

ВЛИЯНИЕ НАСТЫЛИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АЛЮМИНИЕВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ

О.Г. Прворова, И.Н. Коростелев *

Исследуется влияние застывшего слоя электролита - настыва на распределение магнитного поля в алюминиевом электролизере. Настыв влияет на распределение плотности электрического тока в электролизере, а, следовательно, на распределение магнитного поля и электромагнитных сил. Устойчивость работы алюминиевого электролизера существенно зависит от распределения электрических и магнитных полей в нем.

Алюминиевый электролизер представляет собой прямоугольную ванну, которая состоит из двух жидких слоев – слоя электролита и алюминия. Сверху в электролит погружены электроды прямоугольной формы – аноды. Нижняя часть ванны ограничена катодом. Через аноды в электролизер поступает сильный электрический ток ~150 кА. Ток проходит через слой электролита, металл, катод и выходит снизу через блюмсы (рис.1).

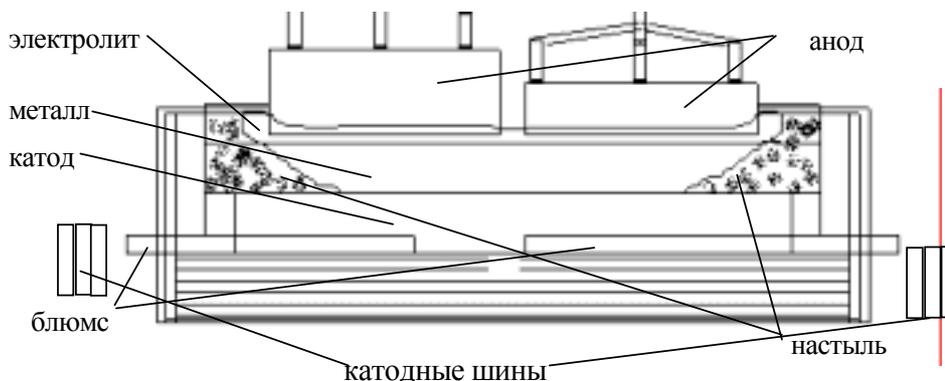


Рис. 1. Алюминиевый электролизер (поперечное сечение)

Процесс производства алюминия состоит в электролитическом разложении глинозема (Al_2O_3), растворенного в электролите. На катоде выделяется алюминий, на аноде происходит окисление выделяющимся кислородом углерода с CO_2 и CO .

* © О.Г. Прворова, И.Н. Коростелев, 2004; Красноярский госуниверситет (Россия); E-mail: opr@krazu.ru, korostelewin@krazu.ru

Основным показателем работы электролизёра служит выход по току. Выход по току - это отношение между практическим и теоретическим производством алюминия. Существуют различные теоретические и эмпирические уравнения, связывающие выход по току с магнитогидродинамическими явлениями в электролизёре.

Вдоль бортов электролизера находится застывший слой электролита – настыль. Настыль играет важную роль в работе ванны:

- защищает бортовые блоки от разрушения; растворенный в электролите или жидкий металлический алюминий реагирует с углеродом с образованием карбида (Al_4C_3), который растворяется в электролите. Настыль – единственная надежная защита бортовых блоков;
- служит естественным регулятором температуры электролиза. При повышении температуры настыль растворяется, что приводит к уменьшению теплового сопротивления, увеличению тепловых потерь и падению температуры. Перегрев электролита и увеличение коэффициента теплообмена на границе электролит-настыль или металл-настыль снижают толщину настыли. Именно этим объясняется тот факт, что в этом районе всегда наблюдается самая тонкая настыль;
- растворение настыли или ее кристаллизация – одна из главных причин изменения состава электролита;
- надлежащая настыль формирует форму рабочего пространства, определяет небольшую скорость циркуляции металла, при которой достигается высокий выход по току.
- настыль влияет на распределение плотности электрического тока в электролизере, а, следовательно, на распределение магнитного поля и электромагнитных сил.

Устойчивость работы алюминиевого электролизера существенно зависит от распределения электрических и магнитных полей в нем. Оптимизация электрических и магнитных полей чрезвычайно важна для устранения неустойчивости границы раздела металл-электролит в алюминиевом электролизере.

Для исследования влияния настыли на магнитное поле применяли метод расчёта электрических и магнитных полей электролизёра с обожжёнными анодами, использующий замеренные значения распределения тока по анодам и блюсам [1]. В модели делается переход от трехмерной задачи к двумерной путем усреднения трехмерных уравнений по высоте каждого слоя.

Сделаны следующие предположения:

- ток в аноде вертикальный и равномерно распределён в объёме каждого анода;
- ток в электролите вертикальный;
- потенциал металла считаем равным нулю относительно других слоёв.

Плотность тока в аноде определяют делением тока, входящего в анод на площадь основания анода. Ток в электролите находят аппроксимацией анодных токов.

Теперь необходимо найти токи в металле и в катоде. Для этого усредним по высоте слоя металла и катода уравнение Лапласа на потенциал:

$$\Delta \varphi_i = 0$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} \right|_{\Gamma_i} = \psi_i(x, y, z),$$

φ_i – электрический потенциал i -го слоя;

$i = 1$ - катод, 2 - металл;

Γ_i – граница i -го слоя.

Плотность электрического тока находится по формуле

$$\vec{j}_i = -\sigma_i \nabla \varphi_i, \quad i = 1, 2,$$

\vec{j}_i - плотность электрического тока i -го слоя;

σ_i – электрическая проводимость i -го слоя.

В результате усреднения получаем уравнения на усредненный потенциал в катоде:

$$\Delta \varphi_1 = -\frac{2\varphi_1}{h_1^2} \quad \text{при } y \in [l, L_y - l]$$

$$\Delta \varphi_1 = 0 \quad \text{при } y \in [0, l] \cup (L_y - l, L_y]$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial \vec{n}} \right|_{G_{1i}} = -\frac{I_i}{\sigma_1 h_1 a}$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial \vec{n}} \right|_{G_2} = 0,$$

h_1 – высота катода;
 l – длина настыли;
 L_y – ширина электролизера;
 I_i – электрический ток, выходящий из i -го блюмса;
 a – ширина блюмса;
 G_{1i} – проводящая часть границы катода (область блюмсов), $i = 1, \dots, k$ (k – количество блюмсов);
 G_2 – непроводящая часть границы катода.

Зная потенциал в катоде и пользуясь тем, что плотность тока на границе металл-катод $j_{mk} \approx \frac{2\sigma_1 \varphi_1}{h_1}$, получаем уравнения на потенциал в металле:

$$\Delta \varphi_2 = \frac{j_{z3} - j_{mk}}{\sigma_2 h_2}$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_2}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0$$

$$\varphi_2(x_0, y_0) = \varphi_0,$$

j_{z3} – плотность тока в электролите;
 h_2 – высота металла;
 Γ – боковая граница слоя металла.

Зная потенциалы, можем найти горизонтальные плотности тока в каждом из этих слоев:

$$\vec{j}_{\parallel i} = -\sigma_i \nabla_{\parallel} \varphi_i, \quad i = 1, 2.$$

Вертикальная компонента плотности тока находится как полусумма плотностей входящего в слой и выходящего из слоя вертикального тока:

$$j_{zi} = \frac{j_{zi}^{ex} + j_{zi}^{blx}}{2}, \quad i = 1, 2.$$

При расчете плотности электрического тока учитывается настыль на границе слоя металла и катода вдоль длинных сторон электролизера (рис. 2). Настыль в модели представляется как непроводящая часть границы металл-катод.

Проведенные расчеты показали, что настыль оказывает существенное влияние на распределение горизонтальных токов в электролизере [2]. На рис. 3 видно, что настыль направляет горизонтальные токи в металле к центру ванны. В катоде влияние настыли сказывается в увеличении значения y -компоненты плотности тока, направленной от центра ванны к блюмсам.

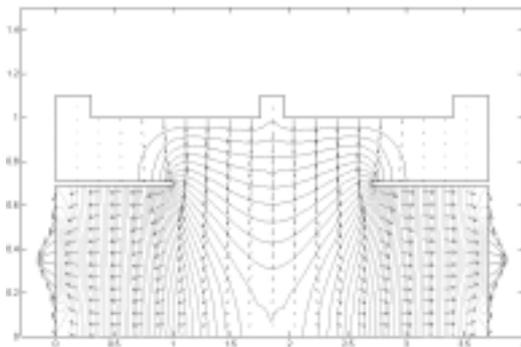


Рис. 2. Представление настыли в модели (поперечное сечение)

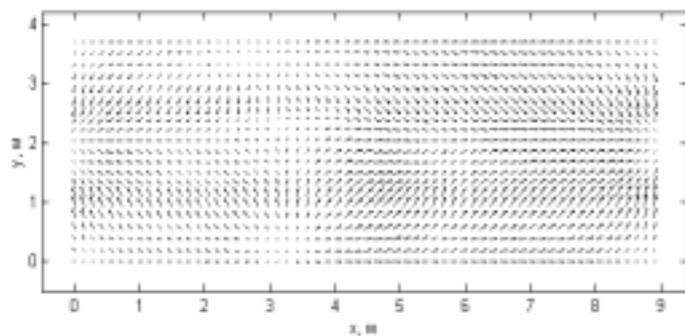


Рис. 3. Распределение горизонтальных токов в металле при настыли 1 м

Магнитное поле в электролизере можно представить следующим образом:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_{ai} + \vec{B}_э + \vec{B}_м + \vec{B}_к + \vec{B}_{ош} + \vec{B}_{вн}.$$

\vec{B}_{ai} - магнитное поле от токов в i -ом аноде;

$\vec{B}_э$ - магнитное поле от токов в электролите;

$\vec{B}_м$ - магнитное поле от токов в металле;

$\vec{B}_к$ - магнитное поле от токов в катоде;

$\vec{B}_{ош}$ - магнитное поле от токов в ошиновке;

$\vec{B}_{вн}$ - внешнее магнитное поле (от токов в соседних электролизерах).

Для расчета магнитного поля используется закон Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d\vec{r}'.$$

Для расчета магнитного поля от соседних электролизеров берут ближайшие пять электролизеров. Соседние электролизеры представляются идентичными электролизеру – объекту расчета. Влияние ферромагнитных деталей в модели не учитывают.

Были проведены расчеты магнитного поля в электролизере для нескольких ванн с настелью разной длины. Настыль оказывает заметное влияние на x - и z -компоненту магнитного поля. На y -компоненту магнитного поля изменение длины настели практически не влияет.

На рис. 4-6 показано влияние настели на x -компоненту магнитного поля. Изменение x -компоненты больше всего заметно в поперечном сечении электролизера при $x = 4,45$ (середина длинной стороны электролизера).

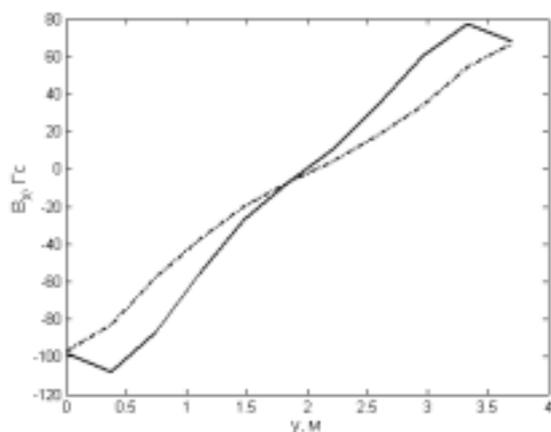


Рис. 4. X-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла, $x = 4,45$ м (пунктирная линия – без учета настели, сплошная линия – настель 0,4 м)

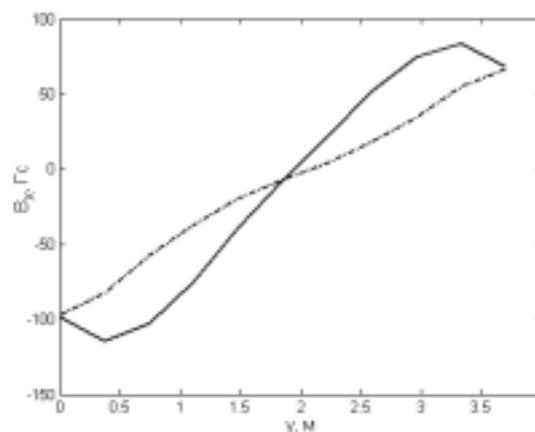


Рис. 5. X-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла, $x = 4,45$ м (пунктирная линия – без учета настели, сплошная линия – настель 0,8 м)

В центре ванны и возле боковых сторон значение x -компоненты не изменилось. В направлении от центра к боковым сторонам модуль x -компоненты магнитного поля постепенно увеличивается до своего максимума, а затем резко падает возле границы. Модули максимального и минимального значения x -компоненты увеличились.

Такое изменение x -компоненты обусловлено тем, что настель изменила форму рабочего пространства в ванне и это привело к увеличению модуля y -компоненты плотности электрического тока в катоде. Возле глухой стороны электролизера ($y = 0$) y -компонента плотности тока в катоде уменьшает значение x -компоненты магнитного поля в металле, возле лицевой стороны ($y = 3,7$) – увеличивает (рис. 7).

Y -компонента магнитного поля практически не изменилась, так как в основном из-за настели изменилась y -компонента плотности электрического тока, а в расчете y -компоненты магнитного поля участвуют x - и z -компоненты плотности электрического тока.

На рис. 8-13 показана z -компонента магнитного поля в поперечном сечении у входного ($y = 0$) и выходного ($y = 8,9$) торца электролизера. Именно в этих местах z -компонента магнитного поля претерпела наибольшее изменение.

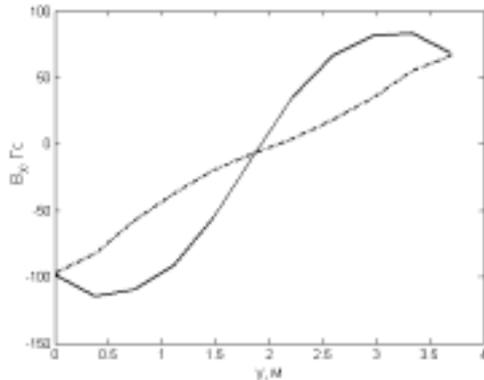


Рис. 6. X-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла, $x = 4,45$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 1,2 м)

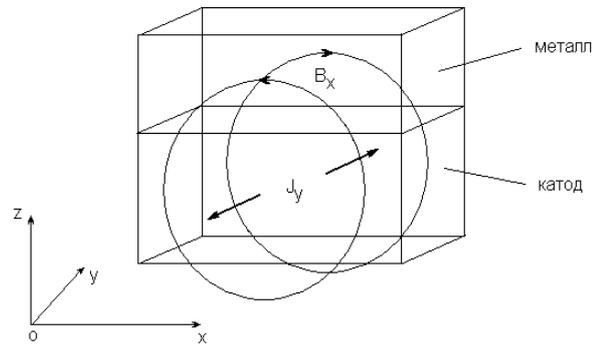


Рис. 7. Влияние y -компоненты плотности электрического тока в катоду на x -компоненту магнитного поля в металле

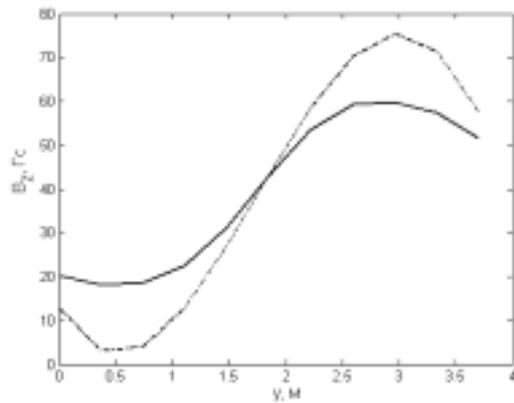


Рис. 8. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у входного торца электролизера, $x = 0$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 0,4 м)

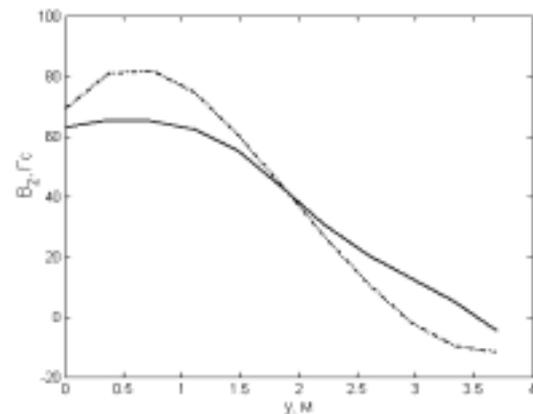


Рис. 9. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у выходного торца электролизера, $x = 8,9$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 0,4 м)

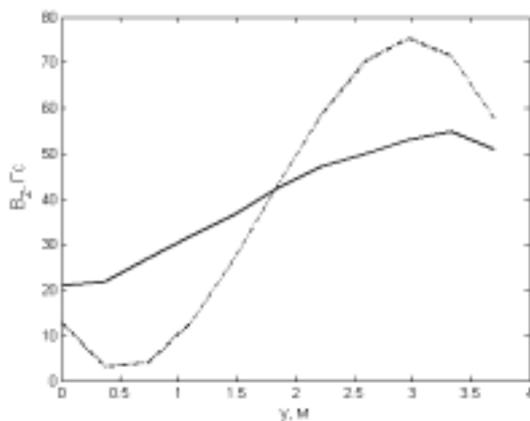


Рис. 10. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у входного торца электролизера, $x = 0$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 0,8 м)

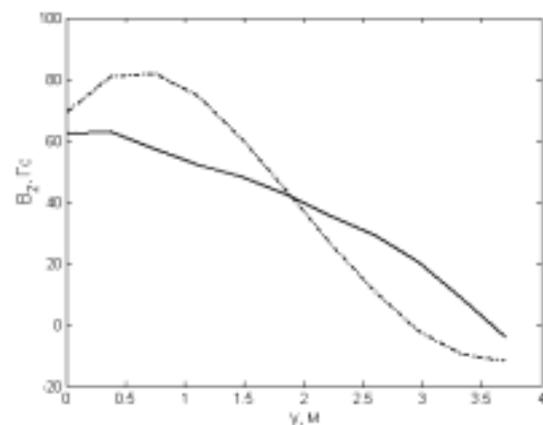


Рис. 11. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у выходного торца электролизера, $x = 8,9$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 0,8 м)

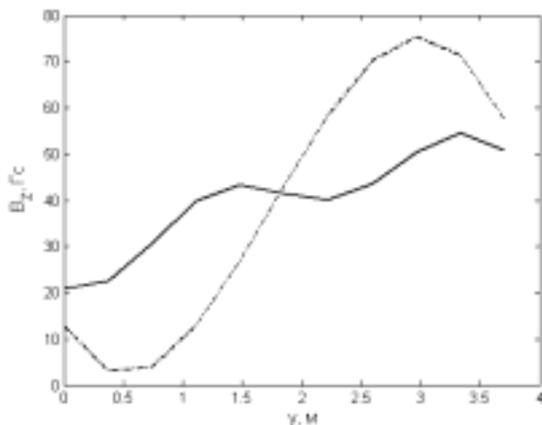


Рис. 12. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у входного торца электролизера, $x = 0$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 1,2 м)

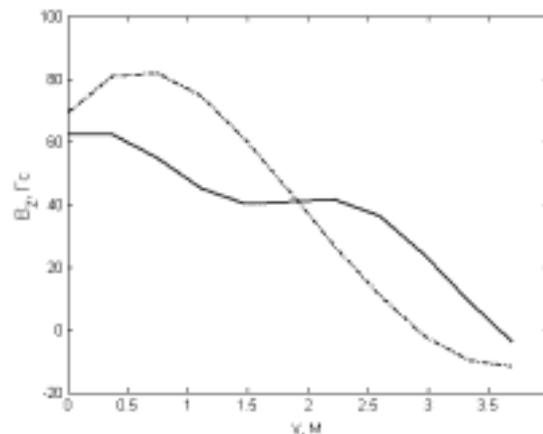


Рис. 13. Z-компонента магнитного поля в поперечном сечении слоя металла у выходного торца электролизера, $x = 8,9$ м (пунктирная линия – без учета настыли, сплошная линия – настыль 1,2 м)

Как и в случае с x -компонентой магнитного поля, z -компонента не изменилась в центре ванны. Вдоль торцов электролизера z -компонента магнитного поля разогнулась практически в прямую линию. Размах z -компоненты уменьшился как возле входного, так и возле выходного торца.

Главную роль в таком изменении z -компоненты магнитного поля сыграла y -компонента плотности электрического тока в металле. Увеличение y -компоненты плотности электрического тока в металле, направленной к центру ванны, приводит к уменьшению размаха z -компоненты магнитного поля вдоль торцов электролизера (рис. 14).

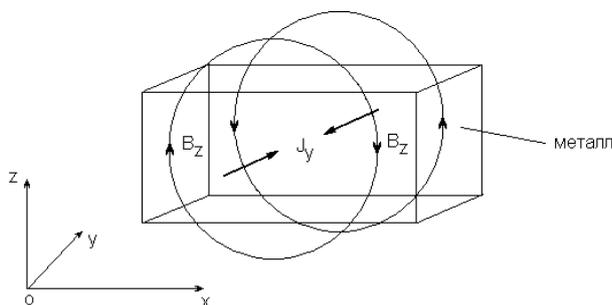


Рис. 14. Влияние y -компоненты плотности электрического тока в металле на z -компоненту магнитного поля в металле

У входного торца электролизера z -компонента магнитного поля увеличивается с глухой стороны, а с лицевой – уменьшается; у выходного торца, наоборот, с глухой стороны z -компонента уменьшается, а с лицевой – увеличивается.

Сильные электрические и магнитные поля, присутствующие в электролизере вызывают гравитационные волны. При некоторых условиях наблюдается рост амплитуд этих волн, который называют неустойчивостью, или магнитогидродинамической неустойчивостью. Любое незатухающее колебание поверхности раздела должно быть ликвидировано, так как из-за него возрастает массоперенос жидкого алюминия от катода в электролит, где он снова окисляется. Для оценки влияния настыли на стабильность работы алюминиевого электролизера были проведены расчеты графика устойчивости электролизера с разной настылью по критерию Бояревича [3]. График устойчивости представляет собой зависимость толщины металла от межполюсного расстояния. Межполюсное расстояние - это расстояние от подошвы анода до поверхности металла. На рис. 15 представлен график устойчивости алюминиевого электролизера с разной настылью. Выше кривой расположена область стабильной работы электролизера, ниже – область неустойчивости. Видно, что при увеличении длины настыли кривая поднимается. Если взять фиксированный уровень металла, то при увеличении длины настыли для того, чтобы работа электролизера была стабильна, необходимо увеличить МПР. Электролит характеризуется очень низкой электропроводностью, увеличение МПР крайне нежелательно, т.к. это вызывает большие энергетические потери. Таким образом, согласно критерию Бояревича, увеличение длины настыли снижает запас устойчивости электролизера.

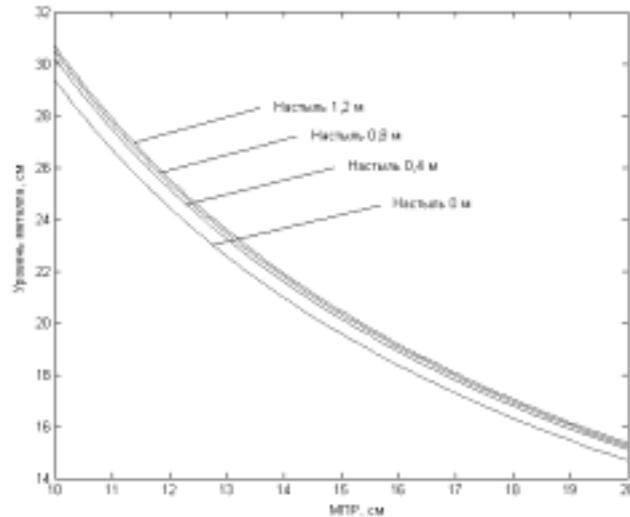


Рис. 15. График устойчивости в зависимости от настыли

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проворова О.Г. Моделирование распределения электрического, магнитного и гидродинамического полей в электролизере Содерберга. Препринт № 7-96 / О.Г.Проворова, В.В.Пингин, В.В.Овчинников, Т.В.Пискажева, Д.А.Горин, В.Ю.Бузунов / Краснояр. гос. ун-т. – Красноярск, 1996. - 22 с.
2. Проворова О.Г. К вопросу о моделировании электромагнитных полей в алюминиевом электролизере. II Всесибирский конгресс женщин-математиков: Сборник статей / О.Г.Проворова, И.Н.Коростелев, В.В.Пингин, Е.Р.Шайдулин. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2002. - С. 99-108.
3. Bojarevics V. Long waves instability of liquid metal-electrolyte interface in aluminium electrolysis cell: a generation of Sele's criterion / V.Bojarevics, M.V.Romerio. – O Fluid Mech, 1994.

INFLUENCE OF LEDGE ON DISTRIBUTION THE MAGNETIC FIELD IN ELECTROLYTIC BATH

O.G. Provorova, I.N. Korostelev

It is researched the influence frozen layer of electrolyte - ledge on distribution the magnetic field in electrolytic bath. Ledge influences upon distribution of density of electric current in bath, but, consequently, on distribution the magnetic field and electromagnetic force. Stability of work bath greatly depends on distribution electric and magnetic fields in him.