

Н.П. Криворучко<sup>(1)</sup>, зав. лабораторией

И.В. Забелин<sup>(1)</sup>, генеральный директор, к.т.н.

Д.В. Бачурский<sup>(1)</sup>, аспирант

Д.М. Хабров<sup>(1)</sup>, ст. научн. сотрудник

Е.А. Матвеев<sup>(1)</sup>, мл. научн. сотрудник

Е.П. Щербань<sup>(1)</sup>, инженер

И.Ф. Червоный<sup>(2)</sup>, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

## КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА МАГНИЯ ИЗ ХЛОРИДА МАГНИЯ ТИТАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

<sup>(1)</sup>Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана, г. Запорожье,

<sup>(2)</sup>Запорожская государственная инженерная академия

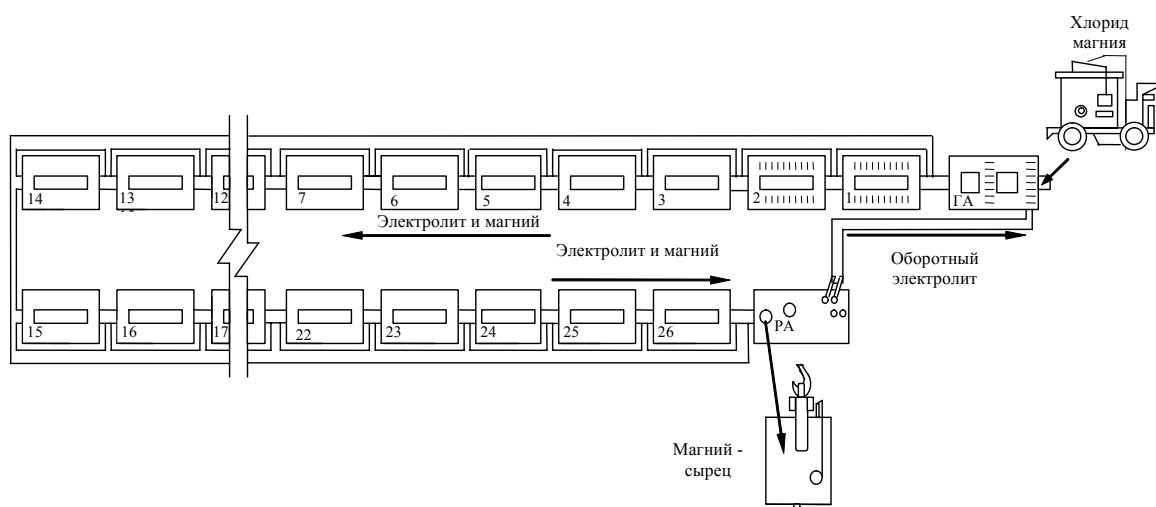
Наведено математичну модель концентраційного режиму функціонування потокової лінії виробництва магнію, що працює у складі титано-магнієвого виробництва. Виконані розрахунки та показано діапазони можливого коливання вмісту хлориду магнію в електроліті апаратів потокової лінії під час періодичного подавання сировини – зворотнього хлориду магнію титанового виробництва. Запропоновано варіанти практичного використання розробленої математичної моделі під час проектування й експлуатації поточкових ліній для електролітичного виробництва магнію.

Приведена математическая модель концентрационного режима функционирования поточной линии производства магния, работающей в составе титаномагниевого производства. Выполнены расчеты и показаны диапазоны возможного колебания содержания хлорида магния в электролите аппаратов поточной линии при периодической подаче сырья – возвратного хлорида магния титанового производства. Предложены варианты практического использования разработанной математической модели при проектировании и эксплуатации поточных линий для электролитического производства магния.

*Введение.* На титано-магниевогох предприятиях СНГ для электролитического получения магния и хлора из возвратного хлористого магния распространена преимущественно индивидуальная схема обслуживания электролизеров.

*Анализ достижений.* Объединение электролизеров в поточную линию дает возможность увеличить производительность электролизеров, а также сократить трудозатраты путем механизации ряда технологических процессов. Возможная схема поточной линии показана на рис. 1. Она включает головной аппарат, рафинировочные и проточные электролизеры, разделительный аппарат. Сырье – расплавленный хлорид магния титанового производства – подается в головной аппарат, где он смешивается с обратным электролитом и таким образом готовится рабочий электролит. Большая часть вредных примесей, поступающих с сырьем, удаляется из электролита в головном аппарате и следующих за ним рафинировочных электролизерах. В этих же аппаратах в виде шлама осаждается основное количество нерастворимых взвесей. Из головного аппарата электролит по соединительным каналам поступает последовательно в рафинировочные, проточные электролизеры и затем в разделительный аппарат. По мере продвижения по электролизерам, вследствие электрохимического разложения, концентрация хлорида магния в электролите снижается, а образующийся при этом магнистый поток электролита транспортируется в разделительный аппарат. В разделе-

тельном аппарате магний сепарируется от расплава, а обедненный по хлориду магния оборотный электролит специальными насосами подается в голову поточной линии.



1, 2 - рафинировочные электролизеры; 3-26 - проточные электролизеры; ГА - головной аппарат;  
РА - разделительный аппарат

**Рисунок 1** – Схема поточной линии электролитического производства магния

Поточная технология позволяет пространственно локализовать и механизировать технологические операции обслуживания аппаратов. Шлам извлекают грейфером из головного аппарата и специальными вакуумными ковшами из рафинировочных электролизеров. Магний-сырец централизованно выбирают из разделительного аппарата и при его удовлетворительном качестве может быть направлен на восстановление титана, минуя стадию рафинирования. Несомненным преимуществом поточной технологии является также и то, что вследствие предварительной очистки электролита в голове поточной линии, по сравнению с электролизерами, обслуживаемыми индивидуально, достигается более высокая токовая нагрузка на серии и увеличивается выход магния по току.

Концентрация хлорида магния в электролите является важной технологической характеристикой работы поточной линии. Она влияет на выход по току, электрическое сопротивление и температуру плавления электролита.

При работе поточной линии весь объем сырья, в нашем случае хлорида магния, подают главным образом в головной аппарат, при этом его содержание в электролите практически скачкообразно увеличивается на величину, пропорциональную количеству залитого хлорида магния. В этом случае важной задачей является прогнозирование концентрационных изменений в поточной линии и их влияние на технологические показатели электролиза.

*Постановка задачи.* Для получения максимальных значений выхода по току электролиз проводят при массовом содержании в электролите хлорида магния в пределах 7...20%. Эти параметры считаются оптимальными как при индивидуальном обслуживании электролизеров, так и для поточной технологии. Задачей исследований является разработка оптимальных параметров электролиза при создании поточной линии производства магния.

*Основная часть исследований.* Концентрационный режим функционирования поточной линии достаточно подробно проанализирован в работах Н.М.Зуева и А.Б.Иванова [1-3]. В условиях непрерывной и равномерной подачи сырья и обрабо-

танного электролита в головной аппарат содержание хлорида магния ( $C_n$ , доли ед.) в каждом из электролизеров будет постоянным и определяться по уравнению:

$$C_n = \frac{C_0 \cdot M_0 - n \cdot m}{M_0 - n \cdot m}, \quad (1)$$

где  $C_0$  – массовое содержание хлорида магния в головном аппарате, доли ед;  $M_0$  – количество электролита, поступающего в первый электролизер за единицу времени, т;  $m$  – расход хлорида магния в каждом из электролизеров за тот же промежуток времени (условно принят равным для каждого электролизера), т;  $n$  – порядковый номер электролизера, отсчитываемый от головного аппарата по направлению движения электролита.

В условиях, когда  $M_0 \gg m$ , графическая зависимость  $C_0 = f(n)$  имеет вид наклонной линии, близкой к прямой. Практически реализовать такой «идеальный» концентрационный режим работы поточной линии при периодической подаче сырья в головной аппарат очень сложно.

В работе [1] предложена математическая модель, где, как частные случаи, рассмотрены нестационарные режимы, при которых или полностью прекращают подачу сырья, или возобновляют в объеме, предшествующем прекращению. При разработке такой модели было сделано ряд допущений:

- поток расплава в цепи аппаратов много больше емкости одного электролизера;
- время заполнения одного электролизера много меньше продолжительности перерыва в питании поточной линии сырьем;
- в каждом электролизере происходит полное перемешивание электролита с поступающим в него расплавом;
- емкость всех агрегатов линии одинаковая:

$$P_{Э1} = P_{Э2} = P_{Э3} = \dots = P_{Эn} = P_{ГА} = P_{РА};$$

- расход хлорида магния во всех электролизерах одинаковый:

$$m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_n;$$

- потери магния на образование шлама и возгонов не учитывают ввиду их незначительной величины.

После прекращения подачи сырья концентрационные изменения в аппаратах поточной линии, в соответствии со сделанными допущениями, рассчитывают по формуле:

$$C_{(n, \tau_k)} = \left( \frac{N_{(n-1; \tau_k)} \cdot (M_n - (n-1) \cdot m) + N_{n, \tau_{(k-1)}} \cdot P_{Э} - m}{M_n + P_{Э} - n \cdot m} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $C_{(n, \tau_k)}$  – концентрация хлорида магния в  $n$ -ом электролизере, массовые доли %, в момент (период)  $\tau_k$ , мин;  $M_n - (n-1) \cdot m$  – поток расплава, поступающий из последнего электролизера замкнутого цикла за вычетом хлорида магния, разложенного в предыдущих электролизерах, т/ч;  $N_{(n-1; \tau_k)}$  – содержание хлорида магния в расплаве, поступающем из предыдущего электролизера (аппарата), доли ед., в момент времени  $\tau_k$ ;  $N_{(n, \tau_{k-1})}$  – содержание хлорида магния в расплаве  $n$ -го электролизера в предыдущий момент (период), доли ед.;  $P_{Э}$  – количество расплава в электролизере, т;  $m$  – количество хлорида магния, т, разложенного в электролизере за период  $\tau_k$ ;  $M_n + P_{Э} - n \cdot m$  – количество

электролита, т, протекающего через электролизер за период  $\tau_k$ .

Эффект снижения концентрации хлорида магния в первое время с момента прекращения подачи сырья наиболее выражен в голове поточной линии. Затем так называемая волна обеднения распространяется далее по электролизерам, а в голове поточной линии содержание хлорида магния будет убывать, стремясь к значению, равному концентрации хлорида магния в электролите, поступающему из разделительного аппарата. Возобновление подачи сырья в стационарном режиме загрузки приведет к подъему концентрации хлорида магния в соответствии с уравнением:

$$C_{(n,\tau_k)} = \left( \frac{N_{(n-1;\tau_k)} \cdot (M_n + \tilde{M} - (n-1) \cdot m) + N_{n,\tau_{(k-1)}} \cdot P_{\text{Э}} - m}{M_n + \tilde{M} + P_{\text{Э}} - n \cdot m} \right) \cdot 100\% , \quad (3)$$

где  $\tilde{M}$  – поток сырья, т/ч, загружаемого за период  $\tau_k$ .

Концентрация хлорида магния в этом случае будет нарастать в виде волны насыщения, распространяющейся от начала к концу поточной линии.

В условиях технологически заданной периодической подачи сырья сравнительно большими порциями с интервалом, составляющим десятки минут, работу поточной линии в режиме обеднения или обогащения следует рассматривать не как частные случаи, а как обычный, штатный режим работы.

При разработке математического аппарата, позволяющего выполнить расчет текущего значения содержания хлорида магния в аппаратах поточной линии, эксплуатирующейся в режиме периодической подачи сырья, мы исходили, в основном, из тех же модельных представлений, что автор работы [1]. Кроме того, были учтены следующие обстоятельства, отвечающие реальной практике работы поточной линии:

– емкость аппаратов поточной линии по расплаву не одинакова, то есть

$$P_{GA} \neq P_{PЭ} \neq P_{ПЭ} \neq P_{РА} ,$$

где  $P_{GA}$ ,  $P_{PЭ}$ ,  $P_{ПЭ}$ ,  $P_{РА}$  – количество электролита в головном аппарате, рафинировочном и проточном электролизерах и разделительном аппарате, соответственно, т;

– количество хлорида магния, разложенного в рафинировочных электролизерах ( $m_{PЭ}$ ) и проточных ( $m_{ПЭ}$ ), различное:

$$m_{PЭ} \neq m_{ПЭ} .$$

В этом случае концентрация хлорида магния  $C_{(\tau_k)}$  в каждом из аппаратов будет определяться уравнениями:

– для головного аппарата

$$C_{GA,\tau} = \left( \frac{\overline{M}_{\tau_k} \cdot N_{MgCl_2} + N_{PA,\tau_{(k-1)}} \cdot M_n + N_{GA,\tau_{(k-1)}} \cdot P_{GA}}{P_{GA} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n} \right) \cdot 100\% , \quad (4)$$

– для рафинировочных электролизеров

$$C_{n,PЭ,\tau_k} = \left( \frac{((N_{(n-1),PЭ,\tau_k} \cdot (\overline{M}_{\tau_k} + M_n - (n_{PЭ} - 1) \cdot m_{PЭ}) + N_{n,PЭ,\tau_{(k-1)}} \cdot P_{PЭ} - m_{PЭ}))}{P_{PЭ} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n - n_{PЭ} \cdot m_{PЭ}} \right) \cdot 100\% , \quad (5)$$

– для проточных электролизеров

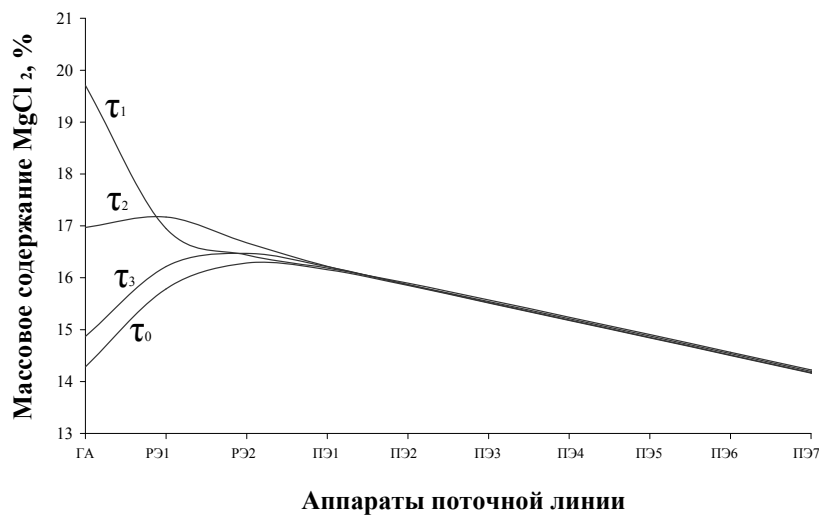
$$C_{n,ПЭ,\tau_k} = \left[ \frac{N_{(n-1),ПЭ,\tau_k} \cdot (\overline{M}_{\tau_k} + M_n - (n_{ПЭ} - 1) \cdot m_{ПЭ} - (n_{PЭ}) \cdot m_{PЭ})}{(P_{ПЭ} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n - n_{PЭ} \cdot m_{PЭ} - n_{ПЭ} \cdot m_{ПЭ})} + \frac{(N_{n,ПЭ,\tau_{(k-1)}} \cdot P_{ПЭ} - m_{ПЭ})}{(P_{ПЭ} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n - n_{PЭ} \cdot m_{PЭ} - n_{ПЭ} \cdot m_{ПЭ})} \right] \cdot 100\%, \quad (6)$$

– для разделительного аппарата

$$C_{PA,\tau_k} = \left[ \frac{N_{ПЭ,\tau_k} \cdot (\overline{M}_{\tau_k} + M_n - (n_{ПЭ}) \cdot m_{ПЭ} - (n_{PЭ}) \cdot m_{PЭ})}{(P_{PA} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n - n_{PЭ} \cdot m_{PЭ} - n_{ПЭ} \cdot m_{ПЭ})} + \frac{N_{PM,\tau_{(k-1)}} \cdot P_{PA}}{(P_{PA} + \overline{M}_{\tau_k} + M_n - n_{PЭ} \cdot m_{PЭ} - n_{ПЭ} \cdot m_{ПЭ})} \right] \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $\overline{M}_{\tau_k}$  – количество хлорида магния титанового производства, т, заливаемого в головной аппарат за время  $\tau_k$ ;  $N_{MgCl_2}$  – содержание хлорида магния в хлориде магния титанового производства, доли ед.

Граничным условием применения уравнений (4)-(7) является равенство нулю  $\overline{M}_{\tau_k}$  во все промежутки времени, кроме тех, при которых происходит подача сырья. Если каждый из промежутков времени  $\tau_k$  принять равным продолжительности заливки хлорида магния из одного ковша, значение  $\overline{M}_{\tau_k}$  будет учитываться при первой заливке, от которой начинается отсчет времени  $\tau_{k=0}$ , и в каждый последующий  $k$ -ый момент времени  $\tau_k = T$  (где  $T$  – время между заливками хлорида магния).



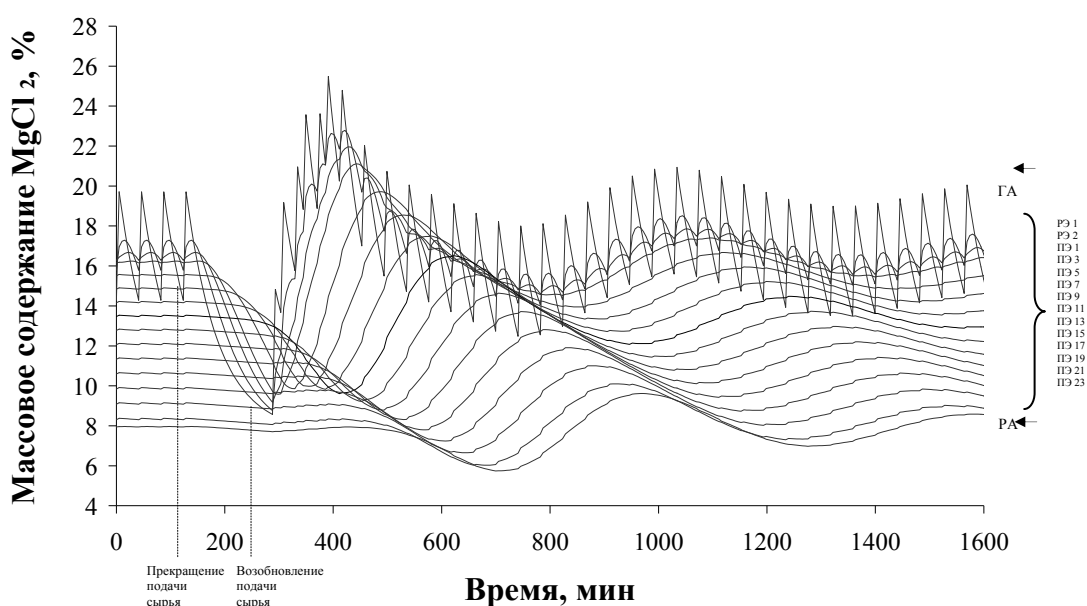
$\tau_0$  - перед заливкой хлорида магния в головной аппарат;  $\tau_1$  - через 5 мин;  $\tau_2$  - через 20 мин;  $\tau_3$  - через 30 мин после заливки хлорида магния в головной аппарат

**Рисунок 2** – Концентрация  $MgCl_2$  в аппаратах поточной линии

Графические зависимости, показанные на рис. 2 и 3, иллюстрируют результаты расчетов, выполненных для поточной линии, включающей головной и разделительный аппараты, два рафинировочных и двадцать четыре проточных электролизера, и работающей на силе тока 200 кА. До прекращения подачи сырья при циклическом питании поточной линии с периодом заливки, равным 41 мин, диапазон изменения

содержания хлорида магния в головном аппарате составит 14,8...19,7%, в первом рафинировочном электролизере – 15,8...17,3%, в первом проточном – 16,18...16,24%. Как видно из приведенных рисунков, циклические колебания концентрации хлорида магния имеют наиболее выраженный характер в первых аппаратах поточной линии и практически затухают на третьем или на четвертом проточном электролизере.

Используя уравнения (4)-(7), можно смоделировать ситуации, отвечающие различным условиям подачи сырья, спрогнозировать их последствия и, при необходимости, выработать решения по поддержанию концентрации хлорида магния в рамках регламентных пределов. Пример такого моделирования представлен на рис. 3, где показано влияние на концентрационный режим поточной линии временного прекращения подачи сырья. После прекращения подачи сырья пропустили три заливки хлорида магния. Снижение концентрации хлорида магния, связанное с распространением волны обеднения, достигает критически низких значений в концевых электролизерах даже при условии возобновления питания сырьем в прежнем объеме.



ГА - головной аппарат, РЭ1, РЭ2 - соответственно первый и второй рафинировочные электролизеры, ПЭ1 - ПЭ7 - соответственно первый - седьмой проточные электролизеры

**Рисунок 3** – Концентрационный режим поточной линии при временном прекращении подачи сырья

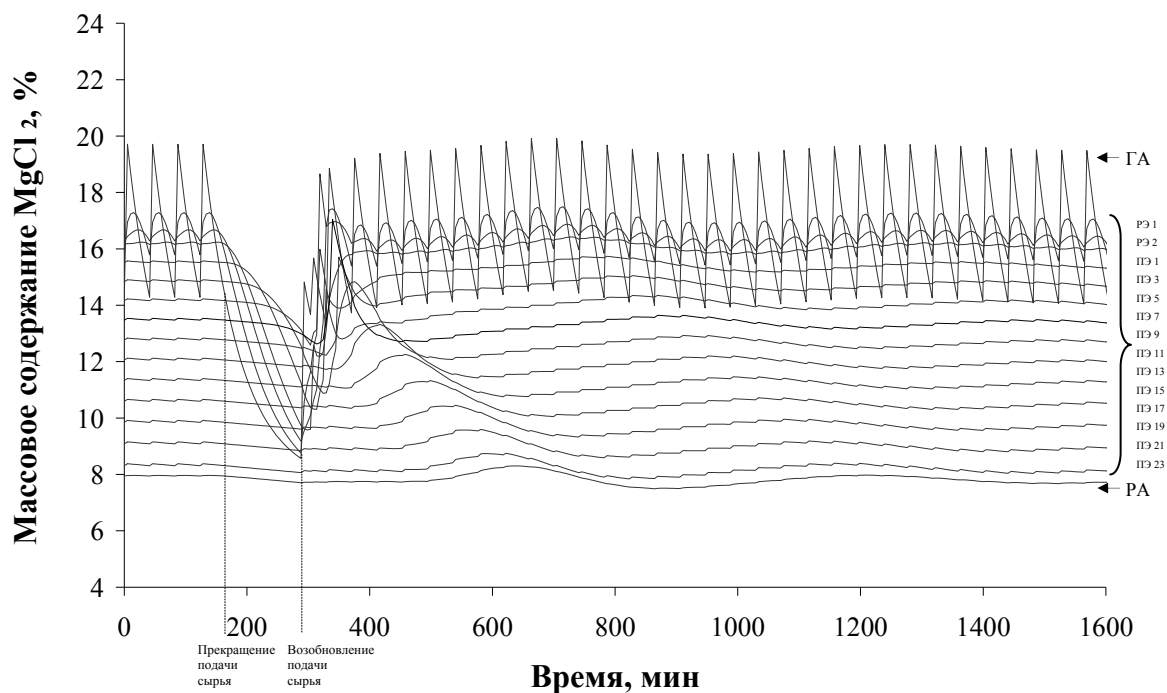
В этом случае для выравнивания концентрации часть сырья необходимо подать в электролизеры. При этом следует учитывать, что более частая подача сырья стандартными порциями в головной аппарат может вызвать резкое увеличение температуры электролита по всей поточной линии. Заливка хлорида магния в электролизер в таком же объеме, как и в головной аппарат, может привести к пассивации катодов, повышенной сработке анодов и снижению технологических показателей.

Уравнения (4)-(7) дают возможность рассчитать режим подачи сырья, позволяющий привести концентрацию в норму. Результаты расчетов, выполненных нами для той же поточной линии, позволили установить, что нарушенный перерывом в подаче сырья концентрационный режим может быть стабилизирован следующим образом.

Через 20 мин после возобновления поступления сырья необходимо одновременно залить по аппаратам ранее пропущенные порции сырья в следующих объемах:

- первый ковш (емкостью 5 т): 2 т – в головной аппарат, 2 т – в первый рафинировочный электролизер, 1 т – во второй рафинировочный электролизер;
- второй ковш (емкостью 5 т) – по 1 т в первый-пятый проточные электролизеры включительно;
- третий ковш (емкостью 5 т) – по 1 т в проточные электролизеры с шестого по десятый включительно.

Картина, иллюстрирующая влияние предложенного режима подачи сырья в аппараты поточной линии на концентрацию хлорида магния по потоку, показана на рис. 4.



**Рисунок 4** – Концентрация хлорида магния в аппаратах поточной линии при использовании предложенного режима подачи сырья

Как видно из зависимостей, представленных на рис. 4, использование предложенного режима подачи пропущенных порций сырья позволяет нормализовать концентрационный режим работы поточной линии и при этом избежать снижения или увеличения концентрации хлорида магния в аппаратах поточной линии до критических значений.

Приведенные уравнения для расчета концентрационного режима могут быть использованы при проектировании поточных линий электролиза магния, а также для текущего анализа работы поточных линий, эксплуатирующихся в составе титано-магниевых заводов. Они могут быть взяты за основу при разработке программного обеспечения системы АСУТП цехов электролитического производства магния, в которых применяется поточная технология.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Н. М. Исследование и разработка поточной технологии электролитического производства магния: дисс. ...доктора техн. наук: 05.16.03 / Зуев Николай Михайлович. – Л.: 1975. – 327 с.
2. Иванов А. Б. О затухании колебаний концентрации вдоль гидравлической цепи аппаратов

/ А. Б. Иванов // Журнал прикладной химии. – 1966. – Вып. 5. – С. 1198-1199.

3. *Иванов А. Б.* Расчет материальных потоков при поточном способе питания электролизеров / А. Б. Иванов // Труды ВАМИ. – Л.: ВАМИ, 1974. – № 1. – С. 119-126.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2009 р.  
Рецензент – проф. Б.П. Серета