

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Г.К. Смолин, М.В. Потёмкин, Я.Г. Смолин,  
А.А. Шапуров, Д.А. Князев, Е.Г. Шорохова

## МГД-УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

МГД насосы с пульсирующим магнитным полем удобны в эксплуатации, не требуют для питания дополнительного оборудования, а включаются непосредственно в сеть переменного тока. В этих насосах канал подвержен пульсирующей с двойной частотой силе, поэтому наиболее надежными являются МГД-насосы с безэлектродными каналами, опасность разгерметизации которых минимальна, а ресурс работы максимален. Насосы, в которых ток замыкается только по жидкости, особенно удобны при работе с жидкими металлами, содержащими включения, которые могут откладываться на электродах, снижая проводимость и ухудшая переходный контакт, а также с агрессивными жидкостями, когда желательно избегать оболочек каналов из металлов.

Исследуемое устройство [1] содержит электромагнитную систему, состоящую из полого цилиндрического магнитопровода 1 с внутренней расточкой для размещения однофазной обмотки 2, внутреннего сердечника 3 из магнитомягкого материала; в нижней части между магнитопроводом 1 и сердечником 3 до торца обмотки 2 впрессована втулка 4 из ферромагнитного материала со сквозными всасывающими осевыми отверстиями 5. Части 1,3, и 4 магнитной системы выполняются шихтованными. Поверхности магнитопровода 1 с обмоткой 2, сердечника 3, втулки 4 с отверстиями 5 защищены оболочкой 6 из огнеупорного материала (или кожухом из стали). Пространство, ограниченное магнитопроводом 1 с обмоткой 2, сердечником 3 и втулкой 4, есть кольцевой канал 7 для протекания жидкого металла.

Для обработки (рафинирования) металла на кольцевой канал 7 на его выходе устанавливается насадок 8 с рафинирующим реагентом 9. Для откачки металла из ванны на канал 7 на его выходе устанавливается отводящий патрубок (не показан).

Устройство работает следующим образом.

Устройство погружают в ванну 10 с расплавленным металлом. При этом жидкий метал через сквозные осевые отверстия 5 заполняет кольцевой канал 7. При включении обмотки в сеть переменного тока возбуждается магнитный поток, силовые линии которого, пронизывая радиально канал 7, замыкаются по

магнитопроводу 1, ферромагнитной втулке 4 и сердечнику 3. В витке жидкого металла, находящемся в кольцевом канале 7, индуцируется ток, направленный азимутально вокруг сердечника 3. Взаимодействие азимутального тока и радиального магнитного потока приводит к возникновению электромагнитной силы, направленной аксиально от ферромагнитной втулки 4. Под действием электромагнитного напора, создаваемого электромагнитными силами, жидкий металл из ванны через отверстия 5 всасывается в канал 7 и, одновременно подогреваясь в канале 7 протекающими в нем токами, снова подается в ванну. Так осуществляется перемешивание (с подогревом) металла в ванне.

В режиме рафинирования жидкий металл прокачивается через рафинирующий реагент 9, поступает из насадка 8 в ванну 10. Для подачи металла в другую приемную емкость на выход канала 7 нанизывается отводящий патрубок (не показан). Выполнение втулки 4 из ферромагнитного материала и установка ее вплотную между сердечником и цилиндрическим магнитопроводом до торца обмотки позволяют уменьшить объем устройства (за счет уменьшения объема обмотки, относительного увеличения канала, уменьшения реактивной мощности). Это позволяет экономить расход средств на изготовление и эксплуатацию устройства.

Необходимо, чтобы электромагнитная сила в канале ниже середины обычной цилиндрической обмотки была направлена вверх (была бы полезной). Это достигается выполнением втулки из ферромагнитного материала и установкой ее между сердечником и магнитопроводом вплотную (без зазоров) до торца обмотки. При этом получается как бы сдвиг всей топографии магнитного поля вниз; в канале остается радиальная компонента индукции только одного направления, а радиальная компонента индукции обратного направления как бы "втянулась" в магнитный шунт, получившийся ниже нижнего торца обмотки.

При относительном движении среды и магнитного поля в среде наводится электрическое поле и э.д.с. движения.

Если среда электропроводна (жидкий металл, плазма, электролит) и существует электрическая цепь, то в результате такого движения поля и среды в среде протекают электрические токи.

Эти токи наводят собственное поле.

Это поле накладывается на первичное поле, деформирует его и воздействует на характеристики МГД-устройства.

Токи в среде индуцируются не только за счет относительного движения, но и за счет изменения магнитного поля во времени; эти токи также создают собственное магнитное поле.

Результирующее магнитное поле есть сумма всех полей. При взаимодействии токов с результирующим полем в среде создаются объемные электромагнитные силы, возмущающие первоначальное движение этой среды.

В результате получается ложное взаимодействие среды и магнитного поля.

Исходная система уравнений для описания течения жидкометаллического расплава в магнитном поле имеет вид

$$r_0 \bar{B} = \mu_0 \bar{J};$$

$$r_0 \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt};$$

$$\bar{J} = \sigma [\bar{E} + \bar{V} \cdot \bar{B}];$$

$$\text{div} \bar{B} = 0;$$

$$\text{div} j = 0;$$

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H};$$

$$\text{grad} p = [\bar{J} \cdot \bar{B}];$$

$$W = - \int_S \bar{I} d\bar{S} = - \int [E \cdot H] d\bar{S}_0$$

Здесь и далее обозначения общепринятые.

Вместе с заданными в необходимом количестве граничными условиями система уравнений достаточна для определения векторных и скалярных полей и расчета энергетических характеристик МГД-каналов.

Для расчета температурных полей необходимо записать уравнение теплопередачи с соответствующими граничными условиями.

При анализе рассматриваются стационарные процессы при следующих допущениях.

1. Внешнее наложенное магнитное поле изменяется во времени по гармоническому закону, так как обмотка включена в сеть на синусоидальное напряжение.

2. Токи и другие электромагнитные величины изменяются во времени также по гармоническому закону, так как рассматриваемая система линейна.

3. Магнитная проницаемость стали много больше магнитной проницаемости жидкого металла.

4. Магнитное поле в канале однокомпонентно, что достигается рассмотрением узких каналов и допущением 3.

5. Проводимость рабочего тела по объему канала не изменяется, что определяется изотропностью среды и постоянством температуры по объему канала за счет большой теплоемкости среды.

6. Скорость рабочего тела по длине канала не изменяется, что обеспечивается несжимаемостью среды и соответствующим выбором параметра квазистационарности.

7. Профиль скорости однородный.

8. Краевой эффект на входе в канал скомпенсирован перегородками. На выходе из канала краевой эффект отсутствует.

9. Величина магнитного потока не зависит от нагрузки при постоянстве напряжения на обмотке, поскольку внутреннее сопротивление обмотки значительно меньше сопротивления контуров тока в жидком металле.

Поскольку физические величины характеризующие поля, изменяются во времени по гармоническому закону, уравнения записываются для комплексных амплитуд векторов поля.

Пусть, например, вектор индукции  $\vec{B}$  изменяется во времени по закону

$$\vec{B} = \vec{B}_m \cos(\omega t + \psi), \text{ где } t - \text{ время; } \omega - \text{ угловая частота.}$$

Причем амплитуда  $B_m$  – функция координат, но не функция времени;

Начальная фаза  $\psi$  – также может быть функцией координат.

Учитывая, что

$$\cos(\omega t + \psi) = \operatorname{Re}[e^{i(\omega t + \psi)}] = \operatorname{Re}[e^{i\psi} \cdot e^{i\omega t}], \text{ то}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_m \cos(\omega t + \psi) = \operatorname{Re}[\vec{B}_m \cdot e^{i\psi} \cdot e^{i\omega t}] = \operatorname{Re}[\vec{B}_m e^{i\omega t}] \text{ и индукцию магнитного поля}$$

можно представить в виде

$$\vec{B} = \operatorname{Re}[\vec{B}_m e^{i\omega t}].$$

Величина  $\vec{B}_m e^{i\omega t}$  называется комплексной амплитудой вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .

$\vec{B}$  имеет составляющие по осям координат, то есть является вектором, в то же время составляющие  $\vec{B}$  по координатным осям являются комплексными числами.

Система уравнений в комплексном виде имеет вид:

$$r_0 \dot{\vec{B}} = \mu_0 \vec{j};$$

$$r_0 \vec{E} = -i\omega \vec{B};$$

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + [\vec{v} \cdot \vec{B}]]$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0;$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H};$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0;$$

$$\operatorname{grad} p = [0,5 \dot{\vec{j}} \cdot \vec{B}];$$

$$W = P + iQ = - \int_S \vec{\Pi} d\vec{S} = - \int_S [0,5 \dot{\vec{E}} \cdot \vec{H} \cdot d\vec{S}_0]$$

Если после решения задачи желательно перейти к реальной физической величине, то найденную величину  $\bar{B}$  следует умножить на  $e^{i\omega t}$  и взять реальную часть полученного произведения.

Этот обратный переход, как правило, не нужен, так как при вычислении мощностей, электромагнитных сил и других величин будем оперировать комплексными амплитудами подобно тому, как в теории переменных токов пользуются комплексными действующими значениями.

Задача решается в осесимметричной цилиндрической системе координат, в которой рассматриваемы насос располагается по схеме рис.1. Для обобщения результатов анализа используется способ относительных единиц записи параметров исследуемых процессов. При этом все параметры выражаются в долях от базисных величин, выбранных в соответствии с  $\pi$ - теоремой теории подобия. В качестве характерного линейного размера и базисной величины для координаты Z (вертикальная ось) выбрана длина канала L, для координаты r - средний радиус канала  $r_k$ . В качестве базисной величины для индукции - средняя постоянная по длине канала амплитуда индукции, которая имеет место в зазоре при отсутствии в нем канала с жидким металлом. Фазы всех гармонически меняющихся во времени параметров берутся относительно вектора - базиса индукции, совмещенного на временной векторной диаграмме с действительной осью,

$$\bar{B}_c = \bar{B}_m \cos \omega t = \operatorname{Re}[\bar{B}_m e^{i\omega t}],$$

где  $\operatorname{Re}$  - реальная часть комплексного числа.

Базисы для площадей, объемов, напряженностей магнитного и электрического поля, плотности тока мощности, вектора Пойнтинга, плотности объемной силы и давления запишутся, соответственно:

$$S_\delta = 2\pi r_\delta \delta; V_\delta = 2\pi r_\delta \delta L = S_\delta \cdot L;$$

$$H_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta; E_\delta = \omega B_\delta L;$$

$$j_\delta = \sigma \omega L B_\delta; P_\delta = \frac{\omega B_\delta^2}{2\mu_0} V_\delta$$

$$\Pi_\delta = \frac{\omega B_\delta^2}{2\mu_0} L; f_\delta = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0 L}; F_\delta = f_\delta \cdot V_\delta$$

$$P_\delta = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0}.$$

Исходная система безразмерных уравнений для комплексных амплитуд имеет вид:

$$r \vec{\partial} i \vec{B} = 2\lambda^1 \vec{j}; \quad (1)$$

$$r\tilde{\omega}i\dot{\tilde{E}} = -i\dot{\tilde{B}}; \quad (2)$$

$$\dot{j} = \dot{\tilde{E}} + \frac{1}{2\lambda^2} \bar{R}_m \cdot \dot{\tilde{B}}; \quad (3)$$

$$d\tilde{i} \nu \dot{\tilde{B}} = 0;$$

$$\dot{\tilde{B}} = \dot{\tilde{H}};$$

$$d\tilde{i} \nu \dot{j} = 0;$$

$$gr\tilde{\alpha}d\tilde{p} = 2\lambda^2 \operatorname{Re}[\dot{j} \cdot \dot{\tilde{B}}];$$

$$W = \tilde{p} + i\tilde{Q} = - \int_s \tilde{\Pi} d\tilde{S} = - \int_s \dot{\tilde{E}} \cdot \frac{\tilde{S}}{\tilde{B}} d\tilde{S}$$

где  $R_m = \mu_0 \sigma L \bar{u}$  - магнитное число Рейнольдса; (4)

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}} \quad \text{- отношение длины канала к толщине} \quad (5)$$

скинслоя;

знак "~" означает, что параметр безразмерный, знак "~" над rot, div, grad означает, что дифференцирование проводится по безразмерным координатам. В дальнейшем анализ проводится в относительных единицах, а знак "~" для упрощения опускается.

С учетом принятых допущений система этих уравнений в проекциях на оси цилиндрической системы координат принимает вид:

$$\frac{d\dot{B}}{dZ} = 2\lambda^2 j; \quad (6)$$

$$\frac{d\dot{E}}{dZ} = i\dot{B}; \quad (7)$$

$$j = \dot{E} + \frac{R_m}{2\lambda^2} \dot{B}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\dot{E}) = 0; \quad (9)$$

Исключением из этих уравнений  $j$  и  $E$  получается уравнение индукции

$$\frac{d^2 B}{dZ^2} - R_m \frac{dB}{dZ} - 2\lambda^2 i\dot{B} = 0. \quad (10)$$

Его решение

$$\dot{B} = \dot{C}_1 e^{q_1 Z} + \dot{C}_2 e^{q_2 Z}, \quad (11)$$

где  $q_1, q_2$  корни характеристического уравнения  $q^2 - R_m q - 2\pi^2 i = 0$ :

$$q_{1,2} = \frac{R_m}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{R_m}{2}\right)^2 + 2\lambda^2 i}, \quad (12)$$

$\dot{C}_1$  и  $\dot{C}_2$  постоянные интегрирования - комплексы, определяемые из граничных условий. Индуцированная напряженность электрического поля на входе в канал связана с полным магнитным потоком, создаваемым обмоткой МГД-насоса, и в соответствии с законом электромагнитной индукции первое граничное условие запишется:

$$\text{при } Z=0 \text{ и } r=1 \quad \dot{E} = \dot{E}_0 = -i. \quad (13)$$

На выходе из канала индуцированное электрическое поле равно нулю, поскольку замкнутый контур на выходе не пронизывается магнитным потоком:

$$\text{при } Z=1 \quad E = E_1 = 0. \quad (14)$$

При подстановке в уравнение (8)  $j$  из (6), решения (11) и поочередно граничных условий (13) и (14) получается система уравнений относительно постоянных интегрирования  $\dot{C}_1$  и  $\dot{C}_2$

$$\begin{aligned} -i &= \frac{1}{2\lambda^2} (\dot{C}_1 q_1 + \dot{C}_2 q_2) - \frac{R_m}{2\lambda^2} (\dot{C}_1 + \dot{C}_2), \\ 0 &= \frac{1}{2\lambda^2} (C_1 q_1 e^{q_1} + C_2 q_2 e^{q_2}) - \frac{R_m}{2\lambda^2} (C_1 e^{q_1} + C_2 e^{q_2}), \end{aligned} \quad (15)$$

ее решение имеет вид

$$\dot{C}_1 = \frac{q_1 e^{q_2}}{e^{q_1} - e^{q_2}}; \quad C_2 = \frac{-q_2 e^{q_1}}{e^{q_1} - e^{q_2}}. \quad (16)$$

Таким образом, комплексные амплитуды индукции и плотности тока в произвольной точке канала определяются с учетом уравнения (9)-выражениями

$$\dot{B} = \frac{q_1 e^{q_1 z + q_2} - q_2 e^{q_1 z + q_1}}{r(e^{q_1} - e^{q_2})}. \quad (17)$$

$$j = \frac{q_1^2 e^{q_1 z + q_2} - q_2^2 e^{q_1 z + q_1}}{2\lambda^2 r(e^{q_1} - e^{q_2})}. \quad (18)$$

По найденному пространственному распределению  $\dot{B}$  и  $j$  определяются характеристики МГД-канала электромагнитного насоса.

При установившемся движении невязкой несжимаемой жидкости безразмерное уравнение Навье-Стокса в комплексной форме имеет вид

$$\text{grad}p = 2\lambda^2 \text{Re}\{j \cdot \dot{B}\} \quad (19)$$

где  $p$  - усредненное по времени безразмерное давление; знаком "\*" обозначена комплексно сопряженная величина.

При подстановке (19) уравнение (1) с учетом векторного равенства

$$\operatorname{rot} \dot{B} \cdot \dot{B} = \dot{B} \cdot \operatorname{rot} \dot{B} + \dot{B} \cdot \nabla \dot{B} + \dot{B} \cdot \nabla \dot{B} - \operatorname{grad} |\dot{B}|^2, \quad (20)$$

получается векторное уравнение

$$\operatorname{grad} \left( p + |\dot{B}|^2 \right) = \operatorname{Re} [\dot{B} \cdot \operatorname{rot} \dot{B} + B \nabla \dot{B} + \dot{B} \nabla B] \quad (21)$$

которое в проекциях на оси цилиндрической системы координат имеет вид:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{dp}{d\varphi} = 0, \quad (22)$$

$$\operatorname{grad}_z \left( p + \frac{|\dot{B}|^2}{2} \right) = 0. \quad (23)$$

Уравнение (23) означает, что сумма магнитного давления  $\frac{|\dot{B}|^2}{2}$  и механического  $P$  постоянна по длине канала. Интегрирование (23) по длине канала с учетом граничного условия:

при  $Z=0$   $p=0$ ,

находится выражение для давления в произвольной точке канала

$$p = \frac{|\dot{B}_0|^2 - |\dot{B}|^2}{2}. \quad (24)$$

Перепад давлений, создаваемый насосом

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{|\dot{B}_0|^2 - |\dot{B}_1|^2}{2}, \quad (25)$$

пропорционален разности квадратов амплитуд индукции на входе и выходе канала, максимален, когда индукция на входе в канал равна предельной по насыщению магнитопровода величине, а на выходе из канала близка к нулю.

Полная электромагнитная мощность, потребляемая каналом, определяется по теореме Умова-Пойнтинга

$$W = P + iQ = -\int_S \Pi dS \quad (26)$$

где  $\Pi = [\dot{E} \cdot \dot{B}]$  - безразмерный комплексный вектор Пойнтинга; (27)

$S$ - поверхность, охватывающая объем, занятый МГД-каналом; знак минус перед интегралом означает, что мощность считается положительной, если она втекает в объем, ограниченный поверхностью  $S$ .

Выражение (26) с учетом (27) по теореме Гаусса преобразуется следующим образом:

$$\int_S [\dot{E} \cdot \dot{B}] dS = \int \operatorname{div} [\dot{E} \cdot \dot{B}] dv. \quad (28)$$

Из векторного анализа следует:

$$\operatorname{div} [\dot{E} \cdot \dot{B}] = \dot{B} \cdot \operatorname{rot} \dot{E} - \dot{E} \cdot \operatorname{rot} \dot{B}. \quad (29)$$

правая часть равенства (29) с учетом уравнений (1)-(3) записывается:

$$\dot{B}rot\dot{E} - \dot{E}rot\dot{B} = -i|\dot{B}|^2 - 2\lambda^2|j|^2 + [R_m \cdot \dot{B}]j. \quad (30)$$

При подстановке (30) и (27) в (26) закон сохранения энергии записывается в виде

$$W = -\oint_S \Pi ds = i \int_V |\dot{B}|^2 dv + 2\lambda^2 \int_V |j|^2 dv + \int_V R_m [j \cdot \dot{B}] dv. \quad (31)$$

Таким образом, мощность, проходящая через замкнутую поверхность, охватывающую МГД-канал, затрачивается на создание магнитного поля в зазоре

$$Q_B = \delta^{-1} \int_{1-\frac{\delta}{2}}^{1+\frac{\delta}{2}} \int_0^1 |\dot{B}|^2 r dr dZ; \quad (32)$$

покрывает потери энергии на джоулев разогрев жидкого металла в канале

$$P_{дж} = 2\lambda^2 \delta^{-1} \int_{1-\frac{\delta}{2}}^{1+\frac{\delta}{2}} \int_0^1 |j|^2 r dr dZ; \quad (33)$$

расходуется на давление жидкого металла

$$S_{де} = P_{II} + iQ_{де} = R_m \cdot \delta^{-1} \int_{1-\frac{\delta}{2}}^{1+\frac{\delta}{2}} \int_0^1 j \cdot \dot{B} r dr \cdot dZ \quad (34)$$

Полезная активная мощность, расходуемая на движение жидкого металла,

$$P_{II} = R_m \cdot \delta^{-1} \cdot \text{Re} \int_{1-\frac{\delta}{2}}^{1+\frac{\delta}{2}} \int_0^1 j \cdot \dot{B} r dr dZ, \quad (35)$$

потребляется каналом в насосном режиме и связана с силой

$$f = 2\lambda^2 \cdot \text{Re} \{ j \cdot \dot{B} \} \quad (36)$$

осредненная по времени величина этой силы равна

$$f_{cp} = 2\lambda^2 \cdot |j| \cdot |\dot{B}| \cdot \text{Cos} \theta, \quad (37)$$

где  $\theta$  - угол сдвига по фазе между векторами  $j$  и  $\dot{B}$ ; во времени эта сила меняется по закону

$$f(t) = 2\lambda^2 |j| \cdot |\dot{B}| \text{Cos} \theta (1 + \text{Cos} 2\omega t). \quad (38)$$

Реактивная мощность, связанная с движением жидкого металла

$$Q_{де} = R_m \cdot \delta^{-1} \cdot \text{Im} \int_{1-\frac{\delta}{2}}^{1+\frac{\delta}{2}} \int_0^1 j \cdot \dot{B} r dr \cdot dZ, \quad (39)$$

имеет место в канале из-за несинфазности векторов  $j$  и  $\dot{B}$  и связана с "реактивной" знакопеременной силой

$$f_{\mu} = 2\lambda^2 J_m \{j \cdot \dot{B}\} \quad (40)$$

во времени эта сила меняется по закону

$$f(t) = -2\lambda^2 |j| \cdot |\dot{B}| \cdot \sin\theta \cdot \sin 2\omega t, \quad (41)$$

а осредненная по времени величина ее равна нулю.

Вектор Пойнтинга проникает в объем, занятый каналом насоса, только через торцевую поверхность  $Z=0$  на входе в канал, где

$$B = -\frac{B_0}{r}; \quad E = -\frac{i}{r}; \quad \Pi = -\frac{iB_0}{r^2} 1_z.$$

Поток вектора Пойнтинга при этом равен

$$\oint \Pi dS = \delta^{-1} \ln \frac{1 + \frac{\delta}{2}}{1 - \frac{\delta}{2}} \cdot iB_0, \quad (42)$$

откуда с учетом (26) определяется

$$\text{активная } P = \delta^{-1} \cdot J_m \dot{B}_0 \cdot \ln \frac{1 + \frac{\delta}{2}}{1 - \frac{\delta}{2}},$$

$$\text{и реактивная мощность } Q = -\delta^{-1} \cdot \text{Re } \dot{B}_0 \cdot \ln \frac{1 + \frac{\delta}{2}}{1 - \frac{\delta}{2}},$$

Коэффициент мощности канала равен

$$\cos \varphi = P \cdot (P^2 + Q^2)^{-\frac{1}{2}} = \sin \psi_0, \quad (43)$$

где  $\psi_0$  - фаза вектора  $\dot{B}_0$ .

Коэффициент полезного действия канала определяется выражением

$$\eta_k = \frac{P_{\Pi}}{P}. \quad (44)$$

Расчетное распределение по длине канала индукции и плотности тока при различных  $R_m$  и различных  $\lambda$ . Распределение амплитуды индукции по длине канала, полученное экспериментально для случая  $R_m=0$ , подтвердило справедливость теоретических предпосылок. Перепад давлений, замеренный на опытной модели при  $R_m=0$ , находится в хорошем соответствии с рассчитанным по формуле (25).

При экспериментальных исследованиях магнитное поле в канале замерялось датчиками - калиброванными катушками, выведенными на электронный милливольтметр. Распределение электромагнитных сил по длине канала замерялось токопроводящим витком, соединенным с динамометром (виток распола-

гался на различных уровнях канала и замерялась действующая на него электромагнитная сила).

Экспериментальные исследования устройства показали следующее. Индукция увеличивается по длине канала от нижнего торца обмотки к верхнему, достигая максимума, а затем экспоненциально уменьшается к концу канала. Плотность тока слабо уменьшается по длине канала от нижнего торца обмотки к верхнему и быстро уменьшается к концу канала вне обмотки. 70% давления развивается на участке канала, где расположена обмотка (из них 38% - на участке канала ниже середины обмотки и 32% - на участке канала выше середины обмотки), остальные 30% давления развиваются на участке канала выше верхнего торца обмотки.

Установка ферромагнитной втулки 4 вплотную между ферромагнитным сердечником 3 и ферромагнитным магнитопроводом 1 делает магнитную цепь магнитозамкнутой со стороны входа в устройство расплавленного металла. При этом потеря магнитного напряжения на участках магнитопровод-втулка-сердечник минимальны (практически близки к нулю). Это позволяет уменьшить (при той же магнитной индукции в канале 7) ампер-витки обмотки 2 и, как следствие, уменьшить объем всего устройства (при той же эффективности воздействия устройства на жидкий металл).

Экспериментальные исследования устройства в ртутном контуре показали, что наличие немагнитных промежутков между магнитопроводом и втулкой, а также втулкой и сердечником суммарной величиной в 5 мм (как в известном устройстве, где толщину двух огнеупорных стенок невозможно выполнить менее 5 мм) приводит к практически нулевой эффективности устройства.

Установка втулки до торца обмотки, в сравнении с установкой до середины обмотки, как в прототипе, приводит: к увеличению напора в тех же габаритах (как показал эксперимент, напор увеличивается на 38%); к уменьшению магнитного рассеяния (при установке втулки до середины обмотки, как в прототипе, половина магнитного потока не пронизывает МГД-канал а уходит в рассеяние).

#### **Библиографический список**

1. А.с. СССР SU №1612365 А1, М.кл. Н02К 44/00, с 21 с 7/00. Устройство для обработки расплавленного металла/. Я.Г.Смолин, Г.К.Смолин, Опубл. 07.12.90; Бюл.№45.