

УДК 537.84

А.И.Глухенький, Ю.М.Гориславец, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Определение давления жидкого металла в электромагнитном дозаторе на основе решения уравнений Навье-Стокса

С использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности численно рассчитано вихревое течение жидкого металла в стопорном электромагнитном дозаторе. Исследовано влияние неравномерности плотности электромагнитных сил по высоте канала на распределение давления в жидком металле.

З використанням $k-\epsilon$ моделі турбулентності чисельно розраховано вихровий рух рідкого металу в стопорному електромагнітному дозаторі. Досліджено вплив нерівномірності густини електромагнітних сил по висоті каналу на розподіл тиску в рідкому металі.

Введение. В работах [4, 5] описаны конструкции и принцип действия стопорного электромагнитного дозатора, предназначенного для периодической выдачи заданных по массе или объему доз жидкого металла.

Как известно, электромагнитная система такого дозатора представляет собой расположенный в зазоре электромагнита канал с жидким металлом, к которому подведен продольный электрический ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем электромагнита обуславливает появление в канале электромагнитных сил, которые обеспечивают удержание (стопорение) жидкого металла над сливными отверстиями, расположенными на нижней стенке (дне) канала. При снятии этих сил осуществляется выдача металла за счет свободного его истечения. Таким образом, длительность электромагнитного стопорения в этом устройстве задает паузу в цикле дозирования, а длительность отключенного состояния определяет величину выдаваемых доз жидкого металла. В стопорном дозаторе возможна также выдача металла при совместном действии гидростатического и электромагнитного давлений, что позволяет управлять скоростью наполнения дозы.

В зависимости от способа возбуждения электромагнитных сил в жидком металле стопорные дозаторы бывают постоянного и переменного тока. В дозаторе постоянного тока электромагнитные силы создаются за счет взаимодействия постоянного магнитного поля электромагнита и постоянного тока в канале, который подводится к нему кондукционно (с помощью электродов) [4]. Если ампервитки электромагнита существенно превышают величину тока в канале, распределение этих сил в поперечном сечении канала практически равно-

мерное.

В дозаторе переменного тока [5] магнитное поле электромагнита и ток в канале изменяются с одинаковой (обычно промышленной) частотой, что приводит к возникновению в жидком металле постоянной и переменной (двойной частоты) составляющих электромагнитных сил. Первая составляющая создает гидравлический напор, а вторая вызывает только колебания металла и практически не сказывается на работе дозатора. На переменном токе за счет экранирования поля электромагнита жидким металлом и возбуждения в нем вихревых токов распределение плотности электромагнитных сил по высоте канала становится существенно неравномерным.

Определяющей характеристикой стопорного дозатора является давление на нижней стенке канала $p_{ок}$ в зоне расположения отверстий. При выдаче доз это давление задает скорость истечения металла $u_0 = \xi (2p_{ок} / \rho)^{0.5}$ (ξ — коэффициент скорости отверстия, ρ — плотность жидкого металла), а в период паузы для обеспечения удержания металла оно должно равняться нулю ($p_{ок} = 0$).

На рис. 1 схематично показан фрагмент канальной части дозатора (приемная емкость и канал электромагнита), где условно показаны удельные электромагнитные силы f , которые возбуждаются в жидком металле при взаимодействии продольного тока в канале I_k и поперечного магнитного поля электромагнита B_k . Локальный характер распределения по длине (направленных поперек канала) электромагнитных сил предопределяет возникновение вихревого движения металла, которое приводит к перераспределению давления в нем по отношению к гидростатическому. Исследование этих

процессов с учетом реального распределения электромагнитных сил возможно на основе решения уравнений магнитной гидродинамики, включающих в себя уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла) и уравнения гидродинамики (уравнения Навье-Стокса).

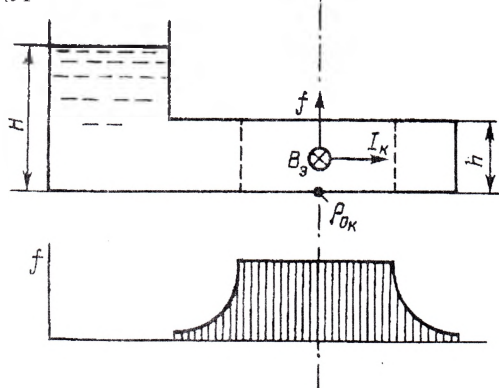


Рис. 1

Анализ определяющих критериев подобия для стопорного дозатора показывает, что для таких устройств можно использовать электродинамическое приближение [2], при котором пренебрегают индуцированными за счет движения жидкого металла токами. Систему уравнений магнитной гидродинамики в этом случае можно разделить на уравнения электромагнитного поля (для неподвижной среды) и уравнения обычной гидродинамики с заданным (полученным в результате решения электромагнитной задачи) распределением плотности электромагнитных сил \vec{f} .

В работе [5] применительно к стопорному дозатору переменного тока с индукционным вводом тока в канал была решена задача расчета электромагнитного поля, что позволило определить распределение электромагнитных сил в поперечном сечении канала. Используя полученные результаты, можно перейти к рассмотрению гидродинамической задачи.

Общие положения расчета течения жидкого металла. Система уравнений Навье-Стокса, описывающая течение несжимаемой вязкой жидкости, состоит из уравнения движения и уравнения неразрывности. Для общего случая нестационарного движения при наличии сил электромагнитного происхождения \vec{f} эти уравнения имеют

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} (\vec{u} \cdot \nabla) = -\nabla p + \eta \Delta \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{f}; \quad (1)$$

$$\nabla \vec{u} = 0, \quad (2)$$

где \vec{u} — скорость жидкости; p — давление; η — коэффициент динамической вязкости; g — ускорение свободного падения. Связь коэффициента η с коэффициентом кинематической вязкости ν дается соотношением

$$\eta = \rho \nu. \quad (3)$$

Для получения решения этих уравнений должны быть заданы начальные и граничные условия. Начальными условиями обычно задается распределение скоростей в области движения в некоторый (начальный) момент времени. Граничными условиями задаются значения скорости или давления на границе области. Граничные условия зависят от характера границ. На твердой границе используется условие прилипания частиц жидкости к твердому телу. Поэтому граничное условие на неподвижной твердой границе заключается в равенстве нулю скоростей потока. В качестве граничного условия на свободной поверхности принимается условие: давление во всех точках свободной поверхности одинаково и равно давлению во внешней среде.

Уравнения Навье-Стокса в представленном виде с указанными граничными условиями обычно используются для расчета ламинарных течений. Однако, в реальных системах течение жидкости, как правило, является турбулентным. Такие течения также могут быть рассчитаны с помощью уравнений (1)–(2). В этом случае скорость \vec{u} означает осредненную во времени (на интервалах, существенно превышающих длительности турбулентных пульсаций) скорость, а вместо коэффициента молекулярной вязкости η вводят коэффициент эффективной вязкости

$$\eta_{эфф} = \eta + \eta_t, \quad (4)$$

где η_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости. Сила вязкости, входящая в правую часть уравнения (1), ввиду того, что в общем случае $\eta_{эфф} = \text{var}$, будет иметь вид: $\nabla (\eta_{эфф} \nabla \vec{u})$.

Коэффициент турбулентной вязкости определяется принятой моделью турбулентности. В последнее время широкое распространение получила $k-\varepsilon$ модель [7]. В соответствии с этой моделью коэффициент турбулентной вязкости вычисляется как

$$\eta_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon, \quad (5)$$

где C_μ — эмпирическая константа; k — плотность кинетической турбулентной энергии; ε — скорость ее диссипации.

Суть $k-\varepsilon$ модели состоит в добавлении к исходной системе (1)–(2) с вышеуказанными изменениями дифференциальных уравнений для k и ε

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \rho \vec{u} \cdot \nabla k = \frac{\eta_t}{2} \nabla \vec{u} - \rho \varepsilon; \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \rho C_{\varepsilon 1} \frac{k}{2} \nabla \vec{u} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

где σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ — эмпирические константы.

Таким образом, определение турбулентного течения (поля осредненных во времени скоростей

и давления) на основании $k-\varepsilon$ модели турбулентности производится путем численного решения уравнений (1), (2), (6) и (7) с учетом соотношения (5). Граничные условия на твердой границе потока (на стенке) при турбулентном течении обычно задаются в виде логарифмического профиля скорости для пограничного слоя. Значения эмпирических безразмерных констант в выражениях (5)–(7) в расчетах принимают следующими: $C_{\mu}=0,09$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$, $C_{\varepsilon 1}=0,1256$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$.

Модель расчета стационарного течения жидкого металла в дозаторе. Рассчитывалось плоское (двухмерное) турбулентное течение жидкого металла в канальной части электромагнитного дозатора переменного тока, конструктивное описание которого приведено в работе [5]. На рис. 2 показана расчетная область, состоящая из трех подобластей $\Omega 1$, $\Omega 2$, $\Omega 3$. Подобласть $\Omega 1$ представляет собой поперечное сечение приемной емкости дозатора. Подобласть $\Omega 2$ соответствует участку канала между приемной емкостью и каналом, расположенным в зазоре электромагнита. Подобласть $\Omega 3$ — это половина участка канала, находящегося в зазоре электромагнита. Вторая его половина вследствие симметрии не рассматривалась. Размеры подобластей соответствуют дозатору для алюминия, электро-

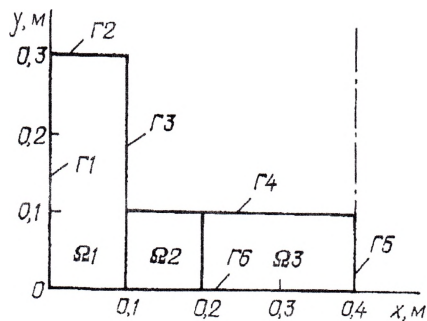


Рис. 2

магнитные расчеты которого выполнены в [5].

В расчетной области задавались удельные силы, входящие в правую часть уравнения (1). В каждой подобласти учитывались силы тяжести ρg , которые в принятой системе координат являются отрицательными. Кроме того, в подобластях $\Omega 2$ и $\Omega 3$ задавались электромагнитные силы $\vec{f}=\{0; f; 0\}$, т.е. учитывалась только y -компонента этих сил. Другие компоненты ввиду их незначительности не рассматривались.

В подобласти $\Omega 3$ электромагнитные силы принимались постоянными по длине канала, а распределение их по высоте (по координате y бралось из расчета электромагнитного поля стопорного дозатора [5]. Для возможности сравнения и анализа влияния неравномерности распределения этих сил по высоте канала использовались также некоторые другие распределения плотности электромагнитных воздействий, которые будут рассмотрены ниже.

В подобласти $\Omega 2$, для которой характерно не-

равномерное распределение плотности электромагнитных сил по длине, обусловленное спадом магнитного поля за пределами сердечника электромагнита, силы f по высоте имеют такое, как и в подобласти $\Omega 3$ распределение. Распределение их по длине подобласти $\Omega 2$ в расчетах задавалось в соответствии с законом изменения магнитного поля выпучивания электромагнита, которое согласно [3] по мере удаления от торца электромагнита ослабляется по экспоненциальному закону

$$f(x, y) \Big|_{\Omega 2} = e^{-\frac{0.2-x}{b}} f(y) \Big|_{\Omega 3}, \quad (8)$$

где b — ширина зазора электромагнита.

Граничные условия для расчетной области приняты следующими: на границах $\Gamma 1$, $\Gamma 3$, $\Gamma 4$ и $\Gamma 6$ — логарифмический закон погранслоя, на границе $\Gamma 2$ (свободная поверхность) — давление $p=0$, на границе $\Gamma 5$ — условие симметрии. При таких граничных условиях истечение металла через сливные отверстия не рассматривалось, а критерием удержания металла является выполнение условия $p_{0к}=0$ на дне канала в подобласти $\Omega 3$.

Расчет стационарного течения ($\partial \vec{u} / \partial t = 0$) жидкого металла на основе $k-\varepsilon$ модели турбулентности производили путем численного решения уравнений (1), (2), (6) и (7), которое программно реализовано в пакете *FEMLAB* [8]. Расчеты выполняли для жидкого алюминия с плотностью $\rho=2400$ кг/м³ и кинематической вязкостью $\nu=10^{-6}$ м²/с при постоянной высоте его в приемной емкости $H=0,3$ м и высоте канала электромагнита $h=0,1$ м.

Результаты расчета. Рассчитывались течения жидкого металла для двух режимов работы электромагнитного дозатора переменного тока: режима удержания (стопорения) жидкого металла и режима выдачи металла при совместном действии гидростатического и электромагнитного давлений.

Рассмотрим сначала результаты расчета режима удержания металла, соответствующего паузе в цикле дозирования. Расчет течения жидкого металла выполнялся для полученного в работе [5] распределения электромагнитных сил применительно к дозатору с индукционным вводом тока в жидкий металл, имеющему равные числа витков электромагнита и индуктора ($w_e=w_i=100$) при питании их от одного напряжения ($U_e=U_i$). В зависимости от уровня питающего напряжения по отношению к линейному напряжению сети $U_e=U_i=k_u \cdot 380$ В указанное распределение плотности электромагнитных сил аппроксимировали кубическим полиномом

$$f_1 = k_u^2 (-2,7926y^3 + 0,4882y^2 - 0,0286y + 0,0007) \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3, \quad (9)$$

где $0 \leq y \leq h$.

Достижение нулевого значения давления на дне канала электромагнита ($p_{ок}=0$) осуществлялось за счет подбора коэффициента k_u путем изменения величины питающего напряжения. Значение этого коэффициента для данной конструкции стопорного дозатора при удержании столба жидкого металла (алюминия) высотой 0,3 м составило $k_u=0,7$, что соответствует напряжению $U_e=U_i=226$ В. Распределение сил f_1 по высоте канала при указанном напряжении питания электромагнита и индуктора показано на рис. 3 (кривая 1).

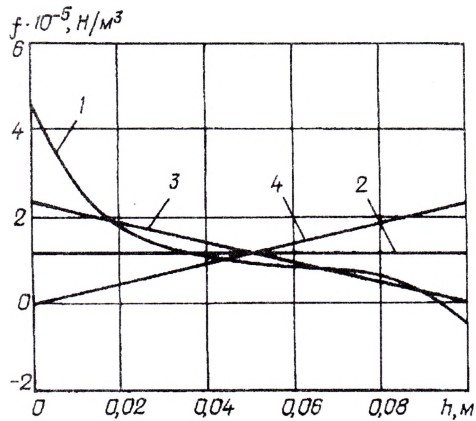


Рис. 3

На рис. 4 показана картина течения (поле скоростей) жидкого металла в канальной части электромагнитного дозатора, полученная расчетным путем для этого режима. Как видно, в подобластях Ω_1, Ω_3 металл практически неподвижен, в то время как в подобласти Ω_2 (в области спада электромагнитных сил) возникает достаточно мощное вихревое течение. Расчеты показывают, что максимальная скорость жидкого металла в вихре может достигать до 2–3 м/с. Аналогичная картина течения жидкого металла наблюдается в магнитодинамическом насосе [6].

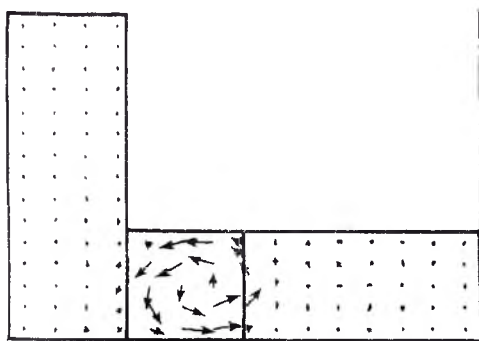


Рис. 4

Распределение давления в металле по длине канальной части дозатора (при $y=0$) и по высоте канала (в средней части подобласти Ω_3) представлено соответственно на рис. 5, а и рис. 5, б (кривые 1). Как видно из рис. 5, а, в результате действия электромагнитных сил давление на дне канала

принимает нулевое значение практически во всей подобласти Ω_3 , что указывает на возможность размещения в ней нескольких сливных отверстий по длине. Отношение электромагнитного давления в канале дозатора, определяемого как $p_{эм} = \int_0^h f_1 dy$ (при $k_u=0,7$), к величине компенсируемого гидростатического давления для данного случая (для $p_{ок}=0$) составило $n = p_{эм} / (\rho g H - p_{ок}) = 1,38$.

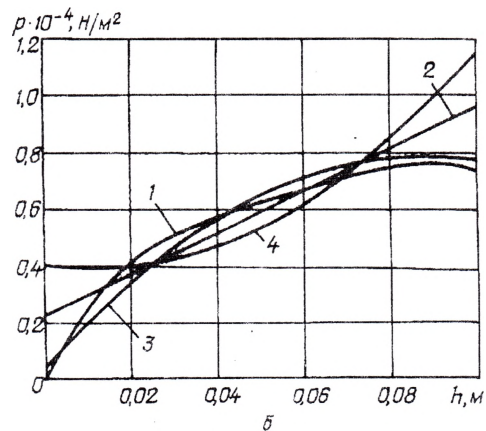
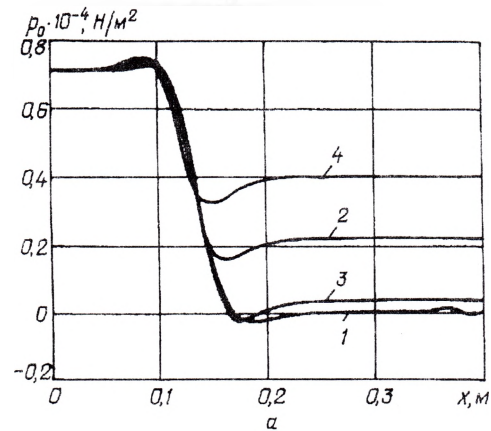


Рис. 5

Для выяснения влияния неравномерности электромагнитных сил в канале на общий уровень и распределение давления в жидком металле были выполнены расчеты течений для некоторых других распределений плотности электромагнитных сил по высоте канала (рис. 3) — для равномерного (кривая 2) и двух неравномерных (условных) распределений: линейного спада до нуля по оси y (кривая 3) и линейного нарастания от нуля (кривая 4). Уровень электромагнитных сил во всех трех случаях был таким, чтобы электромагнитное давление, созданное этими силами, было одинаковым и равнялось давлению, которое обеспечивает нулевое значение давления на нижней стенке канала в случае реального (расчетного) их распределения (кривая 1). Распределение сил по высоте для этих трех случаев аппроксимировалось выражениями

$$\begin{aligned} f_2 &= p_{эм} / h; & f_3 &= 2 (p_{эм} / h) (h - y) / h; \\ f_4 &= 2 (p_{эм} / h) (y / h). \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты расчета давления при указанных распределениях также представлены на рис. 5 (нумерация кривых соответствует нумерации сил в формулах (10) и на рис. 3). Сопоставляя кривые этих рисунков между собой, можно констатировать, что уровень давления в канале электромагнита (в подобласти Ω_3) существенно зависит от распределения электромагнитных сил по высоте канала. Отношение электромагнитного давления $p_{эм}$ к компенсированному гидростатическому давлению $\rho gH - p_{ок}$ составило: для равномерного распределения плотности сил (кривая 2 на рис. 5, а) $n = 2,04$, для линейного спада (кривая 3) — 1,47 и для линейного нарастания сил (кривая 4) — 3,22. Следует отметить, что ни одно из дополнительных рассмотренных распределений сил (кривые 2–4 рис. 3) не смогло полностью компенсировать гидростатическое давление на дне в подобласти Ω_3 (рис. 5, а).

В теории жидкометаллических насосов [1, 6] обычно оперируют обратной к n величиной, которая получила название коэффициента ослабления давления $k_{ос} = (\rho gH - p_{ок}) / p_{эм}$. Для рассмотренных распределений электромагнитных сил значения указанного коэффициента оказались следующими: для расчетного распределения сил — $k_{ос} = 0,72$, для равномерного распределения — $k_{ос} = 0,49$, для линейного с нулем плотности сил на верхней стенке — $k_{ос} = 0,68$ и для линейного с нулем сил на нижней стенке — $k_{ос} = 0,31$.

Несмотря на полученные различные как по форме, так и по величине распределения давления в канале, как следует из рис. 5, б общий перепад давлений по высоте канала (напор канала) $\Delta p = p_{y=h} - p_{ок}$ для всех четырех случаев оказался практически одинаковым, т.е. он почти не зависит от распределения сил по высоте. Вводя в рассмотрение для этого участка (с учетом его высоты) коэффициент ослабления $k'_{ос} = (\Delta p + \rho gh) / p_{эм}$, можно увидеть, что во всех четырех случаях он близок к единице. Это означает, что напор канала в первом приближении можно рассчитывать через электромагнитное давление. Однако, что касается абсолютных значений давления в канале, в том числе и давления на его нижней стенке, то определить его на основании такого подхода нельзя. За счет мощного вихревого течения жидкого металла, возникающего в подобласти Ω_2 , происходит перераспределение давления между подобластями Ω_1 и Ω_3 , хотя в каждой из них в отдельности перераспределение давления за счет движения металла несущественно (вследствие малых скоростей).

Таким образом, в рассмотренном стопорном электромагнитном дозаторе в режиме удержания более эффективным оказалось существенно неравномерное распределение электромагнитных сил в жидком металле, обусловленное вихревыми то-

ками, которые приводят к концентрации плотности электромагнитных сил у дна канала. Коэффициент ослабления давления при этом составил $k_{ос} = 0,72$. При равномерном распределении сил в жидком металле, которое возможно при питании электромагнита и канала постоянным током, значение этого коэффициента близко к 0,5.

Далее рассмотрим режим работы стопорного дозатора, когда выдача жидкого металла осуществляется за счет совместного действия электромагнитного и гидростатического давлений. Такой режим реализуется путем периодического реверсирования направления электромагнитных сил в цикле дозирования: при удержании металла (в период паузы) эти силы направлены вверх, а при выдаче — вниз. Для реализации этого режима предложена система питания дозатора, в которой при удержании металла индуктор дозатора подключается на линейное напряжение сети, от которого питается электромагнит, а при выдаче металла индуктор переключается на одно из фазных напряжений, сдвинутое относительно указанного линейного напряжения на угол, превышающий 90 эл. град.

Расчеты выполнялись с использованием рассчитанного в соответствии с работой [5] распределения электромагнитных сил в канале электромагнита, полученного для $w_e = w_i = 100$ и $\angle U_e, U_i = 150$ эл. град. При том же, что и ранее значении коэффициента $k_u = 0,7$, напряжение питания электромагнита составило $U_e = 0,7 \cdot 380 = 266$ В, а индуктора — $U_i = 0,7 \cdot 220 = 154$ В. Аппроксимация распределения плотности электромагнитных сил по высоте для этого случая имеет вид

$$f_1' = 0,7^2 \left(-1,7367y^3 + 0,2127y^2 - 0,0111y + 0,0001 \right) \cdot 10^9 \text{ Н/м}^3. \quad (11)$$

Аналогично режиму стопорения для возможности сравнения гидродинамическая задача и в этом случае дополнительно решалась для трех условных распределений сил по высоте канала — равномерном, линейно спадающем и линейно нарастающем (рис. 6)

$$f_2' = p'_{эм} / h; \quad f_3' = 2 \left(p'_{эм} / h \right) (h - y) / h; \quad f_4' = 2 \left(p'_{эм} / h \right) (y / h), \quad (12)$$

где $p'_{эм} = \int_0^h f_1' dy$.

Рассчитанная для этого случая картина течения отличается от режима удержания направлением движения вихря, которое поменялось на противоположное.

Распределение давления в стопорном дозаторе в режиме выдачи дозы при совместном действии гидростатического и электромагнитного давлений

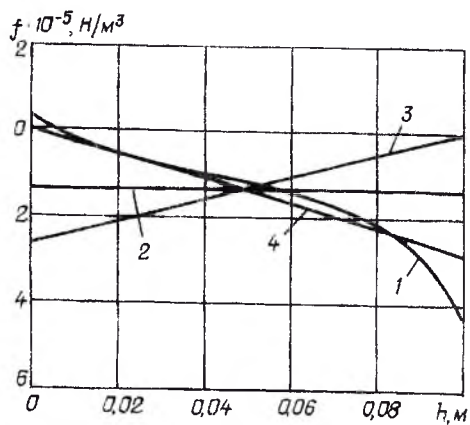


Рис. 6

для различного характера распределения сил по высоте показано на рис. 7. Как видно из рис. 7, а, и в этом случае эффективность электромагнитного воздействия на жидкий металл существенно зависит от характера распределения электромагнитных сил по высоте. Однако, расчетное распределение сил для дозатора переменного тока здесь (кривая 1) обеспечивает наименьшую добавку к гидростатическому давлению, коэффициент ослабления давления в этом случае составляет всего $k_{oc} = 0,21$. Равномерное распределение плотности сил обеспечивает (как и ранее) $k_{oc} \approx 0,5$. Наиболее эффективным из рассмотренных является распределение, при котором силы сконцентрированы у дна канала (кри-

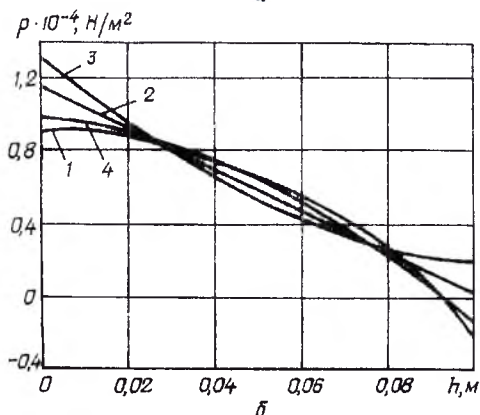
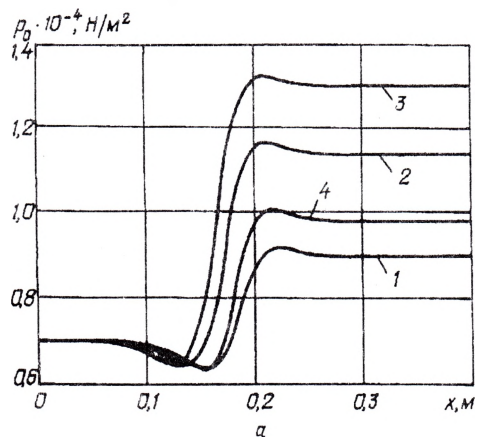


Рис. 7

вая 3) — $k_{oc} = 0,67$, линейно нарастающее по высоте распределение сил дает $k_{oc} = 0,31$. Из рис. 7, б видно, что и при выдаче дозы, несмотря на различный характер изменения давления по высоте канала и различные его уровни (средние значения) в подобласти Ω_3 , перепад давления между верхней и нижней стенками канала для всех четырех случаев в этой области примерно одинаковый, при этом коэффициент ослабления давления по высоте канала k'_{oc} , как и ранее, близок к единице.

Заключенне. На основании численного решения уравнений гидродинамики с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности рассчитаны течения жидкого металла в канальной части стопорного электромагнитного дозатора. Определено давление в металле, обусловленное совместным действием электромагнитных сил и сил тяжести в режиме удержания металла и при выдаче дозы.

Расчетным путем показано, что давление жидкого металла в дозаторе существенным образом зависит от распределения электромагнитных сил по высоте канала. Установлено, что при равномерном распределении электромагнитных сил коэффициент ослабления давления близок к 0,5 (как при удержании металла, так и при его выдаче). Обусловленное вихревыми токами неравномерное распределение электромагнитных сил по высоте канала повышает эффективность электромагнитного воздействия на жидкий металл в режиме удержания ($k_{oc} = 0,72$) и понижает ее при выдаче дозы ($k_{oc} = 0,21$).

1. Бирзвалк Ю.А. Основы теории и расчета кондукционных МГД-насосов постоянного тока. — Рига: Зинатне, 1968. — 235 с.

2. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И. и др. Электровихревые течения / Под ред. Шербинина Э.В. — Рига: Зинатне, 1985. — 315 с.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. — Л.: Энергия, 1970. — 271 с.

4. Гориславец Ю.М., Глухенький А.И., Малахов В.В. Электромагнитное дозирование жидких металлов // Техн. электродинамика. — 2000. — № 5. — С. 3—6.

5. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. Расчетные исследования системы "индуктор-массивный виток-электромагнит" для устройств дозирования жидкого металла // Техн. электродинамика. — 2006. — № 1. — С. 11—18.

6. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / В.П.Полнщук, М.Р.Цин, Р.К.Горн, В.И.Дубоделов, В.К.Погорский, В.А.Трефняк. — К.: Наук. думка, 1989. — 256 с.

7. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD // DCW Industries Inc. — 1998.

8. FEMLAB User's Guide and Introduction. — FEMLAB 2.3. — COMSOL, Inc., 1994—2002. — 436 p.

Надійшла 26.07.2006