

Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 2. Одно- и многоступенчатые электрогидродинамические насосы

И. В. Кожевников, М. К. Болога*

*Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, *e-mail: mbologa35@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.04.2021

После доработки 23.09.2021

Принята к публикации 27.09.2021

Исследуются многоступенчатые ЭГД насосы с электродами диафрагма–пластина с отверстием и проволока–пластина с отверстием. Установлено, что с помощью потокоограничивающих диафрагм можно значительно улучшить характеристики насоса. Указано, что в магистральных многоступенчатых ЭГД насосах предпочтительно использование электродов решетчатого типа, изготовленных из оголенных и покрытых перфорированной изоляцией проводов. Определены оптимальные геометрические параметры электродов, потокоограничивающих диафрагм, диэлектрических покрытий, межэлектродных расстояний. Рассмотрено влияние электрофизических свойств рабочей среды и гальванически развязанных источников высокого напряжения на производительность многоступенчатого насоса. Показаны возможные способы снижения взаимного влияния ступеней на его выходные параметры. Получены формулы, достоверно отражающие физическую сущность результатов исследований характеристик ЭГД насосов. Выяснено, что лучшими характеристиками обладает кремнийорганическая жидкость и, учитывая стабильность ее свойств под воздействием электрического поля, микрозарядов, температуры, рекомендовано ее использование в качестве теплоносителя в ЭГД теплообменниках. Выявлены причины ухудшения характеристик насоса при продолжительной работе и отмечены способы снижения влияния этих факторов на выходные параметры.

Ключевые слова: электрогидродинамический насос, многоступенчатый, диэлектрическая жидкость, напор, расход, диэлектрическое покрытие, перфорация, КПД (коэффициент полезного действия), стержневые (цилиндрические) электроды, диафрагма, пластина с отверстием, решетки, гальванически развязанные источники

УДК 532.5:537 + 536.24:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.31>

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики электрогидродинамических насосов (ЭГДН) в значительной мере зависят от процессов зарядообмена на границе электрод–жидкость и, естественно, чем интенсивнее ионизация рабочей среды за счет инжекции зарядов с эмиттера [1] и ее нейтрализация на коллекторе, тем выше производительность, которая также определяется организацией ЭГД течений в межэлектродном промежутке (МЭП) и состоянием поверхности электродов, в частности наличием диэлектрического налета [2]. Независимо от геометрии электродов, в МЭП, как правило, образуются возвратные (вихревые) течения [2–4], в которых происходит основная диссипация энергии электрического поля. Образование налета, особенно на коллекторе, существенно ухудшает характеристики насоса. В то же время нанесение определенным образом

изоляционного покрытия на эмиттер способно повысить выходные параметры ЭГДН. Возвратные течения могут быть подавлены путем сужения канала, это, однако, сопровождается возрастанием гидравлического сопротивления МЭП и уменьшением интенсивности ЭГД течения. Поэтому целесообразно использовать диэлектрические покрытия, оказывая воздействие на инжекцию зарядов с электродов при частичном подавлении вихревых течений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭГДН С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДОВ

ЭГДН с электродами диафрагма–пластина с отверстием и проволока–пластина с отверстием

Установка для исследования эффективности влияния диэлектрического покрытия на

процессы инжекции зарядов с электродов при частичном подавлении вихревых течений, следовательно, на характеристики ЭГДН, состояла из прямоугольной емкости, заполненной рабочей средой – керосином, в которой установлен ЭГД насос (рис. 1). В коаксиальном диэлектрическом корпусе 3 размещены электроды 1 и 2.

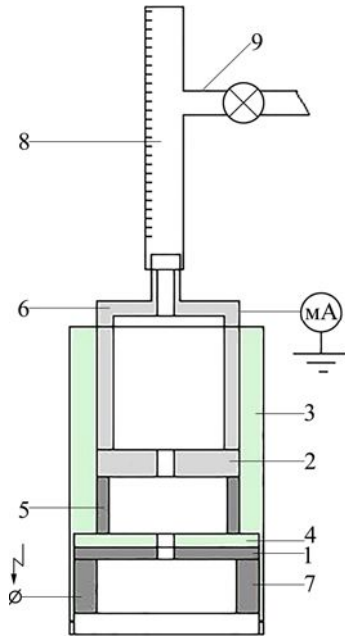


Рис. 1. Схема электрогидродинамического насоса.

Электроды выполнены в виде плоскопараллельных пластин с одним или несколькими сквозными отверстиями (диафрагмами). Вплотную к эмиттеру 1, со стороны коллектора 2, установлена диэлектрическая пластина 4 с отверстием. Расстояние l между электродами 1 и 2 варьировалось с помощью диэлектрических втулок 5. Положение электродов фиксировалось с помощью муфт 6 и 7. Выходной патрубок насоса соединялся с пьезометром 8 со сливом 9 для измерения расхода. Напор, создаваемый насосом, определялся по разнице уровней рабочего вещества в пьезометре и емкости. Измерения производились при нулевом расходе, что позволило достовернее выявить влияние различных факторов на работу ЭГД насоса. На рис. 2 представлены зависимости напорной характеристики насоса с одним сквозным отверстием в каждом из электродов, расположенных соосно друг другу, от напряжения.

Диаметр (d) отверстий в эмиттере существенно влияет на характеристики насоса. По мере уменьшения d напряженность электрического поля на краях отверстий увеличивается, что приводит к повышению напора (кривые 1 и 2, рис. 2). Обратная

закономерность наблюдается при увеличении диаметра d_1 отверстия в коллекторе (кривые 3 и 4, рис. 2). Значительное воздействие на параметры насоса оказывает толщина эмиттера d_2 , определяющая также степень инжекции зарядов с кромки отверстия в жидкость (кривые 1 и 4, рис. 2). Увеличение количества отверстий N в электродах приводит к снижению напора, создаваемого насосом (рис. 3), что объясняется взаимным влиянием отверстий и неэквивалентностью процессов, происходящих в них.

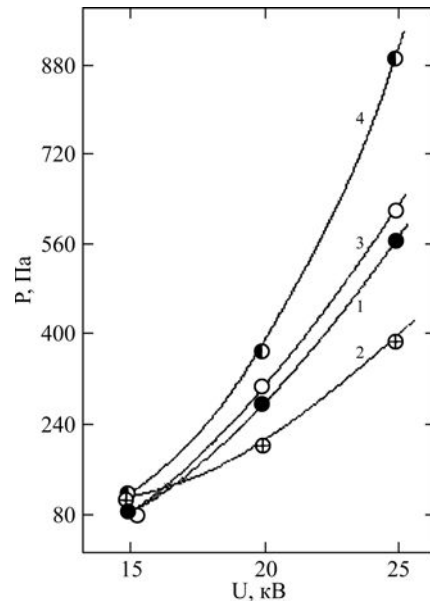


Рис. 2. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами: 1 – $d = d_1 = 1$ мм; 2 – $d = d_1 = 2$ мм, $d_2 = 1$ мм; 3 – $d_1 = 2,5$ мм; 4 – $d_1 = 1$ мм, $d = 1$ мм, $d_2 = 0,1$ мм; $l = 2,8$ мм. В эмиттере и коллекторе по одному отверстию.

Нарушение соосности отверстий в эмиттере и коллекторе ухудшает напорную характеристику (кривые 1, 2, рис. 3). Возрастает сопротивление, оказываемое коллектором направленному потоку жидкости от отверстия в эмиттере. Полярность приложенного к электродам потенциала также значительно изменяет параметры насоса, что в основном связано с электрофизическими свойствами рабочего вещества (кривые 3 и 4, рис. 3). Зависимость характеристик насоса от толщины коллектора не обнаружена, следовательно, определяющими являются процессы на поверхности коллектора, обращенной к эмиттеру, и в объеме жидкости в межэлектродном промежутке, о чем свидетельствует зависимость напора от межэлектродного расстояния (рис. 4). При l , равном толщине изоляционного покрытия b , сквозная прокачка практически отсутствует.

По мере увеличения l уменьшается гидравлическое сопротивление МЭП и возрастает интенсивность электроконвективных течений в свободном пространстве между изоляционным покрытием эмиттера и

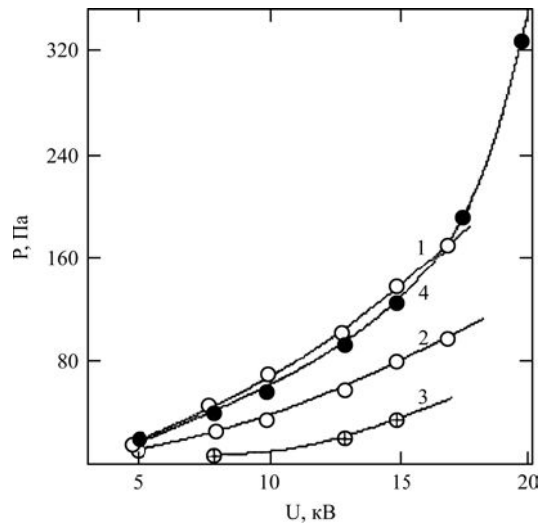


Рис. 3. Изменение напора с разностью потенциалов между электродами при различной соосности и полярности электродов: 1 – соосно; 2 – не соосно; $d = d_1 = 1,5$ мм, $d_2 = 0,2$ мм; $b = 2$ мм (b – толщина изоляционного покрытия); 3 – на эмиттере «+»; 4 – на эмиттере «-», $d = d_1 = 1,5$ мм, $d_2 = 0,2$ мм; $b = 1$ мм; $l = 3,3$ мм; $N = 30$.

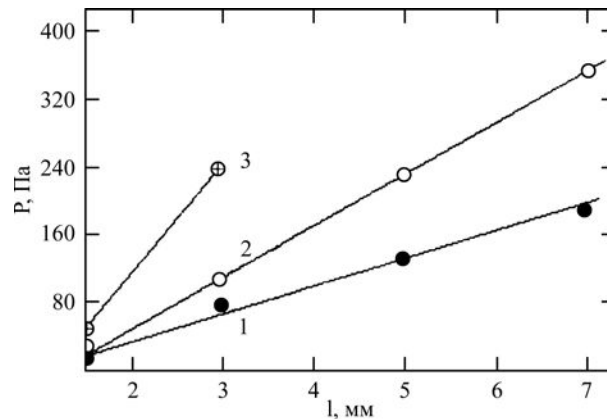


Рис. 4. Зависимость напора от межэлектродного расстояния при различных напряженностях электрического поля (E), кВ/см: 1 – 30; 2 – 40; 3 – 60; $d = d_1 = 1,5$ мм, $d_2 = 0,2$ мм; $b = 0,5$ мм; $N = 30$.

коллектором. Вихрения, которые образуются в этом промежутке, особенно у кромок эмиттера, оказывают дополнительно подсосывающее воздействие на рабочую среду, проходящую через отверстие эмиттера. Повышение разности потенциалов на электродах приводит к переходу диссоциационного в инжекционный механизм ЭГД течения с преобладающей инжекцией зарядов с кромок эмиттера, приводящей к увеличению степени ионизации жидкого диэлектрика и, как следствие, к резкому увеличению напора (кривая 4, рис. 3). Такая же зависимость наблюдается при росте напряженности электрического поля в МЭП (кривые 1, 2, 3, рис. 4). Пороговый переход диссоциационного в инжекционный режим ЭГД течения экспериментально наблюдался в системах электродов игла-плоскость и лезвие-плоскость [5–7], в которых структура ЭГД течений аналогична, что и в исследуемой системе электродов. Увеличение количества отверстий от 30 до 100 практически не оказывает влияние на напорную характеристику, что позволяет легко изменить производительность насоса. Плоские электроды с отверстием без

изоляционного покрытия на эмиттере использованы в многоступенчатом насосе [8]. Увеличение оголенной поверхности эмиттера приводит к возрастанию тока утечки с коллектора и соответственно к снижению эффективности насоса. При замене эмиттера (пластины с отверстием) на провод диаметром 1 мм в лаковой изоляции с перфорацией в виде насечки (по направляющей поверхности провода) шириной 0,1 мм, являющейся центром инжекции зарядов с электрода, значительно улучшается напорная характеристика насоса (рис. 5).

В случае эмиттера-пластины со сквозным отверстием, на кромках которого происходит инжекция зарядов и ионизация диэлектрической жидкости, напорная характеристика (кривая 1) значительно хуже. При этом концентрация напряженности электрического поля ниже, чем на перфорации и игле, что снижает степень электризации рабочей среды. Также следует отметить неустойчивость электрогидродинамического течения, связанную с неравномерностью зарядки жидкости на протяженной кромке отверстия. Существенное

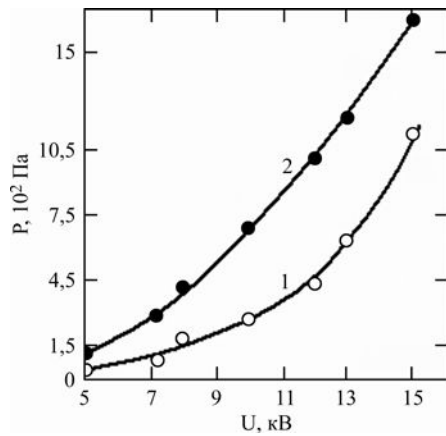


Рис. 5. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами: 1 – плоская пластина; 2 – провод с перфорацией.

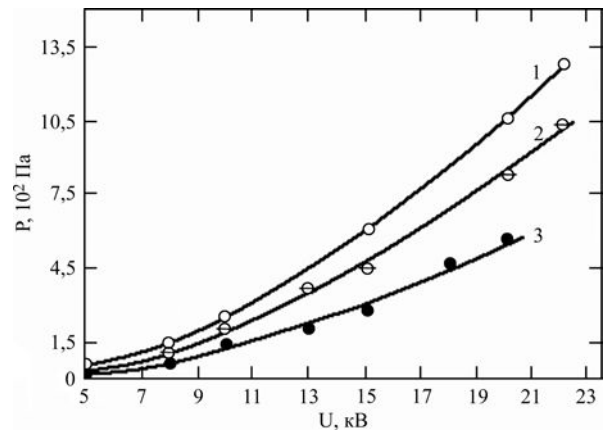


Рис. 6. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами при различной толщине диэлектрической пластины b , мм: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0.

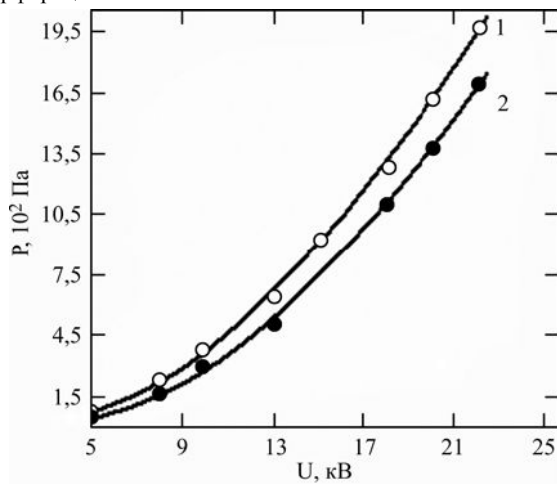


Рис. 7. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами при различном диаметре отверстия в диэлектрической пластине d_3 , мм: 1 – 1,5; 2 – 2,0.

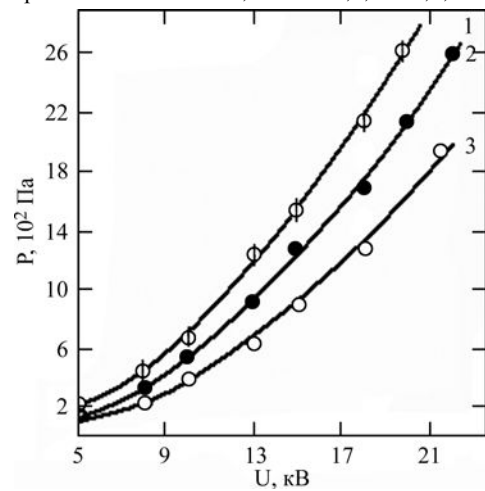


Рис. 8. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами при различном расстоянии между электродами l , мм: 1 – 1,2; 2 – 2,0; 3 – 3,0.

влияние на характеристики насоса оказывает толщина b диэлектрической пластины, расположенной вплотную к эмиттеру (рис. 6). По мере увеличения b при постоянном межэлектродном расстоянии l уменьшается толщина слоя жидкости между диэлектрической пластиной и коллектором, что приводит к перераспределению электрического поля и повышению гидравлического сопротивления межэлектродного промежутка. В результате ухудшается напорная характеристика (кривые 1–3, рис. 6). Варьирование b менее 1 мм не оказывает воздействия на параметры насоса, а уменьшение диаметра отверстия d_3 в диэлектрической пластине несколько повышает напор (кривые 1 и 2, рис. 7). Диэлектрическая пластина с отверстием играет роль диафрагмы, ограничивающей возвратные течения, создающие подсосывающий эффект в зоне перфорации на проволоке. Межэлектродное расстояние l также влияет на характеристику насоса (рис. 8). Это улучшение связано с уменьшением l при неизменной разности потенциалов между электродами (кривые 1–3, рис. 8) за счет роста напряженности поля E .

Такая же зависимость наблюдается с увеличением l при постоянном E (рис. 9), что объясняется снижением гидравлического сопротивления межэлектродного промежутка.

В значительной степени напор, создаваемый насосом, зависит от диаметра d_1 отверстия в коллекторе. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами при различных d_1 представлена на рис. 10 (кривые 1–3). Оптимальные результаты достигнуты в случае $d_1 = 1$ мм. С уменьшением диаметра отверстия в коллекторе увеличивается напряженность электрического поля за счет сокращения расстояния между перфорацией и кромкой отверстия и неустойчивости электрогидродинамического течения, характерного для системы электродов игла-кольцо. Замена коллектора-пластины с отверстием на металлическую сетку также приводит к улучшению напора (кривые 2–4). Последнее позволяет использовать в качестве коллектора сетку (при некотором снижении напора, кривые 1, 4), что упрощает конструкцию насоса. Установлены оптимальные параметры насоса (b, l, d, d_1, d_2, d_3). Получен максимальный

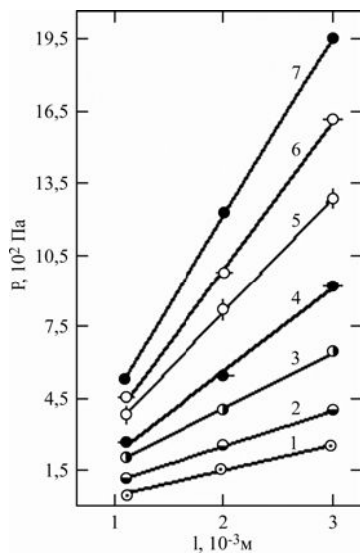


Рис. 9. Зависимость напора от расстояния между электродами при различных напряженностях поля E , кВ/см: 1 – 27; 2 – 33,3; 3 – 43,3; 4 – 50; 5 – 60; 6 – 66,7; 7 – 73,3.

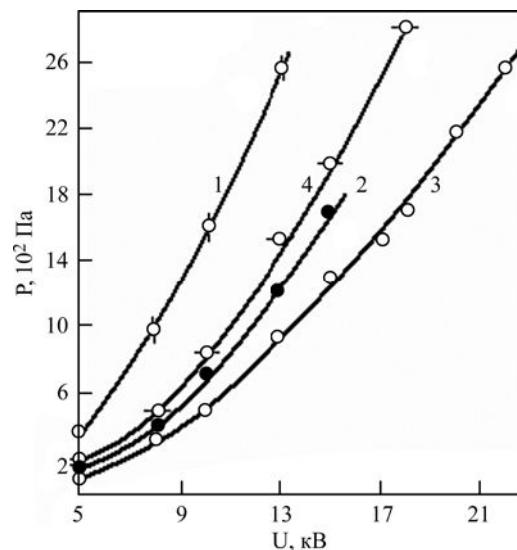


Рис. 10. Зависимость напора от разности потенциалов при различном диаметре отверстия в коллекторе d_1 , мм: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0; 4 – коллектор-сетка (1×1 мм).

статический напор, равный 5025 Па (625 мм столба керосина), что не является пределом. С помощью потокоограничивающих диафрагм и используя возвратные (ячеистые) течения в свободном слое жидкости межэлектродного пространства, можно значительно улучшить характеристики электрогидродинамических насосов с системой электродов диафрагма-пластина с отверстием и проволока-пластина с отверстием. Однако возможности таких ЭГДН ограничены по производительности (в части расхода перекачиваемой диэлектрической жидкости). Для прокачки диэлектрических жидкостей по магистральным каналам с расходом от нескольких десятков до сотни (и выше) мл/с предпочтительнее применение электродов решетчатого типа (образованных из натянутых на оправе проводов), при которых площадь проходного сечения электродов для рабочей среды значительно выше.

Характеристики ЭГДН с решетчатыми электродами

1. *Влияние гальванически развязанных высоковольтных источников на параметры двух- и четырехступенчатого насосов.* Исследования ЭГД насосов с проволочными (цилиндрическими) электродами проводились в работах [9, 10], но использование перфорированных изоляционных покрытий значительно повышает характеристики подобных систем [2]. В связи с этим нами были выполнены исследования ЭГДН с решетчатыми электродами, изготовленными из оголенных и с перфорированным диэлектрическим покрытием проводов.

Использовалась установка, состоящая из прямоугольной емкости, заполненной рабочей средой – трансформаторным маслом электропроводностью $\sigma = 0,9 \times 10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, в которой установлен двухступенчатый ЭГД насос (рис. 11). Ступени 1 и 2 размещены в прямоугольном корпусе 3 из органического стекла. Каждая ступень состоит из двух электродов – эмиттера и коллектора, выполненных в виде решеток из натянутых на прямоугольной диэлектрической оправе (изготовленной из ударопрочного полистирола) параллельно друг другу проводов $\varnothing 1$ мм с определенным шагом. На провода эмиттера нанесены изоляционные (лаковые) покрытия с перфорациями со стороны коллектора в виде насечек (по направляющей поверхности провода) шириной 0,1 мм, являющиеся центрами инъекции зарядов с электродов. Electrodes ступеней склеены между собой с зазором $l = 2$ мм. Первая ступень 1 (рис. 11) приклеена к корпусу 3 и неподвижна. Ступень 2 склеиванием соединена с выходным патрубком 4 насоса и может перемещаться вдоль прямоугольного канала, образованного корпусом 3. В боковой стенке корпуса сделаны пазы 5 и 6 для перемещения токоподводов при изменении расстояния l_1 между ступенями. Последнее определялось с помощью делений, нанесенных на боковой стенке корпуса 3. Выходной патрубок насоса соединен с пьезометром 7, предназначенным для измерения давления (напора), создаваемого насосом. Высокое напряжение подавалось от двух высоковольтных источников, один из которых питался от аккумулятора, а другой – от сети 220 В. Эксперименты проводились при нулевом расходе ЭГДН.

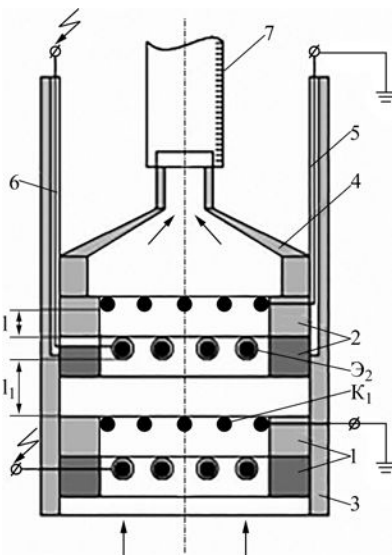


Рис. 11. Схема двухступенчатого электрогидродинамического насоса.

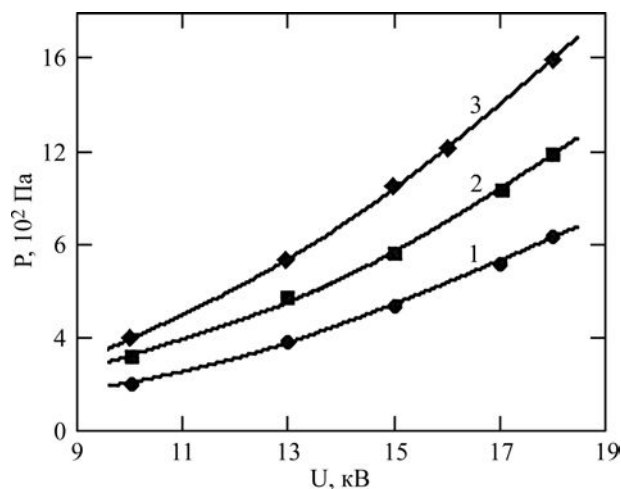


Рис. 12. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами: 1 — одна ступень; 2 — две ступени; 3 — две ступени, подключенные к гальванически развязанным источникам высокого напряжения; $l = 2$ мм, $l_1 = 2$ мм.

Зависимости напорной характеристики двухступенчатого насоса от типа используемого высоковольтного источника представлены на рис. 12. При подключении обеих ступеней к одному источнику напорная характеристика насоса (кривая 2, рис. 2) пропорциональна давлению, создаваемому одной ступенью (кривая 1, рис. 12), умноженному на коэффициент $k \approx 1,4$. Это объясняется тем, что между эмиттером \mathcal{E}_2 (рис. 11) и коллектором K_1 под действием электрического поля возникают силы Кулона, которые действуют на ионы, не рекомбинировавшие на коллекторе K_1 , создавая дополнительное сопротивление основному потоку рабочего вещества. Значительно слабее влияние этих сил при подключении ступеней к отдельным высоковольтным источникам, гальванически развязанным (кривая 3, рис. 12). При этом напорная характеристика двухступенчатого насоса улучшается почти в два раза ($k \approx 1,93$). Однако некоторое взаимное влияние ступеней сохраняется за счет поляризационных эффектов.

Взаимодействие ступеней может быть ослаблено также за счет увеличения расстояния между ними (рис. 13). При этом практически отсутствует зависимость напора от l_1 при низком напряжении (кривая 1). С повышением напряжения зависимость $P = f(l_1)$ до $l_1 = 8$ мм становится круче (кривые 2 и 3), что свидетельствует об усилении взаимного влияния ступеней. В дальнейшем давление достигает стационарного состояния и в диапазоне $l_1 = 10\text{--}14$ мм не изменяется. Следовательно, при $l_1 \geq 10$ мм ступени не взаимодействуют, и напор двухступенчатого насоса становится равным алгебраической сумме давлений, создаваемых каждой ступенью в условиях одноступенчатого насоса.

В целях выяснения эффективности использования гальванически развязанных источников в насосах со ступенями более двух дополнительно к существующим установлены две ступени. Схема подключения электродов ступеней ЭГДН показана на рис. 14.

Полученные зависимости (кривые 1 и 2, рис. 15) свидетельствуют о снижении влияния

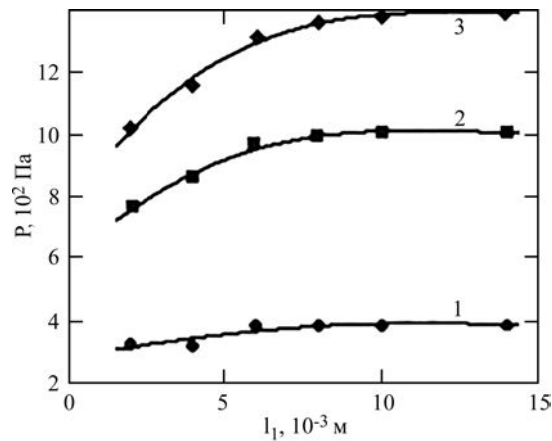


Рис. 13. Зависимость напора от расстояния между ступенями в двухступенчатом насосе при различных напряжениях, U , кВ: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 17.

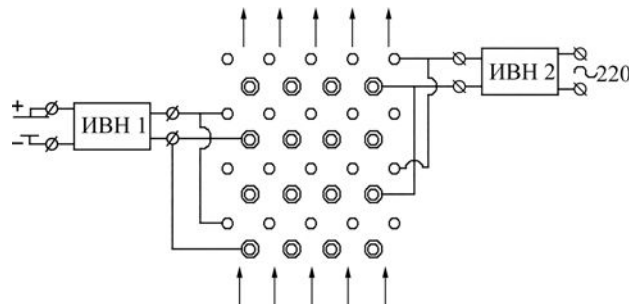


Рис. 14. Схема подключения электродов насоса к источникам высокого напряжения.

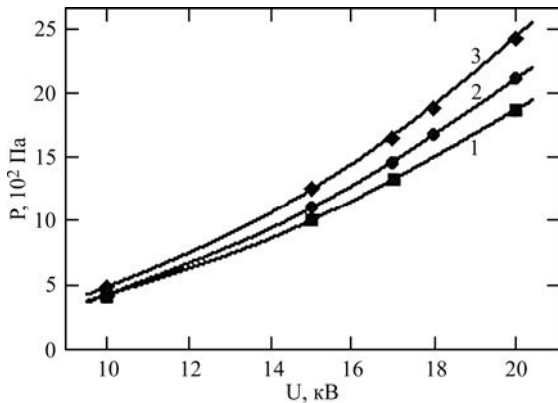


Рис. 15. Зависимость напора от разности потенциалов между электродами при различных способах соединения электродов с источниками напряжения; 1, 3 – к одному источнику; 2 – согласно рис. 14.

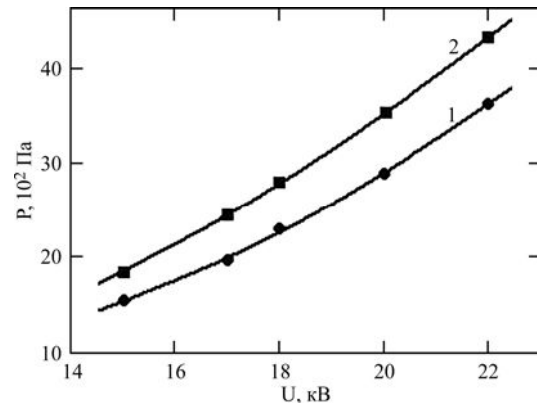


Рис. 16. Зависимость напора от разности потенциалов при различных способах соединения электродов с источниками напряжения: 1 – к одному источнику; 2 – согласно рис. 14.

гальванически развязанных источников на характеристику четырехступенчатого насоса. Повышение напора составляет не более 10% от давления, создаваемого насосом, подключенным к одному источнику (кривая 1, рис. 15). С ростом l_1 , в частности при $l_1 = 4$ мм, гальваническая развязка источников не оказывает влияние на выходную характеристику насоса (кривая 3, рис. 15). Но последняя изменяется при увеличении зазора l_2 между второй (начало отсчета от нижней ступени, рис. 14) и третьей ступенями (кривая 1 и 2, рис. 16). На расстоянии $l_2 = 10$ мм ступени 3, 4 практически не влияют на ступени 1, 2. Использование гальванически развязанных источников снижает взаимодействие между третьей и четвертой (1- и 2-й) ступенями, что повышает давление, создаваемое насосом, на 20% (при $U = 22$ кВ).

Применение гальванически развязанных источников эффективно при зазорах между ступенями, сравнимых с межэлектродным расстоянием, и количеством ступеней не более двух. Оптимальное расстояние между ступенями насоса, подключенного к одному источнику напряжения, составляет 10 мм (в исследованном диапазоне напряженности электрического поля), что сказывается на размерах преобразователя. С точки зрения уменьшения геометрических параметров многоступенчатого насоса целесообразно использование гальванически развязанных источников и разнесение отдельных или групп ступеней на расстояние, близкое к оптимальному. Для снижения взаимного влияния ступеней в многоступенчатом насосе необходимо обеспечение эффективной нейтрализации прокачиваемой жидкости на

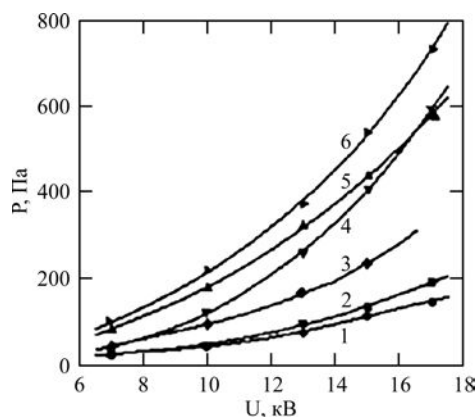


Рис. 17. Зависимость напора от напряжения на электродах при различных расстояниях между ступенями ЭГДН: 1 – одиночная ступень с перфорированным изоляционным покрытием на коллекторе; 2 – ступень без диэлектрического покрытия на коллекторе; 3 – две ступени, $l_1 = 47,7$ мм; 4 – две ступени, $l_1 = 2,7$ мм; трансформаторное масло ($\sigma = 1,3 \times 10^{-11}$ См/м); 5 – $l_1 = 47,7$ мм; 6 – $l_1 = 2,7$ мм, смесь трансформаторного масла с бутиловым спиртом ($\sigma = 4,8 \times 10^{-10}$ См/м).

коллекторах, сокращающей воздействие не рекомбинировавших зарядов за межэлектродным промежутком. Это возможно за счет увеличения площади поверхности коллектора или размещения дополнительного электрода, в частности стержневого (цилиндрического), что также приводит к росту геометрических размеров насоса. В связи с этим нами предложено интенсифицировать процесс зарядки среды за МЭП знаком полярности коллектора путем нанесения перфорированного изоляционного покрытия в виде насечек на стержневые электроды коллектора со стороны, обратной по отношению к эмиттеру.

2. *Эффективность нанесения перфорированного (в виде насечек) изоляционного покрытия на коллектор первой ступени в двухступенчатом насосе.* Исследования проводились на установке, описанной выше (рис. 11). Дополнительно нанесено перфорированное изоляционное покрытие на коллектор K_1 со стороны, обращенной к эмиттеру \mathcal{E}_2 второй ступени. В качестве рабочей среды использовались: трансформаторное масло, смесь трансформаторного масла с бутиловым спиртом, полиэтилсилоксановая жидкость (ПЭС-1). Эксперименты проводились при нулевом расходе, что позволило выявить эффективность предложенного метода. Зависимости напора, создаваемого двухступенчатым насосом, от напряжения на электродах при различных расстояниях между ступенями представлены на рис. 17. Наличие изоляционного покрытия с перфорациями на определенной части поверхности коллектора K_1 (рис. 11), как показали предварительные исследования, практически не оказывает влияние на статическую характеристику одиночной

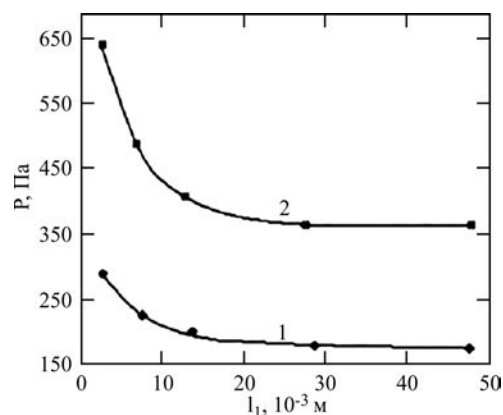


Рис. 18. Зависимость напора от расстояния между ступенями при различных напряжениях между электродами U , кВ: 1 – 13; 2 – 17 ($\sigma = 1,3 \times 10^{-11}$ См/м).

ступени (кривая 1 и 2, рис. 17). Также отсутствует воздействие изоляционного покрытия K_1 на выходные параметры двухступенчатого насоса при больших $l_1 = 47,7$ мм (кривые 1–3, рис. 17). По мере уменьшения расстояния между ступенями с $l_1 = 12$ –14 мм (рис. 18) и с повышением напряжения эффективность влияния изоляционного покрытия возрастает до 70–80% от давления, создаваемого двухступенчатым насосом при $l_1 = 47,7$ мм. Последнее объясняется тем, что с коллектора K_1 со стороны эмиттера \mathcal{E}_2 инжектируются ионы, которые частично нейтрализуются зарядами, выбрасываемыми из межэлектродного промежутка первой ступени.

Не рекомбинировавшие ионы двигаются под действием кулоновских сил в сторону эмиттера \mathcal{E}_2 , создавая дополнительную прокачку рабочей среды, интенсивность которой повышается с напряжением. С увеличением электропроводности, уменьшением вязкости теплоносителя возрастает интенсивность электрогидродинамических течений и, как следствие, снижается эффективность изоляционного покрытия, которая при $l_1 = 2,7$ мм в смеси трансформаторного масла с бутиловым спиртом составляет 25% (кривые 5 и 6, рис. 17) и в полиэтилсилоксановой жидкости – 20% (кривые 1–3, рис. 19). Удаление изоляции с поверхности \mathcal{E}_2 со стороны K_1 в целях формирования дополнительной полноценной ступени приводит к уменьшению напора, создаваемого двухступенчатым насосом (кривые 1 и 2, рис. 20), что вызвано в основном ухудшением характеристики второй ступени.

На оголенной поверхности \mathcal{E}_2 образуются ионы, которые под действием сил Кулона

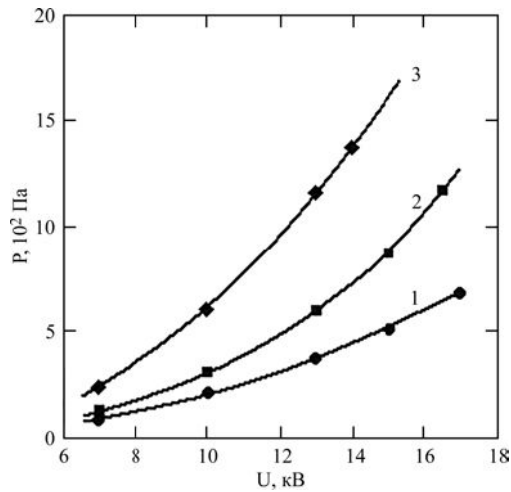


Рис. 19. Зависимость напора от напряжения между электродами: 1 – одиночная ступень 1 с перфорированным изоляционным покрытием на коллекторе; 2 – ступень 2 без диэлектрического покрытия на коллекторе; 3 – две ступени, $l_1 = 2,7$ мм. Полиэтилсилоксановая жидкость ($\sigma = 5,1 \times 10^{-11}$ См/м).

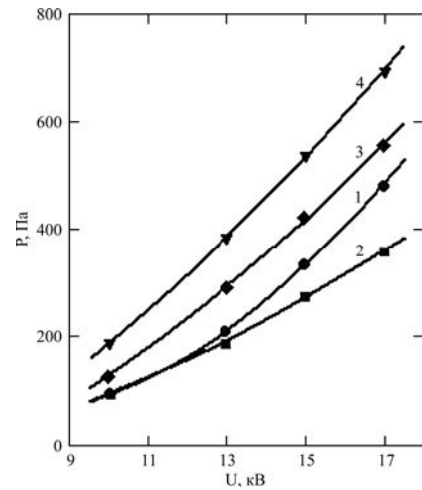


Рис. 20. Зависимость напора от напряжения между электродами в двухступенчатом насосе: 1 – с перфорированным изоляционным покрытием на коллекторе K_1 ; 2 – с оголенной эмиттером \mathcal{E}_2 , $l_1 = 47,7$ мм; 3 – с оголенным эмиттером \mathcal{E}_2 , $l_1 = 2,7$ мм; 4 – с оголенным эмиттером \mathcal{E}_2 , $l_1 = 2,7$ мм, после нахождения в теплоносителе в течение 96 часов. Трансформаторное масло ($\sigma = 3,5 \times 10^{-12}$ См/м).

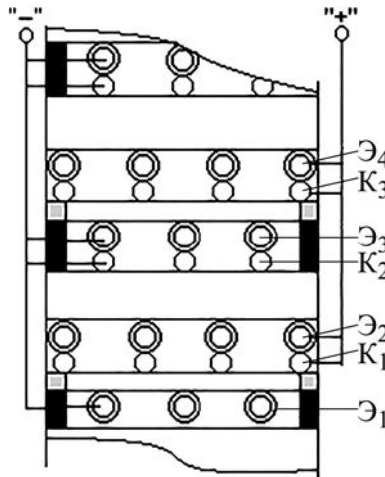


Рис. 21. Схема многоступенчатого ЭГД насоса.

двигаются против основного потока. Но с уменьшением расстояния между ступенями напорная характеристика насоса увеличивается на 50%, что свидетельствует о преобладающей концентрации ионов, формируемых на перфорациях K_1 и двигающихся в направлении оголенной поверхности эмиттера \mathcal{E}_2 . Характеристики этого же насоса после пребывания в трансформаторном масле в отсутствие электрического поля в течение 96 часов улучшились дополнительно на 25% (кривые 3 и 4, рис. 20), хотя выходные параметры отдельных ступеней остались неизменными. Видимо, одной из причин этого является коррозия [11], в результате на оголенной поверхности \mathcal{E}_2 образуется тонкая пленка, снижающая процессы образования и нейтрализации зарядов на электроде. Аналогичные закономерности наблюдаются при длительном пребывании одноступенчатого

насоса в отсутствие электрического поля между электродами в ряде диэлектрических жидкостей: трансформаторное масло, керосин, ПЭС-1. Таким образом, интенсифицируя процесс зарядки диэлектрической жидкости на коллекторе за МЭП путем нанесения перфорированного изоляционного покрытия, можно значительно улучшить выходные характеристики и уменьшить размеры многоступенчатого электрогидродинамического насоса. Идея использования зазора между ступенями многоступенчатого ЭГД насоса в качестве ступени может быть реализована по схеме, предложенной на рис. 21, для проверки работоспособности которой необходимо проведение дополнительных исследований.

3. Влияние электрофизических свойств рабочей жидкости на характеристики многоступенчатого ЭГД насоса. Характеристики многоступенчатого ЭГДН, как

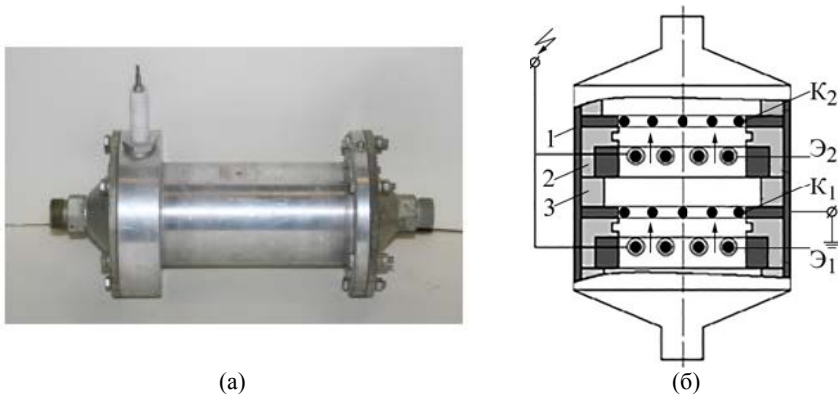


Рис. 22. Электрогидродинамический насос: (а) – внешний вид; (б) – конструкция.

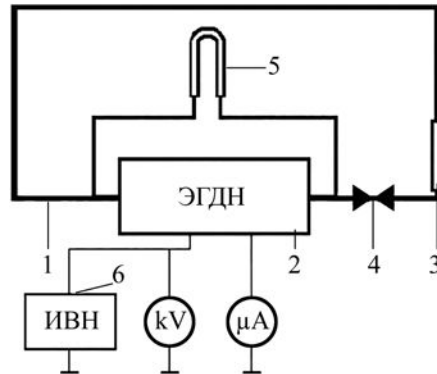


Рис. 23. Схема экспериментального стенда.

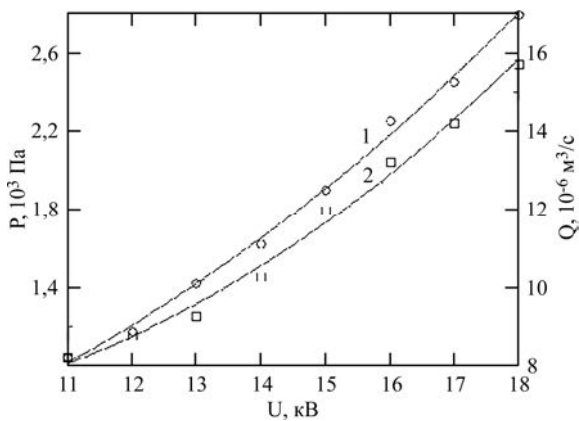


Рис. 24. Зависимость напора l и расхода 2 от разности потенциалов между электродами в трансформаторном масле.

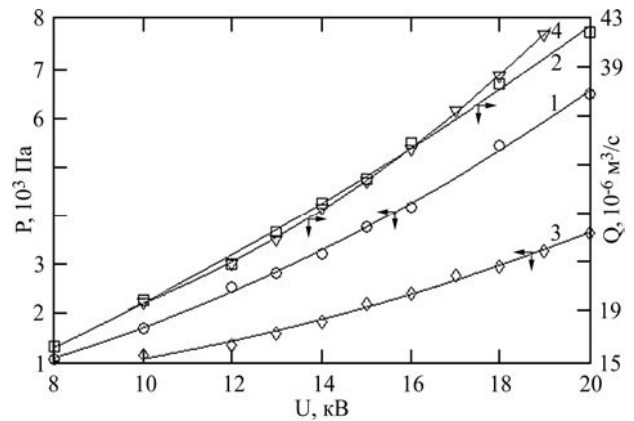


Рис. 25. Зависимость напора и расхода от разности потенциалов между электродами в кремнийорганической жидкости (1, 2) и керосине (3, 4).

указывалось выше, зависят от электрофизических свойств среды. В связи с этим проведены исследования влияния типа диэлектрических жидкостей на выходные параметры ЭГДН с целью его применения в теплообменниках. ЭГДН состоит из корпуса цилиндрической формы 1 (рис. 22), выполненного из алюминиевого сплава, внутри которого на определенном расстоянии размещены восемь ступеней. Каждая ступень состоит из двух электродов – эмиттеров (Э_1 и Э_2) и коллекторов (К_1 и К_2), выполненных в виде решеток из натянутых на кольцевой металлической оправе параллельно друг другу проводов с определенным шагом. На изоляционное покрытие провода эмиттера

нанесены перфорации в виде насечек со стороны коллектора.

Электрод-эмиттер изолирован от заземленного корпуса с помощью диэлектрической оправы 2 . Расстояние между соседними ступенями фиксировалось посредством диэлектрических прокладок 3 . Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 23), представляющем собой циркуляционный контур 1 , который включает ЭГДН 2 , расходомер 3 , вентиль 4 для регулирования гидравлического сопротивления циркуляционного канала. Перепад давления (гидродинамический напор), создаваемый насосом, регистрировался дифференциальным пьезометром 5 . Высокое напряжение на

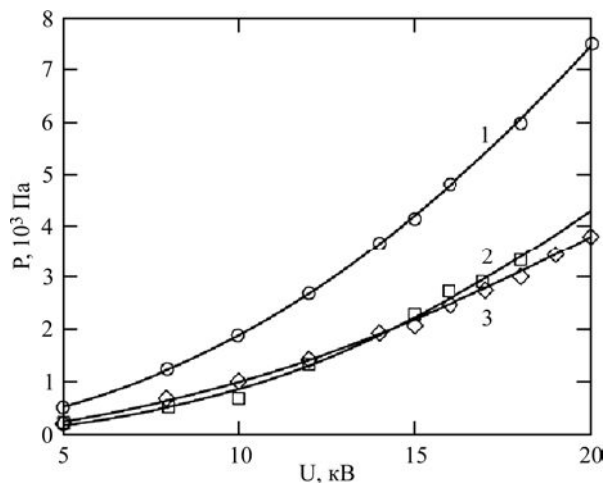


Рис. 26. Зависимость статического напора от разности потенциалов между электродами в ПЭС-1 (1), трансформаторном масле (2), керосине (3).

электроды подавалось от источника высокого напряжения (ИВН) 6. Напряжение U измерялось киловольтметром (кВ), ток I – микроамперметром (μ А), включенным последовательно с корпусом 1 (рис. 22, 23) ЭГДН. В качестве рабочей среды использовались: трансформаторное масло с электропроводностью $\sigma = 1 \times 10^{-11}$ См/м, кинематической вязкостью $\nu = 28 \times 10^{-6}$ м²/с; кремнийорганическая жидкость – $\sigma = 1,36 \times 10^{-10}$ См/м, $\nu = 3,55 \times 10^{-6}$ м²/с; керосин – $\sigma = 1,43 \times 10^{-11}$ См/м, $\nu = 1,55 \times 10^{-6}$ м²/с.

Зависимости перепада давления (напора) P и расхода Q в контуре от напряжения U на электродах представлены на рис. 24 и 25. Сравнительный анализ кривых перепада давлений 1 (рис. 24), 1 и 3 (рис. 25) показывает, что максимальный гидродинамический напор $P = 6,5 \times 10^3$ Па достигнут в кремнийорганической жидкости при расходе $\sim 43 \times 10^{-6}$ м³/с.

Это объясняется тем, что электропроводность 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 их вязкостей. При этом кривые зависимости напорной характеристики насоса от напряжения в трансформаторном масле (кривая 1, рис. 24) и керосине (кривая 3, рис. 25) практически совпадают. Аналогичные закономерности получены для зависимости статического напора от напряжения в трансформаторном масле и керосине (кривые 2 и 3, рис. 26). В керосине более интенсивны возвратные течения между электродами ступени и в пространстве между ступенями, что

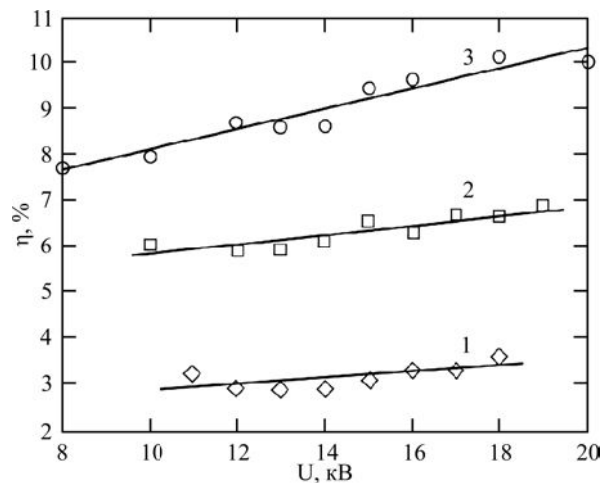


Рис. 27. Зависимость КПД насоса от разности потенциалов между электродами в трансформаторном масле (1), керосине (2), кремнийорганической жидкости (3).

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 $\sim 7,5 \times 10^3$ Па получен в кремнийорганической жидкости, что в два раза больше, чем в керосине и трансформаторном масле. КПД преобразования рассчитывался по отношению механической мощности, затраченной на работу в канале, к полной электрической:

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

В трансформаторном масле КПД ЭГДН практически не зависит от напряжения (кривая 1, рис. 27). В керосине (кривая 2) с переходом к кремнийорганической жидкости (кривая 3) такая зависимость усиливается. Наибольшее значение КПД преобразования достигнуто в кремнийорганической жидкости $\sim 10\%$, что в 3 и 1,5 раза выше, чем в трансформаторном масле и керосине соответственно. Качественное объяснение полученных зависимостей желательно в связи с тем, чтобы при последующем расширении диапазона опытных данных, прежде всего, по выявлению вольт-амперных характеристик ЭГДН, иметь предпосылки 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. Однонаправленное движение определяется течением во внешней ветви циркуляционного контура и, поскольку

энергия этого движения фигурирует в числителе формулы (1), можно заключить, что она верно определяет КПД. В то же время, воспользовавшись формулой Пуазейля для расхода жидкости через трубопровод радиусом R и длиной L , для полезной работы найдем [12]:

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

где μ – коэффициент динамической вязкости. Эта работа расходуется на преодоление сил вязкого трения, для которой, учитывая распределение скорости при пуазейлевом течении, получим:

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

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

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

Формула показывает, что одним из параметров среды, непосредственно влияющих на КПД ЭГДН, является вязкость μ , с уменьшением которой он возрастает, что и наблюдается на опыте (рис. 27). 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 исходим, во-первых, 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 ρ и \vec{j} – плотности свободных объемных зарядов и электрического тока; k – подвижность ионов знака «коронирующего» электрода (эмиттера). И для оценки перепада давления, вырабатываемого ЭГДН, получим формулу:

$$P \sim \frac{l}{s} \times \frac{I}{k}, \quad (6)$$

где I – сила тока; l – расстояние между электродами; s – характерная площадь

поверхности эмиттера. Подставив выражение (6) в (4), найдем:

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

Оценив в формуле (7) силу тока формулой

$$I \sim js \sim \sigma(U/l)s$$

и подставив ее в (7), получим:

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

Однако здесь удельную электропроводность σ нельзя рассматривать как индивидуальную константу, поскольку согласно формулам (5) $\sigma = k\rho$. С учетом (8) КПД должен оцениваться по формуле:

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

Таким образом, он прямо пропорционален плотности объемного заряда ρ и обратно пропорционален подвижности «активных» носителей заряда k . Несмотря на прозрачность этого результата с физической точки зрения, он мало полезен, ибо неизвестна плотность объемного заряда, к оценке которой переходим. Согласно концепциям коронного разряда, в пределах разумных допущений, он возникает при некотором критическом напряжении U_c , и плотность объемного заряда оценивается:

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

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

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

В последней формуле (11) масштабная единица σ_m имеет физический смысл низковольтной электропроводности, в то время как расстояние l неопределенно, поэтому эта формула послужит для нахождения следующих величин:

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

С учетом (10)–(12) из (9) получим:

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

Эта формула, однако, требует детального анализа относительно табличных значений

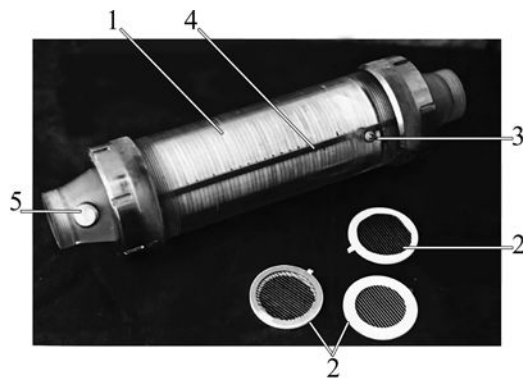
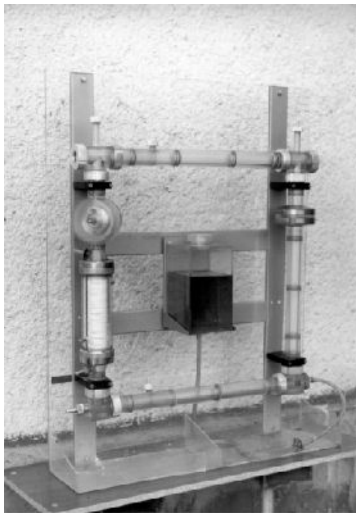
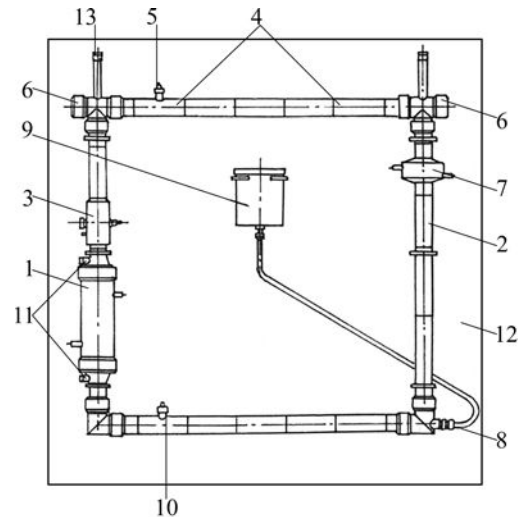


Рис. 28. Многоступенчатый ЭГД-насос: 1 – корпус; 2 – электроды; 3 – высоковольтный ввод; 4 – высоковольтная шина; 5 – заглушка посадочного гнезда под дифференциальный манометр.



(а)



(б)

Рис. 29. Стенд для исследования характеристик многоступенчатого ЭГД-насоса: (а) – общий вид; (б) – схема стенда.

фигурирующих в ней параметров, а также их взаимосвязи, в частности, между коэффициентами подвижности и вязкости; требуют трактовки и определения числового значения коэффициента пропорциональности s . Пока ограничимся формулой (13), приведя 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, исходя из формулы (13), можно констатировать следующее. Уменьшение вязкости должно сопровождаться увеличением КПД, однако следует установить еще связь между подвижностью k и вязкостью μ . Рост удельной проводимости σ_m должен приводить к увеличению КПД. Причем заметим, что электропроводность кремнийорганической жидкости примерно в 10 раз больше, чем

керосина, а КПД в ней выше примерно втрое, что подтверждается опытными данными (рис. 27) 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 ожидается, рост диэлектрической проницаемости среды должен сопровождаться корневым ростом КПД.

Согласно формуле (13) должно наблюдаться линейное увеличение КПД в зависимости от напряжения, что и следует из зависимостей, представленных на рис. 27. Также должна наблюдаться линейная зависимость перепада давления от силы тока. В тоже время 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. 26.

Поскольку расход жидкости Q по формуле Пуазейля (см. формулу (2)) прямо пропорционален гидродинамическому напору P , то и расход квадратично зависит от напряжения,

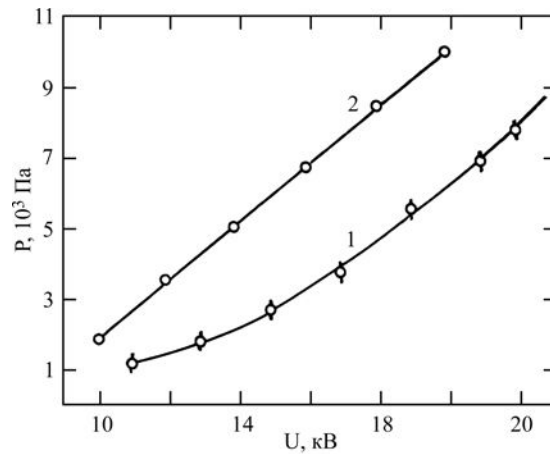


Рис. 30. Зависимость статического напора от разности потенциалов между электродами. Межэлектродное расстояние (l), мм: 1 – 4, $l_1 = 3$ мм; 2 – 3, $l_1 = 7$ мм. Количество ступеней, шт.: 30 (1); 27 (2). Рабочее вещество – трансформаторное масло.

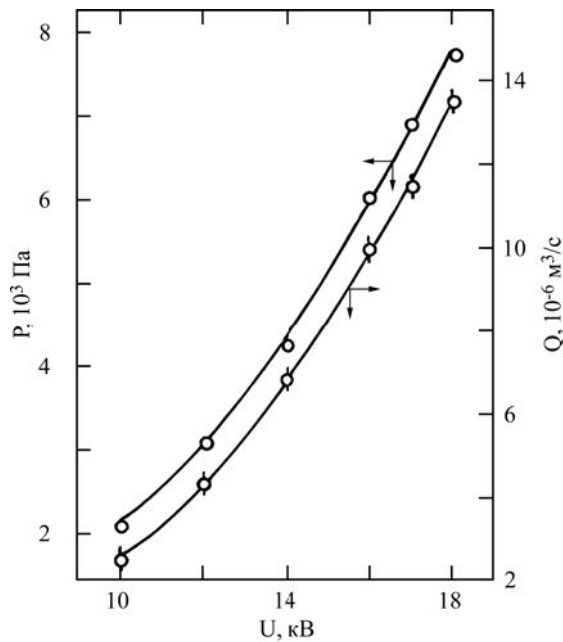


Рис. 31. Зависимость напора и расхода ЭГД насоса от напряжения. 27 ступеней, $l = 3$ мм, $l_1 = 8$ мм, трансформаторное масло.

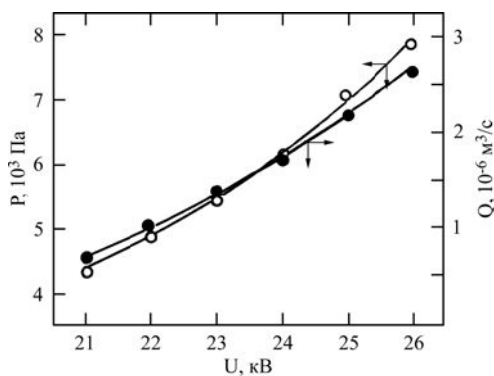


Рис. 32. Зависимости напора и расхода ЭГД насоса от напряжения. 30 ступеней, $l = 4$ мм, $l_1 = 4$ мм, трансформаторное масло.

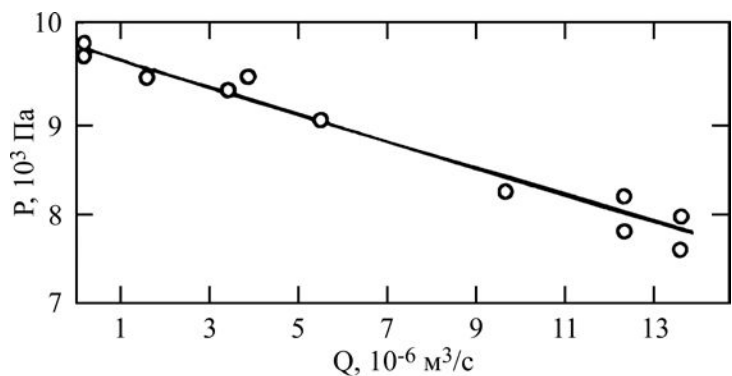


Рис. 33. Зависимость напора ЭГД насоса от расхода. 27 ступеней, $l = 3$ мм, $l_1 = 8$ мм, $U = 20$ кВ, трансформаторное масло.

что также находит экспериментальное подтверждение (рис. 24, 25). Таким образом, установленные экспериментально 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 лучшими 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.

4. *Выходные параметры многоступенчатого ЭГДН.* На основе полученных результатов разработан и изготовлен 30-ступенчатый ЭГДН (рис. 28). Электроды 2 (эмиттер и коллектор) выполнены в виде решеток из натянутых на кольцевой (или круговой, см. с. 10) оправе параллельно друг другу медных проводов диаметром 1 мм с зазором 1,5 мм. Коллектор изготовлен из оголенных проводов, а эмиттер – из проводов в лаковой изоляции. На проводах эмиттера с интервалом в 1,5 мм снята изоляция длиной 1,5 мм со стороны, обращенной к коллектору. Оголенные участки существенно повышают пороговое значение напряженности поля, соответствующее пробоем межэлектродного промежутка, чем в случае насечек шириной 0,1 мм. Это позволяет улучшить характеристики насоса за счет уменьшения зазора между электродами и использования более высоких напряженностей электрического поля при низких значениях приложенной к электродам разности потенциалов.

Характеристики насоса определялись на стенде (рис. 29), в котором диэлектрическая жидкость (трансформаторное масло) прокачивалась с помощью ЭГД насоса 1 по замкнутому контуру 2, выполненному из оргстекла. Контур 2 состоит из цилиндрических каналов с внутренним диаметром 30 мм. Электропроводность рабочей жидкости измерялась в ячейке 3, содержащей два плоскопараллельных электрода. На участке визуализации 4 канала установлен капилляр 5, предназначенный для ввода меток – воздушных пузырей диаметром не более 0,1 мм. С торцов участка 4 установлены оптические стекла для подсветки меток. Электроочистка рабочего вещества осуществлялась в электрофильтре 7, содержащем два сетчатых электрода, находящихся под различными высоковольтными потенциалами. Заправка и слив диэлектрической жидкости производились через патрубок 8 в балластный резервуар 9. Гидравлическое сопротивление канала регулировалось диафрагмой 10. Перепад давления на входе и выходе насоса измерялся дифференциальным манометром через патрубки 11. Вакуумирование системы, заполненной рабочей средой, производилось через патрубок 13. Методика проведения эксперимента подробнее описана в

[2]. На рис. 30 представлены зависимости статического напора, создаваемого насосом при различных межэлектродных расстояниях. При малых зазорах между электродами и больших расстояниях между ступенями (рис. 30) напорная характеристика насоса лучше, чем при больших зазорах. Напор, в случае кривой 1, создается большим числом ступеней при малых расстояниях между ними. Значительнее проявляется взаимодействие между ступенями, что снижает выходные характеристики многоступенчатого насоса. Существенно выше производительность насоса при зазоре между электродами 3 мм и меньших значениях напряжения (рис. 31, 32).

Напорно-расходная характеристика ЭГД насоса при $U = 20$ кВ, имеющая вид ниспадающей прямой, представлена на рис. 33. С уменьшением гидравлического сопротивления канала (замкнутого контура) путем регулирования диафрагмой 10 (рис. 29) возрастает расход до 14 мл/с при изменении напора от 9800 до 7800 Па. Наибольший статический напор достигнут при $l = 2$ мм (равный 12789 Па). Максимальный КПД насоса при прокачке трансформаторного масла равен 6%. В кремнийорганической жидкости, в частности ПМС – 1,5 Р, КПД 30-ступенчатого насоса равен 16,8% при $U = 16,7$ кВ, $P = 10094$ Па, $Q = 100$ мл/с. Максимальный статический напор составляет 12495 Па при $U = 17$ кВ. Дальнейшее повышение напряжения приводит к пробоем межэлектродного промежутка. Из анализа полученных результатов следует, что ЭГД насосы работают более эффективно в кремнийорганической жидкости.

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭГД НАСОСА

Одновременно с выходными параметрами для практического применения имеет важное значение их стабильность в процессе длительной работы. С этой целью проводились ресурсные испытания первоначально одноступенчатого ЭГД насоса.

Была собрана установка, представляющая собой ячейку (рис. 34), выполненную в виде закрытой кюветы 1 из органического стекла, которая разделена диэлектрической перегородкой 2 на два отсека – 3 и 4, заполненных диэлектрической жидкостью. Перегородка снабжена отверстием 5 и отверстием, в котором установлена ступень ЭГД-насоса 6. Эмиттер 7 выполнен в виде решетки из медных проводов с перфорированным изоляционным покрытием. Коллектор 8 представляет собой решетку из оголенных проводов. Измерение напора,

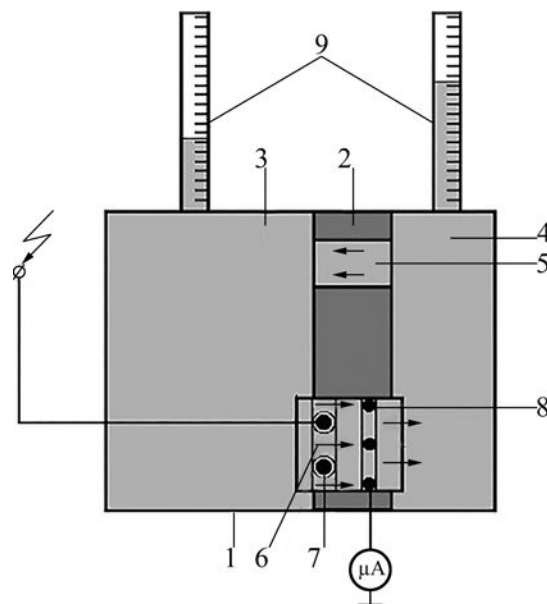


Рис. 34. Схема экспериментальной установки.

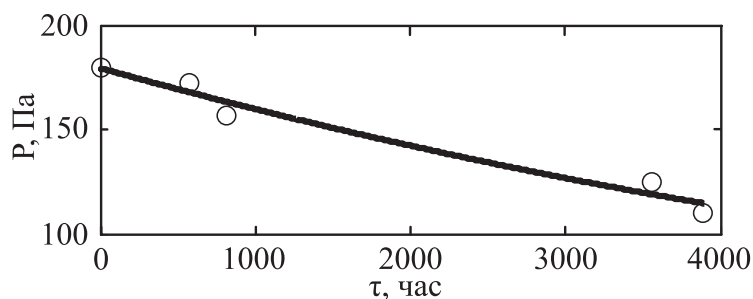


Рис. 35. Изменение динамического давления со временем в керосине.

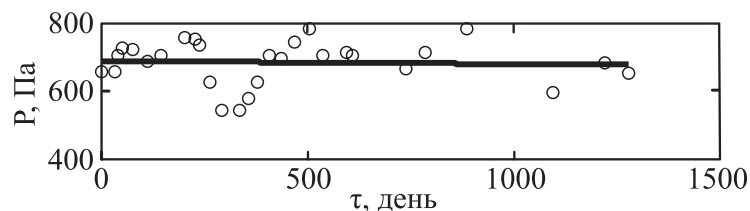


Рис. 36. Зависимость статического напора от напряжения в керосине.

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 ($\sigma = 3 \times 10^{-10}$ См/ м). На втором этапе были установлены последовательно две ступени в кремнийорганической жидкости, коллектор одной из них выполнен из нержавеющей проволоки. Проводилась подготовительная работа, связанная с промывкой ячейки рабочей жидкостью. После заполнения кюветы керосином (кремнийорганической жидкостью) на электроды насоса подавалось постоянное высокое напряжение (источник ИВН-50). Рабочая жидкость перекачивалась из отсека 3 в 4 и через отверстие 5 обратно в 3 отсек, образуя замкнутый контур. В процессе непрерывной

работы насоса до 3,5 лет поддерживалось постоянным напряжение 19 кВ, через определенные промежутки времени регистрировались показания микроамперметра и пьезометра – более чувствительных к воздействию различных факторов на производительность насоса. В кремнийорганической жидкости последовательно была установлена дополнительная ступень с коллектором, выполненным из нержавеющей проволоки. В этом случае испытания насоса проводились ежедневно продолжительностью 10 часов. На рис. 35 представлена зависимость динамического давления (при прокачке керосина по замкнутому контуру из отсека 3 (рис. 34) в 4 и обратно) от продолжительности работы ЭГД насоса.

После подачи напряжения наблюдается постепенное увеличение напора (продолжительностью 30–40 мин) до достижения

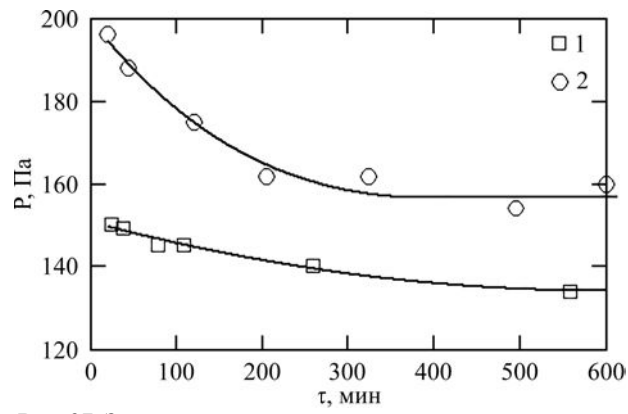


Рис. 37. Зависимость динамического давления от времени.

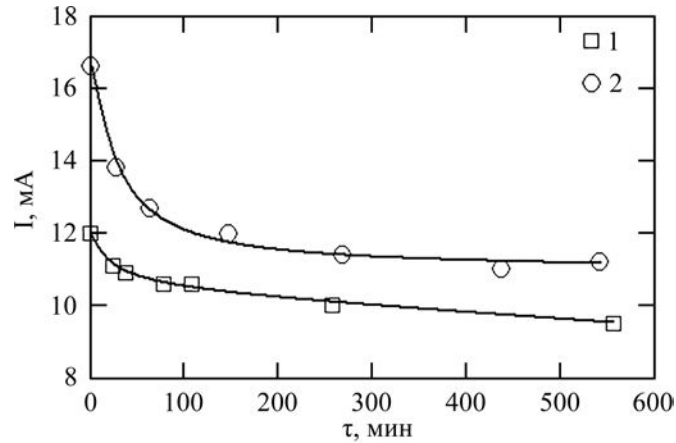


Рис. 38. Зависимость тока от времени в случае коллектора из нержавеющей стали: 1 – до обесточивания насоса; 2 – после включения насоса через 30 дней.

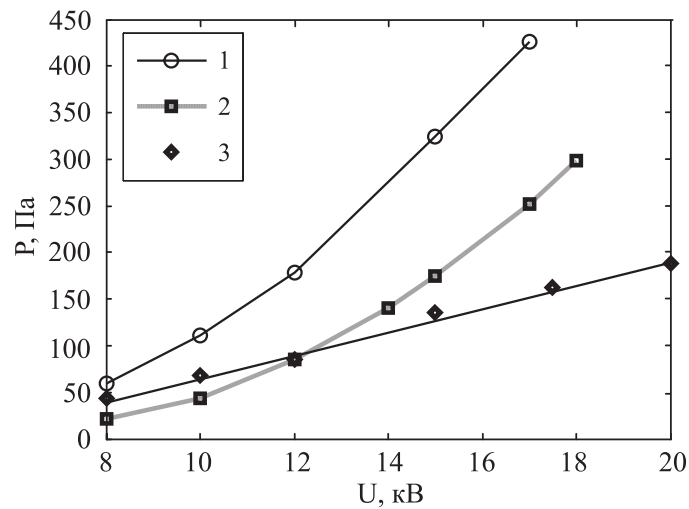


Рис. 39. Зависимость давления от напряжения (коллектор из нержавеющей стали): 1 – статическое; 2 – статическое (1287 часов); 3 – динамическое.

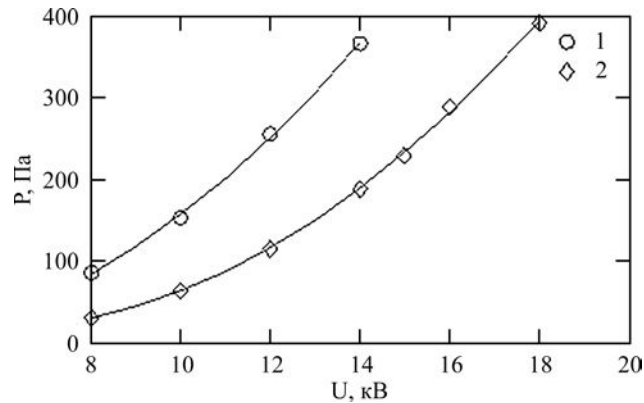


Рис. 40. Зависимость статического давления от напряжения (медный коллектор).

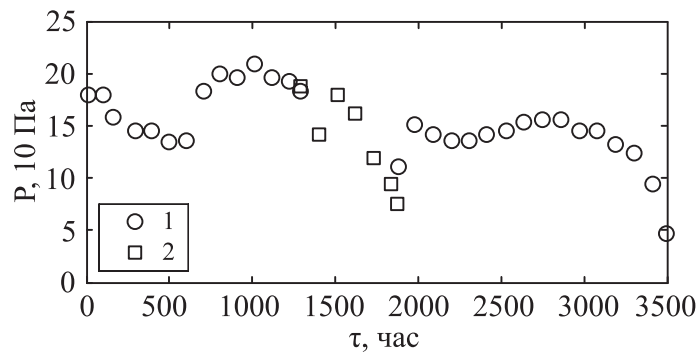


Рис. 41. Зависимость давления от времени: 1 – коллектор из нержавеющей стали; 2 – медный коллектор.

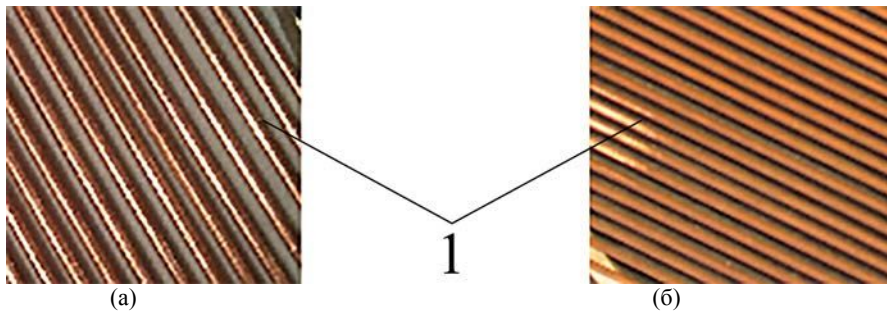


Рис. 42. Электрод-коллектор: (а) – первоначальное состояние; (б) – после ресурсных испытаний. 1 – участок поверхности, очищенной от налета.

максимального значения, затем в течение 4000 часов прослеживается снижение давления на 40%. Такая зависимость напора от времени объясняется временем релаксации зарядов, формированием двойных слоев на границе электрод-жидкость, снижением инжекции ионов с эмиттера вследствие их накопления в рабочей среде (сносимых потоком из межэлектродного промежутка), электроочисткой рабочей среды. При статическом испытании напорная характеристика насоса более стабильна (рис. 36).

Сильное снижение напора до 540 Па в течение 336 дней связано с уменьшением температуры керосина от 22 до 5°C. В статическом режиме в межэлектродном промежутке в течение всего испытания 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 3,5 лет работы насоса. При разборе установки на коллекторе обнаружен налет светло-зеленого цвета, свидетельствующий об образовании сульфитов и карбонатов меди, имеющих очень низкую электропроводность. Налет препятствует рекомбинации ионов на электродах, вследствие чего снижается производительность насоса. Поскольку керосин по своим свойствам не во всех случаях применим как теплоноситель, ресурсные испытания проводились и в кремнийорганической жидкости ($\sigma = 3 \times 10^{-11}$ См/м). После ступени насоса с

медными электродами была установлена ступень с коллектором, изготовленным из нержавеющей проволоки в целях выяснения влияния коррозии электродов на производительность насоса. Напряжение подавалось на электроды ступени с нержавеющей коллектором, а с медными электродами была обесточена ступень, размещенная в набегающем потоке кремнийорганической жидкости. На рис. 37 представлена зависимость динамического давления от времени в течение 10 часов. Так же как в керосине, при подаче напряжения в течение 25–30 мин наблюдается увеличение напора, затем постепенное его снижение до достижения стационарного режима (кривая 1, рис. 37). Значительное влияние на динамический напор оказывает продолжительность перерыва ($U = 0$) в работе насоса (кривая 2, рис. 37). Отключение насоса от высокого напряжения на 30 дней приводит к увеличению напора на 25%, что связано с возможным структурным преобразованием жидкости под действием электрического поля. Изменение тока утечки со временем (рис. 38) согласуется с поведением динамического давления, поскольку прокачка жидкости создается движением ионов. Обесточивание на определенное время приводит к увеличению производительности насоса (кривые 1 и 2, рис. 38).

С увеличением разности потенциалов между электродами возрастают как динамические, так и статические напоры (рис. 39).

Зависимость статического напора от напряжения (кривые 1 и 2) ближе к

параболической, а динамического (кривая 3) – к прямой. Зависимости 1 и 3 (рис. 39) соответствуют началу ресурсных испытаний, кривая 2 (рис. 39) получена через 1287 часов работы насоса в динамическом режиме. При этом статическое давление понизилось на 40–50%. Статическое давление, развиваемое насосом с медными электродами (кривые 1 и 2, рис. 40), соответствующее тем же самым моментам времени, что зависимости 1 и 2 (рис. 39), значительно выше. Это объясняется тем, что изготовление идеально идентичных ступеней практически невозможно, особенно с решетчатыми электродами. Изменение динамического давления, генерируемого насосом с коллектором из нержавеющей стали (первая ступень), представлено на рис. 41.

За 600 часов работы напор ступени снизился на 24%. После отключения от напряжения на 30 дней наблюдается восстановление напорной характеристики насоса. При этом ступень (вторая) с медными электродами находится в потоке жидкости, создаваемом первой ступенью. Через 1293 часа отключалась первая ступень, подавалось напряжение на электроды второй ступени. При этом начальное значение давления второй ступени равно напору первой, что свидетельствует об изменениях поверхности медных электродов (в отсутствие электрического поля). В течение 580 часов давление понизилось на 60%. После включения первой вместо второй ступени восстанавливается напорная характеристика, и она неизменна в течение 1310 часов. В дальнейшем происходит резкое снижение давления за 310 часов. Ступень с коллектором из нержавеющей проводов работает стабильно более продолжительно, чем из медных проводов. В результате на электродах обнаружен налет бледно-желтого цвета (рис. 42), особенно на коллекторах. При этом деградация электродов в условиях эксперимента не обнаружена.

Анализ показал, что во время работы насоса под действием электрического поля на кремнийорганическую жидкость образуется и оседает на поверхность электродов двуокись кремния, которая имеет большое удельное сопротивление. Структура покрытия рыхлая, неравномерная, толщиной до 30 мкм, значительно снижает рекомбинацию зарядов на электродах. Также следует учитывать возможную коррозию электродов даже в отсутствие электрического поля в виде окисной пленки на поверхности (в частности меди в кремнийорганической жидкости). Поэтому происходит резкое падение давления ступени с медными электродами (рис. 41). В более проводящих средах (керосине) с электро-

проводностью на два порядка выше, чем в кремнийорганической жидкости, эти процессы менее выражены и в таких средах достигаются более высокие скорости течений. Под действием давления, оказываемого потоком жидкости на коллектор, часть налета формируется и отлетает с поверхности, устанавливая равновесие между этими процессами. Перешедшие в жидкость частицы увеличивают ее электропроводность за счет образования дисперсной среды. В то же время происходит и электроочистка, влияние которой заметно в начальный период работы насоса как в керосине, так и в кремнийорганической жидкости. Из полученных данных следует, что основной причиной снижения напорной, соответственно расходной характеристики ЭГД насоса, является образование диэлектрического покрытия на электродах, особенно на коллекторе. Также следует учитывать в условиях эксперимента влияние сносимых потоком рабочей среды зарядов из межэлектродного промежутка, затем поступающих обратно в ЭГД насос. Аналогичные процессы наблюдались при ресурсном испытании многоступенчатого (8-ступенчатого) насоса [13]. Установлено, что увеличение ресурса ЭГДН возможно: применением низких значений напряжения на электродах, использованием жидкостей с $\sigma > 10^{-10}$ См/м и режима эксплуатации с перерывами определенной продолжительности. При резком снижении производительности необходимо восстановление поверхности электродов, что будет способствовать образованию центров инжекции ионов путем повышения напряженности поля между электродами. Независимо от влияния отрицательных факторов многоступенчатый (МЭГД) насос функционировал свыше 5200 часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что с помощью потокоограничивающих диафрагм и используя возвратные (ячеистые) течения в свободном слое жидкости межэлектродного пространства, можно значительно улучшить характеристики электрогидродинамических насосов с системой электродов диафрагма-пластина с отверстием и проволока–пластина с отверстием. Но в магистральных МЭГД насосах наиболее предпочтительно использование электродов решетчатого типа, изготовленных из оголенных и покрытых изоляцией проводов. Определены оптимальные расстояния между электродами и ступенями МЭГД насоса, показаны возможные

способы снижения взаимного влияния ступеней на его выходные характеристики. 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 лучшими характеристиками по всем показателям обладает кремнийорганическая жидкость и, учитывая стабильность свойств под воздействием электрического поля, микрозарядов, температуры, представляется целесообразным рекомендовать ее в качестве теплоносителя в ЭГД теплообменниках. Стабильность выходных параметров насоса со временем зависит от материала электродов и параметров электрического поля между ними, электрофизических свойств рабочей среды. В керосине динамическая напорная характеристика одноступенчатого ЭГД насоса с медными электродами в течение 3,5 лет непрерывной работы снизилась на 40%, в случае ПЭС-1 – на 60% за 700 часов. В случае коллектора, выполненного из нержавеющей проволоки, без заметного изменения напора насос проработал 1300 часов. Установлены причины ухудшения характеристик МЭГД насоса при длительной работе и предложены способы снижения влияния этих факторов на выходные параметры. Лучшие результаты получены при ресурсном испытании многоступенчатого ЭГД насоса, который при всех отрицательных факторах функционировал свыше 5200 часов. Однако остаются вопросы по устойчивости характеристик ЭГД насосов со временем, в частности, касающиеся эрозии (деградации) электродов и их влияния на производительность насоса, подбора материала электродов и рабочей жидкости и оказывающие воздействие на стабильность выходных параметров. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, учитывая полученные результаты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственной программы «Интенсификация процессов переноса и обработки в электрических, электромагнитных, кавитационных полях; применимость. ANCD 20.80009.5007.06 (2020–2023)».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жакин, А.И., *Электрогидродинамика, УФН*, 2012, т. 182, № 5, с. 495.
2. Болога, М.К., Кожевников, И.В., Гросу, Ф.П., Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 1. Электрогидродинамические течения и характеристики одноступенчатых ЭГД-насосов, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 58.
3. Болога, М.К., Гросу, Ф.П., Кожухарь, И.А., *Электроконвекция и теплообмен*, Кишинев: Штиинца, 1977, 320 с.
4. Стишков, Ю.К., Остапенко, А.А., *Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках*, Л.: Изд. ЛГУ, 1989, 176 с.
5. Zhihao Sun, Dexin Sun, Jinxin Hu, PhilippeTraoré et al., Experimental study on electrohydrodynamic flows of a dielectric liquid in a needle-plate configuration under direct/alternating current electric field, *J. Electrostatics*, 2020, vol. 106, 103454. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103454>.
6. Michel Daaboul, PhilippeTraoré and PedroVázquez, Study of the transition from conduction to injection in an electrohydrodynamic flow in blade-plane geometry, *J. Electrostatics*, 2017, vol. 88, p. 71. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.014>.
7. Жакин, А.И., Кузько, А.Е., Электрогидродинамические течения и теплообмен в системе электродов лезвие-плоскость, *Механика жидкости и газа*, 2013, т. 48, № 3, с. 310.
8. Hanaoka, R., Kuge, K., Takata, S., Kanamaru, Y. et al., Properties of pressure reinforced compact EHD pump. *Proceedings of the 14 th International Symposium on Electrets*, France, 2011, p. 217.
9. Cho, D., Kang, S. and Suh, Y., Development of a bi-directional electrohydrodynamic pump: Parametric study with numerical simulation and flow visualization, *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 6, p. 1. doi: 10.1177/16878 | 40 | 6655777.
10. Hojjati, M., Esmaeilzadeh, E. and Gharraei, R., Electrohydrodynamic conduction pumps with cylindrical electrodes for pumping of dielectric liquid film in an open channel, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2011, vol. 392, no. 1, p. 294. doi: 10.1016/J.COLSURFA.2011.10.007. Corpus ID: 95335177.
11. Брегман, Дж., *Ингибиторы коррозии*, М.: Химия, 1966. 312 с.
12. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М., *Гидродинамика*, М.: Наука, 1988, 733 с.
13. Кожевников, И.В., Гросу, Ф.П., Болога, М.К., Характеристики многоступенчатого электрогидродинамического конвертора, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 5, с. 68. doi: 10.5281/zenodo.1464858.

Summary

The one-stage electrohydrodynamic (EHD) pumps with electrodes “a diaphragm – a plate with a hole” and “a wire – a plate with a hole” are studied. It is established that with the help of flow-limiting diaphragms, the pump characteristics can be significantly improved. It is indicated that in the main multi-stage EHD pumps, it is preferable to use lattice-type electrodes made of bare and perforated insulated wires. Optimal geometrical parameters of electrodes, flow-limiting diaphragms, dielectric coatings, and interelectrode distances are determined. The influence of the electrophysical properties of the working medium and galvanically isolated high voltage sources on the performance of a multistage pump is considered. Possible ways to reduce the mutual influence of steps on its output parameters are

shown. Formulas have been obtained that reliably fully reflect the physical nature of the results of studies of the characteristics of EHD pumps. It was found out that organosilicon liquid has the best characteristics and considering the stability of its properties under the influence of an electric field, micro-discharges, and temperature, it is recommended to use it as a coolant in EHD heat exchangers. The reasons for the deterioration of the pump characteristics during prolonged operation are identified, and ways to reduce the influence of these factors on the output parameters are noted.

Keywords: electrohydrodynamic pump, multistage, dielectric fluid, pressure, flow, dielectric coating, perforation, efficiency, rod (cylindrical) electrodes, diaphragm, plate with hole, gratings, galvanically isolated sources