

# Характеристики электрогидродинамического насоса

М. К. Болога, Ф. П. Гросу, И. В. Кожевников,  
А. А. Поликарпов, О. И. Мардарский

*Институт прикладной физики АН Молдовы,  
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: [mbologa@phys.asm.md](mailto:mbologa@phys.asm.md)*

Получены напорно-расходные характеристики-зависимости перепада давления и расхода жидкости через электрогидродинамический насос (ЭГДН) от напряжения электрического поля и свойств рабочей среды. Напорные характеристики определены в гидростатическом и гидродинамическом режимах; установлена линейная зависимость коэффициента полезного действия ЭГДН от напряжения. Теоретические результаты согласуются с экспериментальными. Найдены формулы для расчетов ЭГДН. Лучшими характеристиками обладает кремнийорганическая жидкость, рекомендованная для применения в ЭГД теплообменниках.

*Ключевые слова: электрогидродинамический насос, электрическое поле, рабочая среда, напорные характеристики, коэффициент полезного действия, кремнийорганическая жидкость.*

УДК 532.5:537+536.24:537

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиоэлектронной промышленности и компьютерной техники сопровождается ростом тепловых нагрузок, которым подвергнуты ее отдельные элементы и узлы. Соответственно повышаются требования к обеспечению их тепловых режимов. Возникает необходимость в эффективных системах охлаждения, которые при малых теплоотдающих поверхностях были бы способны отводить значительные тепловые потоки. В этой связи в последнее время находят все более широкое применение системы охлаждения, в которых используются как конвективное движение жидкого теплоносителя, так и фазовые переходы [1, 2]. Одним из перспективных направлений решения возникающих задач является интенсификация теплообмена путем турбулизации жидкого диэлектрического теплоносителя (одно- или двухфазного) в зоне теплоподвода и его транспорта в зону теплоотвода, используя электрическую конвекцию [3]. Однако, если вопросы электроконвективного перемешивания относительно хорошо изучены, то организация направленного движения диэлектрической среды представляет собой достаточно сложную задачу. Устройство, в котором энергия электрического поля преобразуется в механическую – направленного движения жидкого диэлектрика с целью его прокачки, как известно, называется электрогидродинамическим насосом (ЭГДН). В существующих конструкциях ЭГДН, состоящих в большинстве случаев из двух или трех электродов, возникновение движения жидкости связывают с геометрической асимметрией электродов. Ввиду сильной неоднородности электрического поля у одного из

них создаются условия для инъекции зарядов, в результате возникает течение жидкости, направленное к противоэлектроду, аналогичное «электрическому ветру» при коронном разряде в газах. Но система из двух симметричных электродов, в частности «проволака–проволака», при определенных условиях также может работать как ЭГДН [4], однако, в данном случае возможны другого рода асимметрии (носителей зарядов). Изменяя состав и проводимость среды, можно управлять характером электронно-ионного обмена на электродах и, как следствие, направлением прокачки. При этом достигается сравнительно невысокая производительность, что явилось стимулом дальнейших исследований по поиску методов управления процессами зарядообмена на границе электрод – жидкость, в частности, посредством нанесения перфорированного диэлектрического покрытия на один из электродов, что оказалось достаточно эффективным в трехэлектродной системе [5].

Все же возможности одноступенчатых ЭГДН ограничены как в части создаваемого им напора, так и расхода перекачиваемой диэлектрической жидкости. Поэтому в зависимости от требуемых выходных характеристик ЭГДН трехпроводочные системы электродов устанавливаются геометрически параллельно, физически последовательно, образуя многоступенчатый преобразователь (насос) [6]. При этом характеристики многоступенчатого ЭГДН зависят не только от взаимного расположения ступеней, но и от электрофизических свойств среды. В связи с этим в данной работе проводится исследование влияния типа диэлектрических жидкостей на характеристики многоступенчатого ЭГДН с

целью его применения в качестве теплообменника.

### УСТРОЙСТВО ЭГДН И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

ЭГДН состоит из корпуса цилиндрической формы 1 (рис. 1), выполненного из алюминиевого сплава, внутри которого на определенном расстоянии размещены его ступени. Каждая ступень состоит из двух электродов-эмиттеров ( $\text{Э}_1$  и  $\text{Э}_2$ ) и коллекторов ( $\text{К}_1$  и  $\text{К}_2$ ), выполненных в виде решеток из натянутых на круговой металлической оправе параллельно друг другу проводов с определенным шагом. На изоляционное покрытие провода эмиттера нанесены перфорации со стороны коллектора. Электрод-эмиттер изолирован от заземленного корпуса с помощью диэлектрической оправы 2. Расстояние между соседними ступенями фиксировалось посредством диэлектрических прокладок 3.

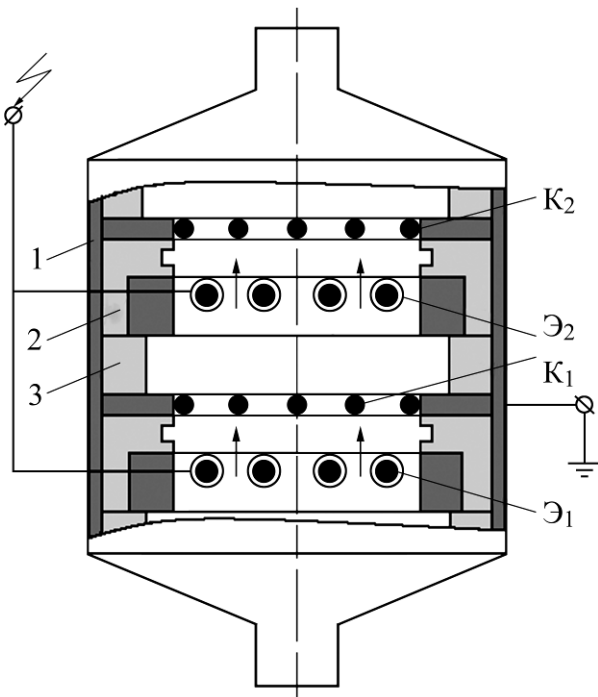


Рис. 1. Конструкция электрогидродинамического насоса.

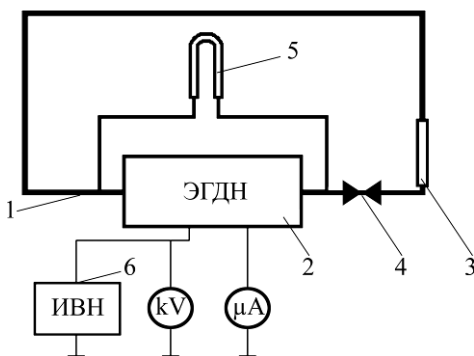


Рис. 2. Схема экспериментального стенда.

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 2), представляющим собой циркуляционный контур 1, который включает ЭГДН 2, расходомер 3, вентиль 4 для регулирования гидравлического сопротивления циркуляционного канала. Перепад давления (гидродинамический напор) на регистрировался дифференциальным пьезометром 5. Высокое напряжение на электроды подавалось от источника напряжения (ИВН) 6. Значение постоянного напряжения  $U$  измерялось киловольтметром (кВ), тока  $I$  – микроамперметром ( $\mu\text{A}$ ), включенным последовательно с корпусом 1 (рис. 1, 2) ЭГДН. В качестве рабочей среды использовались: трансформаторное масло с электропроводностью  $\sigma = 1 \cdot 10^{-11}$  См/м, кинематической вязкостью  $\nu = 28 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; кремнийорганическая жидкость –  $\sigma = 1,36 \cdot 10^{-10}$  См/м,  $\nu = 3,55 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; керосин –  $\sigma = 1,43 \cdot 10^{-11}$  См/м,  $\nu = 1,55 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимости перепада давления (напора)  $\Delta p$ , далее обозначаемого  $P$ , и расхода  $Q$  в контуре от напряжения  $U$  на электродах представлены на рис. 3 и 4. Сравнительный анализ хода кривых перепада давлений 1 (рис. 3), 1 и 3 (рис. 4) показывает, что наибольший гидродинамический напор  $P = 6,5 \cdot 10^3$  Па достигнут в кремнийорганической жидкости при расходе  $\sim 43 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с.

Это объясняется тем, что электропроводность (см. ниже) кремнийорганической жидкости на порядок больше, чем у керосина и трансформаторного масла, соответственно выше плотность объемных зарядов. Совпадение расходных характеристик в кремнийорганической жидкости и керосине (кривые 2, 4) объясняется незначительной разницей вязкостей этих жидкостей. При этом кривые зависимости напорной характеристики насоса от напряжения в трансформаторном масле (кривая 1, рис. 3) и керосине (кривая 3, рис. 4) практически совпадают. Аналогичные закономерности получены в зависимости статического напора от напряжения в трансформаторном масле и керосине (кривые 2 и 3, рис. 5). В керосине более интенсивны возвратные течения между электродами ступени и в пространстве между ступенями, что объясняется гораздо меньшей вязкостью, чем у трансформаторного масла, при небольшой разнице в электропроводностях. Эти два фактора существенно влияют на напорно-расходные характеристики насоса.

Максимальный статический напор  $\sim 7,5 \cdot 10^3$  Па получен в кремнийорганической

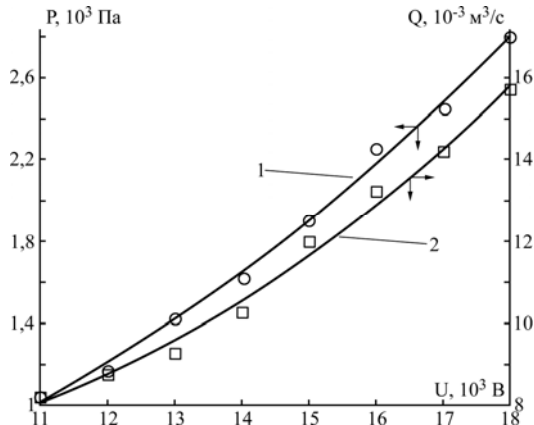


Рис. 3. Зависимость напора  $I$  и расхода  $Q$  от разности потенциалов между электродами в трансформаторном масле.

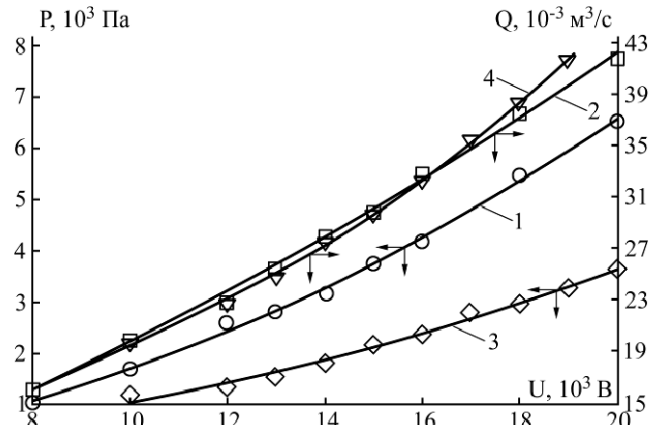


Рис. 4. Зависимости напора и расхода от разности потенциалов между электродами в кремнийорганической жидкости (1, 2) и керосине (3, 4).

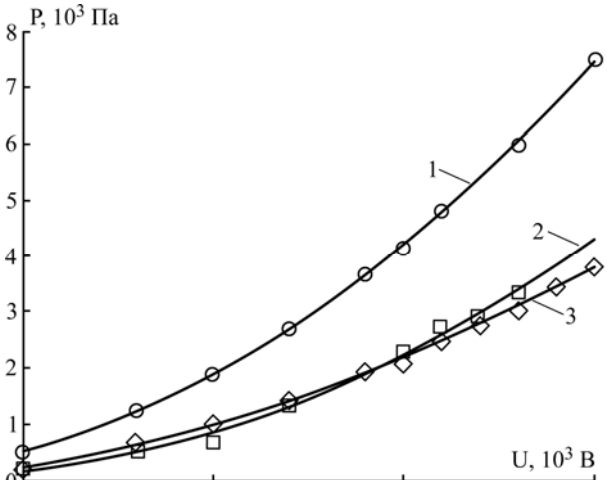


Рис. 5. Зависимости статического напора от разности потенциалов между электродами в ПЭС-1 (1), трансформаторное масло (2), керосин (3).

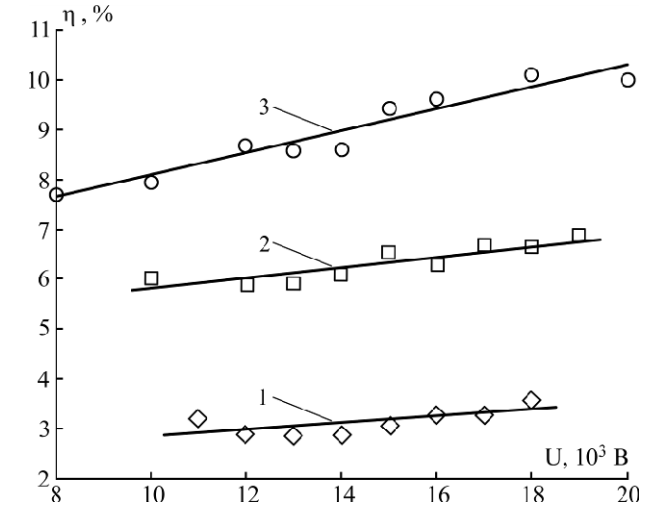


Рис. 6. Зависимости КПД насоса от разности потенциалов между электродами в кремнийорганической жидкости (3), керосине (2), трансформаторном масле (1).

жидкости, в два раза больший, чем в керосине и трансформаторном масле. КПД ( $\eta$ ) преобразования рассчитывался по отношению механической мощности, затраченной на работу в канале, к полной электрической:

$$\eta = (P \cdot Q) / (I \cdot U). \quad (1)$$

В трансформаторном масле КПД ЭГДН практически не зависит от напряжения (кривая 1, рис. 6). В керосине (кривая 2) с переходом к кремнийорганической жидкости (кривая 3) такая зависимость усиливается. Наибольшее значение КПД преобразования достигнуто в кремнийорганической жидкости  $\sim 10\%$ , в 3 и 1,5 раза выше, чем в трансформаторном масле и керосине соответственно.

#### ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качественное объяснение полученных экспериментальных зависимостей необходимо в связи с тем, чтобы при последующем расширении диапазона опытных данных, имея в виду, прежде

всего, выявление вольт-амперных характеристик (ВАХ) ЭГДН, исходить из предпосылок для поисков количественных закономерностей. Заметим, что помимо КПД, как отношения кинетической энергии к полной, следовало бы ввести понятие КПД упорядоченного движения, как отношение кинетической энергии, идущей непосредственно на сквозную прокачку жидкости, ко всей кинетической энергии, включая энергию возвратных течений. Однако однонаправленное движение определяется течением во внешней ветви циркуляционного контура. Поскольку энергия этого движения фигурирует в числителе формулы (1), заключаем, что она верно определяет КПД. С другой стороны, воспользовавшись формулой Пуазейля для расхода жидкости через трубопровод круглого поперечного сечения радиусом  $R$  и длиной  $l$ , для полезной работы найдем [7]:

$$Q \cdot P = \frac{\pi R^4}{8\mu l} \cdot P^2, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости. Эта работа расходуется на преодоление сил

вязкого трения, для которой, учитывая распределение скорости при пуазейлевском течении, получим:

$$\begin{aligned} -\mu \cdot \int_{(V)} v \cdot \nabla^2 v \cdot dV &= \mu \cdot \int_{(V)} (\nabla \times v)^2 \cdot dV = \\ &= \mu \cdot \int_0^R \left( \frac{dv}{dr} \right)^2 \cdot 2\pi l r dr \equiv \frac{\pi R^4}{8\mu l} \cdot P^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Тот же результат, что и в правой части равенства (2), свидетельствующий о его справедливости. Подставив (2) в (1), найдем:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \cdot P^2}{8\mu l \cdot IU}. \quad (4)$$

Эта формула показывает, что одним из параметров среды, непосредственно влияющих на КПД ЭГДН, является вязкость  $\mu$ , с уменьшением которой возрастает КПД, что и наблюдается на опыте (рис. 6). Чтобы понять, как влияют другие параметры жидкости на КПД, необходимо найти напор  $P$ , фигурирующий в формуле (4). Оценим эту величину из соображений униполярного коронного разряда. При этом, во-первых, исходим из оценки максимального напора, который возможен в статическом режиме, то есть при  $Q = 0$ . Во-вторых, учтем, что электрическая сила в условиях резкой неоднородности поля внутри ЭГДН, как и при коронном разряде, носит чисто кулоновский характер. При этих предположениях

$$-\nabla p + \rho \vec{E} = 0; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E} = k\rho \vec{E} \Rightarrow \rho \vec{E} = \vec{j} / k, \quad (5)$$

где  $\rho$  и  $\vec{j}$  – плотности свободных объемных зарядов и электрического тока;  $k$  – подвижность ионов знака «коронирующего» электрода (эмиттера). Отсюда для оценки перепада давления, вырабатываемого ЭГДН, получим формулу:

$$P \sim \frac{\delta}{s} \cdot \frac{I}{k}, \quad (6)$$

где  $I$  – сила тока;  $\delta$  – расстояние между электродами ЭГДН, а  $s$  – характерная площадь поверхности эмиттера. Подставив выражение (6) в (4), найдем

$$\eta \sim \frac{\pi R^4 \delta^2 I}{8l s^2 \mu k^2 U}. \quad (7)$$

Оценив в формуле (7) силу тока формулой

$$I \sim j s \sim \sigma (U / \delta) s$$

и подставив ее в (7), получим

$$\eta \sim \frac{\pi R^4 \delta \sigma}{8l s \mu k^2}. \quad (8)$$

Однако здесь удельную электропроводность  $\sigma$  нельзя рассматривать как индивидуальную кон-

станту, ибо согласно формулам (5)  $\sigma = k\rho$ . С учетом (8) КПД должен оцениваться по формуле

$$\eta \sim \frac{\pi R^4 \delta}{8l s \mu} \cdot \frac{\rho}{k}. \quad (9)$$

Таким образом, он прямо пропорционален плотности объемного заряда  $\rho$  и обратно пропорционален подвижности «активных» носителей заряда  $k$ . Несмотря на прозрачность этого результата с физической точки зрения, он мало эффективен, ибо неизвестна плотность объемного заряда, к оценке которой переходим. Согласно концепций коронного разряда, придерживаемся пределов разумных допущений, он возникает при некотором критическом напряжении  $U_c$ , и плотность объемного заряда оценивается согласно [8]:

$$\begin{aligned} \rho &= \varepsilon \cdot \nabla \vec{E} \sim \varepsilon \cdot \frac{U - U_c}{\delta^2} \equiv \\ &\equiv \frac{\varepsilon \cdot U_c}{\delta^2} \cdot (U_* - 1) \equiv \rho_m \cdot (U_* - 1), \end{aligned} \quad (10)$$

где введены масштабные (с индексом « $m$ ») и безразмерные (с индексом «\*») единицы измерения:

$$\rho_m \equiv \frac{\varepsilon \cdot U_c}{\delta^2}; \quad U_* \equiv U / U_c; \quad \sigma_m \equiv k\rho_m \equiv \frac{k\varepsilon U_c}{\delta^2}. \quad (11)$$

В последней формуле (11) масштабная единица  $\sigma_m$  имеет физический смысл низковольтной электропроводности, в то время как расстояние  $\delta$  неопределенно, поэтому эта формула послужит для определения следующих величин:

$$\rho_m \equiv \frac{\sigma_m}{k}; \quad \delta^2 \equiv \frac{k\varepsilon U_c}{\sigma_m}. \quad (12)$$

С учетом (10)–(12) из (9) получим:

$$\eta = c \cdot \frac{\pi R^4}{8l s \mu} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \sigma_m U_c}{k}} \cdot \frac{(U_* - 1)}{k}. \quad (13)$$

Эта формула, однако, требует детального анализа, в частности, относительно табличных значений, фигурирующих в ней параметров, а также их взаимосвязи, в частности, между коэффициентами подвижности и вязкости; требует трактовки и определения числового значения коэффициента пропорциональности  $c$ . Пока ограничимся формулой (13), приводя некоторые комментарии к ней.

Прежде всего заметим, что КПД ЭГД насоса сильно зависит от геометрических факторов, особенно от радиуса внешнего трубопровода, – пропорционально  $\sim R^4$ , а увеличение его длины приводит, естественно, к уменьшению КПД. Что касается геометрических параметров ЭГДН, то согласно (13) уменьшение площади эмиттера  $s$  должно благоприятствовать росту КПД, что

также представляется физически понятным. Относительно влияния свойств среды на процесс прокачки, то, исходя из формулы (13), можно констатировать следующее. Как упоминалось, уменьшение вязкости, должно сопровождаться увеличением КПД. Однако следует еще установить связь между подвижностью  $k$  и вязкостью  $\mu$ . Рост удельной проводимости  $\sigma_m$  должен приводить к увеличению КПД. Причем заметим, что электропроводность кремний-органической жидкости примерно в 10 раз больше, чем керосина, а ее КПД выше примерно втрое, что подтверждается опытными данными (рис. 6) в соответствии с корневой зависимостью (13). Существенной оказалась роль подвижности ионов «коронирующего» электрода: чем она меньше, тем больше КПД, результат понятный, ибо с уменьшением подвижности, как следует из формулы (5), возрастают кулоновские силы. Как и следовало ожидать, рост диэлектрической проницаемости среды должен сопровождаться ростом КПД.

Согласно формуле (13), должно наблюдаться линейное увеличение КПД в зависимости от напряжения, что и следует из зависимостей, представленных на рис. 6. Также должна наблюдаться линейная зависимость перепада давления от силы тока. С другой стороны, поскольку

$$E \sim U; \rho \sim (U - U_c) \Rightarrow I \sim j = k\rho E \sim U(U - U_c),$$

то это означает квадратичную зависимость от напряжения в соответствии с графиками на рис. 5.

Поскольку расход жидкости  $Q$  по формуле Пуазейля (см. формулу (2)) прямо пропорционален гидродинамическому напору  $P$ , то и расход квадратично зависит от напряжения, что также находит экспериментальное подтверждение (рис. 3, 4). Таким образом, экспериментально установленные особенности работы ЭГД насоса отражены в формуле (13).

Следовательно, теоретические соображения и полученные на их основе формулы, достоверно отражают физическую сущность результатов исследований характеристик ЭГДН. И в этой связи можно заключить, что созданы необходимые предпосылки для практических расчетов ЭГД насосов. Выяснено, что наилучшими характеристиками по всем показателям обладает кремнийорганическая жидкость. Учитывая стабильность ее свойств под воздействием электрического поля, микрозарядов, температуры и т.п., представляется целесообразным рекомендовать эту жидкость в качестве теплоносителя в ЭГД теплообменниках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кисеев В., Аминев Д., Черкашин В., Мурзин Р. Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников. *Полупроводниковая светотехника*. 2011, (3), 27–31.
2. Кравец В.Ю., Наумова А.Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010, (1), 39–43.
3. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. с. 320.
4. Ashikhmin I.A., Stishkov Yu.K. Structural Features of EHD Flows in Wire-wire Symmetric Systems of Electrodes. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2009, **45**(6), 471–479.
5. Болога М.К., Кожевников И.В., Мардарский О.И. Теплообмен при ЭГД течениях. *Тепловые процессы в технике*. 2010, (11), 507–511.
6. Bologa M.K., Kozhevnikov I.V. Influence of the Electric Field and the Arrangement of the Stages on Multistage Pump Characteristics. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2009, **45**(6), 489–491.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. М.: Наука, 1988. 733 с.
8. Grosu F.P., Bologa An.M., Bologa M.K., Motorin O.V. On the Simulation of a Corona Discharge by the Similarity theory Methods. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2014, **50**(2), 141–148.

Поступила 19.02.14

## Summary

The head-flow rate characteristics are obtained, namely dependencies of the head and flow rate through the electrohydrodynamic pump (EHDP) on voltage and the properties of the working liquid. Head characteristics are determined for hydrostatic and hydrodynamic modes. It is found that the efficiency of the EHDP depends linearly on voltage. Theoretical results agree with experimental ones. Formulas for the calculation of the EHDP are derived. Silicone fluid turned out to have better performance so it is recommended for applications in electrohydrodynamic heat exchangers.

*Keywords: electrohydrodynamic pump, electric field, working medium, head characteristics, efficiency, silicone fluid.*