветным металлам. Производство глинозема. - М.: «Металлургия», 1970. - 318 с.
54. Сысоев А.В., Марков Н.В., Внедрение интенсивной технологии в электролизном производстве // Цветные металлы. - 2000. - № 5. - С. 31-33.
55. Терентьев В.Г., Сысоев А.В., Гринберг И.С. Производство алюминия: Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1997. - 350 с.
56. Терентьев В.Г., Школьников Р.М., Гринберг И.С., Черных А.Е., Зельберг Б.И., Чалых В.И. Производство алюминия. - М.: Иркутск, 1998. - 348 с.
57. Технологическая инструкция по АО «КЭЗ».
58. Троицкий И.А., Железнов В.А. Металлургия алюминия. - М.: Металлургия, 1984. -247 с.
59. Фролов А.В., Гусев А.В. Способ определения концентрации глинозема в криолит – глиноземном расплаве и устройство для его осуществления /– Патент

- РФ № 2370573; Заявл. 09.04.2007 // Бюллетень изобретения (Заявки и патенты). - 2009.
60. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. - М.: Руда и Металлы, 2001. - 670 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Измерения температуры ликвидуса и температуры перегрева электролита прибором «ТЕМП»

Дата изм.	№	№	Время	Тэл	Тл.изм	ΔТпер	Состав электролита				Нме	Нэ	G	Примечания
	эл-ра	замера	замера	град.	град.	град.	К.О.	CaF ₂	MgF ₂	Al ₂ O ₃	см	см	%	
14.06.2013	717	18	9:25	961,2	950,7	10,5	2,25	5,18	0,71	3,00	23	18	91,87	
		26	13:42	959,6	948,2	11,4	2,25	5,18	0,71	3,00	23	18	91,87	После выливки
	716	19	9:35	963,5	953,2	10,3	2,21	5,17	0,71	2,05	23	18	91,87	
		27	13:47	959,6	947,0	12,6	2,21	5,17	0,71	2,05	23	18	91,87	
	817	20	9:47	953,2	947,2	6,0		5,23	0,60	1,30	23	19	91,48	Каша
		24	10:00	955,2	950,2	5,0		5,23	0,60	1,30	23	19	91,48	
	816	22	9:59	952,7	946,1	6,6	2,13	5,81	0,70	1,52	23	18	91,53	
	Ср.			957,9	948,9	8,9	2,21	5,28	0,68	2,03	23,0	18,3	91,71	
28.05.2013	616	2	9:24	951,6	940,3	11,3	2,23	5,04	0,75	1,76	17	21	92,72	
28.05.2013	617	3	9:30	953,4	937,5	15,9	2,23	5,02	0,72	1,63	18	20	93,44	
28.05.2013		6	9:38	958,4	949,9	8,5	2,23	5,02	0,72	1,63	18	20	93,44	
04.05.2013		11	9:11	944,2	930,0	14,2	2,07	5,43	0,82	1,51	19	21	93,25	
04.05.2013		15	9:41	942,2	930,2	12,0	2,07	5,43	0,82	1,51	19	21	93,25	
04.05.2013	625	8	8:50	957,6	936,7	20,9	2,19	5,24	0,77	1,67	18	18	92,76	
		13	9:25	955,0	938,0	17,0	2,19	5,24	0,77	1,67	18	18	92,76	
04.05.2013	624	9	8:59	940,1	927,3	12,8	2,13	5,11	0,73	1,70	19	20	92,86	
		10	9:04	940,5	927,0	13,5	2,13	5,11	0,73	1,70	19	20	92,86	
		14	9:34	940,7	928,7	12,0	2,13	5,11	0,73	1,70	19	20	92,86	
	Ср.			948,4	934,6	13,8	2,16	5,18	0,76	1,65	18,4	19,9	93,0	

Примечания: Т_{эл}, Т_{лизм} - измеренные температура электролита и температура ликвидуса прибором ТЕМП, ΔТ_{пер} - измеренный перегрев электролита

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сводные результаты измерений электрического баланса

		1 очередь					2 очередь					Разность
№	Название \ Электролизер	716	717	816	817	Ср	616	617	624	625	Ср	1-2
1	Контакт анодная шина-штанга	8,2	7,8	6,1	5,4	6,9	6,0	5,7	5,6	5,0	5,6	-1
2	Штанга	16,9	17,5	16,1	15,9	16,6	18,3	18,5	16,6	20,5	18,5	2
3	Контакт штанга-БМП	1,2	1,3	1,5	1,6	1,4	3,8	2,0	2,2	2,7	2,7	1
4	БМП	3,4	2	2,3	3,7	2,9	1,9	4,2	3,1	4,5	3,4	1
5	Контакт БМП-кронштейн	14,0	13,9	13,4	17,5	14,7	15,4	13,2	16,8	14,8	15,1	0
6	Кронштейн с ниппелями	44,3	50,1	44,7	48,1	46,8	39,0	45,5	40,4	37,8	40,7	-6
7	Контакт ниппель-анод	121,3	126	119,9	126,0	123,3	116,8	115,5	126,4	136,1	123,7	0
8	Анод	190,0	175,2	198,0	189,7	188,2	197,0	171,5	164,0	201,8	183,6	-5
	Итого анодный узел	399,3	393,8	402	407,9	400,8	398,2	376,1	375,1	423,2	393,2	-8
9	Обратная ЭДС	1783	1783	1783	1783	1783	1783	1783	1783	1783	1783	0
10	Электролит	1385	1360	1330	1375	1363	1384	1413	1412	1413	1405	42
	Электролит + обратная ЭДС	3168	3143	3113	3158	3146	3167	3196	3195	3196	3188	42
11	Подина с блюмсом	323,6	303,6	340,7	338,3	326,6	329,3	349,6	333,9	331,1	336,0	9
12	Контакт блюмс-БМП	10,1	10,6	10,5	11,5	10,7	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	-1
13	БМП	1,3	1	1,4	1,1	1,2	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	0
14	Спуск с контактами	24,4	16,7	23,3	21,1	21,4	11,4	10,6	10,1	13,6	11,4	-10
15	Катодная ошиновка	73,8	73,8	73,8	73,8	73,8	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	27
16	Стояки с контактами	145,2	145,2	145,2	145,2	145,2	103,0	103,0	103,0	103,0	103,0	-42
17	Анодная ошиновка	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	1
	Итого ошиновка	272,0	264,5	271,4	269,9	269,5	244,3	243,3	242,8	246,4	244,2	-25
18	Рабочее напряжение.	4163	4105	4128	4174	4143	4138	4165	4146	4196	4162	19
19	От анодных эффектов	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Среднее напряжение	4163	4105	4128	4174	4143	4138	4165	4146	4196	4162	18,95
	Греющее напряжение, мВ	3883	3833	3850	3899	3866	3888	3916	3898	3945	3912	46
	МПР, см	5,55	5,66	5,73	5,5	5,62	5,30	5,20	5,15	5,48	5,28	0
	Цена 1 см электролита, мВ	250	240	232	249	243	261	272	274	258	266	24
	Рабочее напряжение по АСУТП	4153	4131	4113	4160	4139	4110	4160	4150	4170	4148	8

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Параметры ФРП. Электролизеры 1 очереди. Толщина гарниссажа, см

	Входная сторона							Выходная сторона							Ср. эл-р	Торцы	
	1	5	8	11	14	17	Среднее А	1	5	8	11	14	17	Среднее В		Выл	Глух
716	5	15	13	11	1	7	8,7	17	14	9	6	9	17	12,0	10,3	18,2	20,9
717	6	13	16	17	13	9	12,3	10	9	9	10	15	0	8,8	10,6	10,7	21,3
816	12	16	10	8	14	6	11,0	15	8	-3	-2	2	0	3,3	7,2	8	12,2
817	14	5	16	14	17	6	12,0	14	7	-1	5	12	0	6,2	9,1	7,2	14,5
Среднее	9,3	12,3	13,8	12,5	11,3	7,0	11,0	14,0	9,5	3,5	4,8	9,5	4,3	7,6	9,3	11	17,3

Длина подовой настыли от уровня проекции анода, см

	Входная сторона							Выходная сторона							Ср. эл-р	Перепад в подине, мВ
	1	5	8	11	14	17	Среднее А	1	5	8	11	14	17	Среднее В		
716	-9	2	5	0	2	5	0,8	5	6	0	0	6	-9	1,3	1,1	324
717	-17	-2	2	9	0	-5	-2,2	7	8	0	6	-5	0	2,7	0,3	304
816	25	13	6	11	20	0	12,5	12	20	20	18	23	26	19,8	16,2	341
817	0	6	5	13	0	5	4,8	14	-12	-10	-15	-10	5	-4,7	0,1	338
Среднее	-0,3	4,8	4,5	8,3	5,5	1,3	4,0	9,5	5,5	2,5	2,25	3,5	5,5	4,8	4,4	327

Параметры ФРП. Электролизеры 2 очереди. Толщина гарниссажа, см

	Входная сторона							Выходная сторона							Ср. эл-р	Торцы	
	1	5	8	11	14	17	Среднее А	1	5	8	11	14	17	Среднее В		Выл	Глух
616	8	11	5	10	-	4	7,6	14	3	2	7	7	5	6,3	7,0	18	18
617	14	4	7	10	15	10	10,0	16	1	4	6	4	11	7,0	8,5	22	23
624	15	5	7	11	15	10	10,5	8	2	3	-2	8	10	4,8	7,7	14	11
625	4	8	0	9	11	9	6,8	8	12	14	6	9	3	8,7	7,8	15	23
Среднее	10,3	7,0	4,8	10,0	13,7	8,3	9,0	11,5	4,5	5,8	4,3	7,0	7,3	6,7	7,8	17,3	18,8

Длина подовой настыли от уровня проекции анода, см

	Входная сторона							Выходная сторона							Ср. эл-р	Перепад в подине, мВ
	1	5	8	11	14	17	Среднее А	1	5	8	11	14	17	Среднее В		
616	0	-9	-5	0	-5	-10	-4,8	2	-5	-2	-5	3	-13	-3,3	-4,1	329
617	0	4	0	-8	-10	-5	-3,2	15	1	-11	0	-6	-13	-2,3	-2,8	350
624	0	4	0	-8	-10	-5	-3,2	15	0	-12	0	-5	-6	-1,3	-2,3	334
625	-8	-12	-8	-13	-2	-12	-9,2	4	-8	-11	-8	-2	-10	-5,8	-7,5	331
Ср.	-2,0	-3,3	-3,3	-7,3	-6,8	-8,0	-5,1	9	-3	-9	-3,25	-2,5	-10,5	-3,2	-4,1	336

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Энергетический баланс электролизеров 1 очереди АО «Казахстанский электролизный завод»

	Сила тока 325 кА										
	Приход энергии		кВт·ч/тAl	В	кВт	%			Исходные данные		
1	Подведенная электроэнергия, в т.ч	W_T	12575	3,866	1237	92,5	Греющее напряж.	$U_{гр}(\text{сумм.})$	3,866		
	анодный узел	Q_a	1304	0,401	128	9,6	анод	dU_a	0,401		
	электролит	$Q_{эл}$	4434	1,363	436	32,6	эл-т	$dU_{эл}$	1,363		
	подина	Q_k	1062	0,327	105	7,8	подина	dU_k	0,327		
	анодные эффекты	$Q_{аэ}$	0	0,000	0	0,0	ан.эфф	$dU_{аэ}$	0		
	обратная ЭДС	Q_p	1932	0,594	190	14,2	обратная ЭДС	$E_{обр}$	1,783		
2	Вторичное окисление алюминия	$Q_{ал}$	353	0,109	35	2,6	перенапряжение	dE_p	0,594		
3	Изменение теплоемкости CO_x	$Q_{аг}$	172	0,053	17	1,3	Выход по току	$G, \%$	0,917		
4	Нейтрализация Na_2O в глиноземе	Q_n	3	0,001	0	0,0	Щелочь в глиноземе	$C(Na_2O), \%$	0,35		
5	Догорание CO	$Q_{со}$	397	0,122	39	2,9		$h_l, \text{см}$	2		
6	Окисление анода воздухом	$Q_{св}$	94	0,029	9	0,7	Высота анода	$h_a, \text{см}$	55		
	Итого приход		13594	4,179	1337	100,0	расход анодов	$P(C), \text{кг/т}$	541		
	Расход энергии						содержание CO	$N(CO), \text{доли ед.}$	0,2		
1	Электрохимическая реакция	$Q_{нр}$	6171	1,897	607	45,4	содержание CO_2	$N(CO_2), \text{доли ед.}$	0,8		
2	Нагрев и растворение глинозема	$Q_{ало}$	670	0,206	66	4,9	тепловой эффект	$dH(CO), \text{ккал/кмоль}$	134		
3	Нагрев анодов	Q_c	159	0,049	16	1,2	тепловой эффект	$dH(CO_2), \text{ккал/кмоль}$	138		
4	Реакция Будуара	Q_b	26	0,008	3	0,2	расход, кг/т	$P(AlF_3)$	16,15		
5	Гидролиз фторида алюминия	Q_{alf}	6	0,002	1	0,0	расход, кг/т	$P(Na_3AlF_6)$	0,97		
6	Нагрев и плавление криолита	$Q_{на}$	0,5	0,000	0	0,0	Сила тока	$I, \text{кА}$	320		
7	Суммарные тепловые потери		6794	2,089	668	50,0					
7,1	С газоотсосом		1419	0,436	140	10,4					
7,2	С конструктивных элементов, в т.ч	5374	1,652	529	39,5						
7.2.1	Анодное устройство		1189	0,365	117	8,7					
7.2.2	Катодный кожух		4186	1,287	412	30,8					
	Итого расход		13825	4,250	1360	101,7					
	Невязка баланса, %		-231	-0,07	-23	-1,7					
	Энергетический КПД, %		51,7								
	Распределение по узлам, %	анод	38,4								
	по узлам, %:	катод	61,6								

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Энергетический баланс электролизеров 2 очереди

	Сила тока 325 кА								
	Приход энергии		кВт·ч/тAl	В	кВт	%		Исходные данные	
1	Подведенная электроэнергия, в т.ч.	W_T	12528	3,912	1252	93,4	Греющее напряжение	$U_{гр}(\text{сумм.})$	3,912
	анодный узел	Q_a	1259	0,393	126	9,4	анод	dU_a	0,393
	электролит	$Q_{эл}$	10209	3,188	1020	76,1	электролит	$dU_{эл}$	3,188
	подина	Q_k	1076	0,336	108	8,0	подина	dU_k	0,336
	анодные эффекты	$Q_{аз}$	0	0,000	0	0,0	Анодный эффект	$dU_{аз}$	0
	обратная ЭДС	Q_p	1636	0,511	164	12,2	обратная ЭДС	$E_{обр}$	1,7
2	Вторичное окисление алюминия	$Q_{ал}$	292	0,091	29	2,2	перенапряжение	dE_p	0,511
3	Изменение теплоемкости CO_x	$Q_{ар}$	172	0,054	17	1,3	Выход по току	$G, \%$	0,931
4	Нейтрализация Na_2O в глиноземе	Q_n	3	0,001	0	0,0	Щелочь в глиноземе	$C(Na_2O), \%$	0,35
5	Догорание CO	$Q_{со}$	323	0,101	32	2,4	Обгор. анода сверху	$h1, \text{ см}$	2
6	Окисление анода воздухом	$Q_{св}$	95	0,030	10	0,7	Высота анода	$h_a, \text{ см}$	55
	Итого приход		13413	4,188	1340	100,0	расход анодов	$P(C), \text{ кг/т}$	547
	Расход энергии						содержание CO	$N(CO), \text{ доли ед.}$	0,14
1	Электрохимическая реакция	$Q_{нр}$	6075	1,897	607	45,3	содержание CO_2	$N(CO_2), \text{ доли ед.}$	0,86
2	Нагрев и растворение глинозема	$Q_{ало}$	670	0,209	67	5,0	тепловой эффект	$dH(CO), \text{ ккал/кмоль}$	134
3	Нагрев анодов	Q_c	160	0,050	16	1,2	тепловой эффект	$dH(CO_2), \text{ ккал/кмоль}$	138
4	Реакция Будуара	Q_b	48	0,015	5	0,4	расход, кг/т	$P(AlF_3)$	15,6
5	Гидролиз фторида алюминия	Q_{alf}	5	0,002	1	0,0	расход, кг/т	$P(Na_3AlF_6)$	0,97
6	Нагрев и плавление криолита	$Q_{на}$	0,5	0,000	0	0,0	Сила тока	$I, \text{ кА}$	320
7	Суммарные тепловые потери		6463	2,018	646	48,2			
7,1	С газоотсосом		1699	0,531	170	12,7			
7,2	С конструктивных элементов, в т.ч	4764	1,488	476	35,5				
7.2.1	Анодное устройство		1692	0,528	169	12,6			
7.2.2	Катодный кожух		3073	0,960	307	22,9			
	Итого расход		13422	4,191	1341	100,1			
	Невязка баланса, %		-9	0,00	-1	-0,1			

РЕФЕРАТ

Диссертация магистра содержит 114 страниц, количество иллюстраций – 57, таблиц – 25, использованных литературных источников – 60.

Комплексное исследование электролизера GAMI 320 кА и NEUI 330 кА на АО «Казахстанский электролизный завод

В современной алюминиевой промышленности принята стратегия строительства новых производственных мощностей с установкой электролизеров с обожженными анодами на силу тока 300 кА и выше, а также по интенсификации существующего производства путем увеличения силы тока. С повышением плотности тока увеличивается приход тепла от электроэнергии и возникает необходимость создания условий рационального распределения теплотерь, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии, создания оптимальной формы рабочего пространства, снижения температуры конструктивных элементов катодного кожуха.

Актуальность темы исследования. Республика Казахстан имеет огромные производственные мощности по производству глинозёма, но до недавнего времени это сырьё, необходимое для производства алюминия, приходилось экспортировать на металлургические заводы других стран. В 1992 году правительство республики приняло решение об организации алюминиевого производства в Казахстане с использованием китайской технологии. В качестве наиболее приемлемого был принят вариант строительства завода по производству и переработке алюминия в Павлодаре на основе действующего здесь глиноземного производства.

До недавнего времени главной целью разработки электролизера было достижение максимального выхода по току при минимальных капитальных вложениях. Стоимость электроэнергии была небольшой и в избытке, и электролизеры чаще проектировались для их использования в интенсифицированном режиме с получением максимальной производительности. Однако, с 1973 года стоимость электроэнергии возросла в большей степени, чем другие затраты на производство, и стала сопоставима с остальными составляющими себестоимости. Современные электролизеры в основном эксплуатируют и проектируют в расчете на низкое электропотребление и высокий выход по току, что обеспечивает экономичное производство первичного алюминия.

12 декабря 2007 года состоялся запуск первой очереди КЭЗ, получен первый Казахский алюминий. АО «КЭЗ», как одно из молодых и современных предприятий Республики Казахстан – первенец алюминиевой промышленности, постоянно стремится соответствовать тенденциям мирового развития в данной отрасли.

АО «КЭЗ» создавался практически с нуля. В Казахстане отсутствует система подготовки кадров для алюминиевого производства, поэтому все экспериментальные работы, проводимые на промышленных электролизерах

имеют первостепенное значение для воспитания собственных квалифицированных специалистов электролизного производства.

Завод достаточно успешно работает с начала эксплуатации. Тем не менее руководство и ведущие специалисты завода стремятся не только сохранить высокие технико-экономические показатели, но и обеспечить развитие технологического процесса и повышения технико-экономических показателей электролизного производства на основе внедрения современных прогрессивных технологий.

Цель работы - интенсификация технологического процесса и совершенствование конструкции электролизеров с целью увеличения силы тока для обеспечения требуемых тепловых и энергетических параметров.

Задачи исследования:

1. Определить возможность изменения конструкции ошиновки электролизеров с применением обожженных анодов на базе Казахстанского электролизного завода;
2. Произвести измерение электрического, теплового и энергетического балансов, обратная электродвижущая сила, форма рабочего пространства и других параметров электролизера;
3. Произвести статистический анализ технико-экономических показателей электролизеров;
4. Произвести расчеты теплоэнергетических и МГД-характеристик электролизеров при изменении технологических и энергетических параметров агрегата.
5. На основании комплексных измерений и расчетов выполнить технологические рекомендации по оптимизации технологических параметров и путям повышения существующих технико-экономических показателей.

Объект исследований – промышленные электролизеры GAMI-320 кА и NEUI-330 кА на базе АО «Казахстанский электролизный завод».

Научная новизна исследования. В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Среднее напряжение электролизеров составило 4,14 %, выход по току 92-93 %, удельный расход электроэнергии 13200-13500 кВт·ч/т;
2. Значение $E_{обр}$ составило - по первой очереди 1,786 В, по второй 1,780 В, по заводу в целом – 1,783 В.
3. По совокупности параметров, электролизеры 2 очереди предпочтительнее электролизеров 1 очереди по возможности получения более высоких показателей электролиза;
 - По совокупности параметров аноды марок «Джининг» и «Орион ДТО» предпочтительнее других и могут быть опробованы для испытаний при цикле замены анодов 29 дней, особенно для анодов марки «Джининг»;
 - Энергетический коэффициент полезного действия электролизеров составил 51,6-51,9 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности электролизеров.

Практическая значимость исследований:

- результаты, полученные в работе, представляют научную и практическую значимость при применении обожженных анодов на электролизерах типа GAMI-320 кА и NEUI-330 кА;

- результатами расчетов показано, что улучшение технико-экономических показателей без изменения конструкции электролизеров 1 и 2 очереди возможно за счет увеличения уровня металла на 1-2 см, увеличения содержания CaF_2 до 5,5-5,8 %, снижения криолитового отношения до 2,2-2,25;

- магнитно-гидродинамическая неустойчивость - характеристики электролизеров 1 и 2 очереди достаточно высоки и не ограничивают величину силы тока по верхнему пределу до расчетных значений силы тока 340-360 кА. Электролизеры 2-й очереди обладают лучшими характеристиками по сравнению с электролизерами 1 очереди;

- основные направления по совершенствованию и интенсификации технологического процесса и конструкции электролизера, лимитирующей стадией для увеличения силы тока показало обеспечение требуемых тепловых и энергетических параметров;

- увеличение силы тока на 5-7 кА допустимо без изменения конструкции электролизера и существующих технологических параметров;

- применение силы тока 335 кА и выше требует изменений в конструкции электролизера, предусматривающих возможное применение подовых блоков с содержанием графита 70-80 % и изменение состава футеровки.

Апробация работы:

Диссертация была обсуждена и рекомендована к защите кафедрой «Химия и металлургия». Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ой международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии» (г. Темиртау, 2013 г., том 1), научный журнал «Магистрант» (г. Краснодар, № 7-8 2013 г.), а также опубликована статья в научном журнале Вестник ИнЕУ (г. Павлодар, №3 2013 г.).

Резюме

Магистрант – Ю.С. Трофимова

Научный руководитель – А.К. Жунусов

Инновационный Евразийский Университет (г. Павлодар)

Комплексное исследование электролизера GAMI 320 кА и NEUI 330 кА на АО «Казахстанский электролизный завод»

В диссертационной работе была рассмотрена интенсификация технологического процесса и совершенствование конструкции электролизеров с целью увеличения силы тока для обеспечения требуемых тепловых и энергетических параметров на базе АО «Казахстанский электролизный завод».

Полученные результаты показывают, что улучшение технико-экономических показателей без изменения конструкции электролизеров возможно за счет увеличения уровня металла на 1-2 см, увеличения содержания CaF_2 до 5,5-5,8 %, снижения криолитового отношения до 2,2-2,25.

Түйіндеме

Ю.С.Трофимова

А.К.Жунусов

Инновациялық Еуразия университеті (Павлодар қ.)

GAMI электролизерінің кешенді зертте 320 кА және NEUI 330 кА АО "Қазақстандық электролизді зауыт"

Ара диссертациялық жұмыста қара – технологиялық үдерістің қарқындандыруы және электролизердің конструкциясының жетілдірілуі – мақсатпен қырманның күшінің аумақтауының үшін сұра жылы және энергетикалық параметрдің қамсыздандыруы үшін бас база АО "Қазақстандық электролизді зауыт" бол.

Ал нәтижелер көргізеді, не технико-экономикалық көрсеткіштің жақсартуы электролизердің конструкциясының өзгерісімен мүмкін арқасында деңгейдің аумақтауының ме.

Abstract

Postgraduate student – J. S. Trofimova

Supervisor – A.K.Zhunusov

Innovative university of Eurasia (Pavlodar)

Complex research of cell GAMI 320 kA and NEUI 330 kA on "Kazakhstan Electrolysis Plant"

The thesis was considered intensification process and improve cell designs in order to increase the amperage to provide the required heat and power parameters on the basis of JSC "Kazakhstan Aluminium Smelter." The results show that the improvement of technical and economic parameters without changing cell designs with an increase of the metal level 1-2 cm, increasing the content of CaF_2 to 5,5-5,8% reduction of cryolite ratio to 2,2-2,25 .