

Релаксация выходных характеристик электрогидродинамического насоса

М. К. Болога, *Ф. П. Гросу, И. В. Кожевников

*Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова,
e-mail: f.grosu@mail.ru

Изложен принцип работы электрогидродинамического насоса (ЭГДН), сформулированы задачи исследований, которые сводятся к изучению закономерностей и особенностей функционирования ЭГДН, с целью их оптимизации. Представлено описание экспериментальной установки, определены особенности релаксации выходных характеристик одноступенчатого ЭГДН. Приводятся напорные и токовые характеристики в зависимости от времени и напряжения (постоянного), питающего ЭГДН. Выявлены новые результаты при весьма длительной работе ЭГДН, заключающиеся в том, что напорные характеристики являются колеблющимися функциями времени. На основе аналоговой электрической схемы приведена теоретическая модель токопереноса в ЭГДН.

Ключевые слова: электрогидродинамический насос, выходные характеристики, ток, напряжение, диэлектрическая жидкость, законы Кирхгофа, релаксация, токоперенос.

DOI: 10.5281/zenodo.1051298

УДК 532.5:537+536.24:537

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы электрогидродинамических насосов (ЭГДН) основан на явлении электроконвекции, первопричиной которой являются свободные объемные заряды, образующиеся в диэлектрической жидкости под воздействием внешнего электрического поля. Заряды, двигаясь, увлекают нейтральную среду, в результате чего возникает перемешивание жидкости. Скорости электрогидродинамических (ЭГД) течений, в зависимости от напряжения на ЭГДН и электрофизических свойств рабочего вещества, достигают порядка ~ 1 м/с и более. В насосах электроконвекции придается направленный характер за счет подбора геометрии, диэлектрических покрытий электродов и канала в межэлектродном промежутке. Часть энергии электрического поля преобразуется непосредственно в энергию механического движения среды, другая – в тепло.

Известны различные конструкции ЭГДН [1–5], в которых в большинстве случаев используются резко асимметричные электроды: «игла–кольцо», «игла–плоскость», «провода–две проволоки», «лезвие–две проволоки», «провода с перфорированным диэлектрическим покрытием–две проволоки». Ввиду сильной неоднородности электрического поля в окрестности одного из электродов (с меньшим радиусом кривизны поверхности) создаются условия, необходимые для инъекции гомозарядов, в результате чего жидкость теряет локальную электронейтральность и, как следствие, возникают ЭГД течения, которым придается упорядоченный характер, о чем упомянуто выше.

ЭГД насосы выгодно отличаются от традиционных отсутствием движущихся частей, вибраций, шума, а также малой потребляемой мощностью, простотой регулирования их параметров, высокой производительностью, массогабаритными показателями. Эти преимущества особенно востребованы в настоящее время, когда наблюдается тенденция развития радиоэлектронной и компьютерной техники по пути ее миниатюризации. Одновременно возрастают удельные тепловые потоки, выделяемые отдельными элементами и узлами данной техники, нарушаются их режимы работы. Возникает проблема охлаждения малых тепловыделяющих поверхностей, которая успешно может быть решена с помощью высокоэффективных систем охлаждения, разработанных на основе транспорта теплоносителя с помощью ЭГДН.

Принципиальное значение для практического применения ЭГД систем имеет стабильность теплопередающих выходных характеристик, в частности напорных, которые в имеющихся публикациях практически не рассматриваются. В данной работе приведены результаты исследований по затронутым вопросам и, в частности, ресурсных испытаний одноступенчатого ЭГД насоса применительно к режимам его функционирования.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исследования проводились на установке, представляющей собой замкнутый контур с ячейкой (рис. 1), выполненный в виде закрытой кюветы *I* из органического стекла, разделенной

диэлектрической перегородкой 2 на два отсека 3 и 4, заполненных диэлектрической жидкостью. Перегородка снабжена отверстием 5 и окошком, в котором установлена ступень ЭГД насоса 6. Эмиттер 7 насоса выполнен в виде решетки из медных проводов с перфорированным изоляционным покрытием. Коллектор 8 представляет собой решетку из оголенных проводов, установленных на определенном расстоянии друг от друга. Измерение напора, создаваемого ЭГД насосом, производилось пьезометром 9, одновременно регистрировался ток утечки с коллектора. Эксперименты проводились в два этапа. Вначале ресурсные испытания ступени ЭГД насоса с медными электродами в динамическом и статическом режимах производились в керосине ($\sigma = 3 \cdot 10^{-10}$ См/м). На втором этапе установлены последовательно две ступени в кремнийорганической жидкости, коллектор одного из них изготовлен из нержавеющей проволоки 08X18H10 (AISI 304/321).

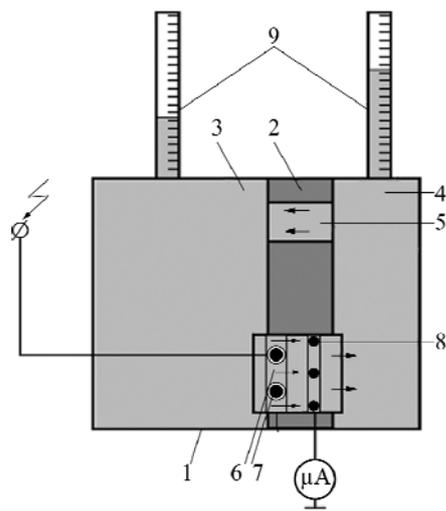


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проводилась подготовительная работа, связанная с промывкой ячейки рабочей жидкостью. После заполнения кюветы керосином или кремнийорганической жидкостью на электроды насоса подавалось постоянное высокое напряжение, генерируемое источником ИВН-50 и измеряемое киловольтметром С196. При этом рабочая жидкость перекачивалась из отсека 4 в 3 через отверстие 5 и обратно через ЭГДН в отсек 4, то есть по замкнутому контуру. В процессе непрерывной работы насоса до 3,5 лет поддерживалось постоянным напряжение 19 кВ. Через определенные промежутки времени регистрировалась сила тока (показания микроамперметра) и напора (давления), последняя более чувствительная к воздействию различных факторов на производительность насоса. В кремнийоргани-

ческой жидкости последовательно установлена дополнительная ступень с коллектором, выполненным из проволоки 08X18H10. Испытания каждой ступени проводились по отдельности, при наличии в потоке неработающей ступени, ежедневно в течение 10 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена зависимость динамического давления при прокачке керосина по замкнутому контуру из отсека 4 в 3 и обратно через окошко в перегородке (рис. 1) от продолжительности работы насоса с медными электродами.

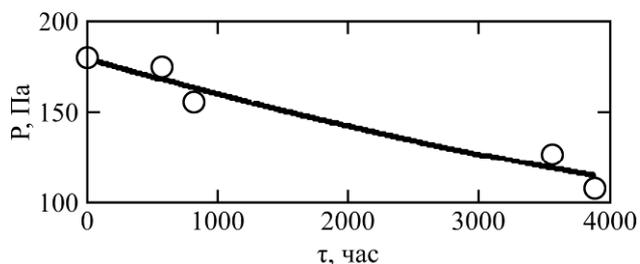


Рис. 2. Изменение динамического давления со временем в керосине.

После подачи напряжения на ЭГДН вначале наблюдается постепенное увеличение напора (продолжительностью 30–40 мин) до достижения максимального значения, затем в течение 4000 часов прослеживается снижение давления на 41%. Такая зависимость напора от времени объясняется изменением параметров электрической цепи.

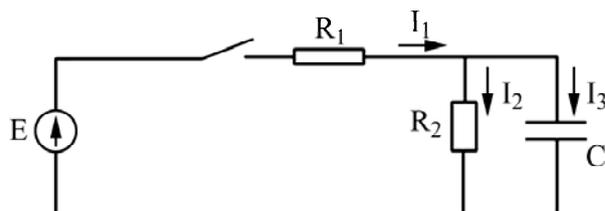


Рис. 3. Простейшая электрическая схема ЭГДН.

Действительно, судя по конструктивной схеме ЭГДН (рис. 1), эмиттер и коллектор с содержащейся между ними диэлектрической жидкостью могут условно рассматриваться как конденсатор с двумя сопротивлениями утечки – одно последовательное конденсатору (R_1), другое параллельное (R_2). Первое отображает внутреннее сопротивление конденсатора, которое при пробое равно нулю, а при отсутствии жидкости (вскипании) – бесконечности. В обоих случаях ЭГДН будет неработоспособен, причем во втором случае последовательное соединение означает еще, что при наличии загрязнения инжектора зарядов ток может вовсе прекратиться. Электрическая схема ЭГДН представлена на рис. 3. На примере этой схемы рассмотрим

принципиальную возможность описания сложных ЭГД процессов их электрическими аналогами.

Составим уравнения Кирхгофа для расчета токов в ветвях схемы:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 &= 0, \\ I_1 R_1 + q / c &= E, \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 &= E, \\ I_3 &= dq / dt, \end{aligned} \quad (1)$$

где q – заряд на обкладках конденсатора, генерируемый эмиттером ЭГД насоса, остальные обозначения общепринятые. Эта система сводится к одному линейному неоднородному уравнению относительно заряда q :

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{\tau} = \frac{E}{R_1} \quad (2)$$

с общим решением

$$q = C_1 e^{-t/\tau} + \frac{E\tau}{R_1}, \quad (3)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, второе слагаемое в (3) – частное решение уравнения (2), а выражение

$$\tau \equiv C(R_1 R_2) / (R_1 + R_2) \quad (4)$$

представляет собой постоянную времени ЭГДН, характеризующую темп зарядки конденсатора. В связи с формулой (4) следует обратить внимание на то, что попытки оценить токи или заряды по ней могут привести к недоразумениям, ибо электрическая емкость зазора «эмиттер-коллектор» весьма мала (порядка десятков или сотен пикофард), поэтому релаксационные процессы по таким подсчетам должны протекать весьма быстро, гораздо быстрее, чем это показывает эксперимент, даже учитывая сопротивления в (4) порядка МОм. Поэтому под емкостью C в (4) следует подразумевать некую эффективную емкость, обусловленную генерированием зарядов не за счет накопительного конденсаторного эффекта, а за счет их инжекции эмиттером. Этот и другие вопросы, связанные с согласованием электрических и гидродинамических параметров, в будущем заслуживают отдельного рассмотрения.

Из общего решения (3) с помощью уравнений (1) находятся токи в ветвях схемы (рис. 3):

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{R_1} - \frac{1}{CR_1} (C_1 e^{-t/\tau} + \frac{E\tau}{R_1}); \\ I_2 &= \frac{1}{CR_2} (C_1 e^{-t/\tau} + \frac{E\tau}{R_1}); \\ I_3 &= -\frac{C_1}{\tau} e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения постоянной интегрирования C_1 заметим, что речь идет о переходном процессе – зарядке конденсатора на схеме, представленной на рис. 3, и в этом процессе в качестве начального условия следует задать нулевой заряд конденсатора, то есть $q(0) = 0$. Другое условие, например кажущееся $I_1(0) = 0$, не приведет к указанному $q(0) = 0$. С учетом сказанного, согласно (3):

$$C_1 = -\frac{E\tau}{R_1}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), находим формулы для токов с учетом начального условия:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{R_1 + R_2} (1 + \frac{R_2}{R_1} e^{-t/\tau}); \\ I_2 &= \frac{E}{R_1 + R_2} (1 - e^{-t/\tau}); I_3 = \frac{E}{R_1} e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда для начальных и установившихся токов (при $t \rightarrow \infty$) соответственно имеем: $I_1(0) = E/R_1$; $I_2(0) = 0$; $I_3(0) = E/R_1$; $I_1(\infty) = E/(R_1 + R_2)$; $I_2(\infty) = E/(R_1 + R_2)$; $I_3(\infty) = 0$. По характеру зависимостей эти результаты представляются правдоподобными. Более того, падение общего тока $I_1(t)$ в цепи и его асимптотическое стремление к нижнему пределу $E/(R_1 + R_2)$ как оказалось апостериори качественно согласуются с экспериментальными данными (рис. 5), принимая во внимание оговорку по поводу «зарядки конденсатора» за счет инжекции.

Относительно зависимости напора от времени (рис. 2) следует заметить, что в этом случае речь идет о квазистационарном процессе, протекание которого пока не находит объяснений. Слишком сильно разнятся временные масштабы явлений, отображенных на рис. 2 и 4. По-видимому, столь медленное убывание гидродинамического напора со временем следует увязать с изменениями, которые претерпевают подвижность ионов жидкости и удельная электропроводность. Сама сущность связи электрических токов и напора (гидродинамического или статического) представляется скрытой в силовом факторе, присутствующем при «коронном разряде», в частности, в формуле для плотности сил \vec{f} в статическом состоянии:

$$\vec{f} = \rho \vec{E} = \vec{j} / k = \nabla p, \quad (8)$$

где ρ – плотность объемных электрических зарядов; k – подвижность ионов знака «коронирующего» электрода, остальные обозначения общепринятые.

Что касается статических испытаний насоса, то получена более стабильная, хотя и колеблющаяся, напорная характеристика (рис. 4). Такой

характер зависимости давления $P(t)$ свидетельствует о том, что имеют место какие-то пока неизвестные, периодически повторяющиеся процессы, возможно, связанные с возникновением и исчезновением центров коронирования, которые в отличие от динамического режима (рис. 2) из-за ограниченности объема будут носить более локальный характер, а потому и в большей степени повторяемые.

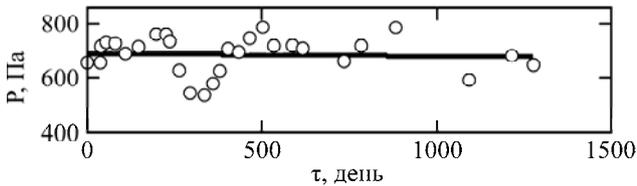


Рис. 4. Зависимость статического напора в керосине от времени.

Сильное снижение напора (до 540 Па) при работе насоса (в течение 336 дней) связано с уменьшением температуры керосина (от 22 до 5°C). В статическом режиме в межэлектродном промежутке в течение всего испытания, как было отмечено, находится один и тот же объем жидкости. Поэтому более выражено должно проявляться воздействие релаксационных процессов. Но результаты исследований свидетельствуют об относительно стабильном значении напора в течение продолжительной работы насоса (3,5 года). После разборки установки на коллекторе обнаружен сильный налет светло-зеленого цвета, свидетельствующий об образовании на поверхности электрода сульфитов и карбонатов меди, имеющих очень низкую электропроводность. Налет препятствует рекомбинации зарядов на электродах, вследствие чего снижается напор насоса. Учитывая, что керосин по своим свойствам не во всех случаях применим как теплоноситель, ресурсные испытания ЭГД насоса были проведены и в кремнийорганической жидкости ($\sigma = 3 \cdot 10^{-11}$ См/м). В ступени насоса с медными электродами установлена ступень с коллектором, изготовленным из проволоки 08X18H10, в целях выяснения влияния коррозии электродов на производительность насоса. Медь с течением времени в керосине и кремнийорганической жидкости покрывается окисной пленкой с низкой электропроводностью, что не обнаружено на нержавеющей стали. Напряжение подавалось на электроды ступени, в то время как ступень с медными электродами, находящимися в набегающем потоке кремнийорганической жидкости, была обесточена. На рис. 5 представлена зависимость динамического давления от времени.

Как и в керосине, при подаче напряжения на электроды насоса в течение 25–30 мин наблюдается увеличение напора, затем постепенное снижение до стационарного состояния (рис. 5, кривая 1). Такое поведение напора может быть объяснено аналогичными изменениями электрического тока (см. формулу (8)), что, по-видимому, свидетельствует о линейной или близкой к тому связи между напором и током. Значительное влияние на динамический напор оказывает продолжительность перерыва («отдых» насоса, когда $U = 0$) в работе насоса (рис. 5, кривая 2). Его отключение от высокого напряжения на 30 дней приводит к увеличению напора на 25%, связанному, видимо, с возможными структурными превращениями жидкости под действием электрического поля. Изменение тока утечки со временем (рис. 6) согласуется с поведением динамического давления, так как прокачка жидкости создается движением ионов. Обесточивание установки на определенное время приводит к увеличению производительности насоса (рис. 6, кривые 1 и 2). Перерыв в работе ЭГДН благоприятствует его регенерации, очевидно, ввиду восстановления свойств ионов в отсутствие внешнего электрического поля, ведь известно понятие о «старении» ионов, связанном, в частности, с их кластеризацией [6].

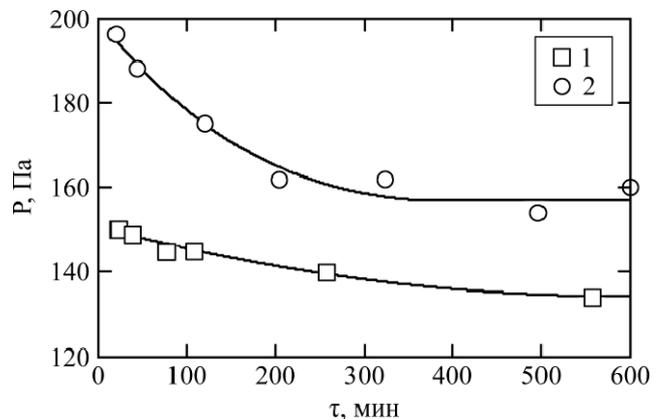


Рис. 5. Зависимость динамического давления от времени.

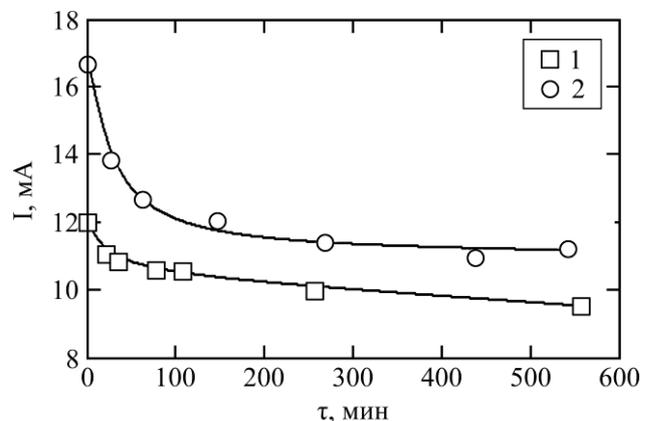


Рис. 6. Зависимость тока от времени при нержавеющей коллекторе: 1 – до обесточивания насоса; 2 – после включения насоса через 30 дней.

С увеличением разности потенциалов между электродами возрастают как динамические, так и статические напоры (рис. 7), что согласуется с ранее проведенными исследованиями [7].

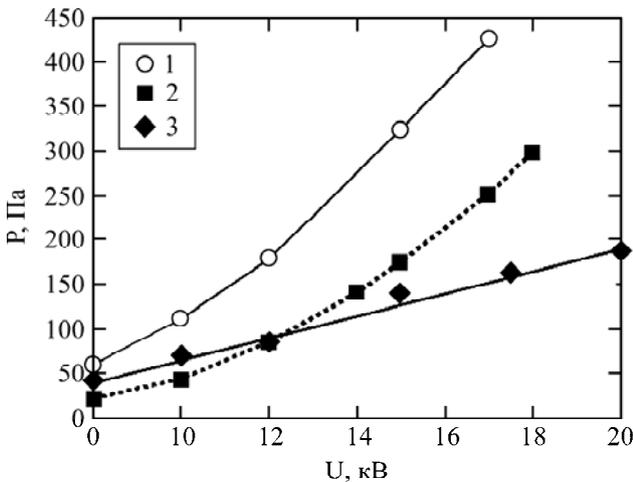


Рис. 7. Зависимость давления от напряжения (коллектор из нержавеющей стали): 1 – статическое; 2 – статическое (1287 часов); 3 – динамическое.

Зависимость статического напора от напряжения (кривые 1 и 2) ближе к параболической, что отражает аналогичный характер вольт-амперных характеристик коронного разряда, а динамического (кривая 3) – к прямой, что связано с падением напора вследствие движения жидкости. Кривые 1 и 3 (рис. 7) получены в самом начале ресурсных испытаний, кривая 2 (рис. 7) – через 1287 часов работы насоса в динамическом режиме. При этом статическое давление понизилось на 40–50% в зависимости от напряжения на электродах. Во время работы насоса с коллектором из нержавеющей стали ступень с медными электродами была обесточена. Статическое давление, развиваемое насосом с медными электродами (рис. 8, кривые 1 и 2) и соответствующее тем же самым моментам времени, что и в зависимостях 1 и 2 на рис. 7, значительно выше.

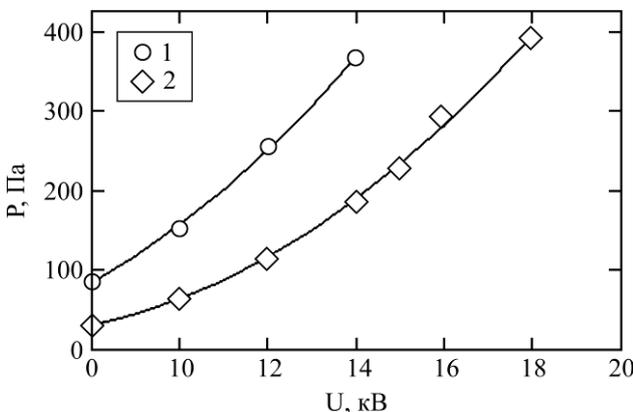


Рис. 8. Зависимость статического давления от напряжения (медный коллектор).

Это объясняется тем, что изготовление идеально идентичных ступеней практически невоз-

можно, особенно с решетчатыми электродами. Изменение динамического давления, генерируемого насосом с коллектором из нержавеющей стали (первая ступень), представлено на рис. 9. За 600 часов работы напор ступени снизился на 24%. После отключения его от напряжения на 30 дней наблюдается восстановление напорной характеристики насоса. При этом вторая ступень с медными электродами находится в потоке жидкости, созданном первой ступенью. Через 1293 часа отключили первую ступень, подали напряжение на электроды второй ступени. В этом случае начальное значение давления второй ступени равно напору первой ступени, что свидетельствует об изменениях поверхности медных электродов (в отсутствие электрического поля). В течение 580 часов давление понизилось на 60%. После включения вместо второй ступени первой восстанавливается напорная характеристика, оставаясь неизменной в течение 1310 часов. В дальнейшем за 310 часов происходит резкое снижение давления. Ступень с коллектором из нержавеющей проводов работает стабильно более продолжительное время, чем из медных. В результате осмотра ступеней насоса на электродах обнаружен налет бледно-желтого цвета (рис. 10), особенно на коллекторах.

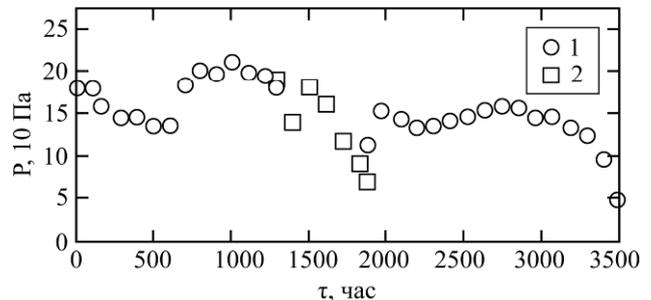


Рис. 9. Зависимость давления от времени: 1 – коллектор из нержавеющей стали; 2 – медный коллектор.

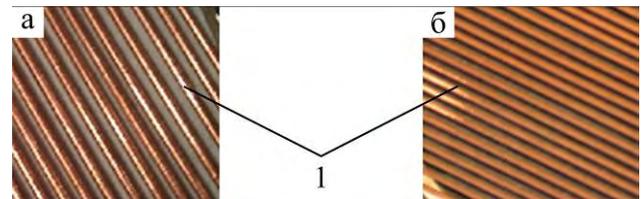


Рис. 10. Электрод-коллектор: (а) – первоначальное состояние; (б) – после ресурсных испытаний: 1 – участок поверхности, очищенной от налета.

Анализ показал, что при работе насоса в кремнийорганической жидкости под воздействием электрического поля на поверхности электродов образуется и оседает двуокись кремния, которая имеет большое удельное сопротивление. Структура покрытия рыхлая, неравномерная, толщиной до 30 мкм, что значительно снижает рекомбинацию ионов на электродах. Следует также учитывать возможную коррозию электродов, даже в отсутствие электрического

поля, в виде формирования окисной пленки на поверхности, в частности меди в кремнийорганической жидкости. Поэтому происходит резкое падение давления ступени с медными электродами (рис. 9). В более проводящих средах (керосине), имеющих электропроводность на два порядка выше, чем кремнийорганическая жидкость, эти процессы менее выражены. В таких средах скорости течений в межэлектродном промежутке более высокие. Под действием давления, оказываемого потоком жидкости на коллектор, часть налета отлетает с поверхности и устанавливается равновесие между процессами его образования и разрушения. Перешедшие в жидкость частицы увеличивают ее электропроводность за счет образования дисперсной среды. В то же время происходит и электроочистка жидкости, влияние которой заметно в начальный период работы насоса, как в керосине, так и в кремнийорганической жидкости.

ВЫВОДЫ

1. Сформулирована задача исследования релаксационных процессов в ЭГД насосах, их напорных и ампер-временных характеристик в зависимости от режима (статического, динамического) и длительности работы.

2. Установлено, что зависимость напора от времени вследствие релаксационных процессов падает, причем более стабильными оказываются статические характеристики.

3. Напряжение приблизительно квадратично влияет на статический напор и линейно на динамический.

4. Ток через ЭГДН со временем уменьшается аналогично динамическому напору.

5. Перерывы в работе ЭГДН, особенно длительные, благоприятно сказываются на производительности насосов.

6. Установлены изменения со временем свойств поверхностей электродов ЭГДН в зависимости от материала электродов и прокачиваемой жидкости.

7. Основной причиной снижения напорной и соответственно расходной характеристик ЭГД насоса является образование диэлектрического

покрытия на электродах, особенно на коллекторе.

8. Предложена электрическая модель функционирования ЭГДН, подтверждающая принципиальную возможность адекватного описания электрогидродинамических процессов.

9. Требуются дальнейшие исследования для окончательного выявления особенностей функционирования ЭГД насосов в различных физических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Russel M.K., Selvaganapathy P.R., Ching C.Y. *J Electrostat.* 2016, **82**, 48–54.
2. Gharraei R., Esmaeilzadeh E., Hemayathah M., Danallfar J. *J Electrostat.* 2011, **69**, 43–53.
3. Masahito Nishikawara, Mitsuhiro Shimada, Mizuki Saigo, Hideki Yanada. *J Electrostat.* 2016, **84**, 23–31.
4. Jamal Seyed-Yagoobi. *J Electrostat.* 2005, **63**, 861–869.
5. Cojevnicov Igor, MD; Şchileov Vladimir, MD; Bologa Mircea, MD. Pompă electrohidrodinamica multietajata, MD. Patent, 1027.
6. Леб Л. *Основные процессы электрических разрядов в газах.* М.: Физматгиз, 1950. С. 672.
7. Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhevnikov I.V., Policarpov A.A. et al. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2014, **50**(5), 414–418.

Поступила 16.06.17

Summary

The principles behind the electrohydrodynamic pump (EHDP) action are stated. The research tasks, which are focused on the study of the regularities and peculiarities of the EHDP operation with the aim of its optimization, are formulated. A description of the experimental setup is presented and the peculiarities of the output characteristics relaxation of a single-stage EHD pump are investigated. The dependencies of pressure and current on time and voltage (DC) on the electrodes are given. It was found that after a very long operation of EHDP the pressure characteristics are oscillating functions of time. A theoretical model of the electric current transfer in EHDP, based on the analog electric circuitry, is presented.

Keywords: electrohydrodynamic pump, output characteristics, current, voltage, dielectric fluid, Kirchhoff laws, relaxation, electric current transfer.