

## Электродинамические процессы в спиральном магнитогидродинамическом насосе трансформаторного типа

© С.Ю. Хрипченко, Е.Ю. Тонков

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013 Пермь, Россия  
e-mail: khripch@icmm.ru, tonkoveu@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2024 г.

В окончательной редакции 7 июля 2024 г.

Принято к публикации 7 июля 2024 г.

Проведена оценка развиваемого давления в стопорном режиме спиральным магнитогидродинамическим насосом трансформаторного типа, способным создавать высокие давления даже при работе с низкопроводящими жидкими металлами. Выполнено численное моделирование электродинамических процессов в таком насосе. Приведена оценочная аналитическая зависимость, которая помогает без расчетных пакетов сравнивать характеристики, различных вариантов конструируемого насоса. В рамках верификации математической модели произведен расчет экспериментально исследуемой конструкции по оценочной форме и численной модели. Получены характеристики насоса в стопорном режиме при некоторых конструктивных его вариантах, а также при его работе с металлами различных электропроводностей. Произведено сравнение расчетов по оценочной формуле и численной модели с результатами эксперимента. Показано что насос может создавать высокие давления порядка единиц мегапаскалей, работая даже с такими металлами как жидкий свинец, обладающих низкой электропроводностью.

**Ключевые слова:** магнитогидродинамический насос, магнитная гидродинамика, численное моделирование, COMSOL Multiphysics, жидкий свинец.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58868.181-24

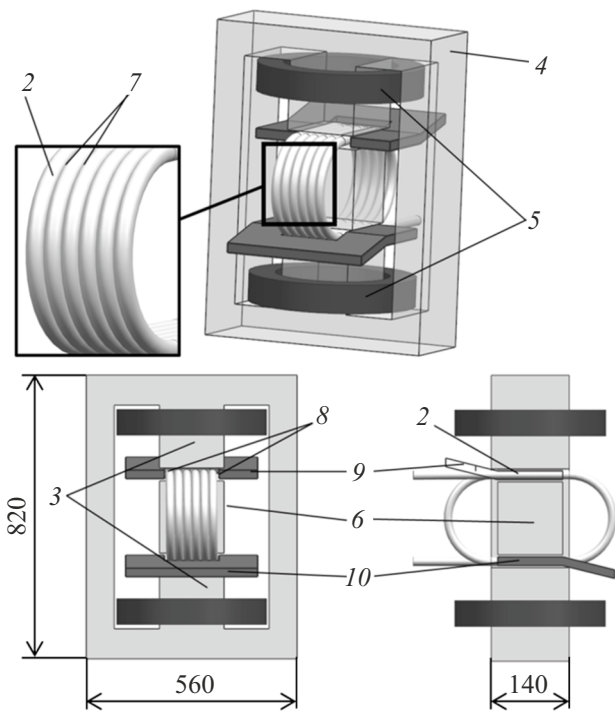
### Введение

Магнитогидродинамические (МГД) насосы применяются для перекачивания жидкого металла в металлургии и атомной промышленности. Электромагнитные силы, действующие на металл в каналах таких насосов и обеспечивающие их работу, являются результатом взаимодействия электрического тока в канале с магнитным полем. По способу создания электрического тока в канале МГД насосы делятся на индукционные и кондукционные [1,2]. В индукционных насосах электрический ток в канале создается переменным магнитным полем и взаимодействует с ним же. В кондукционных насосах ток в канале подводится посредством электродов и взаимодействует либо с магнитным полем от стороннего источника, либо со своим полем. Вследствие того, что в кондукционных насосах электрический ток, создаваемый внешним источником, может иметь существенную величину и подводиться к небольшому по размеру каналу, насосы данного типа обладают относительно небольшими габаритами и могут создавать значительный напор. Стоит отметить, что насосы индукционного типа имеют значительные размеры. Это обусловлено тем, что ток в канале таких насосов наводится внешним переменным магнитным полем, и для создания необходимой силы требуются размеры каналов, превосходящие размеры каналов кондукционных насосов. В то же время индукционные насосы не требуют отдельных источников питания для создания магнитного поля и электрического

тока в канале, и в большинстве своем их КПД превосходит КПД кондукционных насосов. Существуют также насосы трансформаторного типа, они объединяют признаки индукционных и кондукционных насосов. В таких насосах электрический ток, подводимый твердыми или жидкими электродами к каналу, наводится по принципу вторичного витка трансформатора тем же переменным полем, с которым он взаимодействует в канале насоса, обеспечивая его работу [3–5].

В качестве примера можно привести насос, имеющий прямолинейный канал, который с двух боковых сторон охватывает присоединенная подковообразная шина [3].

В шине и канале, как во вторичном витке трансформатора, переменным магнитным полем, создаваемым специальным сердечником, наводится электрический ток, который, протекая по каналу, замыкается через подковообразную шину. Таким образом, ток течет в одном направлении от одной боковой стенки, контактирующей с одной стороной подковообразной шины, к противоположной стенке, контактирующей с другой ее стороной. Электрический ток в канале, взаимодействуя с магнитным полем, которое его индуцировало, создает объемную электромагнитную силу в жидком металле, направленную в сторону охватывающей канал подковы. Эти силы определяют работу насоса. Данное устройство описано и экспериментально исследовано в работе [3]. По способу возбуждения электрического тока описываемое устройство похоже на трансформатор, а по способу подведения тока к каналу — на кондукционный насос,



**Рис. 1.** Спиральный трансформаторный МГД насос: 1 — спиральный канал, 2 — боковая сторона спирального канала, 3 — полюса магнитопровода, 4 — магнитопровод, 5 — катушки намагничивания, 6 — шихтованный ферромагнитный сердечник, 7 — места спайки трубок спирального канала, 8 — внешние боковые стороны спирального канала, контактирующие с подковообразными шинами, 9, 10 — подковообразные замыкающие шины. Справа на рисунке показано распределение силовых линий индукции магнитного поля в магнитопроводе насоса.

сочетая в себе компактность и отсутствие необходимости в громоздком, отдельном источнике питания.

В настоящей работе исследуется схожий по принципу действия насос [5], но для повышения развиваемого давления его канал свернут в спираль 1 (рис. 1), противоположные стороны 2 которого расположены между полюсами 3 магнитопровода 4 магнитной системы, создающей катушками намагничивания 5 переменное магнитное поле. Внутри спирали, между полюсами, расположен шихтованный ферромагнитный блок 6. Боковые стороны соседних витков спирали 7, находящиеся между полюсами магнитопровода 4, имеют хороший электрический контакт, обеспечиваемый сваркой либо спайкой по боковым сторонам соседних витков канала. Внешние стороны крайних витков спирали двух противоположных боковых сторон имеют электрический контакт 8 с продольными частями двух подковообразных шин 9, 10, которые „охватывают“ первый и второй полюс магнитной системы с противоположных сторон 9, 10. Отличительной особенностью данного устройства является то, что каналы в нем не лежат в одной плоскости в одном межполюсном зазоре магнитопровода, а объединены в

одну спираль, две противоположные стороны которой находятся в двух межполюсных зазорах магнитопровода. Независимо от числа витков спирального канала, насос имеет только две подковообразные шины, соединенные продольными частями с крайними витками канала и охватывающие полюса магнитопровода с противоположных сторон.

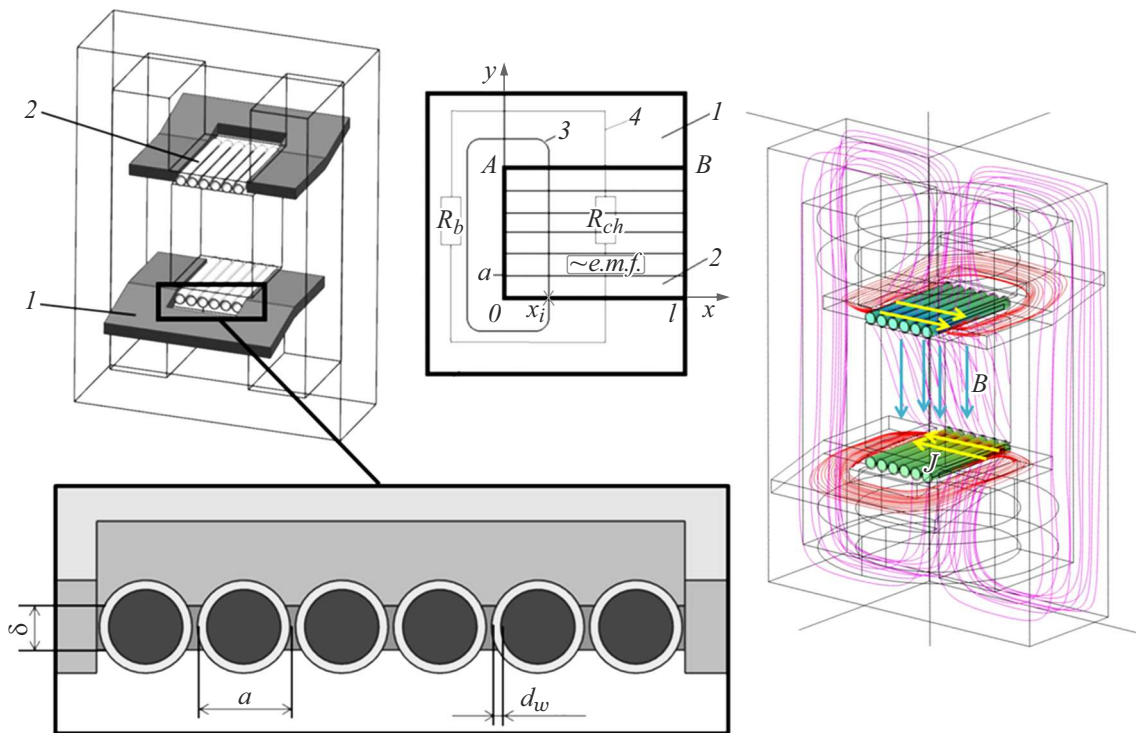
Принцип работы исследуемой конструкции подобен принципу работы МГД насоса, описанного в работе [3]. В разрабатываемом устройстве, как и в работе [3], магнитное поле в трубках канала и шинах наводит электрический ток, который протекает поперек этих трубок (рис. 2), находящихся в зазорах между полюсами 3 и шихтованным сердечником 6 (рис. 1), и замыкается через соответствующие подковообразные шины 1 (рис. 2). Электрический ток в трубках 2 (рис. 2) в каналах взаимодействует с магнитным полем в зазорах и создает объемную силу, действующую на жидкий металл в трубках, что и определяет работу насоса, а так как в спиральном канале все трубки соединены последовательно, давления, развиваемые в трубках, складываются.

## 1. Определение развиваемого насосом давления

На рис. 2 представлен схематический эскиз части спирального канала 2, расположенного между полюсами сердечника, с подковообразной замыкающей шиной 1 и их эквивалентная электрическая цепь 4. Диаметр трубки канала —  $a$ ; толщина стенки трубки —  $d_w$ ; высота спайки между витками канала —  $\delta$ ; длина припаянной части к каналу подковообразной замыкающей шины —  $l$ ; электросопротивление подковообразной замыкающей шины —  $R_b$ ; электросопротивление спирального канала в области полюсов сердечника —  $R_{ch}$ .

## 2. Аналитическая оценка создаваемого насосом давления

Для оценки развиваемого таким насосом давления можно представить область спирального канала, в которой витки канала спаяны между собой, как единую прямоугольную область  $0, A, B, l$  с проводимостью жидкого металла  $\sigma_{liq}$  (рис. 2). Сторона области  $0, l$  имеет длину  $l$ , а сторона  $0, A$  равна  $aN$ , где  $a$  — ширина одного витка канала, а  $N$  — количество его витков. Допустим, что в области  $0, A, B, l$  присутствует однородное переменное магнитное поле с частотой  $f$  и вектором магнитной индукции  $B$ , нормальным к плоскости этой области, а вне этой области магнитное поле отсутствует. Область охватывает электропроводящая шина 1 (рис. 2), имеющая электрический контакт со сторонами  $0, l$  и  $A, B$ . Электрическую проводимость шины можно считать бесконечной. Магнитный поток в контуре 3 (рис. 2), охватывающий часть рассматриваемой области и часть



**Рис. 2.** Схематический эскиз упрощенной модели рассматриваемого насоса: 1 — подковообразная замыкающая шина, 2 — трубки спирального канала диаметром  $a$  и толщиной стенки  $d_w$ , спаянные между собой припоем с высотой  $\delta$  и находящиеся в межполюсном зазоре магнитопровода, 3 — мысленный контур, охватывающий магнитный поток в межполюсном зазоре, 4 — условная эквивалентная электрическая цепь. Справа показано распределение линий электрического тока в трубках канала и подковообразных шинах.

электропроводящей шины, будет равен

$$\Phi = Bx a N. \quad (1)$$

Учитывая, что магнитное поле изменяется во времени по гармоническому закону с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$ , из закона Фарадея можно получить оценку для ЭДС, генерируемой в рассматриваемом контуре:

$$EMF = -\omega B x a N. \quad (2)$$

Если допустить, что электрическое поле в рассматриваемой области, как и магнитное поле, однородно, то

$$EMF = E_y a N. \quad (3)$$

Используя дифференциальный закон Ома  $j_y = \sigma_{liq} E_y$  и выражения (1)–(3), получим оценку для плотности тока в рассматриваемой области:

$$J_y = EMF \frac{\sigma_{liq}}{a N} = \omega B x \omega_{liq}. \quad (4)$$

В этом случае объемную электромагнитную силу можно оценить как

$$f_x = j_y B = \omega B^2 x \sigma_{liq}. \quad (5)$$

Интегрируя выражение (5) вдоль оси  $x$  от 0 до  $l$ , можно получить оценочное выражение для создаваемого областью  $0, A, B, l$  электромагнитного давления:

$$\Delta p = \int_0^l f_x dx = \frac{\omega \sigma_{liq} B^2 l^2 K_\phi \gamma}{2}. \quad (6)$$

Рассматриваемая область состоит из  $N$  сегментов (шириной  $a$  и длиной  $l$ ), которые являются частями витков спирального канала. В каждом таком сегменте создается одинаковое давление (6). Так как в спиральном канале сегменты включены гидравлически последовательно, а в рассматриваемом нами насосе имеется две области с подковообразными шинами, результирующее давление, создаваемое спиральным каналом, будет в  $2N$  раз больше, чем давление (6), получаемое в одном сегменте:

$$\Delta p = 2N \int_0^l f_x dx = N \omega \sigma_{liq} B^2 l^2 K_\phi \gamma \xi. \quad (7)$$

Для получения более точного результата выражение (7) необходимо умножить на коэффициент ослабления  $K_\phi$ , связанный со сдвигом фаз между магнитным полем и индуцированным им током в канале, и на коэффициент  $\gamma$ , учитывающий конечность проводимости замыкающей шины.

Аналогично значению коэффициента, полученного в работе [4], можно принять  $K_\varphi = 0.42$ . Коэффициент  $\gamma$  можно определить, представив канал и подковообразную шину в виде эквивалентной электрической цепи 4 (рис. 2).

Коэффициент  $\gamma = R_{ch}/(R_{ch} + R_b)$ , где  $R_{ch}$  — электро-сопротивление области  $0, A, B, l$ ,  $R_b$  — сопротивление подковообразной шины, а ЭДС (рис. 2) — электродвижущая сила, индуцируемая переменным магнитным полем. Необходимо также учесть, что электрический ток, индуцируемый в канале, распределяется между жидким металлом и его проводящими стенками. Таким образом, электрический ток в жидком металле будет несколько меньше общего индуцированного тока. Для учета этого явления в выражение (7) вводится коэффициент ослабления  $\xi$ , меньший единицы и зависящий от проводимости жидкого металла, стенок канала и его геометрии. Коэффициент  $\xi$  можно представить, как

$$\xi = \frac{\sigma_{liq}\Delta}{(\sigma_{liq}\Delta + \sigma_w d_w)}, \quad (8)$$

где  $\Delta$ ,  $d_w$  и  $\sigma_w$  — соответственно толщина слоя жидкого металла в канале, толщина стенки и ее проводимость.

Если жидкий металл движется в канале под действием электромагнитных сил, то при его движении через переменное магнитное поле возникает электрическое поле, направленное противоположно электрическому полю, индуцированному переменным магнитным полем. Это обстоятельство можно учесть, введя в выражение (3) произведение  $\nu B$  с соответствующим знаком.

В итоге для оценки величины электромагнитного давления, развиваемого насосом при движении жидкого металла по его каналу, можно получить

$$\Delta p = \xi \gamma N B^2 \sigma_{liq} (\omega l^2 K_\varphi - \nu l) - k \frac{N \rho \nu^2}{2}. \quad (9)$$

В выражение (9) добавлен член  $k N \rho \nu^2 / 2$ , учитывающий гидравлическое сопротивление канала [6].

В рамках настоящей работы выполнено сравнение результатов, полученных с использованием выражения (9), с экспериментальными данными [4]. Исследуемый в [4] насос подобен рассматриваемому, имеющему спиральный канал в 0.5 витка. В качестве переносимой среды выступал галлий. Таким образом, исходя из опубликованных данных,  $K_\varphi = 0.42$ ;  $B = 0.38$  Т. Для случая [3] можно считать  $\gamma \approx 0.59$ .

В стопорном режиме, исходя из выражения (9), насос должен развивать давление  $4.14 \cdot 10^5$  Па. В эксперименте [3] полученное давление было на 15% ( $3.5 \cdot 10^5$  Па) ниже рассчитанного по формуле (9). Расхождение оценочных результатов с экспериментальными, вероятно, связано с тем, что в приведенных расчетах не учтено контактное сопротивление при протекании электрического тока через стенки канала, и так называемая реакция якоря, приводящая к уменьшению развиваемого

насосом давления. Кроме того, некоторые конструктивные данные в опубликованной работе не приводятся, и были взяты их ориентировочные значения.

Выражение (9) не претендует на точность, но может служить для проведения предварительных оценок и сравнения различных вариантов при проектировании подобных насосов.

### 3. Численный расчет

В рамках настоящей работы был выполнен численный расчет рассматриваемого насоса и проведено сравнение с результатами, полученными по оценочной формуле. Моделировалась только электродинамическая часть общей задачи, без течения жидкого металла в канале. В немагнитных зазорах сердечника, где располагается спираль, витки канала спаяны боковыми сторонами и имеют между собой электрический контакт, а в области вне зазоров электрический контакт отсутствует. В связи с этим обстоятельством электрический ток в канале индуцируется переменным магнитным полем только в области зазоров. По этой причине задачу можно упростить и рассматривать не весь спиральный канал, а только его области, находящиеся в немагнитных зазорах (рис. 2).

Электромагнитные процессы в сердечнике и канале насоса без учета движения жидкого металла в низкочастотном приближении можно описать уравнениями [7–10]:

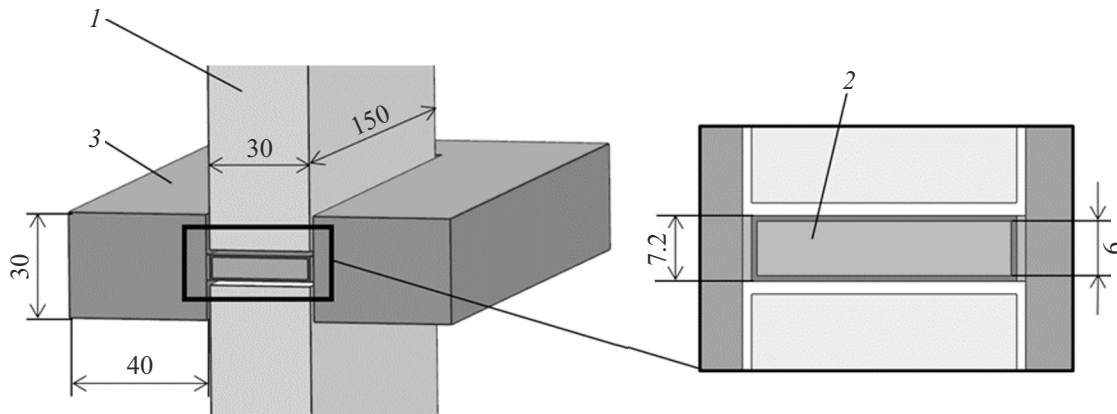
$$\begin{cases} \mathbf{E} = -i\omega\mathbf{A} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{A}$  — векторный потенциал,  $\mathbf{H}$  — вектор напряженности магнитного поля,  $\mathbf{J}$  — вектор плотности тока,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции магнитного поля,  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля,  $\varepsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $i$  — мнимая единица.

Считается, что в рассматриваемом случае магнитное поле, создаваемое переменным электрическим током в катушках намагничивания насоса, изменяется во времени по гармоническому закону [11]. Принята гомогенизированная модель расчета катушек [12], геометрия которых является цилиндром с площадью поперечного сечения, примерно равной площади сечения намотанных проводов. Плотность электрического тока в катушках определялась, как [12]:

$$\mathbf{J}_e = \frac{N I_{coil}}{A} \mathbf{e}_{coil}, \quad (11)$$

где  $N$  — число витков катушки,  $I_{coil}$  — амплитудное значение тока в катушках,  $A$  — площадь поперечного



**Рис. 3.** Реконструированная конфигурация канала и магнитной системы насоса из работы [3]: 1 — полюса магнитной системы, 2 — канал насоса, 3 — подковообразная замыкающая медная шина.

сечения катушки,  $\mathbf{e}_{coil}$  — вектор, указывающий направление течения тока в катушке.

При расчете магнитной системы не учитывались гистерезисные и джоулевы потери в сердечнике, а также считалось, что он изготовлен из трансформаторной стали и его магнитная проницаемость не зависит от магнитного поля.

Условие равенства нулю магнитного поля на бесконечности моделировалось выбором достаточно большой расчетной области, включающей в себя весь исследуемый объект. Ее геометрические размеры были определены таким образом, чтобы размер области не влиял на рассчитываемые электродинамические параметры объекта.

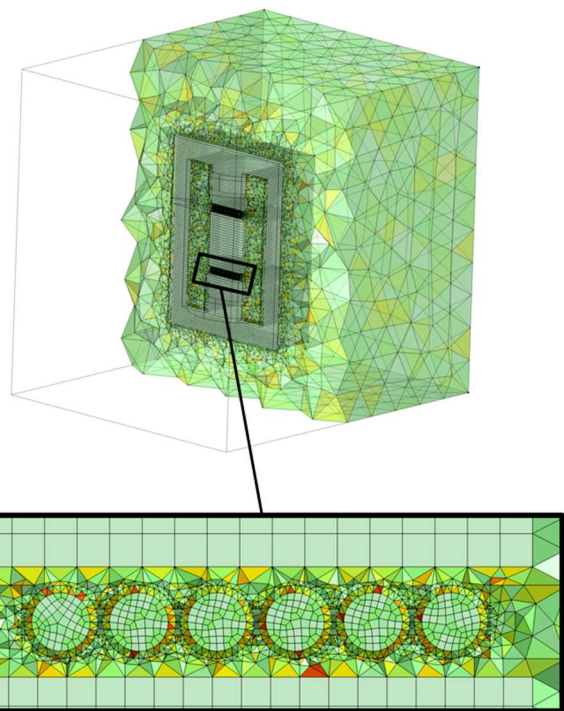
Задавалось условие непротекания электрического тока через стенки канала и в подковообразных шинах за их внешние границы. Для векторного потенциала магнитного поля на границе расчетной области выполнялось условие „магнитной изоляции“ [10]:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (12)$$

где  $\mathbf{n}$  — нормаль поверхности границы расчетной области.

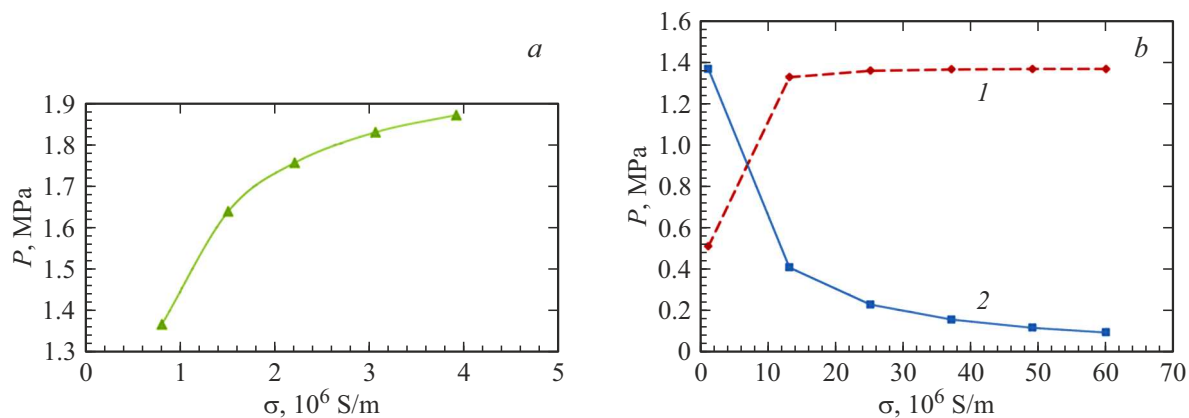
В рамках данного исследования моделировался квазистатический процесс [13] работы насоса, при котором определялось создаваемое в стопорном режиме давление без учета гидродинамических процессов. Для электродинамического расчета использовался модуль частотного анализа электромагнитных процессов в пакете COMSOL Multiphysics.

Для оценки достоверности принятой математической модели был проведен численный эксперимент с конструкцией насоса, подобной приведенной в [3]. В ходе испытаний на галлии [3] при эффективном значении индукции магнитного поля 0.38 Т насос создавал давление в 0.35 МПа при значении  $\cos \varphi = 0.42$ . В численной модели использовалась геометрия экспериментально исследуемого в работе [3] насоса (рис. 3).



**Рис. 4.** Сеточная модель сердечника насоса и витков спирального канала, находящихся в межполюсном зазоре.

В работе [3] отсутствует графическое изображение конструкции (только словесное описание), и не полностью указаны размеры и параметры катушки намагничивания. Расчетное давление, развиваемое насосом с подобными параметрами, составило 0.41 МПа, а  $\cos \varphi = 0.7$ . Полученные значения отличаются от экспериментальных данных. Рассчитанное давление на 15% выше полученного в [3], что может объясняться принятыми допущениями о постоянстве магнитной проницаемости сердечника, отсутствием в описании эксперимента значений проводимости стенок и жидкого галлия при температуре проведения эксперимента, а также



**Рис. 5.** *a* — зависимость развиваемого насосом давления от проводимости перекачиваемого жидкого металла, *b* — зависимость развиваемого насосом давления от проводимости замыкающей шины — 1 и от проводимости стенок канала насоса — 2.

некоторых конструктивных элементов, параметров катушек намагничивания и величины немагнитного зазора. Однако результаты наших расчетов по развиваемому давлению близки к экспериментальным данным, что позволяет сделать вывод о применимости используемой математической модели. Кроме того, они так же близки и к результатам расчетов по оценочной формуле (8).

Следующим этапом настоящей работы является численное моделирование объекта нашего исследования — насоса трансформаторного типа [5] (рис. 1). Его спиральный канал состоит из шести витков трубки из нержавеющей стали (12Х18Н10Т) диаметром 20 мм с толщиной стенки 2 мм. Канал находится в двух межполюсных зазорах высотой по 30 мм О-образного сердечника, создающего в этих зазорах переменное магнитное поле. Размер полюсов составляет 150 × 120 мм. Витки спирального канала, находящиеся в немагнитных зазорах, боковыми стенками спаяны между собой серебряным припоем. К крайним боковым виткам канала, находящегося в зазорах сердечника, припаяны две подковообразные медные шины (рис. 1). Переменное магнитное поле, создаваемое магнитной системой насоса в зазорах, индуцирует в участках спирального канала, находящихся в этих зазорах, ЭДС, которая, замыкаясь через подковообразные шины, охватывающие с одной и с другой стороны полюса сердечника, создает электрический ток в канале. Взаимодействие этого тока и индуцирующего его магнитного поля генерирует объемные электромагнитные силы, создающие давление в каждом витке спирального канала, а так как все участки трубки спирального канала, где действуют данные силы, включены гидравлически последовательно, результирующее давление усиливаетсякратно удвоенному числу витков спирального канала.

При численном моделировании рассматриваемого объекта была принята сеточная модель с 1.19 млн элементов. Размеры и количество элементов всей расчетной области оттачиваются от качественной дискретизации стенок рассматриваемого канала, состоящего из трубок диаметром 20 мм и толщиной 2 мм (рис. 4). В рамках

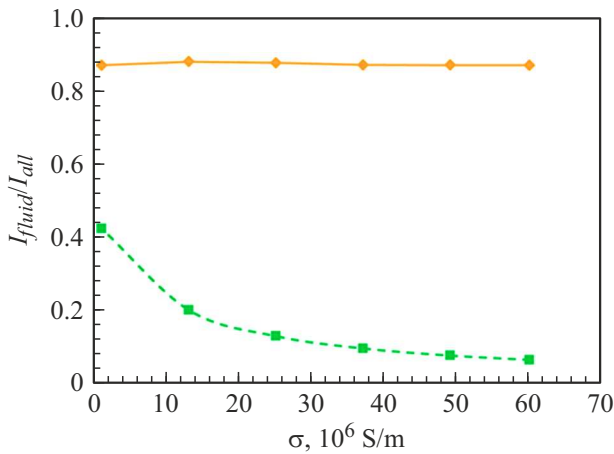
расчетной модели электрический контакт между трубками и подковообразной шиной обеспечен специальным припоем, соединяющим электрически витки трубки между собой, в области межполюсных зазоров, выступающим отдельным доменом со своими свойствами материала и размерами.

#### 4. Результаты численного эксперимента

В результате численного эксперимента было получено, что рассматриваемый насос [5], имеющий спиральный канал и состоящий из шести витков (рис. 1), при характеристике катушки 29700 ампер-витков развивает давление в стопорном режиме 1.37 МПа (рис. 5), при этом в канале и в замыкающей подковообразной шине индуцируется переменный электрический ток с амплитудой до 15266 А. Амплитудное значение тока в жидком свинце в канале насоса в этом случае составит 13293 А.

Численный эксперимент показал (рис. 5, *a*), что развиваемое насосом давление зависит от проводимости перекачиваемого металла. Объемная сила тем больше, чем больше проводимость перекачиваемой среды, однако при этом прирост давления с ростом проводимости уменьшается. Объясняется это тем, что с ростом проводимости жидкого металла уменьшается омическое сопротивление контура (канал — замыкающая шина), и тем самым растет величина индуцируемого тока, а, следовательно, и давления, развиваемого насосом. Однако этому есть предел. Сопротивление контура не может стать ниже сопротивления замыкающей шины, а, следовательно, есть ограничение по величине индуцированного тока.

Похожим образом ведет себя давление при увеличении проводимости замыкающих шин (рис. 5, *b*, кривая 1). При уменьшении омического сопротивления замыкающей шины общее сопротивление контура не может быть ниже сопротивления канала, что ограничивает



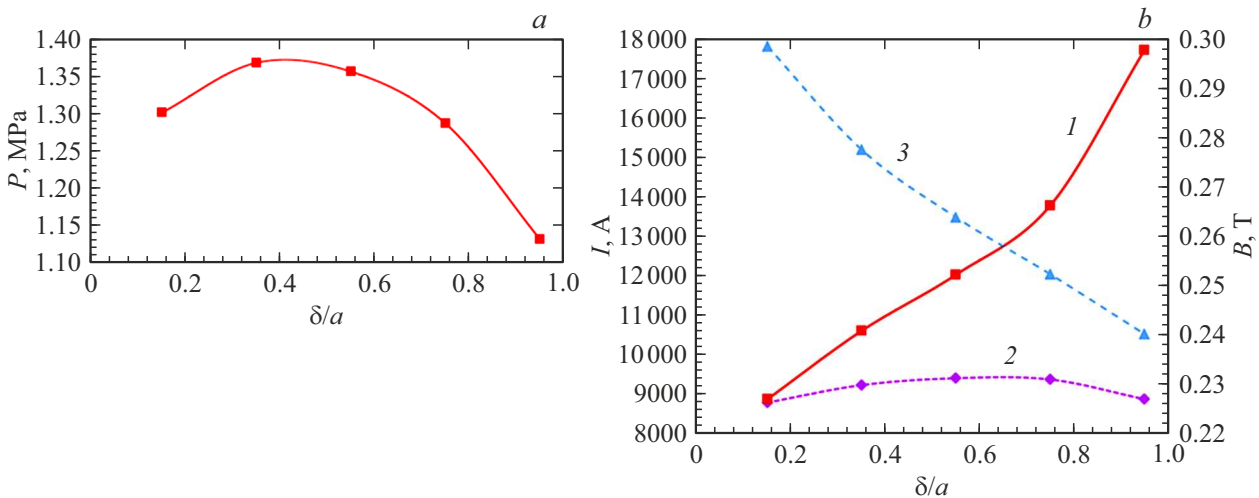
**Рис. 6.** Зависимость отношения тока, протекающего через жидкость к общему току от проводимости стенок канала — 1, и проводимости подковообразной шины — 2. Жидкий металл в канале — свинец.

возрастание индуцированного тока, а, следовательно, и создаваемого насосом давления. Другое дело, когда увеличивается проводимость стенок канала (рис. 5, *b*, кривая 2). В этом случае их шунтирующее влияние возрастает, и ток в жидком металле снижается (рис. 6, кривая 1), что приводит к уменьшению давления. Однако общее сопротивление канала уменьшается, что ведет к возрастанию общего индуцированного тока. По этой причине наблюдаемое снижение тока в жидком металле является не столь резким. Развиваемое насосом давление линейно зависит от тока в жидком металле, поэтому эти рассуждения справедливы и для него.

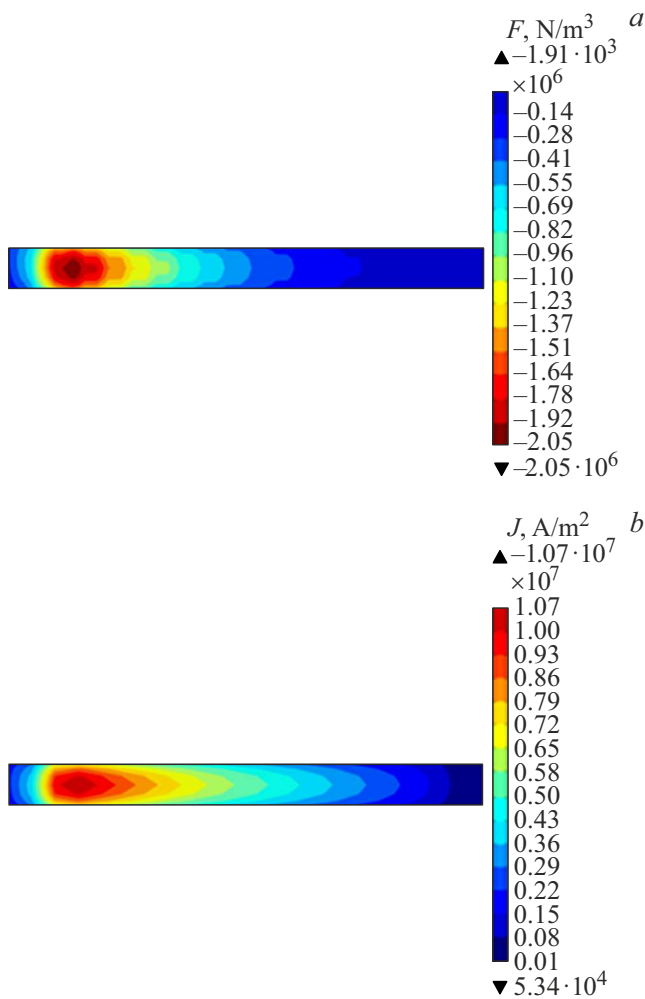
С ростом проводимости подковообразной шины общий ток в контуре и в жидком металле возрастает. После определенного значения проводимости замыкающей

шины его рост прекращается. Так же ведет себя ток и в жидком металле. Его величина за счет шунтирования стенками канала несколько ниже общего тока цепи. В то же время отношение этих токов остается практически постоянным (рис. 6, кривая 2).

В рамках моделирования процессов в рассматриваемом насосе, в настоящей работе исследовалось влияние высоты пропайки  $\delta$  (рис. 2) на развиваемое насосом давление (рис. 7, *a*). Из анализа графика видно, что имеется некоторое наилучшее значение высоты пропайки, соответствующее максимальному развиваемому давлению. Для детального исследования данной зависимости проанализированы графики зависимостей общего тока, тока в жидкости и магнитного поля (рис. 7, *b*) от относительной высоты пропайки. Лучшее значение отношения высоты пропайки к диаметру трубок (рис. 7, *a*) соответствует значению  $\sim 0.42$ , в то время как максимальное значение тока в жидкости (рис. 7, *b*, кривая 2) соответствует значению  $\sim 0.63$ . Данное расхождение объясняется тем, что при увеличении высоты пропайки уменьшается общее сопротивление контура, что приводит к возрастанию общего тока (рис. 7, *b*, кривая 1) и уменьшению значения магнитного поля (рис. 7, *b*, кривая 3) из-за возросшей реакции якоря. Приведенные выше рассуждения объясняют несоответствие значения высоты пропайки, соответствующее максимальному давлению, и значения высоты пропайки, соответствующему максимальному значению тока в жидкости. Наличие экстремума в графике зависимости тока в жидкости от отношения высоты пропайки к диаметру канала (рис. 7, *b*, кривая 2) может быть объяснено тем, что при уменьшении высоты пропайки шунтирующее действие стенок канала уменьшается, что приводит к возрастанию тока, текущего через жидкий металл. В то же время уменьшение высоты пропайки приводит к возрастанию общего сопротивления контура, что, в свою очередь,



**Рис. 7.** *a* — зависимость развиваемого давления от отношения высоты пропайки к диаметру трубок (сегментов канала); *b* — зависимость общего индуцируемого тока (кривая 1); индуцированного тока в жидкости (кривая 2); магнитного поля (кривая 3) от отношения высоты пропайки к диаметру трубок. Жидкий металл в канале — свинец.



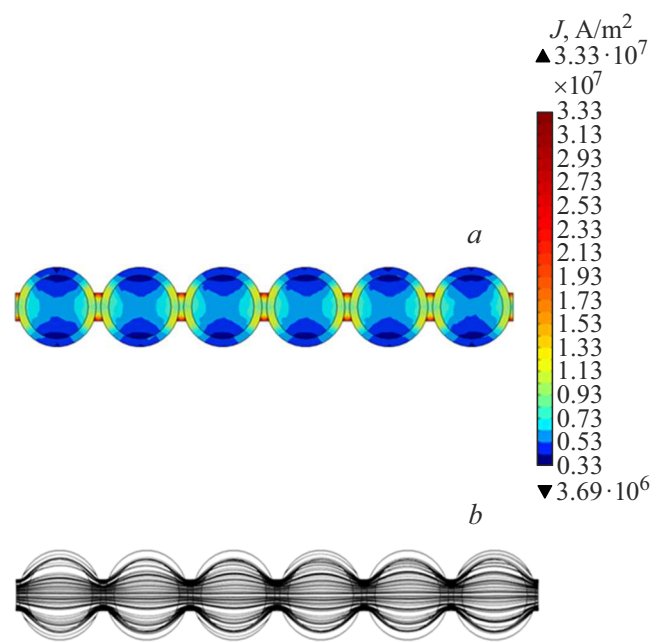
**Рис. 8.** Распределение объемной силы (a) и плотности тока (b) по длине сегмента канала.

приводит к уменьшению значения общего тока, в частности и тока, текущего через жидкий металл.

Ниже предоставлены дополнительные результаты численного моделирования. На рис. 8 показано распределение объемной силы и плотности тока по длине сегмента канала.

На рис. 9 представлено распределение плотности тока в канале со стенками при наилучшей высоте пропайки. На рисунке видно шунтирующее действие стенок канала. Также представлены линии плотности тока, демонстрирующие распределение тока между каналом и стенками.

В рамках настоящей работы было проведено сравнение рассчитанного по приближенной формуле давления, развиваемого спиральным насосом с каналом из шести витков (рис. 1), и давления, полученного численным моделированием. В этой формуле было положено магнитное поле 0.3 Т, частота 50 Hz, число витков 6,  $K_\phi = 0.66$  (полученный в численной модели),  $\gamma = 0.89$ ,  $\xi = 0.85$ . Тогда давление, развиваемое насосом на жидком свинце проводимостью  $10^6 \Omega^{-1}m^{-1}$ , составит 1.9 МПа, в то



**Рис. 9.** a — распределение плотности тока по стенкам сегментов канала, жидкому свинцу и припою; b — линии плотности электрического тока.

время как численный счет дает давление в 1.45 МПа. Отличие составило около 24%.

### Заключение

Рассмотренный в работе спиральный насос трансформаторного типа обладает небольшими габаритами и может создавать достаточно большие давления — выше 1 МПа — даже на слабопроводящем металле, таком, как жидкий свинец. При этом его работа не требует особых источников питания и может осуществляться от промышленной сети переменного тока. Для создания насоса данной конструкции с требуемыми в конкретном производстве рабочими параметрами при поиске конструктивных вариантов можно использовать предлагаемую в нашей работе оценочную формулу с последующим проведением уточняющих численных расчетов.

### Финансирование работы

Работа выполнена в соответствии с госбюджетным планом ИМСС УрО РАН № 122030200191-9.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов



## Список литературы

- [1] А.И. Вольдек. *Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом* (Энергия, Л., 1970)
- [2] Ю.А. Бирзвалк. *Основы теории расчета кондукционных насосов постоянного тока* (Зинатне, Рига, 1968)
- [3] Л.К. Брексон, Н.И. Глазков, В.Д. Егоров, Ю.Ф. Меренков, С.Р. Троицкий. *Экспериментальное исследование однофазного МГД-Насоса с электромагнитной асимметрией* (Девятое Рижское совещание по магнитной гидродинамике, ч. II, тезисы докладов, Рига, 1978), с. 53–54.
- [4] Ю.Ф. Меренков, И.В.Попков. *Электромагнитный насос АС Н 02N 4/20*. Патент № 898575 (СССР). Опубликовано 15.01.82. Б.И. №2
- [5] С.Ю. Хрипченко, В.М. Долгих. *Электромагнитный индукционный насос для жидких проводящих сред* (Патент РФ № 2810528, заявка № 2023119291)
- [6] И.Е. Идельчик. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп.* (Машиностроение, М., 1992)
- [7] C. Alberghi, L. Candido, R. Testoni, M. Utili, M. Zucchetti. *Energies*, **14** (17), 5413 (2021). DOI: 10.3390/en14175413
- [8] M. Zaja, A.A. Razi-Kazemi, D. Jovicic. *High Voltage*, **5** (5), 549 (2019). DOI: 10.1049/hve.2019.0387
- [9] L.P. Aoki, H.E. Schulz, M.G. Maunsell. *An MHD Study of the Behavior of an Electrolyte Solution using 3D Numerical Simulation and Experimental results*. Excerpt from the Proceedings of 2013 COMSOL Conference in Boston, **15**, 65 (2013)
- [10] С.Д. Самуйлов, И.П. Шербаков, Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов. *ЖТФ*, **93** (8), 1193 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55983.61-23
- [11] А.Д. Подольцев, Л.Н. Конторович. *Технічна електродинаміка*, **6**, 3 (2011).
- [12] C.R. Vargas-Llanos, F. Huber, N. Riva, M. Zhang, F. Grilli. *Superconductor Sci. Technol.*, **35**, 41 (2022).
- [13] N.E. Jewell-Larsen, S.V. Karpov, I.A. Krichtafovitch, V. Jayanty, Ch.-P. Hsu, A.V. Mamishev. *ESA Annual Meeting on Electrostatics*, **1**, 20 (2008).