

Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-47-52>

EDN OUAYJZ

## Математическое описание принципа магнитогидродинамического перемещения электропроводящих нефтесодержащих жидкостей

**Игорь Юрьевич Алексанян<sup>✉</sup>, Эльгам Заурович Исаналиев,  
Роман Равильевич Султанов, Ольга Ивановна Коннова**

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, 16081960igor@gmail.com<sup>✉</sup>*

**Аннотация.** Магнитогидродинамический принцип является важной междисциплинарной областью. В современных условиях развития технического оформления добычи нефтяного сырья возникла необходимость в магнитогидродинамической аппаратуре, позволяющей автоматизировать сложные процессы в технологии добычи нефтепродуктов и повысить степень их механизации, а также обеспечить сбережение энергии и ресурсов при повышении экологической безопасности. Одним из наиболее важных применений этого эффекта является откачка материалов, которая в настоящее время осуществляется обычными малоэффективными насосными установками. Для решения задачи роста эффективности обозначенной операции посредством магнитогидродинамической техники целесообразно использовать моделирование, дающее возможность заменить оригинал его математическим аналогом. По причине сложности анализируемых операций в обозначенных устройствах рассматриваются только существенно идеализированные модельные схемы, неприемлемые для изучения их статики и динамики, а также синтеза комплексов автоматического управления, что обуславливает актуальность построения модели, отвечающей физическому механизму управления изучаемыми объектами. В статье подробно изложен физический принцип работы МГД-устройств, основанный на взаимодействии электрического тока, пропускаемого через электропроводящую жидкость (в данном случае обводненную пластовую жидкость, являющуюся электролитом), и перпендикулярного ему магнитного поля высокой интенсивности. Описана сила Лоренца, возникающая в результате этого взаимодействия и приводящая к перемещению жидкости. Приведена конструктивная схема МГД-насоса и рассмотрены его основные достоинства (компактность, термоустойчивость, отсутствие движущихся элементов, надежность, сравнительно высокий КПД, малый переходный временной промежуток, незначительное обслуживание, простота функционирования на микроуровне, большая удельная мощность) и недостатки (проблемы сверхпроводниковых технологий, краевые эффекты магнитного поля, крупногабаритные магнитные элементы, отсутствие корректных аналитических моделей, неравномерность профиля скоростей и неустойчивость потока).

**Ключевые слова:** магнитогидродинамический принцип, физика электромагнитов, электропроводящая жидкость, математическая модель

**Для цитирования:** Алексанян И. Ю., Исаналиев Э. З., Султанов Р. Р., Коннова О. И. Математическое описание принципа магнитогидродинамического перемещения электропроводящих нефтесодержащих жидкостей // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 2. С. 47–52. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-47-52>. EDN OUAYJZ.

Original article

## Mathematical description of the magnetohydrodynamic displacement principle of electrically conductive oily liquids

**Igor Yu. Aleksanyan<sup>✉</sup>, Elgam Z. Isanaliyev,  
Roman R. Sultanov, Olga I. Konnova**

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, 16081960igor@gmail.com<sup>✉</sup>*

**Abstract.** The magnetohydrodynamic principle is an important interdisciplinary field. In modern conditions of development of the technical design of oil extraction, there is a need for magnetohydrodynamic equipment that allows automating

complex processes in oil product extraction technology and increasing their degree of mechanization, as well as saving energy and resources while increasing environmental safety. One of the most important applications of this effect is the pumping of materials, which is currently carried out by conventional low-efficiency pumping units. To solve the problem of increasing the efficiency of the indicated operation using magnetohydrodynamic technology, it is advisable to use modeling, which makes it possible to replace the original with its mathematical counterpart. Due to the complexity of the analyzed operations, the indicated devices consider only substantially idealized model schemes that are not acceptable for studying their statics and dynamics, as well as the synthesis of automatic control complexes, which determines the relevance of constructing a model that corresponds to the physical control mechanism of the studied objects. The article describes in detail the physical principle of operation of MHD devices based on the interaction of an electric current passed through an electrically conductive liquid (in this case, a watered reservoir fluid, which is an electrolyte) and a high-intensity magnetic field perpendicular to it. The Lorentz force resulting from this interaction and leading to fluid displacement is described. The design scheme of the MHD pump is presented and its main advantages (compactness, thermal stability, absence of moving elements, reliability, relatively high efficiency (UAC), short transient time interval, low maintenance, ease of operation at the microlevel, high specific power) and disadvantages (problems of superconducting technologies, edge effects of the magnetic field, bulky dimensions) are considered. magnetic elements, lack of correct analytical models, uneven velocity profile and flow instability).

**Keywords:** magnetohydrodynamic principle, physics of electromagnets, electrically conductive liquid, mathematical model

**For citation:** Aleksanyan I. Yu., Isanaliyev E. Z., Sultanov R. R., Konnova O. I. Mathematical description of the magnetohydrodynamic displacement principle of electrically conductive oily liquids. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;2:47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-47-52>. EDN OUAYJZ.

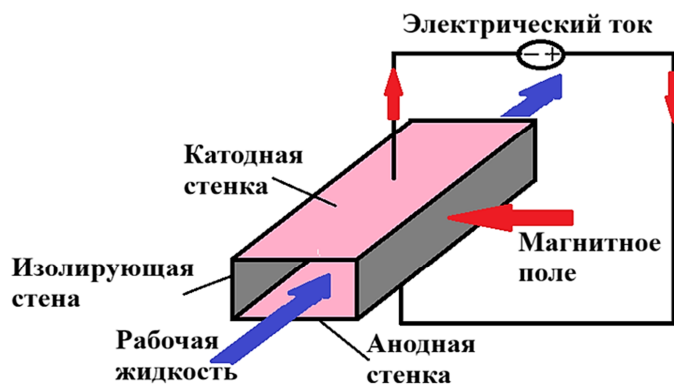
### Введение

В настоящее время растет доля высокообводненных нефтяных скважин, добыча нефти в которых в основном осуществляется электроцентробежными установками [1, 2]. Данные установки имеют низкую надежность (наработка на отказ в среднем составляет 560 сут), что обусловлено с износом вращающихся частей электроцентробежного насоса и выходом из строя погружного электродвигателя, связанным с электрическим пробоем изоляции при импульсных перенапряжениях. Решением данной проблемы может быть применение магнитогиродинамических насосов, т. к. в их конструкции отсутствуют вращающиеся части [2–4].

Магнитогиродинамические устройства (МГДУ) служат для электрохимической трансформации энергии при перемещении газо- или жидкообразной электропроводящей субстанции, такие как электролиты, плазма или жидкие металлы. С учетом способа генерирования тока путем внешнего поступления (кондукции) или его возбуждением посредством переменного электромагнитного воздействия (ин-

дукции) МГДУ классифицируются на два основных типа: кондукционные и индукционные [5–7].

Основной принцип работы МГДУ прост. Однонаправленный ток создается через электропроводящую жидкость, затем через нее – магнитное поле высокой интенсивности, перпендикулярное току [7]. Это сочетание ортогональных магнитного и электрического полей, а также относительного перемещения, обуславливает силу Лоренца, а ее ориентация – перекрестным произведением векторов магнитного поля и тока. Если устройство, содержащее электромагнит и корпус, неподвижно, то жидкость перекачивается. Однако если МГДУ находится в свободном состоянии или обладает наименьшим сопротивлением перемещению, его можно описать вторым законом Ньютона [8, 9]. В таком варианте МГДУ причисляют к подруливающим или насосно-струйным установкам. МГДУ, кроме позиций, обозначенных на рисунке, включает: штуцер для поступления среды, основную корпусную часть и форсуночный диффузор (на рисунке условно не показаны).



Конструктивные составляющие магнитогиродинамических устройств

Structural components of magnetohydrodynamic devices

Электроды и сверхпроводящий магнитный элемент размещены в основном в корпусной части так, чтобы магнитное и электрическое поля были ортогонально направлены. Принимая во внимание конструктивное оформление насосной установки, можно отметить и иные составляющие, такие как

напорный и всасывающий штуцеры, токопроводящие линии, находящиеся за рабочей насосной зоной. Ряд достоинств и недостатков МГДУ по отношению к традиционным установкам представлены в таблице [8, 9].

#### Достоинства и недостатки магнитогидродинамических устройств\*

##### Advantages and disadvantages of magnetohydrodynamic devices

Достоинства	Недостатки
Компактность и простота конструкции. Термостойчивость. Отсутствие движущихся элементов. Надежность. Сравнительно большой КПД. Малый переходной временной промежуток. Незначительное техническое обслуживание. Простота функционирования на микроуровне. Большая удельная мощность	Все недостатки, присущие к сверхпроводниковым способам, как и МГДУ. Противоположный поток на периферии магнитного поля. Крупногабаритные магнитные элементы, как статья капитальных затрат. Отсутствие корректных аналитических модельных схем. Неравномерный профиль скоростей жидкой среды и неустойчивость ее перемещения при определенных условиях

\* Составлено по [8].

С учетом химических параметров пластовая жидкая среда при повышенной обводненности является электролитной субстанцией, где под влиянием электрического тока наблюдается диссоциация солей в водной среде на ионы. При влиянии магнитного поля в электропроводящей жидкой среде наблюдается магнитогидродинамический эффект (МГДЭ), изучением которого занимались такие ученые, как Э. Бааке, В. Н. Тимофеев, С. А. Бояков, А. И. Вольдек, Б. Н. Сипливый, А. И. Хожаинов, Л. Г. Васильев, Е. Г. Андреева, Т. G. Cowling и др. [2, 3, 10].

В публикациях [2, 3, 10] решаются задачи влияния МГДЭ в ядерной и астрофизике, судовом техническом обеспечении и металлургической промышленности, а также рассматриваются общие и частные варианты решения соотношений закономерностей МГДЭ, однако возможность реализации обозначенного эффекта при добыче нефтяного сырья (НС) практически не рассматривается [1–3]. По данной причине актуальность реализации МГДЭ для добычи углеводородного сырья при повышенных степени отложения солей и обводненности не вызывает сомнений.

#### Результаты и обсуждение

МГД-принцип прокачивания нефтесодержащей жидкой среды описывается в следующей последовательности [2, 8]. При поступлении постоянной разности электрических потенциалов  $U$  на электродные элементы в пластовой жидкой среде, как солекислотном растворе, наблюдается ионная диссоциация солей, в частности, растворимой в воде  $\text{NaCl}$ . Под влиянием электрического поля анионы хлора  $\text{Cl}^-$  перемещаются к аноду, а катионы  $\text{Na}^+$  – к катоду.

Представим упрощенное математическое описание идеального МГД-насоса [8, 11, 12], при котором существует вероятность падения эффективности его работы [2, 8]. Приведенные соотношения приемлемы для любой жидкой среды со скалярной

электропроводностью  $s$ , См/м, в определенной точке и вектором интенсивности движения  $V$ , м/с. При условии, что на жидкую среду влияет комплекс вектора электрического поля  $E$ , В/м, и магнитной индукции  $B$ , Тл, наведенная плотность электротока  $J$ , А/м<sup>2</sup>, будет вектором с величиной и ориентацией, определяемым, как:

$$J = s(E + VB). \quad (1)$$

Соотношение (1) можно применить в условиях идентичной ориентации  $E$ ,  $V$  и  $B$  по всему каналу, однако затруднительно в реальном проекте, где уравнение (1) должно быть интегрировано по всему объему рабочего тела.

Если рабочая жидкость является нефтесодержащей (НСЖ), то в уравнение (1) должны быть добавлены дополнительные члены. Эти параметры здесь опущены, потому что средой, применимой к МГД-двигателям, является, например, морская вода, которую с допустимой погрешностью можно принять близкой НСЖ. Если НСЖ становится неподвижной, то уравнение (1) сводится к простому закону Ома, используемому в теории цепи постоянного тока. Предполагая, что на проточный канал не воздействуют существенные поточные возмущения или электрополе не обуславливает пробой в НСЖ,  $J$  можно определить достаточно точно. При этом двухфазный поток, появляющийся по причине заметного газирования НСЖ на электродных элементах или неоднородности потока, обуславливает усложнение моделирования и кодов для точности решения модели.

В процессе пропускания тока сквозь электро-нейтральную проводящую субстанцию в комплексе с магнитным полем векторное воздействие тела в ней на единицу объема  $F$ , Н/м<sup>3</sup>, влияет на нее с силой Лоренца:

$$F = JB. \quad (2)$$

$F$  обуславливает, с одной стороны, ускорение НСЖ в МГД-канальном пространстве, а с другой – торможение НСЖ при условии, что результирующая ориентация  $J$  преобразует МГД-канал в генератор. Общая потребляемая единицей объема МГДУ энергия является плотностью электрической мощности  $P$ , Вт/м<sup>3</sup>, которая в цепи постоянного тока определяется, как:

$$P = EJ. \quad (3)$$

Частично  $P$  реализуется для создания тяги, в то время как остальная часть будет потеряна при нагреве МГД-канала. Для МГД-насосов резистивные потери равны плотности тепловой мощности Джоуля  $P_j$ , Вт/м<sup>3</sup>:

$$P_j = \frac{J^2}{s}. \quad (4)$$

Разница между общей потребляемой мощностью и джоулевыми потерями тепловой мощности составляет идеальную эффективную удельную мощность тяги  $P_j$ , Вт/м<sup>3</sup>. Произведение обеих частей уравнения (1) на  $J$  приводит к:

$$J^2 = Js(E + VB). \quad (5)$$

Разделив соотношение (5) на  $s$  и трансформировав путем подстановки соотношения (3)  $P$ , находим:

$$P = VJB + \frac{J^2}{s}. \quad (6)$$

Тогда

$$P_j = VJB. \quad (7)$$

Подставляя уравнение (2) в уравнение (7), альтернативное выражение для  $P_j$  имеет вид:

$$P_j = VF. \quad (8)$$

Нагрузка  $K$  определяется следующим образом:

$$K = \frac{E}{VB} = \frac{|E|}{|V||B|}.$$

Подставив  $K$  в уравнение (1) и используя векторные величины, поскольку система ортогональна, плотность индуцированного электрического тока, А/м<sup>2</sup>:

$$J = (1 - K)sVB. \quad (10)$$

$P$ , затрачиваемая на нагрузку единицы объема МГДУ, находится, как:

$$P = JE = (1 - K)sV^2B^2. \quad (11)$$

Соотношения (1), (11) можно трансформировать с целью выявления выходного  $U$  и  $P$  с учетом  $J$ , получив

$$E = VB - \frac{J}{s}; \quad (12)$$

$$P = JVB - \frac{J^2}{s}. \quad (13)$$

При условии обратного направления  $F$  по отношению к  $J$ ,  $F$  будет противодействовать перемещению НСЖ и определяться, как:

$$F = JB = (1 - K)sVB^2. \quad (14)$$

При условии неизменности диаметра МГД-канала и перемещения НСЖ будет появляться разность давлений  $dP$  на участке  $dx$ :

$$dP = Fdx. \quad (15)$$

В варианте неизменности  $B$ ,  $V$  и  $s$  общая разность  $P$  в МГД-канале ( $P_{in} - P_{out}$ ) определяется, как:

$$P_{in} - P_{out} = Fl = (1 - K)sVB^2l, \quad (16)$$

где  $l$  – протяженность воздухопровода.

Норма работы НСЖ на единицу объема:

$$P_g = FV - (1 - K)sV^2B^2. \quad (17)$$

Электрический КПД  $Ne$  определяется по отношению выходной и исходной  $P$  рабочего тела телом:

$$Ne = \frac{P}{P_g}. \quad (18)$$

При условии, что рабочая НС имеет повышенную температуру, МГД-генератор можно использовать, как энергетический топเปอร์ в комплексе с другой системой энергетической трансформации. По причине того, что потери энергии МГДУ присутствуют в рабочей НСЖ, энергия остается в определенной степени полезной, но является побочной составляющей от термодинамической обратимости. В МГД-каналах с неизменными магнитными полями  $F$  тоже неизменна. В варианте, когда МГДУ функционирует с перпендикулярными полями, с целью выявления  $V$  с учетом размещения в канале целесообразно использовать закон сохранения энергии. Суммарная выходная мощность МГДУ определяется посредством интегрирования соотношения эквалайзера (8) с учетом размещения в канале.

Магнит составляет около 20 % от общей массы МГДУ, массовый остаток которого преимущественно служит структурной опорой для удержания магнитного элемента. Напряженность поля 10 Тл можно обеспечить посредством сверхпроводящих магнитных элементов. Особыми показателями конфигурации катушки для подруливающего устройства являются масса, эффективность и уровень утечки в полевых условиях. В реальных производственных условиях поток может варьироваться в течение переходных операций, поскольку магнитное поле тоже варьируется по всему каналному пространству. Так как  $J$  связано с  $V$  и  $B$ , используется решение соотношения (7) для всей подаваемой мощности. Таким образом, приближе-

ние квазистационарного магнитного потока вычисляется с использованием закона Био – Савара:

$$B = C_1 \iiint_V \left( \frac{J_m N_{ab}}{r^2} \right) dv, \quad (19)$$

где  $C_1$  – четвертая часть магнитной проницаемости;  $v$  – объем интеграции;  $J_m$  – плотность тока в магнитных катушках;  $N_{ab}$  – вектор между точками  $a$  и  $b$ ;  $r$  – расстояние между точками  $a$  и  $b$ .

$E$  можно определить из соотношения (1), а стационарный вид двух соотношений Максвелла выглядит, как:

$$\nabla \cdot E = 0, \quad (20)$$

$$\nabla \cdot J = 0. \quad (21)$$

Если  $V$  и  $B$  известны, соотношение (20) определяет наличие электрического потенциала, отвечающего уравнению:

$$E = (-\nabla\Theta). \quad (22)$$

где  $\Theta$  – это специальная функция от нескольких комплексных переменных.

Подставив  $J$  из соотношения (1) в (21) с учетом (22), получим уравнение в частных производных для  $\nabla^2\Theta$ , из которого можно определить  $B$ :

$$\nabla^2\Theta = \nabla V \cdot B. \quad (23)$$

На основе построенной математической модели можно произвести расчет и анализ интегральных

и дифференциальных характеристик электромагнитного поля.

### Выводы

В современных условиях основная часть нефтеносных залежей проходит завершающий этап эксплуатации, обусловленный высокой влажностью нефтяного сырья. Осаждение солей в пластовой жидкой среде на оборудовании в определенных термобарических условиях обуславливают выход его из строя, который ведет к материальным потерям при эксплуатации или простою скважины. Соли пластовой НСЖ, растворимые в водной среде, подвергаются электролизу, когда происходит деградация молекул с образованием ионов. Под влиянием магнитного поля на ионы действует сила Лоренца, при этом в пластовой НСЖ наблюдается МГДЭ. Целью приведенного исследования был математический анализ целесообразности МГД способа для добычи углеводородного сырья. Следует отметить, что одним из основных препятствий для дальнейшего применения МГД является необходимость дальнейшего развития теории генерации магнитного поля, т. к. магнитное поле пропорционально влияет на приложенную силу. Кроме этого, использование проводящего материала с меньшим сопротивлением повысит производительность МГД-насосов, особенно при работе с высокотемпературными жидкостями.

### Список источников

1. Ковалева А. Н. Анализ структуры добывающего фонда скважин на Пермском месторождении // Акад. журн. Запад. Сибири. 2016. Т. 12, № 2 (63). С. 15–16.
2. Логунов А. В. и др. Анализ применимости магнитогидродинамического эффекта для добычи углеводородов // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 50–56.
3. Латыпов О. Р. Влияние магнитогидродинамической обработки пластовых сред, содержащих сульфатвосстанавливающие бактерии, на скорость и характер коррозии трубной стали // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2007. № 4 (70). С. 71–76.
4. Николаев О. А. и др. Расчет устройств для магнитогидродинамической обработки, применяемых с целью снижения сульфатредукции бактерий в пластовых водах // Нефтегаз. дело. 2008. Т. 6, № 2. С. 204–209.
5. Тимофеев В. Н., Первухин М. В., Хацаук М. Ю. Магнитогидродинамические технологии в плавильно-литейном производстве алюминиевых сплавов // Индукц. нагрев. 2012. Т. 4, № 22. С. 15–20.
6. Смолин Г. К., Шабалдин Е. Д. Линейно-вихревые и трансформаторные МГД-устройства // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 216–223.

7. Логинов Н. И. Многофункциональное магнитогидродинамическое устройство // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2021. № 2. С. 116–126.
8. Al-Hababeh O. M. et al. Review of magnetohydrodynamic pump applications // Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55, N. 2. P. 1347–1358.
9. Jang J., Lee S. S. Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump // Sensors and Actuators A: Physical. 2000. Vol. 80, N. 1. P. 84–89.
10. Тарасов Ф. Е. Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015. 148 с.
11. Кацнельсон С. С., Поздняков Г. А. Моделирование режимов работы центробежного кондукционного магнитогидродинамического насоса // Приклад. механика и техн. физика. 2013. Т. 54, № 5 (321). С. 81–87.
12. Хрипченко С. Ю., Тонков Е. Ю. Электродинамические процессы в спиральном магнитогидродинамическом насосе трансформаторного типа // Журн. техн. физики. 2024. Т. 94, № 10. С. 1729–1737.

### References

1. Kovaleva A. N. Analiz struktury dobyvajushhego fonda skvazhin na Permjakovskom mestorozhdenii [Analysis of the structure of the producing well stock at the Permjakovskoye

- field]. *Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri*, 2016, vol. 12, no. 2 (63), pp. 15–16.

2. Logunov A. V. i dr. Analiz primenimosti magnitogidrodinamicheskogo jeffekta dlja dobychi uglevodorodov [Analysis of the applicability of the magnetohydrodynamic effect for hydrocarbon production]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 50-56.
3. Latypov O. R. Vlijanie magnitogidrodinamicheskoy obrabotki plastovyh sred, soderzhashhih sul'fatvosstanavlivajushhie bakterii, na skorost' i harakter korrozii trubnoj stali [Influence of magnetohydrodynamic treatment of reservoir media containing sulfate-reducing bacteria on the rate and nature of corrosion of tubular steel]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefii i nefteproduktov*, 2007, no. 4 (70), pp. 71-76.
4. Nikolaev O. A. i dr. Raschet ustrojstv dlja magnitogidrodinamicheskoy obrabotki, primenjaemyh s cel'ju snizhenija sul'fatredukcii bakterij v plastovyh vodah [Calculation of devices for magnetohydrodynamic treatment used to reduce sulfate reduction of bacteria in reservoir waters]. *Neftegazovoe delo*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 204-209.
5. Timofeev V. N., Pervuhin M. V., Hacakuk M. Ju. Magnitogidrodinamicheskie tehnologii v plavil'no-litejnom proizvodstve aljuminievyh splavov [Magnetohydrodynamic technologies in the smelting and casting of aluminum alloys]. *Indukcionnyj nagrev*, 2012, vol. 4, no. 22, pp. 15-20.
6. Smolin G. K., Shabaldin E. D. Linejno-vihrevye i transformatornye MGD-ustrojstva [Linear vortex and transformer MHD devices]. *Avtomatizacija v jelektrojenergetike i jelektrotehnike*, 2015, vol. 1, pp. 216-223.
7. Loginov N. I. Mnogofunkcional'noe magnitogidrodinamicheskoe ustrojstvo [Multifunctional magnetohydrodynamic device]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Jaderno-reaktornye konstanty*, 2021, no. 2, pp. 116-126.
8. Al-Hababbeh O. M. et al. Review of magnetohydrodynamic pump applications. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 1347-1358.
9. Jang J., Lee S. S. Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 80, no. 1, pp. 84-89.
10. Tarasov F. E. *Indukcionnyj MGD-nasos s odnoploskostnoj koncentricheskoj obmotkoj induktora dlja transportirovki magnija: dissertacija ... kandidata tehniceskikh nauk* [Induction MHD pump with a single-plane concentric winding of an inductor for transporting magnesium: dissertation ... Candidate of Technical Sciences]. Ekaterinburg, 2015. 148 p.
11. Kacnel'son S. S., Pozdnjakov G. A. Modelirovanie rezhimov raboty centrobezhnogo kondukcionnogo magnitogidrodinamicheskogo nasosa [Simulation of operating modes of a centrifugal induction magnetohydrodynamic pump]. *Prikladnaja mehanika i tehniceskaja fizika*, 2013, vol. 54, no. 5 (321), pp. 81-87.
12. Hripchenko S. Ju., Tonkov E. Ju. Jelektrodinamicheskie processy v spiral'nom magnitogidrodinamicheskom nasose transformatornogo tipa [Electrodynamic processes in a transformer-type spiral magnetohydrodynamic pump]. *Zhurnal tehniceskoy fiziki*, 2024, vol. 94, no. 10, pp. 1729-1737.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 13.05.2025  
The article was submitted 21.03.2025; approved after reviewing 22.04.2025; accepted for publication 13.05.2025

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Игорь Юрьевич Алексанян** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; 16081960igor@gmail.com

**Igor Yu. Aleksanyan** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; 16081960igor@gmail.com

**Эльгам Заурович Исаналиев** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; dortmund813@mail.ru

**Elgam Z. Isanaliev** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; dortmund813@mail.ru

**Роман Равильевич Султанов** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; sultanov.roman2001@bk.ru

**Roman R. Sultanov** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; sultanov.roman2001@bk.ru

**Ольга Ивановна Коннова** – ассистент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; Okonnova88@gmail.com

**Olga I. Konnova** – Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; Okonnova88@gmail.com

