

УДК 669.0:004.9

И. Н. БУДИЛОВ, Ю. В. ЛУКАЩУК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В ВАННЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приводятся алгоритм и результаты расчета электромагнитных и гидродинамических полей в расплаве алюминия в ванне промышленного электролизера, выполненные с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS.

Компьютерное моделирование; электролизер; магнитные поля

Технология получения алюминия является физически очень сложным, чрезвычайно энергоемким и дорогостоящим процессом, что существенно затрудняет экспериментальные исследования в этой области. В связи с этим общепризнанной мировой практикой является экспертиза с использованием компьютерных моделей технических решений в области совершенствования конструкции и технологии алюминиевых электролизеров. Опираясь на заложенные в модели фундаментальные законы, расчеты позволяют видеть тенденции в хаотическом изменении параметров, определять стратегическую линию совершенствования технологии независимо от массы случайных факторов, имеющих место в любом реальном производственном процессе. Такие возможности и преимущества математических методов необходимы как в период становления технической политики, так и на стадии ее реализации.

Расчет процесса требует учета электромагнитных, тепловых, прочностных и гидродинамических явлений и предъявляет высокие требования к возможностям используемых средств численного моделирования. В работе была поставлена задача разработки расчетного алгоритма с использованием системы компьютерного моделирования ANSYS, для анализа характера течений алюминиевого расплава в ванне электролизера с точки зрения его влияния на энергетический режим. Адекватный расчет, дающий детализированное представление о подробностях процесса, является одним из первостепенных условий экономически эффективного производства.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Циркуляция алюминиевого расплава в ванне электролизера обусловлена совместным действием на него электромагнитных сил, сил вязкостного трения, гидростатического давления и силы тяжести. Рассматриваемая в работе модель предполагает, что расплав является несжимаемой изотропной жидкостью, для которой справедлива гипотеза прилипания. Течение исследуется в трехмерной области, соответствующей ванне реального электролизера, и предполагается стационарным и турбулентным, описываемым $k-\epsilon$ моделью. Влияние движения расплава на возмущение электромагнитного поля в первом приближении не учитывается. Предполагается также, что расплав не имеет поверхностей раздела и ограничен со всех сторон твердой стенкой. Последнее предположение обусловлено тем, что существующие на настоящий момент версии пакета ANSYS (вплоть до версии 6.1, включительно) не позволяют непосредственно проводить расчеты гидродинамики двух контактирующих жидкостей различной плотности в пространственных областях течения.

Система уравнений математической модели включает в себя [1]:

1) уравнение неразрывности

$$\operatorname{div} \mathbf{w} = 0; \quad (1)$$

2) уравнение количества движения в форме Навье-Стокса

$$(\mathbf{w} \nabla) \mathbf{w} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \mathbf{w} + \mathbf{g} + \mathbf{f}_m, \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_m = \frac{1}{4\pi\rho} [\mathbf{H} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{H}]; \quad (3)$$

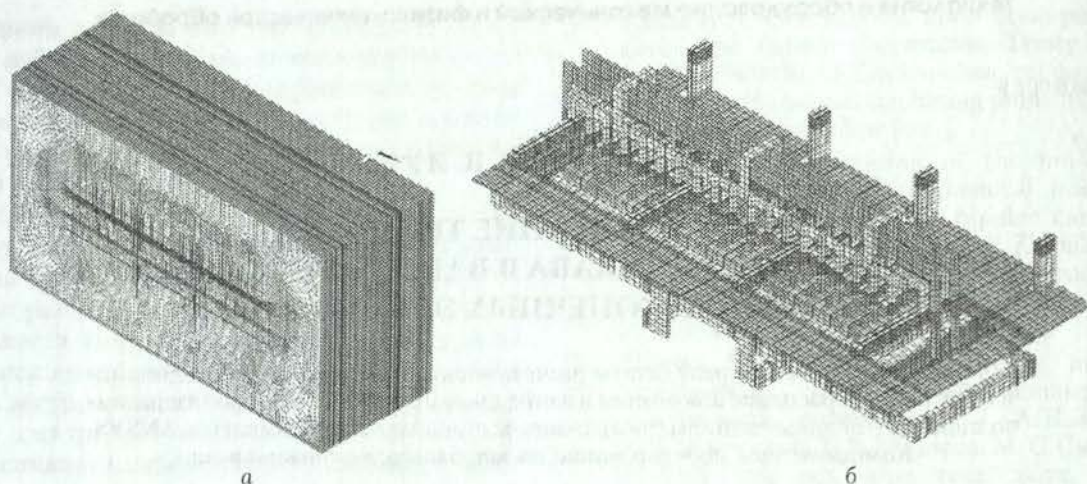


Рис. 1. Конечно-элементная модель отечественного электролизера для получения алюминия: а — расчетный модуль на 555776 элементов, охватывающий воздушным пространством один электролизер, с возможностью задания граничных условий на бесконечности; б — конечно-элементное описание электролизера внутри воздушного пространства

3) уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0, \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad (7)$$

4) уравнение для плотности электрического тока

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}; \quad (8)$$

5) уравнение магнитной индукции

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}; \quad (9)$$

6) уравнение энергии

$$c \rho \mathbf{w} \cdot \operatorname{grad} T = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) + \eta \Phi + \frac{\mathbf{j}^2}{\sigma},$$

$$\Phi = \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_k} + \frac{\partial w_k}{\partial x_i} \right). \quad (10)$$

Здесь \mathbf{w} — вектор скорости движения расплава, м/с; p — статическое давление в расплаве, Па; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения, м/с²; \mathbf{f}_m — вектор плотности массовых электромагнитных сил, действующих на расплав, м/с²; \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля, А/м; \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, В/м; \mathbf{j} — вектор плотности электрического тока, А/м²; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, Тл; T — температура, К; Φ — диссипативная функция, Вт/м³; ρ — плотность расплава, кг/м³; η — коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$\nu = \eta/\rho$ — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; σ — удельная электропроводность, 1/(Ом·м); μ — относительная магнитная проницаемость расплава; μ_0 — магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Основу расчетного модуля составляет один электролизер, окруженный воздушным пространством, замкнутым областью специальных элементов, обеспечивающих задание граничных условий на бесконечности. Модуль имеет минимально допустимый размер окружающего воздушного пространства и ориентирован на составление цепей из нескольких последовательно соединенных электролизеров. Существенно, что при этом они образуют связанную электрическую цепь.

Наиболее полный учет факторов, влияющих на конфигурацию магнитного поля, достигается в моделях, в которых электролизеры и шинопроводы, в том числе и компенсационные, находятся внутри общего воздушного пространства, окруженного областью с граничными условиями заданными на бесконечности.

На рис. 1 в качестве примера показан расчетный модуль одного из видов отечественных электролизеров.

Сформированная модель обладает следующими особенностями. Максимально близко к реальной воспроизведена геометрия всех

токопроводящих элементов электролизера, включая ванну, анодную и катодную ошиновки, а также наиболее массивных элементов, выполненных из ферромагнитных материалов: катодного кожуха, анодных балок, металлического покрытия пола. Элементы конструкции, не проводящие электрический ток и не являющиеся ферромагнетиками, в геометрическую модель не входят, поскольку не оказывают влияния на решение поставленной задачи. Тем не менее, области, занятые этими элементами, были подвергнуты конечно-элементной дискретизации с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$, в силу необходимости передачи через них магнитного поля.

Серийные расчеты выполнялись на более сложных моделях рис. 2, представляющих собой последовательное соединение модулей, показанных на рис. 1 и позволяющих учитывать влияние соседних электролизеров и цеховых электрических цепей.

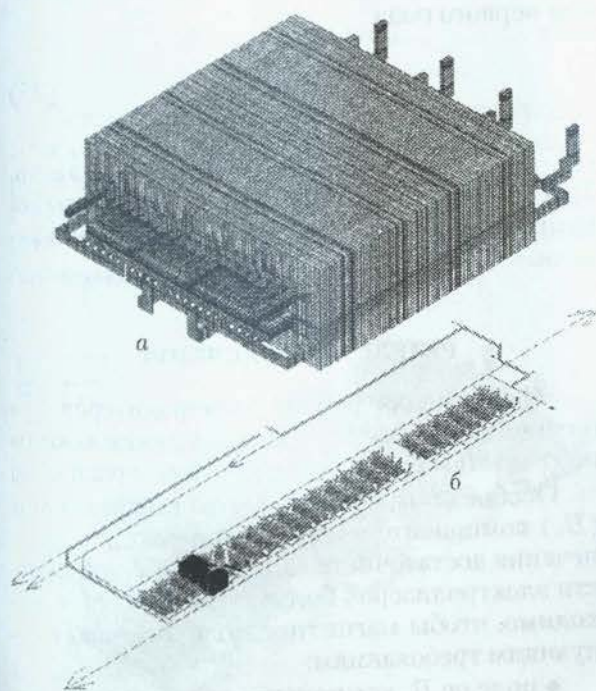


Рис. 2. Расчетные модели для учета взаимного влияния на распределение компонент вектора магнитной индукции соседних электролизеров (а) и цеховых электрических цепей (б)

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В СИСТЕМЕ ANSYS

Решение поставленной задачи в системе ANSYS выполняется последовательно в три этапа.

На первом этапе решается задача определения плотности электрического тока во всех токопроводящих элементах, включая расплав. Для этого решается система уравнений Максвелла (4) и (5). Решение выполняется методом скалярного электрического потенциала [2] на основании соотношения

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (11)$$

где φ — электрический потенциал, В. Искомая плотность тока определяется из уравнения (8). В качестве граничных условий, необходимых для получения однозначного решения, задается распределение тока серии по стоякам анодной ошиновки. При решении использовался конечный элемент Solid 5.

Второй этап состоит в определении магнитного поля электролизера. Поскольку в модели имеются ферромагнитные области, образующие замкнутые контуры (например, корпус), то для решения используется обобщенный метод скалярного магнитного потенциала — метод GSP (General Scalar Potential) [2]. В этом случае искомый вектор напряженности магнитного поля \mathbf{H} представляется в виде суммы двух составляющих:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_g - \text{grad } \psi, \quad (12)$$

где \mathbf{H}_g — некоторое приближенное значение напряженности поля (оно всегда удовлетворяет уравнению (6)), а ψ — обобщенный магнитный потенциал. Подстановка (12) в (9) приводит уравнение (7) к виду

$$\text{div}(\mu \text{ grad } \psi) - \text{div}(\mu \mathbf{H}_g) = 0. \quad (13)$$

Пространственная область Ω , в которой ищется магнитное поле, подразделяется на множество областей, не содержащих ферромагнитных частей Ω_A и множество ферромагнитных областей Ω_F .

Метод GSP предполагает четырехшаговую процедуру поиска решения.

На первом шаге во всей области Ω по закону Био-Савара рассчитывается значение напряженности \mathbf{H}_s , обусловленное протекающими в системе токами:

$$\mathbf{H}_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{j}\mathbf{r}]}{r^3} dV. \quad (14)$$

Здесь интеграл берется по объему токоведущей части, \mathbf{r} — радиус-вектор от этой части до текущей точки области Ω .

На втором шаге решение выполняется только для ферромагнитных элементов, т. е. в Ω_F . Принимается, что в Ω_F

$$\mathbf{H}_g = \mathbf{H}_s, \quad (15)$$

после чего уравнение (13) решается с условием

$$\mathbf{n} \cdot \mu(\mathbf{H}_g - \text{grad } \psi) = 0 \quad (16)$$

на границе $\partial\Omega_F$ области Ω_F (здесь \mathbf{n} — вектор внешней нормали к поверхности области).

В результате находится новое приближение для напряженности магнитного поля в области Ω_F :

$$\mathbf{H}_F = \mathbf{H}_s - \text{grad } \psi. \quad (17)$$

На третьем шаге решение уравнения (13) выполняется в области Ω_A с подстановкой

$$\mathbf{H}_g = \mathbf{H}_s, \quad (18)$$

с граничными условиями

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}_g = \mathbf{n} \cdot \mathbf{H}_F \text{ на } \partial\Omega_F, \quad (19)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} H_g(\mathbf{r}) = 0. \quad (20)$$

В результате новое приближение для поля в неферромагнитной части Ω_A имеет вид

$$\mathbf{H}_A = \mathbf{H}_s - \text{grad } \psi. \quad (21)$$

На последнем, четвертом, шаге область Ω рассчитывается целиком, при этом полученные ранее векторы напряженностей \mathbf{H}_F и \mathbf{H}_A используются в качестве начальных приближений:

$$\mathbf{H}_g = \begin{cases} \mathbf{H}_F & \text{в } \Omega_F, \\ \mathbf{H}_A & \text{в } \Omega_A. \end{cases} \quad (22)$$

На основании найденного из решения уравнения (13) значения потенциала ψ определяется окончательное значение напряженности магнитного поля во всей расчетной области Ω :

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_g - \text{grad } \psi. \quad (23)$$

При решении для ферромагнетиков электролизера зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu(H)$ определяется в программе ANSYS на основании вводимой аппроксимации для кривой намагниченности $B(H)$, которая в нашем случае была взята из работы [3]. На этом шаге решения

также использовался конечный элемент типа Solid 5.

На третьем этапе ищется решение собственно гидродинамической задачи, состоящей в решении системы уравнений (1), (2), (10). При этом областью поиска решения является только область расплава, причем производится дополнительное измельчение конечно-элементной сетки и в качестве расчетного используется конечный элемент Fluid 142. Значение вектора плотности массовых электромагнитных сил \mathbf{f}_m , действующих на расплав, рассчитываются по соотношению (3) на основании полученного на предыдущем этапе вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} с использованием автоматической процедуры интерполяции на новую сетку. В качестве граничных условий для уравнения движения используется условие прилипания,

$$\mathbf{w}|_{\Gamma} = 0, \quad (24)$$

а для уравнения энергии — граничные условия первого рода

$$T|_{\Gamma} = T_w(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in \Gamma, \quad (25)$$

где Γ — поверхность расчетной области, $T_w(\mathbf{r})$ — известное значение температуры на границе, получаемое из решения тепловой задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Эффективная работа электролизеров существенно зависит от распределения компонент вектора магнитной индукции в расплаве.

Особое внимание уделяется вертикальной (B_z) компоненте магнитного поля. Для обеспечения достаточного запаса МГД устойчивости электролизеров большой мощности необходимо, чтобы магнитное поле отвечало следующим требованиям:

- поле по B_z компоненте должно иметь как можно больше перемен знака по продольному направлению и быть симметричным относительно осей ванны;

- условие частой перемены знака B_z является приоритетным даже по отношению к абсолютной величине этой компоненты в расплаве. Когда вертикальная составляющая магнитного поля, действующего на слой расплавленного металла, имеет один и тот же знак на обширном участке электролизера, особенно вдоль продольной оси ванны, могут

возникать когерентные и возрастающие колебания поверхности расплавленного металла (волнения) из-за накопления продольного момента вдоль электролизера.

Оценка неуравновешенности вертикальной компоненты вектора магнитной индукции осуществлялась на основании следующих характеристик:

- среднеинтегральное значение B_z :

$$\bar{B}_z = \frac{1}{V} \int_V B_z dV \approx \frac{\sum B_z^{(e)} V^{(e)}}{\sum V^{(e)}}; \quad (26)$$

- среднеинтегральное значение $|\bar{B}_z|$:

$$|\bar{B}_z| = \frac{1}{V} \int_V |B_z| dV = \frac{\sum B_z^{(e)} V^{(e)}}{\sum V^{(e)}}; \quad (27)$$

• коэффициент относительной неравномерности вертикальной составляющей магнитной индукции:

$$K = \frac{\bar{B}_z}{|\bar{B}_z|} \cdot 100\%. \quad (28)$$

Опиновка рассматриваемого электролизера (см. рис. 2, а) четырехстоячная симметричная относительно поперечной оси. Существенной особенностью является более сложный характер распределения тока в анодной опиновке.

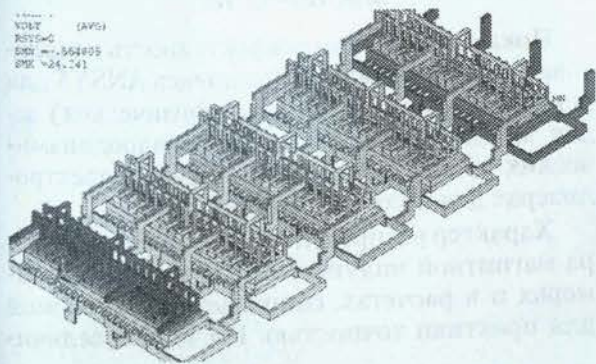


Рис. 3. Распределение потенциала по основным электропроводящим частям конструкции, состоящей из пяти последовательно соединенных устройств

Для определения характера распределения тока серии по четырем подводящим стоякам использована специальная расчетная модель, представляющая собой электрическую цепь из пяти электролизеров (рис. 3). В результате интегрирования плотности тока по подводящим элементам стояка

установлено следующее распределение: 27,5; 22,6; 22,5; 27,4%, использованное при проведении последующих магнитогидродинамических расчетов.

Сравнение расчетных напряжений с результатами замеров, проведенных в цехе, представлено в таблице. Установлено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных, полученных на конечно-элементной модели.

Таблица

	Расчет на модели ANSYS	Данные цеховых замеров
Рабочее напряжение на электролизере, В.....	4,34	4,20
Падение напряжения в аноде, В.....	0,43	0,43
Падение напряжения в подине, В.....	0,39	0,35
Падение напряжения в опиновке, В.....	0,21	0,28
Падение напряжения в межполюсном расстоянии, В.....	1,76	1,50

На рис. 4 в качестве примера приведено сопоставление результатов расчета вертикальной компоненты вектора магнитной индукции B_z на выходной стороне электролизера с данными замеров. Характер распределения компонент, полученных при расчетах и замерах, совпадает.

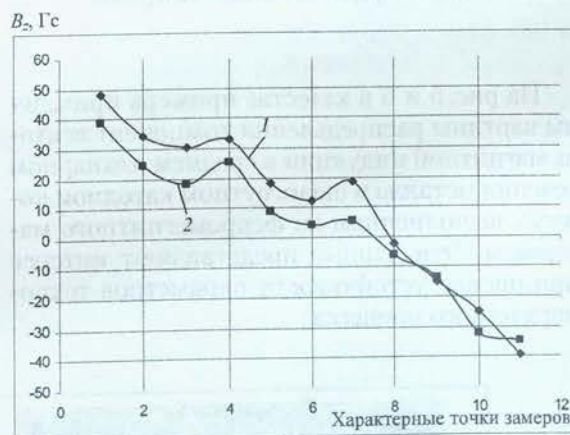


Рис. 4. Сопоставление результатов замеров и расчетов вертикальной компоненты вектора магнитной индукции B_z (Гс) на выходной стороне электролизера (1 — замер, 2 — расчет)

Результаты расчетов позволяют анализировать характер распределения компонент вектора магнитной индукции во всех основных элементах конструкции электролизера.

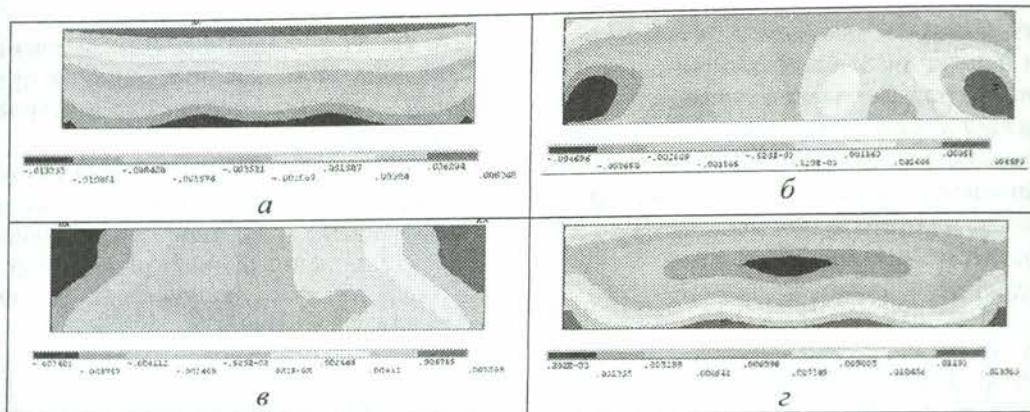


Рис. 5. Компоненты вектора магнитной индукции (Тл) в среднем планарном сечении металла: а — B_x ; б — B_z ; в — B_y ; г — B_z

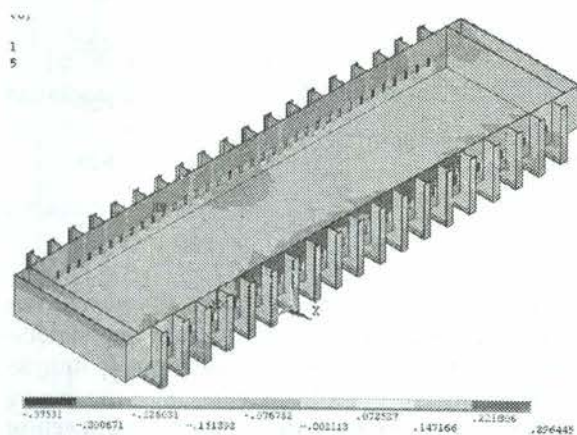


Рис. 6. Распределение вертикальной компоненты вектора магнитной индукции B_z (Тл) в шпангоутном катодном кожухе электролизера, выполненном из ферромагнитного материала

На рис. 5 и 6 в качестве примера приведены картины распределения компонент вектора магнитной индукции в среднем планарном сечении металла и шпангоутном катодном кожухе, выполненном из ферромагнитного материала. Эти данные представляют интерес при оценке устойчивости параметров технологического процесса.

Качественное сравнение картин течения расплава алюминия в ванне электролизера возможно по числу и конфигурации вихрей в среднем планарном сечении металла (рис. 7).

Установлено, что картина циркуляции металла имеет преимущественно симметричный характер; хорошо выражены четыре вихря и вихри меньшей интенсивности у левой и правой границ. Максимальная скорость металла не превышает 0,18 м/с. Коэффициент относительной неравномерности вертикальной составляющей магнитной индукции в соответствии с данными расчетов $K = 0,19$, что характеризует параметры технологического процесса при установленном токе серии как вполне удовлетворительные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана высокая эффективность использования программного комплекса ANSYS для решения связанных (мультифизических) задач моделирования магнитно-гидродинамических процессов в промышленных электролизерах для получения алюминия.

Характер распределения компонент вектора магнитной индукции, полученных при замерах и в расчетах, совпадает с приемлемой для практики точностью. Расчетные вели-

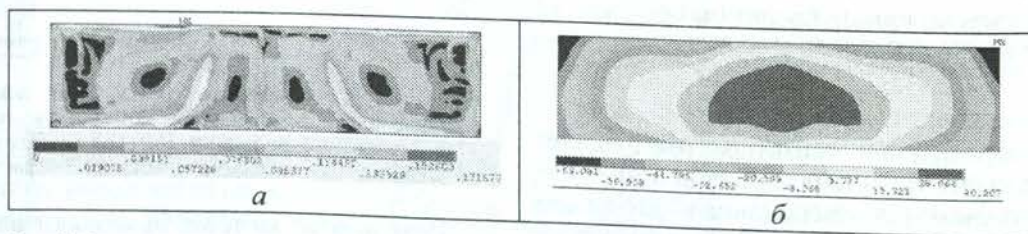


Рис. 7. Скалярное поле суммарной скорости V (м/с) (а) и поле статического давления p (Па) (б) в среднем планарном сечении металла

ны рабочих напряжений и падений напряжений на отдельных элементах близки к экспериментальным замерам. Это позволило использовать разработанные модели, в частности, для анализа параметров ошиновки при модернизации участка цеха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Физматлит, 2001. 656 с.
2. **SAS IP.** ANSYS Theory Reference. Electromagnetic Field Fundamentals. Ninth Edition. SAS IP, Inc.
3. **Калужский, Н. А.** Исследование магнитных свойств ферромагнитных элементов конструкций алюминиевых электролизеров / Н. А. Калужский, А. П. Скворцов, А. В. Павлов [и др.] // Технико-экономический вестник БрАЗа. 2002. № 5. С. 57–60.

ОБ АВТОРАХ



Будилов Игорь Николаевич, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж. по оборуд. и технол. сварочн. произв. (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. макроме- ханики нанострук. материалов, критериев разрушения.



Лукашук Юрий Валенти- нович, доц. каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. по автома- тиз. машиностроит. пром-ти (УАИ, 1972). Канд. техн. на- ук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1981). Иссл. в обл. численных методов в мех. деформ. твердого тела.