

УДК 538.4:621.313.333

А. Ф. Бояринцев, Л. М. Дронник, С. Ю. Реуцкий, И. М. Толмач

МГД-ПРОЦЕССЫ В КАНАЛЕ ПЛОСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАСОСА С ПЕРЕГОРОДКАМИ

Рассматривается установившееся движение жидкого металла с удельной электропроводимостью σ в канале заданной ширины плоского индукционного насоса под действием бегущего вдоль оси x магнитного поля (рис. 1). Поперечное сечение канала разделено продольными проводящими перегородками (их число задано и конечно) с проводимостью σ_1 на ряд одинаковых гидравлически параллельных подканалов. Толщина перегородки равна Δ , стенки Δ_1 , полная ширина канала $2a$ (без учета перегородок), полюсное деление равно τ . Перегородки обычно ставят в каналах крупных индукционных плосколинейных насосов для предотвращения перетеканий и обеспечения прочности.

В данной работе выполнен совместный анализ влияния поперечного краевого эффекта и гидродинамических эффектов в рамках модели узких полос течения при наличии конечного числа перегородок в канале с учетом прилипания потока к стенкам перегородок.

Новым по сравнению с [1] является учет влияния конечного числа проводящих перегородок.

Пренебрегая конвективными членами, запишем уравнение движения для осредненных величин в виде [1]

$$-\frac{d}{dy} \left[(\eta_T + \eta_L) \frac{du}{dy} \right] - \frac{\lambda_m}{8\delta} \rho u |u| - \frac{\alpha}{2\mu_0} B_m \operatorname{Im}(b(y)) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Здесь η_L — динамическая, а η_T — турбулентная вязкость; λ_m — коэффициент сопротивления; $b(y)$ — комплексная амплитуда индуцированного поля; B_m — амплитуда внешнего поля; $\partial p/\partial x$ — градиент давления. Как и в [1], задача рассматривается в приближении плоскопараллельного поля, имеющего одну z -компоненту. В этом случае уравнение индукции имеет вид

$$d^2 \bar{b}/d\bar{y}^2 = \bar{b} + i \operatorname{Rm} (1 - u) (1 + \bar{b}), \quad (2)$$

а составляющие плотности тока $\dot{j}_x = \partial \bar{b}/\partial y$, $\dot{j}_y = i\bar{b}$. Черточками обозначены безразмерные величины, введенные соотношениями (в дальнейшем точка над \bar{b} для простоты не ставится):

$$\bar{y} = \alpha y, \quad \bar{b} = b/B_m, \quad \bar{u} = u/v_s = u\alpha/\omega, \quad (3)$$

а $\operatorname{Rm} = \sigma\mu_0\omega/\alpha^2$ — магнитное число Рейнольдса.

В перегородках и стенках канала вместо (2) имеем

$$d^2 \bar{b}/d\bar{y}^2 = \bar{b} + i \operatorname{Rm}_1 (1 + \bar{b}), \quad \operatorname{Rm}_1 = (\sigma_1/\sigma) \operatorname{Rm}. \quad (4)$$

Для турбулентной вязкости η_T используем два выражения, во-первых,

$$\eta_T = \text{const}, \quad (5a)$$

как и в [1], и, во-вторых,

$$\eta_T = \rho l^2 |du/dy|, \quad (5b)$$

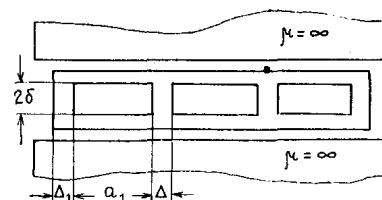


Рис. 1. Схема течения.

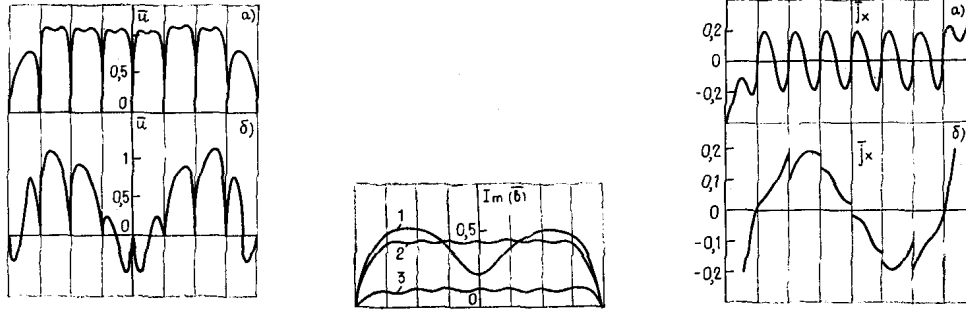


Рис. 2. Профили скорости при $s=0$ (а) и $s=0,8$ (б).

Рис. 3. Распределение плотности электромагнитной силы. s : 1 — 0,8, 2 — 0,2, 3 — 0.

Рис. 4. Составляющая плотности индуцированного тока \bar{j}_x при s : а — 0, б — 0,8.

где $l=0,4y_w$ — длина пути смещения Прандтля [2]; y_w — расстояние до ближайшей твердой стенки. Используя (3), запишем уравнение движения (1) в безразмерном виде:

$$\frac{d}{d\bar{y}} \left\{ \left(1 + \text{Re} \bar{l}^2 \left| \frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} \right| \right) \frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} \right\} - q\bar{u}|\bar{u}| - \frac{1}{2} \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}} \text{Im}(\bar{b}(y)) - \kappa = 0. \quad (6)$$

Здесь $\text{Re} = \rho v_s / \eta \alpha$ — число Рейнольдса; $\text{Ha} = (B_m / \alpha) \sqrt{\sigma / (\rho v)}$ — число Гартмана; $q = \lambda_m \rho v_s / (8 \delta \eta \alpha^2)$, $\kappa = (dp/dx) / (\eta v_s \alpha^2)$.

На твердых границах имеем $u=0$. Для магнитного поля \bar{b} на каждой поверхности раздела выполняются условия

$$\bar{b}_k = \bar{b}_{k+1}, \quad \sigma_k^{-1} (d\bar{b}_k/dy) = \sigma_{k+1}^{-1} (d\bar{b}_{k+1}/d\bar{y}). \quad (7)$$

На внешней стороне боковой стенки канала, граничащей с воздухом, $\bar{b}=0$.

Система уравнений (2), (4), (6) решалась методом конечных разностей (алгоритм описан в [1]). Если для η_T используется (5б), то она уточняется итерационно. Далее представлены некоторые результаты решений.

На рис. 2 показаны профили скорости в поперечном сечении канала, на рис. 3 — плотность электромагнитной силы, а на рис. 4 — распределение компоненты j_x плотности индуцированного тока. Расчеты показывают, что при изменении скольжения приблизительно от 0 до 0,4 наблюдается монотонное уменьшение расхода в каждом из восьми подканалов насоса; при этом профиль скорости в целом сохраняет форму, соответствующую $s=0$. На профиле скорости в этом диапазоне скольжений различимы впадины в центре каждого подканала, а профиль электромагнитной силы имеет волнообразный характер. Это объясняется возникновением в каждом из подканалов вихря индуцированного тока, замыкающегося вдоль перегородок (см. рис. 4а). Разрывы на рис. 4 объясняются тем, что не показано распределение плотности тока в перегородках, толщина которых значительно меньше ширины подканала. При дальнейшем увеличении скольжения ($s > 0,4$) распределение тока, плотности электромагнитной силы и скорости существенно меняется. Отдельные вихри тока, замыкавшиеся в пределах одного подканала, исчезают. Возникает общий вихрь плотности тока, замыкающийся на полной ширине канала (рис. 4б). Это отражается и на распределении электромагнитной силы. Она вследствие размагничивающегося действия вихря плотности тока распределена в поперечном сечении неоднородно, М-образно (рис. 3, кривая 1). Соответственно перераспределяется и профиль скорости, в центральных подканалах имеем $\bar{u} < 0$ (рис. 2б).

Изменение характера распределения скорости, тока и поля в поперечном сечении оказывает влияние и на интегральные характеристики

насоса. На рис. 5 приведен график изменения величин $P_{эл}$, $P_{гидр}$, $P_{тр}$ в зависимости от среднего скольжения. Следует обратить внимание на изменение мощности потерь трения $P_{тр}$: при увеличении скольжения от нуля до $\approx 0,5$ она монотонно уменьшается, подобно тому, как это было бы в случае движения твердого тела. Но с учетом неоднородности распределения профиля скорости по ширине канала $P_{тр}$ равна

$$P_{тр} = \int_0^{2a} \left[\left(1 + \text{Re} \left| \frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} \right| \right) \left(\frac{d\bar{u}}{d\bar{y}} \right)^2 + q |\bar{u}| \bar{u}^2 \right] d\bar{y}.$$

При дальнейшем увеличении скольжения ($s \geq 0,5 \dots 0,6$) $P_{тр}$ перестает убывать и даже несколько возрастает, что объясняется интенсивным перемешиванием металла в режимах, близких к запорному каналу (см. также рис. 2б).

На рис. 6 показано сравнение расчета $p(Q)$ -характеристик насоса АМН-6 с экспериментом, описанным в [3]. Ниже приведено обобщенное выражение для электромеханической мощности, приближенно учитывающее поперечный, продольный и глубинный краевые эффекты, влияние перегородок и неоднородное распределение скорости в поперечном сечении канала [1]

$$P_{эл} = 1/2 \sigma v_{ср}^2 B_m \omega \{ -s/(1-s) k_{ос} k_{пш} k_l + C_0 - C_l - C_H \}. \quad (8)$$

Коэффициенты $k_{ос}$, $k_{пш}$, k_l , C_0 , C_l , C_H определяются из решений отдельных краевых задач, которые здесь не рассматриваются. Формула (8) позволяет при заданных скольжениях, амплитуде индукции и температуре рассчитать электромеханическую мощность, поступающую к жидкому металлу.

Одновременно решение сформулированной выше задачи позволяет рассчитать потери трения, отвечающие неоднородному профилю скорости в поперечном сечении канала. Это, в свою очередь, позволяет найти расчетный перепад давления на насосе по формуле

$$\Delta p = (P_{эл} - P_{тр}) / Q. \quad (9)$$

Для сравнения штриховой линией для $B_m = 0,32$ Т построена $p(Q)$ -характеристика, также рассчитанная по формулам (8) и (9), но при потерях трения, равных ξQ^3 , где ξ — обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления, определенный по данным проливов. В этом случае расчетные и экспериментальные данные совпадают только при небольших скольжениях ($s \leq 0,4$). В то же время учет трения по неоднородному профилю приводит к хорошему совпадению с экспериментом во всем диапазоне скольжений.

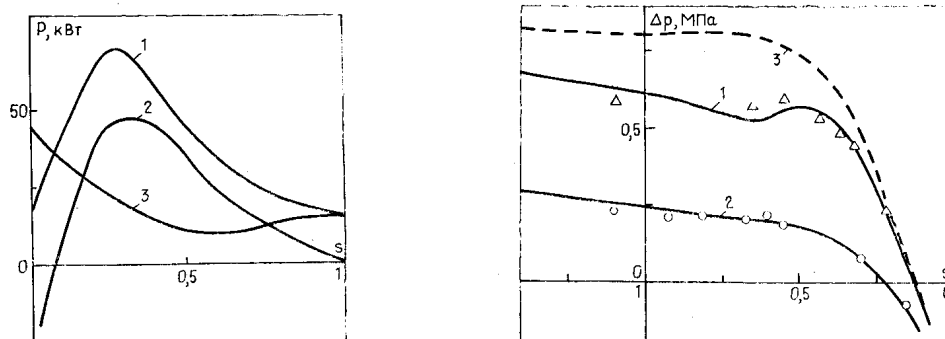


Рис. 5. Энергетические характеристики: 1 — электромеханическая мощность, 2 — гидравлическая мощность, 3 — мощность потерь трения.

Рис. 6. Внешние характеристики АМН-6. B_m : 1 — 0,32 Т, 2 — 0,205 Т; 3 — расчет без учета распределения \bar{u} (пояснения в тексте).

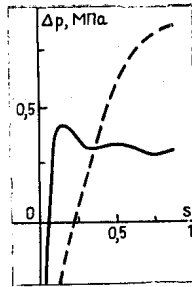


Рис. 7. К влиянию конечной проводимости перегородок.

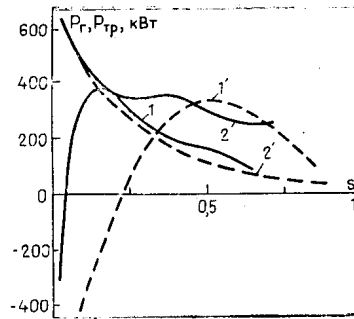


Рис. 8. Гидравлическая мощность (1, 1') и потери на трение (2, 2').

Рассмотрим влияние проводимости перегородок на энергетические характеристики насосов. Анализировались два случая: 1) канал с непроводящими перегородками ($Rm_1=0$), 2) канал с проводящими перегородками. Расчеты проводились для насоса со следующими параметрами: $\tau=0,225$ м, $2a=1$ м, $\Delta=\Delta_1=0,004$ м, $\delta=0,02$ м, $\sigma=5,35 \cdot 10^6$ См/м, $\sigma_1=0,95 \cdot 10^6$ См/м, $\rho=868$ кг/м³, L_A — длина рабочей части канала — равна 3,8 м; $B_m=0,3$ Т.

На рис. 7 показан график зависимости перепада давления Δp от скольжения s . Штриховая кривая построена для насоса с непроводящими перегородками; сплошной линией нанесен график при $\sigma_1=0,95 \cdot 10^6$ См/м.

На рис. 8 для тех же условий построены графики гидравлической мощности (кривые 1, 1') и потерь на трение (2, 2'). В области малых скольжений потери на трение в обоих случаях практически совпадают; затем в случае канала с непроводящими перегородками они продолжают монотонно убывать, а в канале с проводящими перегородками зависимость $P_{тр}$ от скольжения носит волнообразный характер и убывает значительно медленнее. Это связано с тем, что в канале с проводящими перегородками поток теряет устойчивость за счет неоднородного распределения электромагнитной силы. Наличие непроводящих перегородок приводит к разрыву электрической связи между подканалами, препятствует развитию неустойчивости и за счет более равномерного течения уменьшает потери на трение. Вместе с тем наличие непроводящих перегородок увеличивает джоулевы потери в канале. Поэтому предпочтение одного варианта другому требует детального анализа всех процессов, происходящих в канале насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчек Б. Б., Дронник Л. М., Реуцкий С. Ю., Толмач И. М. О поперечном краевом эффекте в плоских индукционных насосах с большой подачей. — *Магнитная гидродинамика*, 1981, № 4, с. 93—100.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
3. Толмач И. М., Аснович Э. З., Голобородько П. Г., Дронник Л. М., Зандарт Я. Я., Клименко А. И., Лиепиньш И. А., Реуцкий С. Ю., Стрижак В. Е. Экспериментальное исследование двухмодульной сборки плоских индукционных насосов. — В кн.: XI Рижское совещание по магнитной гидродинамике. Саласпилс: Ин-т физики АН ЛатвССР, 1984, т. 2, с. 23—26.

Поступила:
первоначально 12 ноября 1986 г.
в окончательной редакции 19 декабря 1986 г.