

Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена.

Часть 1. Электрогидродинамические течения и характеристики одноступенчатых электрогидродинамических насосов

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 25.10.2021

Принята к публикации 27.10.2021

Представлены результаты исследований шпирен-методом электрогидродинамических (ЭГД)-течений в системах электродов «лезвие-лезвие с изолированной кромкой», «лезвие-два стержня», «стержень с перфорированным изоляционным покрытием-два стержня». На основе полученных результатов спроектированы одноступенчатые ЭГД-насосы, исследованы их напорно-расходные характеристики в зависимости от различных факторов. Показано, что нанесением диэлектрического покрытия на электроды можно повысить производительность ЭГД-насосов. Максимальный КПД достигнут в системе электродов «лезвие-лезвие с изолированной кромкой», а статический напор – в трехстержневой системе с перфорированным изоляционным покрытием эмиттера. Отмечаются преимущества трехстержневой системы электродов в плане улучшения расходной характеристики насоса за счет их параллельного размещения, повышения напора путем использования многоступенчатого насоса, состоящего из электродов-решеток.

Ключевые слова: электрогидродинамическое течение, электрогидродинамический насос, ступень, электрогидродинамическая система, шпирен-метод, диэлектрическая жидкость, напор, расход, диэлектрическое покрытие, перфорация, электрод-решетка, КПД, производительность насоса

УДК 532.5: 537 + 536.24:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.58>

ВВЕДЕНИЕ

Под общим названием «Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена» представлен цикл работ, выполненных в Лаборатории тепловых и гидродинамических процессов Института прикладной физики Республики Молдова и посвященных исследованию влияния электрического поля на процессы тепло- и массообмена. Одним из направлений этих исследований являются разработка, исследование и оптимизация устройств (известных как ЭГД-насосы) для прокачки диэлектрических жидкостей, в частности, используемых в качестве теплоносителей в электроконвективных теплообменниках.

Простейшие макро- и микроэлектрогидродинамические насосы (ЭГДН) состоят из двух электродов – эмиттера и коллектора различной конструкции [1–6], размещенных в диэлектрическом канале и подключенных к источнику высокого напряжения. Под действием электрического поля между эмиттером и коллектором в

рабочей среде формируется избыточный заряд знака эмиттера. Под действием кулоновской силы заряд движется к коллектору, увлекая нейтральные молекулы, создавая напор, а при определенных условиях – и расход рабочей среды. На коллекторе происходит нейтрализация потока. От степени электризации среды на эмиттере зависят расходные и напорные характеристики насоса. Поэтому практически в большинстве конструкций ЭГДН используются геометрически асимметричные электроды [7–10].

Впервые подобную конструкцию предложил и исследовал экспериментально и теоретически Штуцер [11–13], применив острейковые и плоские электроды. В качестве острия использовались игла, лезвие (или несколько параллельных игл), а противоэлектрод – кольцо, сетка. На острейковом электроде (эмиттере) в связи с повышенной концентрацией электрического поля и инъекции зарядов с электрода [14] возникают ионизация диэлектрической жидкости, нейтрализация противоположно заряженных носителей и отток одноименных

зарядов. В то же время на характеристики ЭГДН оказывают существенное влияние процессы, происходящие на границе «коллектор-жидкость». На коллекторе также происходит электризация жидкости, приводящая к возникновению потока рабочей среды в направлении эмиттера, что отрицательно сказывается на выходных характеристиках ЭГДН. В этой связи в качестве коллектора применяется электрод с меньшей кривизной поверхности.

Производительность ЭГДН зависит от структуры ЭГД-течений в межэлектродном промежутке, в связи с чем предварительно нами исследовались ЭГД-течения, визуализированные шлирен-методом [15], с использованием теневого прибора [16]. Этот оптический метод основан на визуализации отклонения светового луча, пересекающего градиенты показателя преломления в прозрачной среде, например из-за неоднородности плотности жидкости. Он применяется при исследовании процессов тепло- и массопереноса [17, 18], смешения газов или жидкостей, явления распространения пламени или изучения сверхзвуковых потоков, где градиенты плотности достаточны для большого отклонения света. Шлирен-метод не вносит какие-либо неоднородности в среду, в отличие от микрочастиц, используемых для визуализации ЭГД-течений [6, 9], позволяет выявить характер течения, дает представление о диссипативных (возвратных) течениях и турбулизации потока, оказывающих влияние на эффективность работы насоса.

ЭГД-ТЕЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДОВ

Использовалась экспериментальная установка (рис. 1), в прозрачном канале 1 которой размещена система электродов 2 типа «лезвие-лезвие», ориентированных в одной или разных параллельных плоскостях ребрами противоположно друг другу. Расстояние между электродами и плоскостями, в которых они расположены, варьировалось, а для визуализации ЭГД-течений теневым методом боковые стенки канала 1 выполнены из оптических стекол 5. В замкнутом стеклянном трубопроводе 3 устанавливался капилляр 7 для ввода меток – воздушных пузырей (диаметром 0,1 мм), подсветка которых осуществлялась осветителем 8. Проводимость рабочей среды измерялась в ячейке 9, корпус которой изготовлен из латуни и заземлен. Одновременно она использовалась для разрядки зарядов, уносимых потоком из зоны расположения высоковольтных электродов по замкнутому трубопроводу. Термические неоднородности в жидкости создавались омическим

нагревателем 10. Импульсно-нагретый объем жидкости (измерения проводились термодомом 11) втягивался в межэлектродный промежуток и визуализировался теневым прибором 6. Напор, создаваемый ЭГД-насосом, измерялся с помощью пьезометров, установленных на входе и выходе трубопровода 3.

Регистрировались теневые картины ЭГД-течений в межэлектродном промежутке кинокамерой, одновременно измерялась максимальная скорость движения пузырьков воздуха в трубопроводе 3. На основе данных при ламинарном течении определялся расход рабочей среды $G = 0,5 \times V_{\max} \times S$, где V_{\max} – максимальная скорость жидкости; S – площадь сечения трубопровода. Эксперименты проводились с чистым трансформаторным маслом и раствором бутилового спирта, что позволяло варьировать электропроводность в интервале $\sigma = (10^{-11}, 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1})$. Подготовка экспериментов начиналась с заполнения установки предварительно очищенным трансформаторным маслом, и в течение 1,5–2,5 ч рабочая среда подвергалась воздействию электрического поля до выхода тока утечки на квазистационарное состояние. При сквозной прокачке капилляр устанавливался таким образом, чтобы траектория движения воздушных пузырьков совпадала с центральной осью трубопровода.

ЭГД-течения между электродами «лезвие-лезвие» и «лезвие-лезвие» с изоляционным покрытием»

Структуры ЭГД-течений для системы электродов «лезвие-лезвие» в чистом трансформаторном масле ($\sigma = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) при различных напряжениях приведены на рис. 2. Межэлектродное расстояние $d = 1,0$ см, при отрицательной полярности эмиттера $U = 6$ кВ (рис. 2а) течение – в виде двух симметричных ячеек – замкнуто в межэлектродном промежутке, сквозная прокачка отсутствует. С повышением напряжения $U \geq 9$ кВ (рис. 2б,в) симметричные ячейки смещаются в сторону заземленного электрода (коллектора). Около эмиттера (лезвие) (рис. 2г) возникают две дополнительные ячейки. По мере увеличения напряжения до $U = 30$ кВ происходит вытягивание ячеек вдоль коллектора, затем – турбулизация потока (рис. 2д). При этом наблюдается повышение интенсивности выбросов трансформаторного масла за пределы межэлектродного промежутка. Скорость сквозной прокачки жидкости незначительна, и велика интенсивность возвратных течений. В части интерпретации этих результатов можно отметить, что образовавшиеся ионы за счет инжекции с эмиттера под действием кулоновских сил устремляются в направлении коллектора. Часть

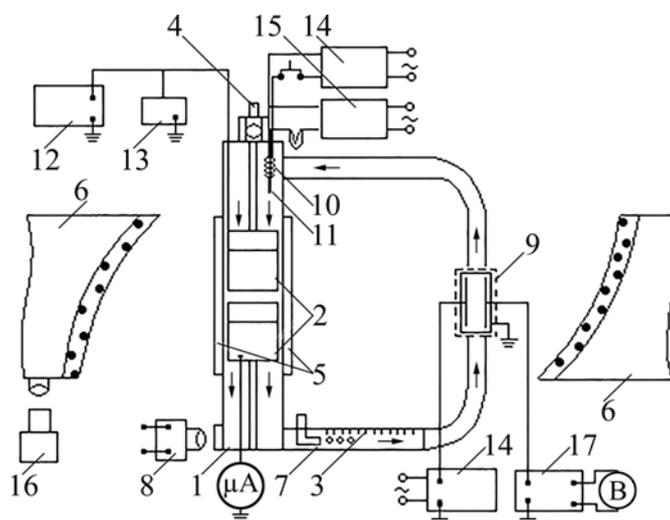


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования структуры ЭГД-течений теньвым методом. 1 – канал; 2 – электроды; 3 – замкнутый трубопровод; 4 – микрометрический столик; 5 – оптические стекла; 6 – теньвой прибор ИАБ-451; 7 – капилляр; 8 – осветитель; 9 – ячейка для измерения проводимости; 10 – омический нагреватель; 11 – термопара; 12 – высоковольтный источник; 13 – киловольтметр; 14 – источник постоянного тока; 15 – милливольтметр; 16 – кинокамера; 17 – усилитель малых токов.

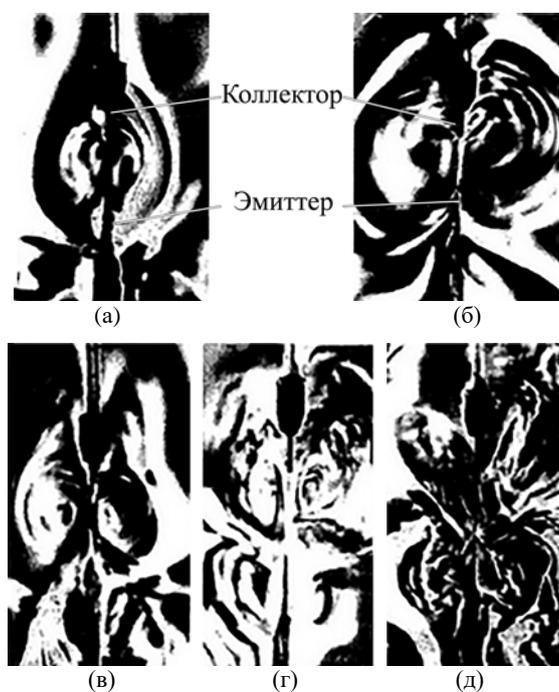


Рис. 2. Структуры ЭГД-течений в трансформаторном масле при напряжениях, кВ: (а) – 6; (б) – 9; (в) – 14; (г) – 20; (д) – 30.

из них выбрасывается за межэлектродный промежуток, а другая, не успевшая перезарядиться, увлекается возвратным течением в сторону эмиттера. Не доходя до него под действием кулоновских сил, ионы вновь двигаются к заземленному электроду. С повышением напряжения сила, действующая на ионы, возрастает, уменьшается расстояние, пройденное ими в направлении эмиттера, наблюдаются смещение и вытягивание ячеек вдоль коллектора.

Нанесение изоляционного покрытия (полихлорвинила) шириной 3 мм на переднюю часть заземленного электрода увеличивает масштаб ячеек и способствует формированию двухъячейстой структуры (рис. 3). Диэлектри-

ческое покрытие снижает скорость ионообразования на коллекторе и рекомбинацию на нем ионов знака потенциала эмиттера, которые нейтрализуются на его оголенной боковой поверхности.

Сужение канала δ в межэлектродном промежутке и уменьшение расстояния между электродами снижают интенсивность возвратных течений и увеличивают инжекцию зарядов с эмиттера, как следствие, повышается скорость сквозной прокачки. На рис. 4 приведены зависимости расхода жидкости (в трубопроводе 3) от напряжения при различных расстояниях между электродами. Оптимальный промежуток между электродами, обеспечивающий максимальный расход, составляет 3,3–5 мм. При $d = 1,2$ мм

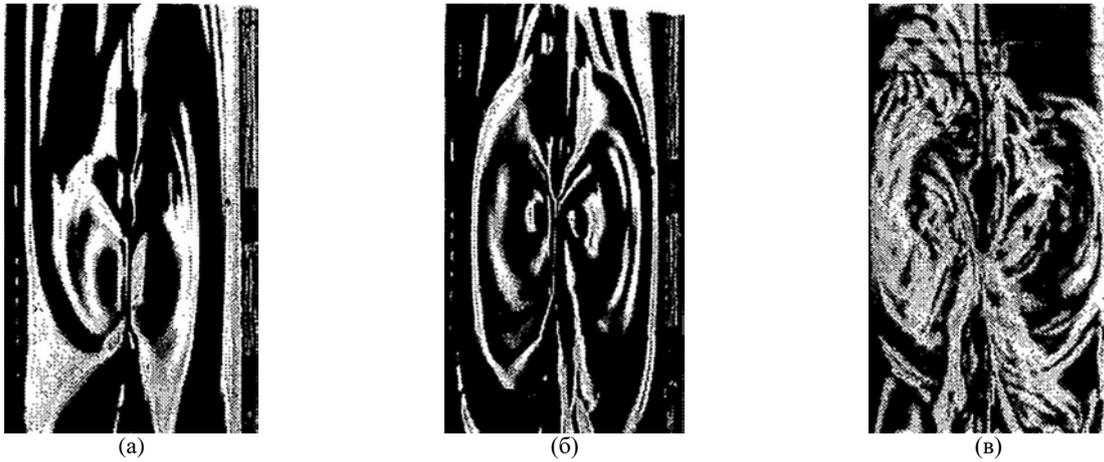


Рис. 3. Структуры ЭГД-течений в трансформаторном масле с изоляционным покрытием коллектора при напряжениях, кВ: (а) – 9; (б) – 14; (в) – 30; $d = 10$ мм.

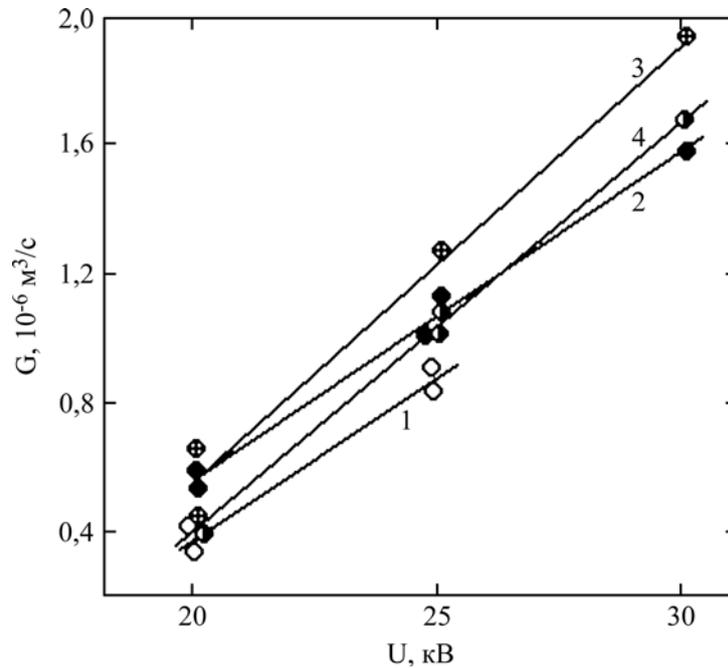


Рис. 4. Зависимость расхода трансформаторного масла от напряжения при различных расстояниях между электродами, d , мм: 1 – 2,3; 2 – 3,3; 3 – 5,0; 4 – 7,3; $\delta = 5,0$ мм.

прокачка практически отсутствует. На коллекторе с изоляционным покрытием накапливается избыток ионов знака эмиттера, часть из которых стекает, увлекая жидкость вдоль изоляции к оголенной части коллектора. Оставшиеся заряды противодействуют движению ионов того же знака от эмиттера. Этот эффект сильно проявляется при малых d (кривая 1, рис. 4).

При сужении канала в межэлектродном промежутке до 2 мм понижается расход ЭГД-течения от 1,67 до 0,11 $\text{см}^3/\text{сек}$ при $U = -30$ кВ. Подавить полностью возвратное течение не удается, структура ячеистого движения сохраняется. Возникают дополнительные две ячейки у эмиттера, которые вырождаются с увеличением напряжения.

Характер ЭГД-течений изменяется при нарушении симметричности (расположении в одной плоскости) электродов. По мере смещения эмиттера к стенке двухъячеестое движение переходит в одноячеестое и возрастает интенсив-

ность сквозной прокачки от $1,5 \times 10^{-6}$ до $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. При этом происходит перераспределение электрических силовых линий в сторону близлежащей боковой поверхности коллектора, снижается влияние избыточного заряда у изолированной его части на ЭГД-течение, вследствие чего формируется более стабильное одноячеестое движение, благодаря которому дополнительно усиливается эффект подсосывания со стороны входа канала и выброса рабочей среды из межэлектродного промежутка.

На интенсивность прокачки оказывают влияние материал, ширина и толщина диэлектрического покрытия коллектора. Изменение этих параметров сказывается на плотности и распределении заряда в межэлектродном пространстве. Максимум расхода трансформаторного масла достигается при полихлорвиниловом покрытии шириной 3,4 мм и

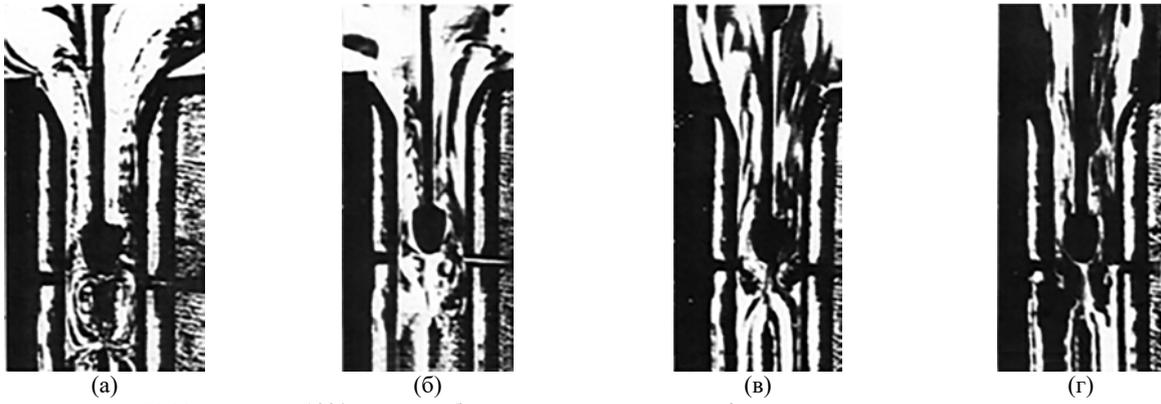


Рис. 5. Структуры ЭГД-течений в 13% растворе бутилового спирта в трансформаторном масле при различных напряжениях, кВ: (а) – 7,5; (б) – 15,5; (в) – 20; (г) – 25.

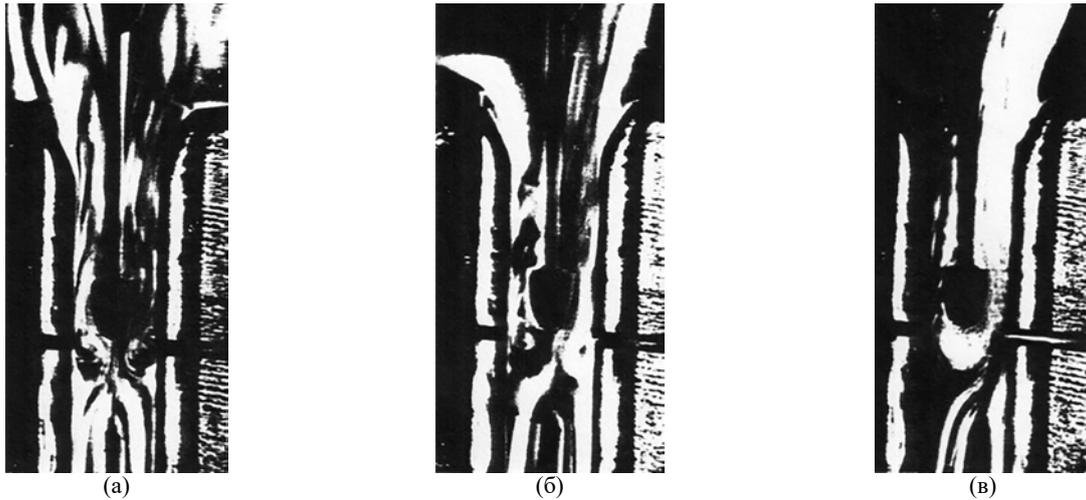


Рис. 6. Структуры ЭГД-течений при различных смещениях (Z) эмиттера относительно коллектора, мм: (а) – 0; (б) – 0,5; (в) – 1,5.

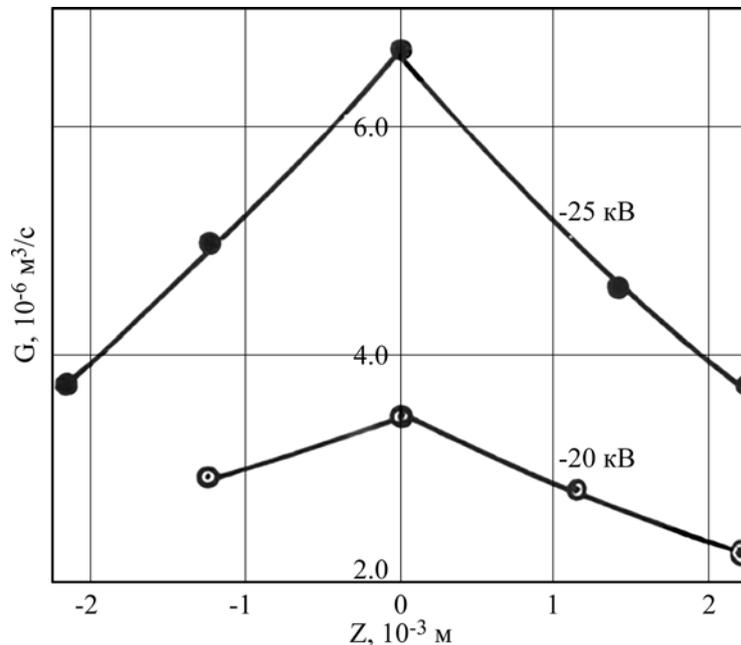


Рис. 7. Зависимость расхода от смещения эмиттера относительно коллектора в 13% растворе бутанола в трансформаторном масле, $\delta = 5$ мм.

толщиной 0,5 мм. Проводимость полихлорвинила: сквозная $\sigma \sim 2,6 \times 10^{-11}$ См/м на два и четыре порядка выше, а поверхностная на один порядок выше, чем у полиэтилена и фторопласта, использованных в экспериментах. При этом токи утечки по сравнению с оголенным коллектором

понижались в случае полиэтилена и фторопласта в 2,3–2,8 раза, а полихлорвинила в 1,2 раза.

При перекачивании рабочей среды, особенно после подачи напряжения, наблюдается интенсивное осаждение на положительном электроде (коллекторе) мельчайших частиц из транс-

форматорного масла, которые являются продуктами электрохимических реакций на электродах и в объеме жидкости под действием электрического поля, а также могут иметь примесную природу. В то же время эффект электроочистки жидкости в отсутствие диэлектрического покрытия слабо выражен.

Производительность насоса существенно зависит от электропроводности диэлектрической жидкости. С увеличением ее проводимости до $\sigma = 5 \times 10^{-10}$ См/м, которая соответствует 13% раствору бутилового спирта в трансформаторном масле, повышается плотность объемных зарядов (за счет инъекции с эмиттера) и, как следствие, возрастает интенсивность сквозной прокачки, а затем убывает в связи с увеличением электрического тока, затрачиваемого на Джоулев разогрев рабочей жидкости, что согласуется с данными [19].

Картина, аналогичная в чистом трансформаторном масле, наблюдается в смеси с бутиловым спиртом (рис. 5). При разности потенциалов до 20 кВ движение жидкости нестабильное, наблюдается флуктуирование центральной струи вдоль поверхности коллектора. С повышением напряжения возрастает интенсивность инъекции зарядов с эмиттера, ЭГД-течение стабилизируется, ячейки уменьшаются и смещаются к коллектору.

Изменение соосности электродов (рис. 6) приводит к одноячейному движению, как в чистом трансформаторном масле.

Зависимость интенсивности сквозной прокачки от смещения электродов относительно симметрии совсем иная, уменьшается от $6,5 \times 10^{-6}$ до 4×10^{-6} м³/с (рис. 7), что является следствием втягивания рабочей среды в межэлектродный промежуток с противоположной стороны коллектора (по отношению к эмиттеру).

Использование изоляционного покрытия позволяет управлять процессами на границе «электрод-жидкость» и, как следствие, повысить эффективность работы системы электродов «лезвие-лезвие». Но увеличение размеров кромки коллектора за счет диэлектрического покрытия создает дополнительную преграду центральной струе ЭГД-течения, способствует возникновению при низких напряжениях флуктуирования его по поверхности частично изолированного электрода, что нежелательно.

ЭГД-течения в системе электродов «лезвие-два стержня» и «стержень-два стержня»

Нестабильность центральной струи течения наблюдается и в системе электродов из эмиттера (лезвия) и коллектора (два разведенных перпендикулярно потоку стержневых электрода), оказывающих незначительное сопротивление ЭГД-течению. В такой системе («лезвие-два стержня») электродов нестабильность центральной струи может быть снижена умень-

шением зазора между заземленными электродами коллектора. Исследования структуры ЭГД-течений при малых расстояниях между электродами и зазора между стержнями коллектора представляют интерес с точки зрения организации сквозной прокачки рабочего вещества. На рис. 8 и 9 представлены теневые картины структуры ЭГД-течений в системе «лезвие-два стержня» при симметричном расположении центральной струи относительно электродов коллектора и параметрах $S_1 = 5$ мм, $d = 1,5$ мм, $\delta = 6,6$ мм, где S_1 – зазор между электродами коллектора; d_1 – расстояние от дополнительного электрода до коллектора.

В качестве электродов коллектора использовался медный провод $\varnothing 1$ мм. По мере повышения напряжения до $U = -20$ кВ максимальная скорость течения трансформаторного масла сначала возрастает с 0,5 (при $U = -15$ кВ) до 0,7 см/с (при $U = -20$ кВ), затем снижается практически до 0 (при $U = -25$ кВ). При этом наблюдается усиление флуктуирования центральной струи между электродами коллектора, и в результате снижается интенсивность сквозной прокачки. В то же время заряженная эмиттером диэлектрическая жидкость не успевает полностью разрядиться на коллекторе (ввиду ограниченности поверхности). В результате за межэлектродным промежутком возникает сила кулоновского взаимодействия между заряженной средой и электродами коллектора, направленная против потока жидкости и возрастающая с увеличением напряжения. Поэтому за электродами коллектора возникают возвратные течения в виде вихрей, направленных к ним (рис. 8). Об этом свидетельствуют и эксперименты с дополнительным заземленным электродом $\varnothing 1$ мм, влияющим как на структуру ЭГД-течения (рис. 9в, г), так и на интенсивность сквозной прокачки. Дополнительный электрод способствует «вытягиванию» заряженной среды из приколлекторной области, что хорошо заметно при сравнении структур ЭГД-течений (рис. 9в, г). С приближением четвертого электрода к коллектору увеличивается максимальная скорость течения среды (рис. 10, кривые 2, 3, 4), наблюдаются стабилизация центральной струи (рис. 9) и вырождение вихрей за коллектором (рис. 9в).

Сужение канала и зазора между стержнями коллектора в отсутствие дополнительного электрода приводит к уменьшению амплитуды колебаний центральной струи, интенсивности возвратных течений как в межэлектродном промежутке, так и за ним (рис. 11), что сказывается на скорости течения среды (рис. 10, кривые 1 и б).

В то же время на электродах коллектора не происходит полная нейтрализация заряженной среды, что подтверждается воздействием четвертого электрода на интенсивность сквозной прокачки (рис. 10, кривая 7), которая практи-

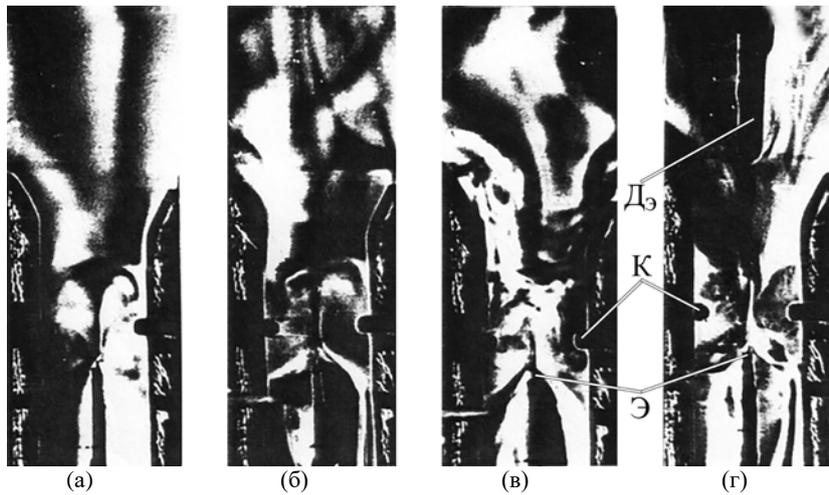


Рис. 8. Структуры ЭГД-течений при различных напряжениях, кВ: (а) – 10; (б) – 15; (в) – 20; (г) – 20 ($d_1 = 9,5$ мм). Э – эмиттер; К – электроды коллектора; $D_э$ – дополнительный электрод. Рабочая среда – трансформаторное масло.

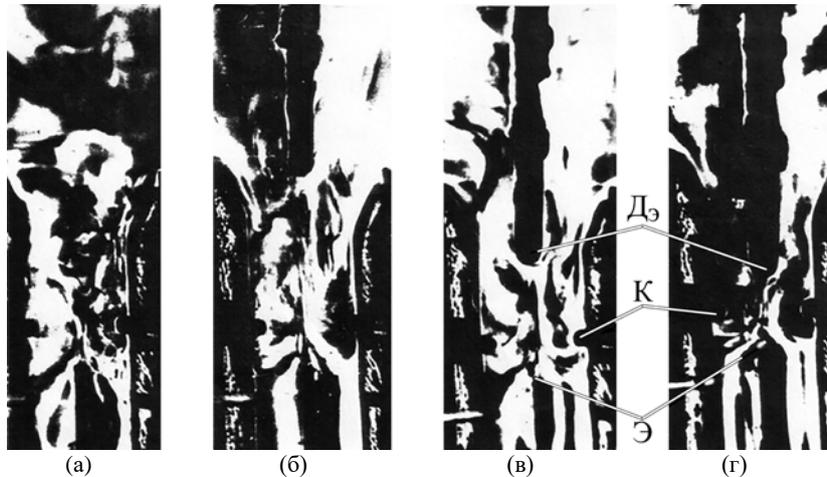


Рис. 9. Структуры ЭГД-течений при различных расстояниях (d_1) между четвертым электродом и коллектором, мм: (а) – ∞ ; (б) – 9,5; (в) – 4,5; (г) – 1,5; $U = -25$ кВ.

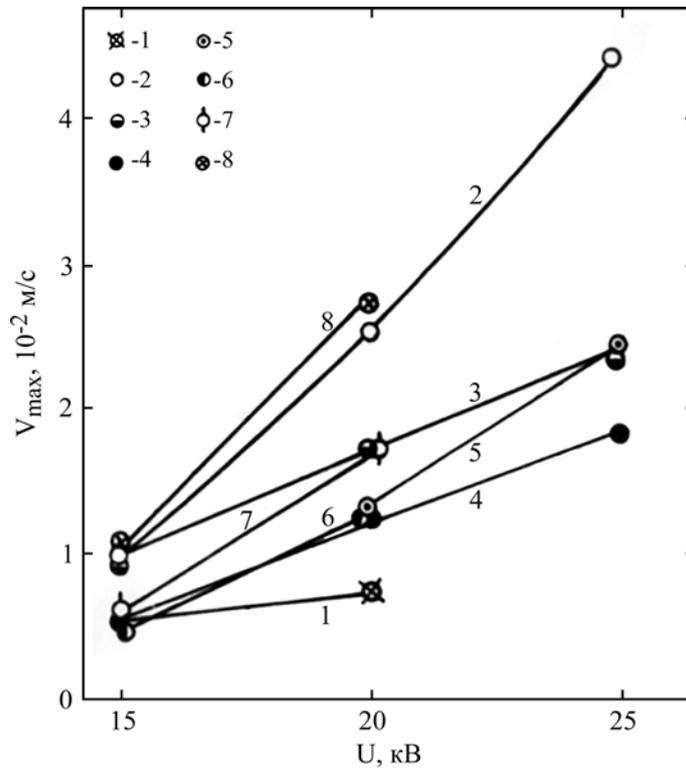


Рис. 10. Зависимость максимальной скорости течения жидкости от напряжения при различных расстояниях между электродами, мм: 1 – $d = 1,5$, $S_1 = 5,0$; d_1 : 1 – без дополнительного электрода; 2 – 1,5; 3 – 4,5; 4 – 9,5; 5 – $d = 3$, $S_1 = 5,0$, $d_1 = 1,5$; $d = 1,7$, $S_1 = 1,8$, d_1 : 6 – без дополнительного электрода; 7 – 6,9; 8 – 2,5; 0,8; $\sigma = 3,9 \times 10^{-12}$ См/м.

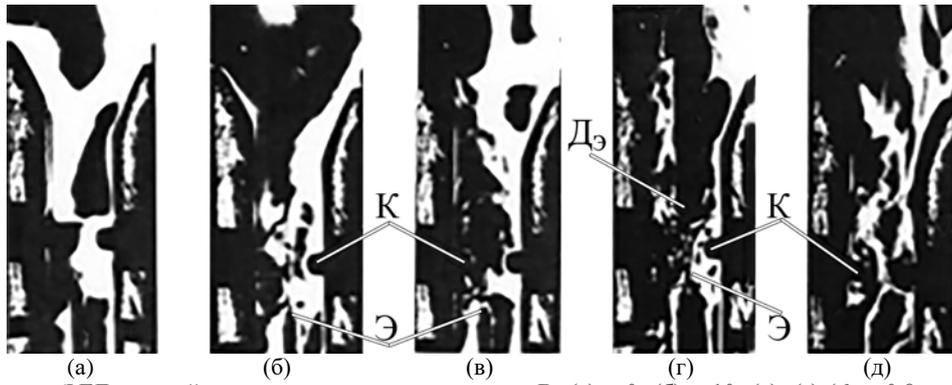


Рис. 11. Структуры ЭГД-течений при различных напряжениях, кВ: (а) – 0; (б) – 10; (в), (г) ($d_1 = 0,8$ мм) – 15; (д) – 20; $d = 1,7$ мм; $S_1 = 1,8$ мм; $\delta = 3,5$ мм.

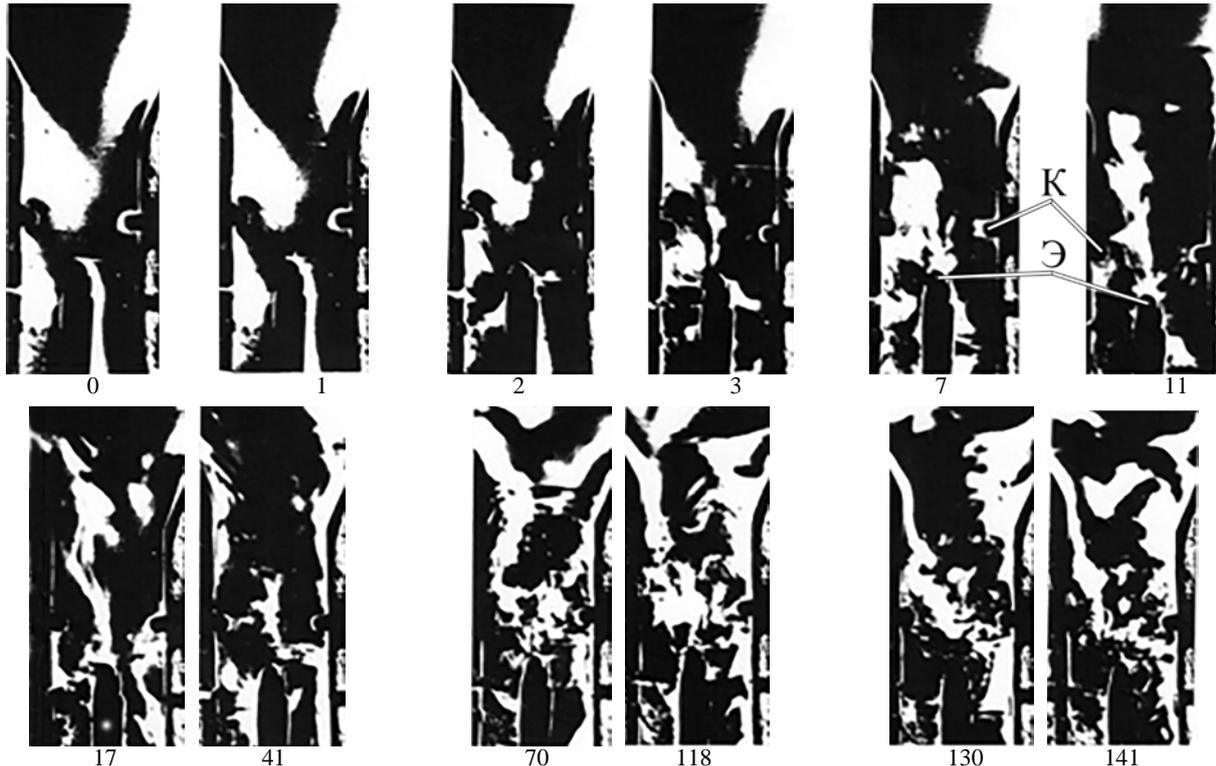


Рис. 12. Развитие ЭГД-течения в отсутствие изоляционного покрытия. Трансформаторное масло. $U = -25$ кВ, $d = 2$ мм, $S_1 = 5$ мм. 0,1,2÷141 – последовательность кадров. Скорость киносъемки 48 кадр/сек.

чески остается постоянной при изменении расстояния между коллектором и дополнительным электродом в пределах $0,8 \div 2,5$ мм (рис. 10, кривая 8). По мере приближения четвертого электрода к коллектору ($d_1 \leq 2,5$ мм) увеличивается сопротивление, оказываемое им потоку жидкости, что компенсирует повышение скорости прокачки. Замена лезвия на медный провод $\varnothing 1$ мм в канале шириной 6,6 мм приводит практически к исчезновению сквозной прокачки (рис. 12).

В момент включения напряжения $U = -25$ кВ/см от эмиттера во все стороны отходят отдельные струйки жидкости, затем следует вихреобразование между эмиттером и электродами коллектора. Возникают потоки жидкости, направленные от центрального электрода к стенкам канала и в противоположную сторону от коллектора. По мере их развития и перехода вихревого течения со временем в хаотичное в межэлектродном

промежутке уменьшается интенсивность сквозной прокачки рабочей среды до ее исчезновения. Наблюдается смена механизма ЭГД-течения с однополярной инжекции (с эмиттера) на биполярную (с эмиттера и электродов коллектора).

Структура ЭГД-течений между электродами «стержень с изоляционным покрытием» и «два стержня»

Иная картина наблюдается при нанесении на эмиттер фторопластового покрытия (до 2/3 его поверхности со стороны, противоположной боковым электродам) (рис. 13). Движение жидкости в основном осуществляется в виде ячеек между электродами. При этом турбулизации среды в отсутствие диэлектрического покрытия (рис. 13а,в) со стороны эмиттера, обращенного к входному патрубку канала, не наблюдается.

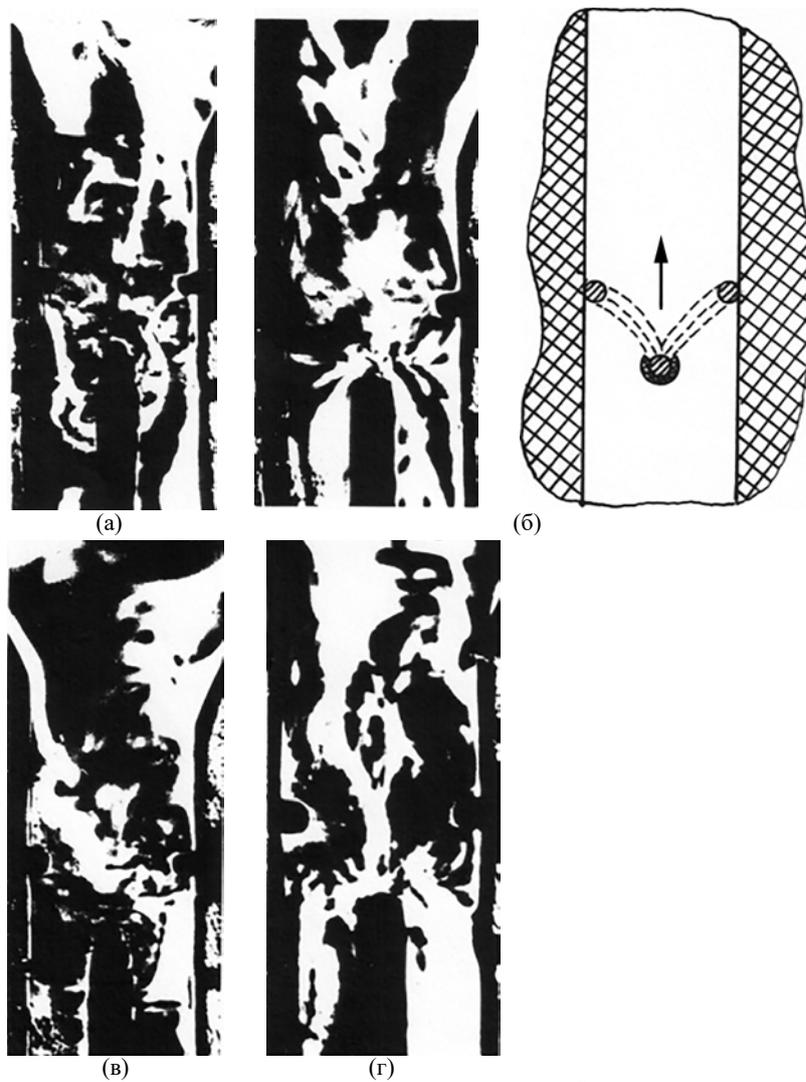


Рис. 13. Влияние изоляционного покрытия на эмиттере на структуру ЭГД-течения: (а), (б) – $U = -20$ кВ; (в), (г) – $U = -25$ кВ; (а), (в) – без изоляции; (б), (г) – с изоляцией. Трансформаторное масло, $d = 2$ мм, $S_1 = 5$ мм.



Рис. 14. Развитие ЭГД-течения при наличии изоляционного покрытия на эмиттере. Трансформаторное масло, $U = -20$ кВ, $d = 2$ мм, $S_1 = 5$ мм. 0, 1, 2, 3, 6, 17, 36, 70 – последовательность кадров. Скорость киносъемки 48 кадр/сек.

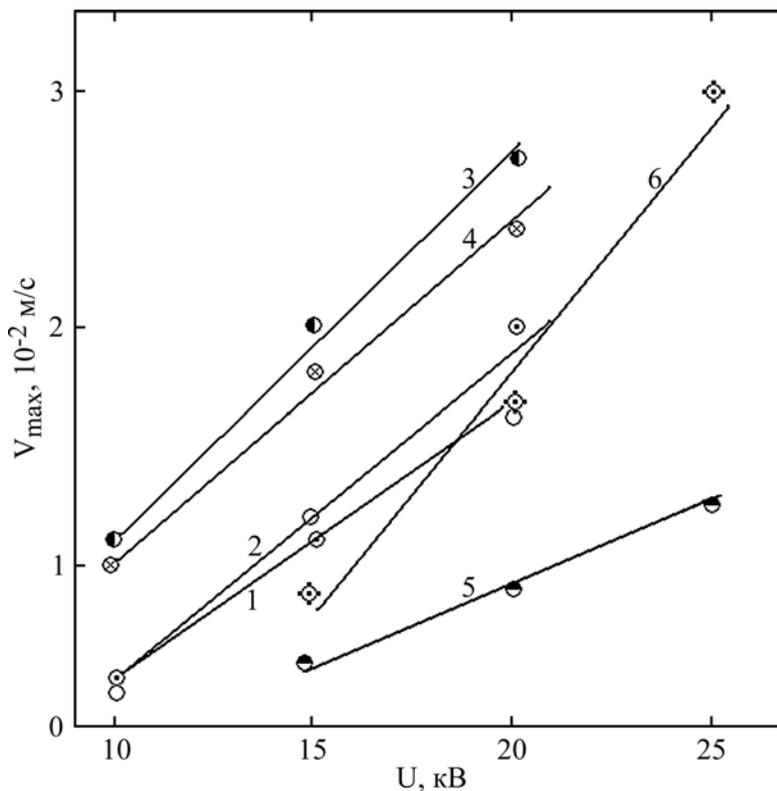


Рис. 15. Зависимость максимальной скорости течения трансформаторного масла в трубопроводе от напряжения: 1 – $d = 1,6$, $S_1 = 1,6$; 2 – $d = 1,6$, $S_1 = 1,6$, $d_1 = 1,2$ мм; $\delta = 3,5$ мм; $\sigma = 3,7 \times 10^{-12}$ См/м; 3 – $d = 1,6$, $S_1 = 1,6$, $d_1 = 3$ мм; 4 – $d = 1,6$, $S_1 = 1,6$, $\delta = 3,5$ мм; 5 – $d = 2$, $S_1 = 5$, $\delta = 6,6$ мм; 6 – $d = 2$, $S_1 = 5$, $d_1 = 3,5$, $\delta = 6,6$ мм; $\sigma = 8 \times 10^{-12}$ См/м.

В начальный момент от оголенной поверхности эмиттера отходит веерообразный поток жидкости (рис. 14), направленный в сторону коллектора.

Около каждого электрода коллектора образуется вихревое течение, проникающее частично за межэлектродный промежуток, из которого по центру канала интенсивно выбрасывается диэлектрическая жидкость, что приводит к возникновению сквозной прокачки (рис. 15, кривая 5). При этом флуктуирование центральной струи меньше, чем в случае использования электродов типа «лезвие-два стержня».

Изложенное может быть интерпретировано тем, что образование ионов происходит по всей поверхности эмиттера, но со стороны, обращенной к входу ЭГД-системы, на заряды действует сила кулоновского отталкивания, направленная против сквозной прокачки. Это может быть вызвано взаимодействием ионов со связанными зарядами на стенках канала, возникшими за счет поляризационных эффектов, в результате которых возникает турбулизация среды за эмиттером. Нанесение диэлектрического покрытия устраняет описанную компоненту кулоновской силы, оставляя составляющую между эмиттером и коллектором. В то же время неоднородности электрического поля, возникающие на границе «диэлектрик-металл-диэлектрик», способствуют возникновению ячеистого движения со стороны каждого электрода коллектора и тем самым снижают интенсивность флуктуирования центральной струи.

Значительно увеличивается интенсивность прокачки при введении четвертого электрода (рис. 15, кривые 5 и 6). Но эффект слабее выражен в случае узкого канала и зазора между электродами коллектора (рис. 15, кривые 1, 2 и 3, 4). Последнее свидетельствует о более полной нейтрализации заряженного потока жидкости на коллекторе. Сужение ширины канала и одновременно зазора между электродами, как отмечалось ранее, понижает интенсивность возвратных течений и повышает устойчивость центральной струи, в результате чего увеличивается максимальная скорость течения рабочей среды по трубопроводу (рис. 15, кривые 4 и 5). Структуры ЭГД-течений, зарегистрированные в узком канале, приведены на рис. 16 и 17 (при наличии дополнительного электрода-Дэ).

Движение жидкости между электродами происходит в виде ячеек около каждого электрода коллектора. Иногда за счет флуктуаций в среде наблюдается смещение центральной струи в сторону одного из электродов, изменяющее масштабы ячеек. При более высоких напряжениях увеличивается неустойчивость центральной струи, самих ячеек, прослеживается со временем переход из двухъячеистого движения в одноячеистое, и наоборот. Смещение эмиттера от плоскости симметрии (относительно стержневых электродов коллектора) на 0,7 мм снижает скорость сквозной прокачки от 1,6 до 1,3 м³/с.

Из зависимостей, приведенных на рис. 10 и 15, следует, что влияние четвертого электрода

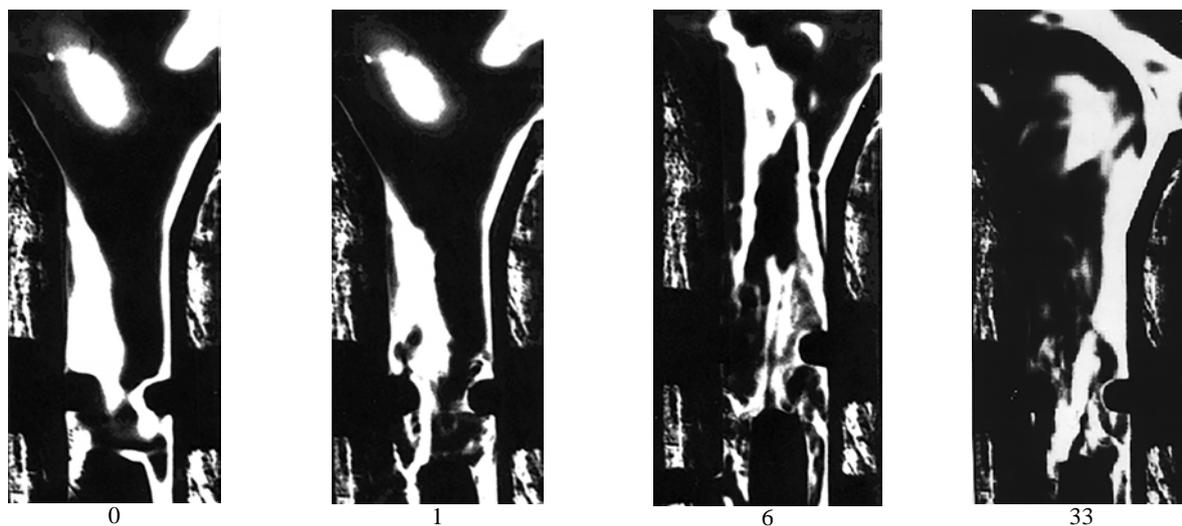


Рис. 16. Развитие ЭГД-течения в узком канале. $U = -25$ кВ, $d = 1,6$ мм, $S_1 = 1,7$ мм, $\delta = 3,5$ мм. 0, 1, 6, 33 – последовательность кадров. Скорость киносъемки – 48 кадр/сек.

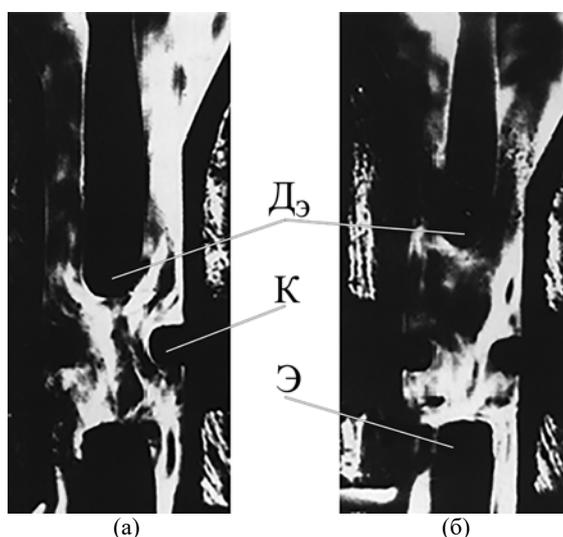


Рис. 17. Структуры ЭГД-течений в узком канале при воздействии дополнительного электрода Дэ. $U = -20$ кВ, $d = 1,6$ мм, $S_1 = 1,7$ мм, $\delta = 3,5$ мм, d_1 (мм): (а) – 1,3; (б) – 3,0.

Дэ на интенсивность сквозной прокачки, при равных условиях, сильнее в системе электродов «лезвие-два стержня». Однако в отсутствие дополнительного электрода максимальная скорость течения жидкости в трубопроводе выше в системе «частично изолированный стержень-два стержня». При малых значениях напряжения ЭГД-течения, имеющие ячеистый характер, локализованы в межэлектродном пространстве (сквозное течение отсутствует). Увеличение напряжения приводит к возникновению прокачки по трубопроводу, причем ее интенсивность определяется эффективностью нейтрализации жидкости на коллекторе, а также экранировкой эмиттера зарядом, осевшим на стенках канала. Последний и возвратные течения как в межэлектродном промежутке, так и за ним, обусловленные неполной нейтрализацией потока на коллекторе, ухудшают характеристики рассматриваемых систем электродов. В то же время в определенной степени можно управлять

этим процессами путем нанесения диэлектрического покрытия на один из электродов, то есть воздействуя на процессы зарядообмена на границе «металл-жидкость». При этом возрастает интенсивность сквозной прокачки, которая также зависит от электропроводности среды и максимальна для электродов «лезвие-лезвие с изолированной кромкой» при $\sigma \sim 10^{-10}$ См/м. Выявлено ускоряющее воздействие дополнительного электрода (коллектора) на одноименно с эмиттером заряженную среду за межэлектродным промежутком, препятствующее возникновению завихрений и повышающее устойчивость центральной струи ЭГД-течения. Обнаружен сильный процесс электроочистки трансформаторного масла в системе электродов «лезвие-лезвие с изолированной кромкой», который менее выражен в отсутствие диэлектрического покрытия и в смеси трансформаторного масла с бутиловым спиртом. Образование налета на положительном электроде (коллекторе)

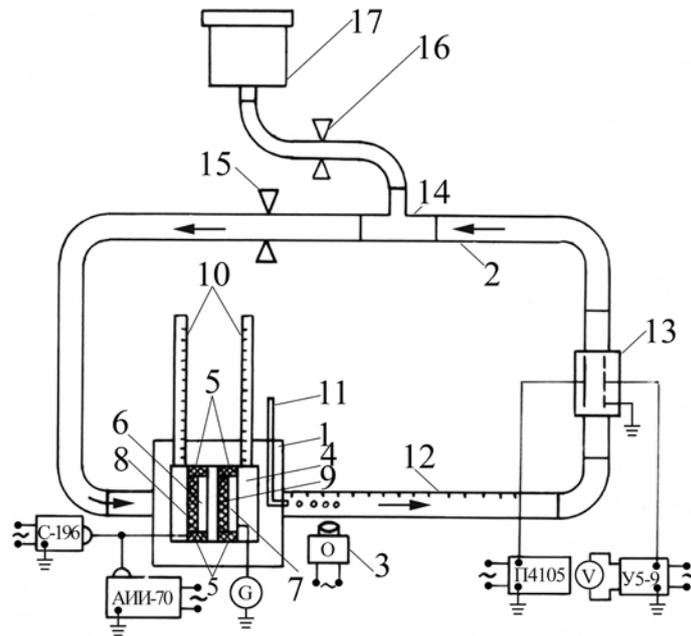


Рис. 18. Схема стэнда для исследования напорно-расходных характеристик ЭГД-насосов.

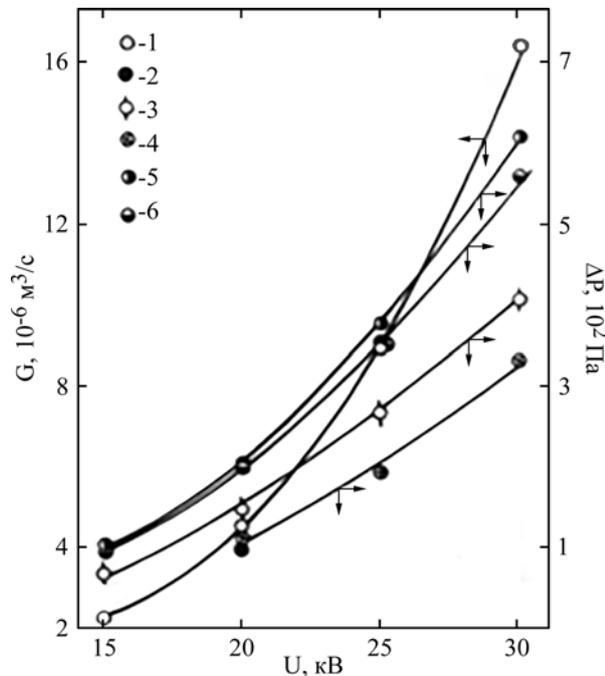


Рис. 19. Зависимость расхода рабочей жидкости и перепада давления от напряжения: 1, 3, 5 — $d = 3$ мм; 2(Г), 4, 6 — $d = 2$ мм; 5, 6 — в статическом состоянии. $\sigma = 5,4 \times 10^{-10}$ См/м.

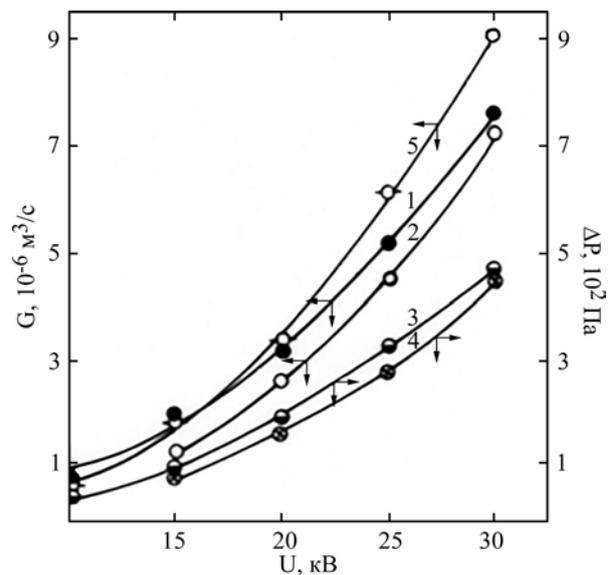


Рис. 20. Зависимости расхода рабочей жидкости и статического напора от напряжения: 1, 3 — $\delta = 5$ мм; 2, 4 — $\delta = 2$ мм; $d = 5$ мм; 5 — $\delta = 5$ мм; $d = 2$ мм, $\sigma = 2,6 \times 10^{-10}$ См/м.

ухудшает характеристики рассмотренных ЭГД-систем.

НАПОРНО-РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭГД-НАСОСОВ

Исследования напорно-расходных характеристик ЭГД-насосов, разработанных на основе полученных результатов, проводились на установке, схема которой представлена на рис. 18.

Установка состояла из экспериментального участка 1, включенного в замкнутый трубопровод 2, высоковольтного источника с

киловольтметром, гальванометра (G) М195/3, осветителя 3, стабилизатора постоянного тока, электрометрического усилителя с вольтметром. Корпус экспериментального участка был выполнен из оргстекла, в его центре был проточен канал 4, в котором с помощью диэлектрических вставок 5 устанавливались в одной плоскости электроды 6 и 7. В качестве эмиттера 6 использовалось лезвие длиной 3,7 мм, изолированное фторопластом 8 со стороны, обращенной к входу канала, устраняющее возможность возникновения ЭГД-течений, создающих дополнительное сопротивление

потоку жидкости по трубопроводу. Коллектор 7, имеющий форму пластины, с рабочей поверхностью $40 \times 18 \times 0,8$ мм со стороны эмиттера изолирован полихлорвинилом 9. Ширина канала в межэлектродном промежутке варьировалась с помощью диэлектрических вставок 5. Для измерения перепада давления, создаваемого ЭГД-насосом, на его входе и выходе были установлены пьезометры 10. Замкнутый трубопровод 2 длиной 1,4 м включал в себя стеклянную трубку 12, ячейку 13 (для измерения проводимости рабочей среды), корпус которой выполнен из латуни и заземлен, металлический тройник 14, пережимные устройства 15 и 16 и резервуар 17 объемом 500 мм, которые соединены силиконовой трубкой $\varnothing 12$ мм. Ячейка 13 использовалась также для разрядки зарядов, смываемых потоком рабочей среды из зоны расположения ЭГД-насосов. В стеклянной трубке внутренним диаметром 12 мм установлен капилляр 11 для дискретного ввода меток – воздушных пузырей (диаметром не более 0,1 мм). Через резервуар 17 производились заправка и слив рабочего вещества. Подготовка и методика проведения эксперимента те же, что и при исследованиях структуры ЭГД-течений. КПД ЭГД-системы рассчитывался по отношению механической мощности, затраченной на работу во внешнем контуре, к электрической: $\eta = \Delta P \times G / (I \times U)$. При этом перепад давления (ΔP) вычислялся по формуле: $\Delta P = \gamma \times g \times \Delta h$, где $\Delta h = h_2 - h_1$ – разница уровней жидкости в пьезометрах. В качестве рабочей среды использовались трансформаторное масло и смеси с бутиловым спиртом.

*Выходные характеристики насоса
«лезвие-лезвие с изолированной кромкой»*

На рис. 19 представлены зависимости расхода и напора от напряжения при различных зазорах между электродами, полученные без предварительной обработки рабочего вещества в ЭГД-системе.

По мере приближения эмиттера к коллектору на расстояние менее 3 мм прослеживается ухудшение напорных характеристик ЭГД-насоса как динамических (кривые 3 и 4, рис. 19), так и статических (кривые 5 и 6, рис. 19), что объясняется воздействием зарядов, накапливающихся у поверхности изолированного коллектора, на ЭГД-течение. Такое же снижение характеристик наблюдается с увеличением межэлектродного расстояния до 5 мм (кривые 1 и 5, рис. 20).

При этом зависимости, приведенные на рис. 20, получены после 2,5 часа работы ЭГД-насоса. Из сравнения кривых 1 (рис. 19) и 5

(рис. 20) следует, что в последнем случае характеристики насоса значительно хуже. Учитывая результаты, полученные ранее, это нельзя объяснить разницей в проводимости среды. Видимо, со временем происходят электроочистка рабочей среды и выделение ее продуктов на боковых поверхностях коллектора, что обнаружено визуально. Образуется тонкий слой покрытия, который затрудняет рекомбинацию ионов знака эмиттера на коллекторе, что приводит к перераспределению электрического поля. В то же время КПД ЭГД-насоса с увеличением напряжения и межэлектродного расстояния возрастает (кривые 1 и 3, рис. 21) за счет снижения интенсивности возвратных течений.

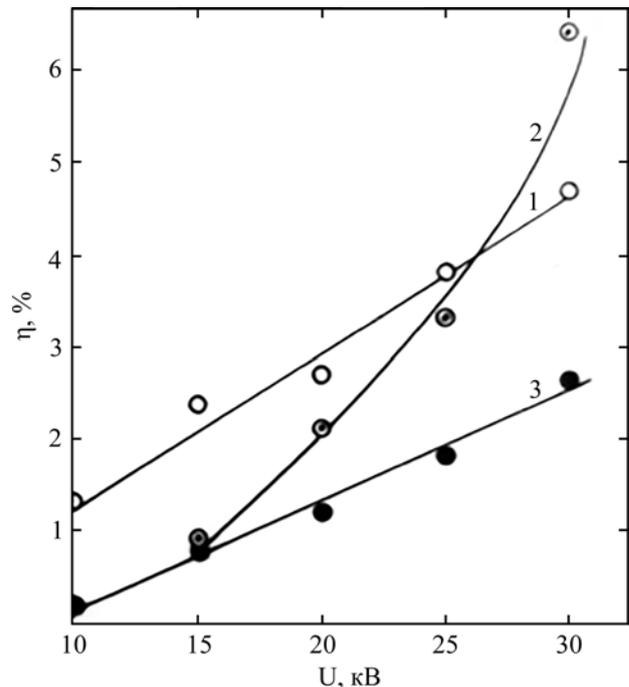


Рис. 21. Зависимость КПД ЭГД-системы от напряжения: 1 – $\delta = 5$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм, $d = 5$ мм; 3 – $\delta = 5$ мм; $d = 2$ мм, $\sigma = 2,6 \times 10^{-10}$ См/м.

Сужение ширины канала с помощью диэлектрических вставок до 2 мм в межэлектродном промежутке приводит к ухудшению характеристик насоса (кривые 2 и 4, рис. 20 и кривая 2, рис. 21). Повышается гидравлическое сопротивление канала, снижается интенсивность ЭГД-течения. При напряжениях $U \leq 25$ кВ между электродами реализуется четырехъязычистое течение. С ростом напряжения ($U > 25$ кВ) наблюдается постепенный переход к двухъязычистой структуре и соответственно повышению КПД (кривая 2, рис. 21), который в исследованном диапазоне напряжений не превышает 6,5% (рис. 21), то есть основная часть электроэнергии, подводимой к насосу, затрачивается на образование язычистых движений между электродами, которые подавить полностью сужением канала затруднительно. В значи-

тельной степени производительность ЭГД-насоса зависит от полярности потенциала на эмиттере (рис. 22).

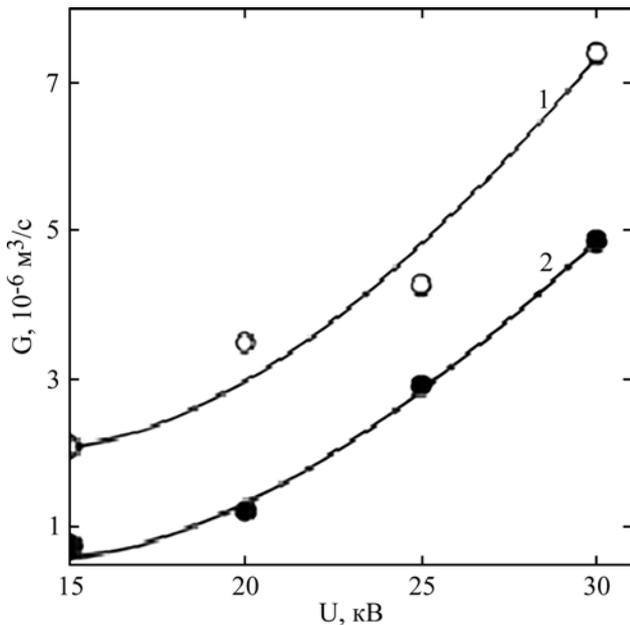


Рис. 22. Зависимость расхода рабочей жидкости от напряжения при различной полярности высоковольтного электрода эмиттера (лезвия): 1 – «-», 2 – «+», $d = 3$ мм, $\sigma = 6,6 \times 10^{-10}$ См/м.

Ввиду электроотрицательности смеси трансформаторного масла с бутиловым спиртом она лучше прокачивается ЭГД-насосом с отрицательным потенциалом на эмиттере (кривая 1). Напорно-расходная характеристика насоса при различных напряжениях представлена на рис. 23.

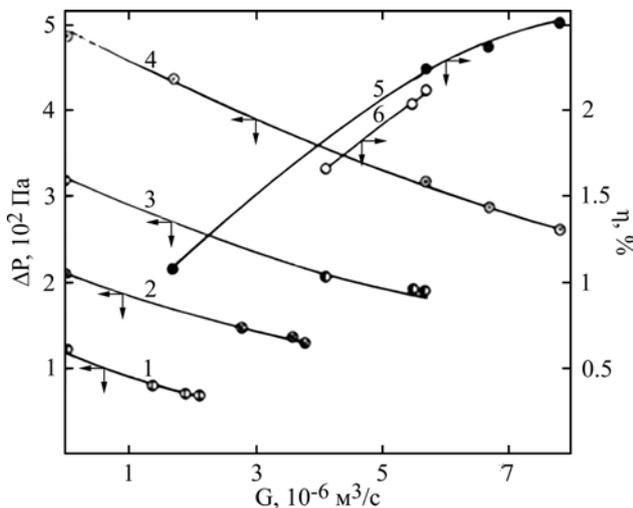


Рис. 23. Зависимости напорной характеристики и КПД ЭГД-насоса от расхода при различных напряжениях (U), кВ: 1 – 15; 2 – 20; 3, 6 – 25; 4, 5 – 30; $\sigma = 6,6 \times 10^{-10}$ См/м.

Ход кривых, соответствующих разным напряжениям, по характеру одинаковый. С ростом напряжения зависимость $\Delta P = f(G)$ смещается в область больших напоров и расходов (кривые 1, 2, 3, рис. 23). Повышение гидравлического сопротивления внешнего контура вызывает усиление степени локализации

ЭГД-течения в межэлектродном промежутке, что приводит к снижению КПД (кривые 5 и 6, рис. 23). Дополнительное увеличение неоднородности электрического поля на эмиттере, осуществленное нанесением на лезвие треугольных выступов, при $U \geq 25$ кВ не способствует улучшению характеристик насоса (кривые 1 и 2, рис. 24), что объясняется несущественным изменением плотности объемных зарядов у эмиттера.

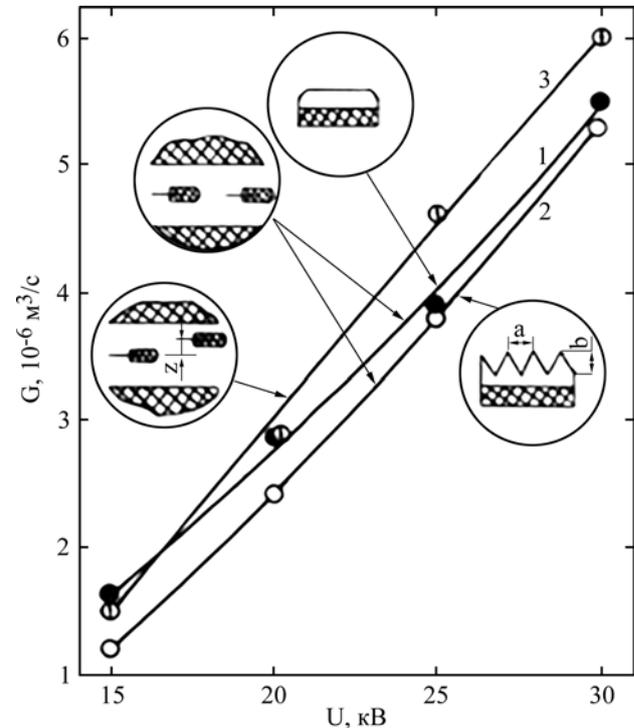


Рис. 24. Зависимость расхода от напряжения при различных конфигурациях эмиттера и взаимном расположении электродов: $z = 1$ мм, $a = 2$ мм, $b = 2$ мм, $d = 3$ мм, $\sigma = 6,2 \times 10^{-10}$ См/м.

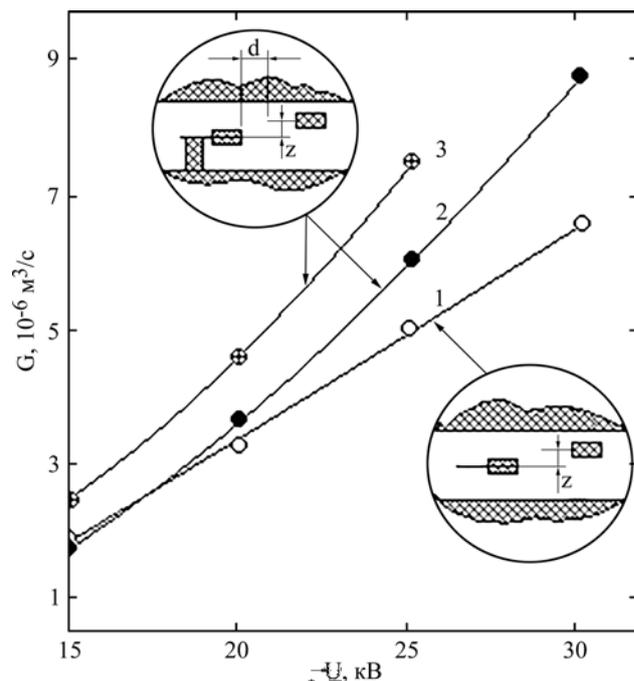


Рис. 25. Зависимость расхода от напряжения: 1, 2 – $d = 3$ мм; 3 – $d = 2$ мм; $z = 2$ мм; $\sigma = 3,1 \times 10^{-10}$ См/м.

Уменьшение напряжения приводит к снижению интенсивности прокачки, обусловленному изменением гидродинамики в межэлектродном промежутке. С нарушением соосности электродов наблюдается увеличение скорости потока при $U > 20$ кВ (кривая 3, рис. 24). В этом случае скорость потока определяется соотношением интенсивности выброса рабочего вещества из межэлектродного промежутка и вытягиванием его обратно со стороны, противоположной поверхности коллектора (по отношению к эмиттеру). Поэтому ухудшение интенсивности прокачки связано с превалированием последнего процесса, подтверждением этого являются зависимости, приведенные на рис. 25.

Действительно, с перекрытием канала со стороны удаленной (по отношению к эмиттеру) боковой поверхности коллектора существенно повышается скорость потока в замкнутом контуре, особенно с ростом напряжения (кривые 1 и 2). Улучшаются параметры насоса по мере уменьшения расстояния между электродами менее 3 мм (кривые 2 и 3), что объясняется снижением степени влияния на ЭГД-течение ионного слоя, накапливающегося у изолированной части коллектора за счет удаления от него эмиттера к стенке канала, и, как следствие, усиления вытягивающего воздействия на заряженную среду боковой поверхности коллектора, ближайшей к эмиттеру. Это воздействие значительно усиливается с изменением угла между коллектором и плоскостью стенки канала до 90° , как показано на рис. 26.

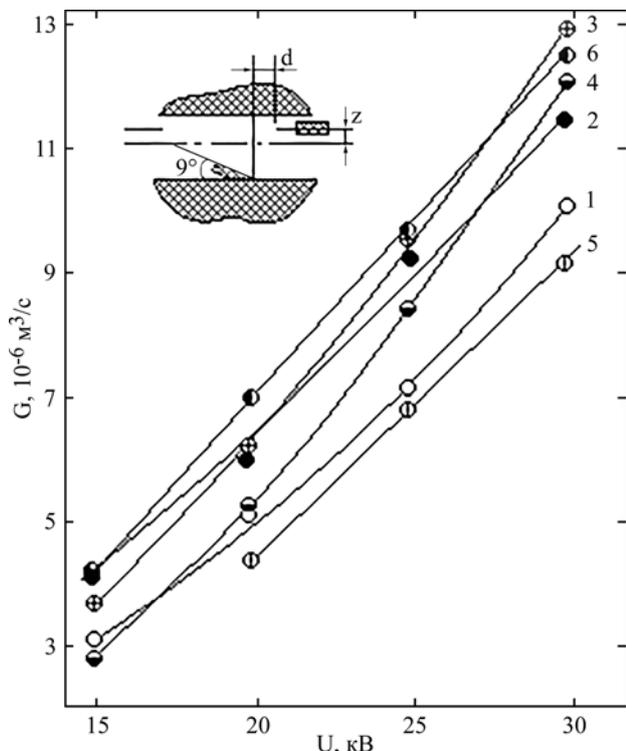


Рис. 26. Зависимость расхода от напряжения при различных проводимостях и расстояниях между электродами, σ (См/м): 1 – $1,3 \times 10^{-10}$; 2 – 3×10^{-10} ; 3 – $6,1 \times 10^{-10}$; 4 – $1,2 \times 10^{-9}$, $d = 2$ мм; 5 – $1,1 \times 10^{-9}$, $d = 3$ мм; 6 – $1,1 \times 10^{-9}$, $d = 1$ мм, $z = 2$ мм.

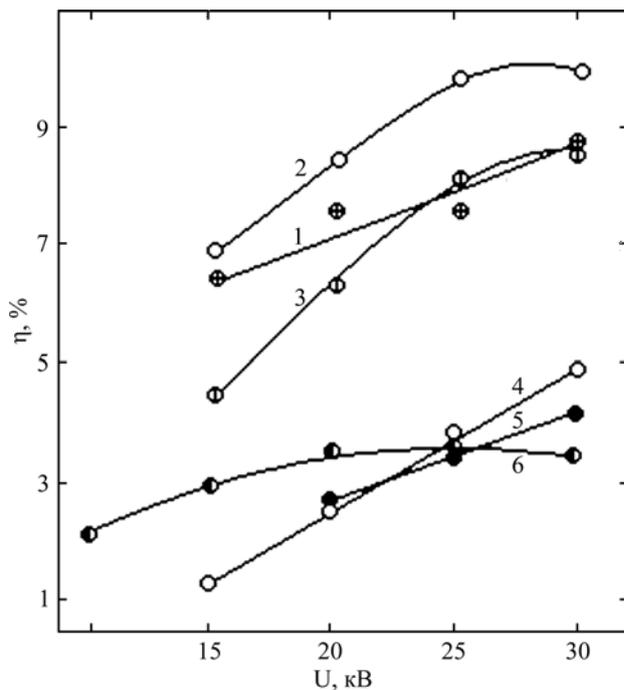


Рис. 27. Зависимость КПД ЭГД-системы от напряжения при различных проводимостях рабочей среды и расстояниях между электродами, σ (См/м): 1 – $1,3 \times 10^{-10}$; 2 – 3×10^{-10} ; 3 – $6,1 \times 10^{-10}$; 4 – $1,2 \times 10^{-9}$, $d = 2$ мм; 5 – $1,1 \times 10^{-9}$, $d = 3$ мм; 6 – $1,1 \times 10^{-9}$, $d = 1$ мм.

Повышается расход жидкости по внешнему контуру (кривая 3, рис. 25 и кривая 2, рис. 26), максимальное значение которого достигается при проводимости среды $\sigma = 6,1 \times 10^{-10}$ См/м (кривая 3). В то же время экстремальное значение КПД насоса наступает при $\sigma = 3 \times 10^{-10}$ См/м и по величине не превышает 10%. С уменьшением межэлектродного расстояния увеличивается интенсивность сквозной прокачки (кривые 4–6), но изменяется характер зависимости КПД от напряжения (кривые 4–6, рис. 27), которая при $d = 2; 3$ мм монотонно возрастает, а при $d = 1$ мм сначала возрастает, затем в интервале 20–30 имеет постоянное значение. То есть основная часть энергии, подводимая к ЭГД-наосу, затрачивается на Джоулев разогрев рабочей жидкости. Таким образом, из рассмотренных схем расположения электродов лучшие напорно-расходные характеристики получены при размещении коллектора под углом 90° к плоскости стенки канала (рис. 26).

Характеристики насоса «стержень с изоляционным покрытием-два стержня»

В трехстержневой системе электроды были выполнены из медного провода $\varnothing 1$ мм, длиной 44 мм. Покрытие из фторопласта наносилось на 2/3 части (по направляющей) боковой поверхности эмиттера со стороны, обращенной к входу насоса. От ширины b_1 (по направляющей поверх-

Таблица. Изменение напорно-расходной характеристики ЭГД-насоса в зависимости от ширины (по направляющей поверхности провода) оголенной поверхности эмиттера ($d = 1,3 \times 10^{-3}$ м, $S_1 = 1,5 \times 10^{-3}$ м, $\sigma = 1,0 \times 10^{-11}$ См/м)

$b_1, 10^{-3}$ м	0.2		0.7		1.2		Перфор. поверхн.	
$U, \text{кВ}$	20	25	20	25	20	25	20	25
$G, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	1,3	2,4	2,8	5,1	3,0	5,8	3,7	7,1
$\Delta P, \text{Па}$	56	129	129	230	129	259	169	306
$I, 10^{-6} \text{ А}$	1,43	2,4	1,5	3,0	1,8	3,45	3,3	6,0

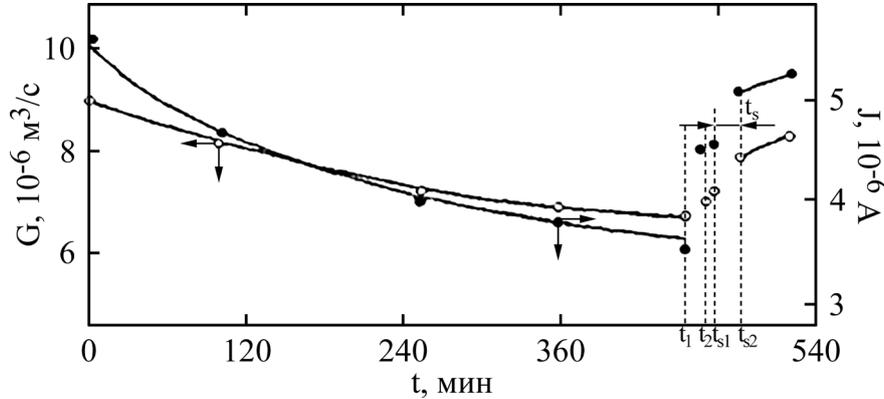


Рис. 28. Зависимости расхода жидкости и тока утечки от продолжительности работы ЭГД-насоса, $E = 107$ кВ/см: t_1 – момент обесточивания насоса; t_2 – момент подачи напряжения на эмиттер, $t_s = (t_2 - t_1)$ – интервал, соответствующий короткому замыканию эмиттера с коллектором при $U = 0$.

ности цилиндра) оголенной поверхности (степени изоляции) эмиттера значительно зависят характеристики рассматриваемого ЭГД-насоса (см. таблицу). Уменьшение оголенной поверхности, что равносильно степени изоляции поверхности электрода, приводит к снижению напора и расхода. При этом структура ЭГД-течения становится похожей на ЭГД-течение в системе «лезвие-два стержня», для которой характерна нестабильность центральной струи.

Характеристики насоса улучшаются с повышением неоднородности электрического поля на эмиттере нанесением на его оголенную поверхность дополнительного перфорированного диэлектрического покрытия в виде чередующихся по всей длине электрода оголенных и изолированных участков. Размеры перфораций (длины оголенных участков) существенно влияют на работу насоса. Лучшие результаты получены при длине перфорации $\sim (0,3 \div 1)$ мм, изолированного участка ~ 1 мм. При этом ширина перфораций составляла $1/3$ направляющей боковой поверхности электрода. Определенное влияние на выходные параметры насоса оказывает диаметр эмиттера, с его увеличением более 1 мм (в частности до 2,5 мм) наблюдается уменьшение напора с 469 до 363 Па и расхода с $9,1 \times 10^{-6}$ до $7,5 \times 10^{-6}$ м³/с. Это объясняется, во-первых, сужением зазора между эмиттером и стенками канала, во-вторых, изменением структуры ЭГД-течения, обусловленным снижением неоднородности электрического поля на эмиттере. Ее усиление за счет

утонения изолированного электрода не улучшает характеристики насоса. Увеличиваются нестабильность центральной струи ЭГД-течения и зазор между эмиттером и стенками, вследствие чего усиливается интенсивность возвратных течений. Установлено изменение производительности ЭГД-насоса в процессе работы (рис. 28). Со временем происходит понижение расхода, которое связано с электроочисткой трансформаторного масла от механических примесей (частиц размером менее 10 мкм) [20, 21] и продуктов окисления, представляющих полярные соединения (по размерам близкие к коллоидным частицам) [22]. В результате электроочистки уменьшается проводимость рабочей среды и наблюдается осаждение примесей на поверхности электродов. Кроме этого, в осадке могут быть продукты разложения трансформаторного масла под действием микро-разрядов (на границе раздела «эмиттер-жидкость»), о возможности чего говорилось в случае насоса «лезвие-лезвие с изолированной кромкой».

Образование осадка в основном на положительных электродах позволяет считать, что частицы осадка являются носителями отрицательных зарядов. В результате происходит понижение интенсивности электрохимических процессов на коллекторе, что согласуется и с изменением тока утечки во времени (рис. 28). Следует учитывать и поляризационные эффекты на границе раздела «электрод-жидкий диэлектрик» и поляризацию стенок канала в межэлектродном промежутке. Об этом

свидетельствует некоторое увеличение расхода и тока утечки после кратковременного (на время $\Delta t = (t_2 - t_1) \sim 20$ мин) отключения насоса (рис. 28).

Восстановление производительности ЭГД-насоса наблюдается и после короткого замыкания эмиттера с коллектором одновременно с отключением источника питания (интервал времени t_s). За счет волн от электродов, образующихся во время разряда, часть слоя продуктов электроочистки отходит от поверхности коллектора в жидкость, инициируя тем самым первоначальное состояние, как следствие, увеличивается производительность насоса. Аналогичные зависимости наблюдаются после пробоя в межэлектродном промежутке: в начальный момент некоторое увеличение скорости прокачивания рабочей среды, а в дальнейшем ее понижение с выделением продуктов пробоя на электродах коллектора.

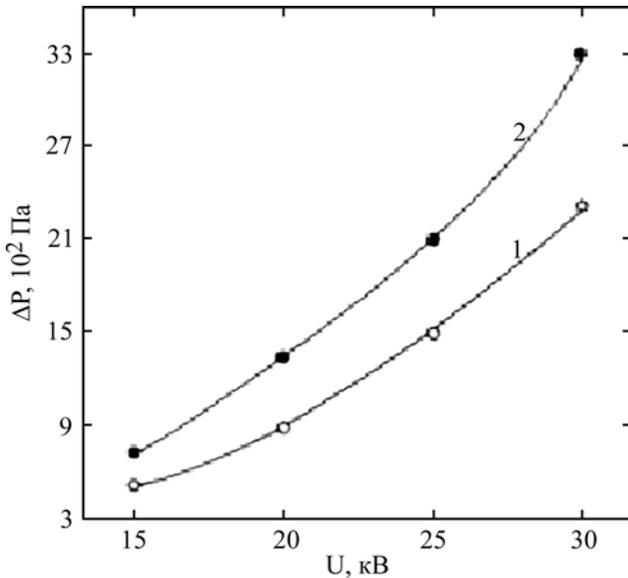


Рис. 29. Зависимость статического напора от напряжения: 1 – при наличии осадка на электродах коллектора; 2 – в отсутствие осадка. $d = 2$ мм; $\delta = 5$ мм; $S_1 = 1$ мм.

На рис. 29 представлены зависимости статического напора от напряжения при различных состояниях поверхности электродов коллектора. Значительное влияние на производительность насоса оказывают: межэлектродное расстояние – d , ширина канала в межэлектродном промежутке – δ , зазор между электродами коллектора – S_1 . С увеличением межэлектродного расстояния, при прочих равных условиях, скорость сквозной прокачки растет (увеличивается КПД, рис. 30), что объясняется уменьшением интенсивности возвратных течений и увеличением расстояния, проходимого ионами, увлекающими за собой большое количество нейтральных молекул. Но такая сильная зависимость характеристики насоса от расстояния прослеживается до 5 мм

(кривые 1 и 2), чего нельзя утверждать при более высоких значениях d (кривая 3, рис. 30).

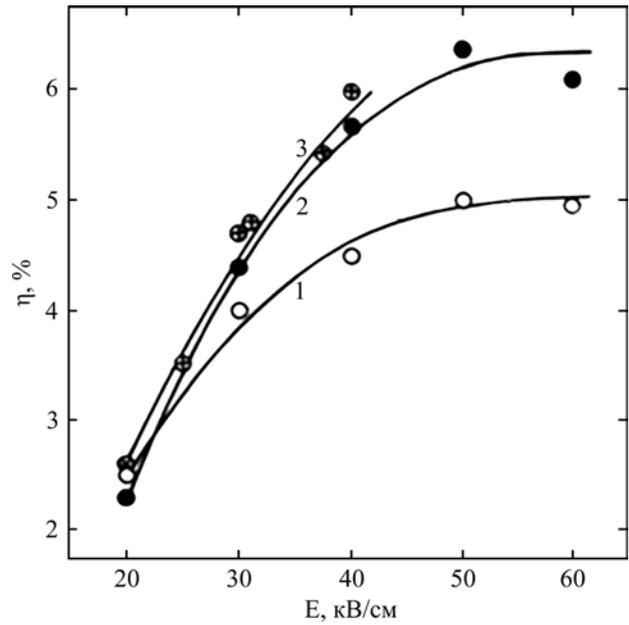


Рис. 30. Зависимость КПД от напряженности электрического поля при различных расстояниях между электродами d , мм: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 8.

По мере сужения зазора (повышения гидравлического сопротивления) между электродами коллектора динамические характеристики насоса ухудшаются (рис. 31), но увеличивается статический напор (кривые 5 и 6, рис. 32).

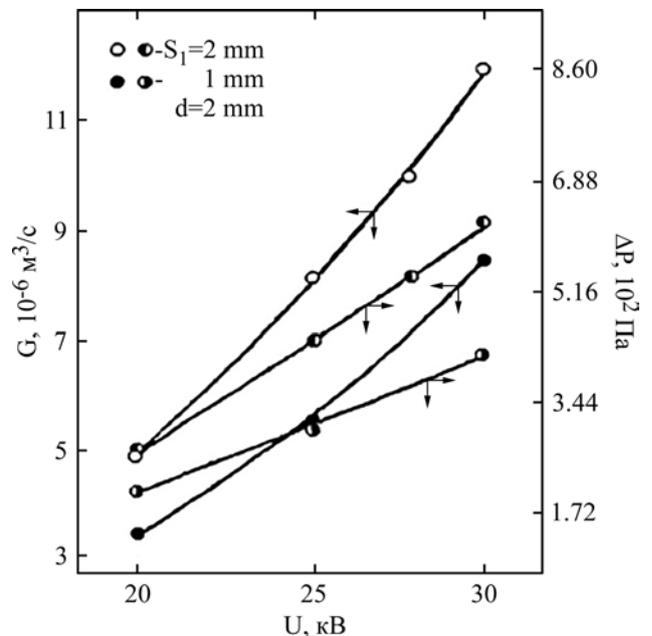


Рис. 31. Зависимости расхода и перепада давления от разности потенциалов.

Уменьшение ширины канала в межэлектродном промежутке при постоянном зазоре между электродами коллектора приводит к понижению напора (кривые 2 и 4, рис. 32), который возрастает с приближением эмиттера к коллектору (кривая 5). Оптимальное соотношение d :

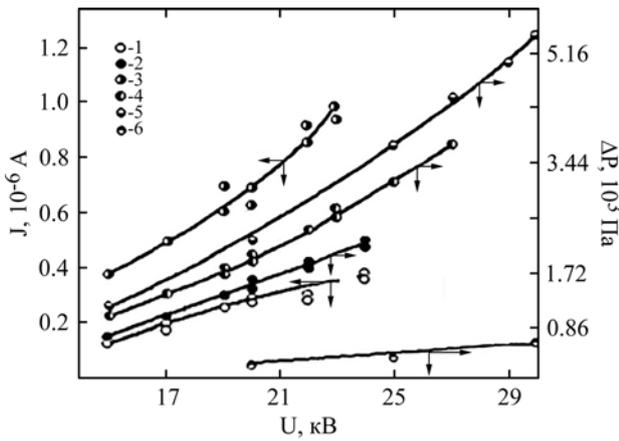


Рис. 32. Зависимости тока утечки и статического напора от разности потенциалов между эмиттером и коллектором, $\sigma = 4,0 \times 10^{-12}$ См/м: 1, 2 – $d = 2$ мм; $\delta = 1$ мм; 3, 4 – $d = 2$ мм, $\delta = 2$ мм; 5 – $d = 1,5$ мм, $\delta = 2$ мм, $S_1 = 1$ мм; 6 – $d = 1,5$ мм, $\delta = 5,6$ мм, $S_1 = 2,5$ мм.

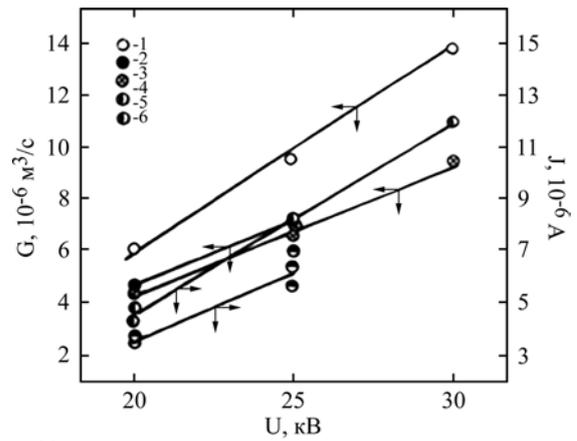


Рис. 33. Зависимости расхода и тока утечки от напряжения между электродами при различных полярностях эмиттера: 1, 4 – на эмиттере « \leftarrow »; 2 – на эмиттере « \rightarrow »; 3, 5 – после положительной полярности, на эмиттере « \leftarrow ».

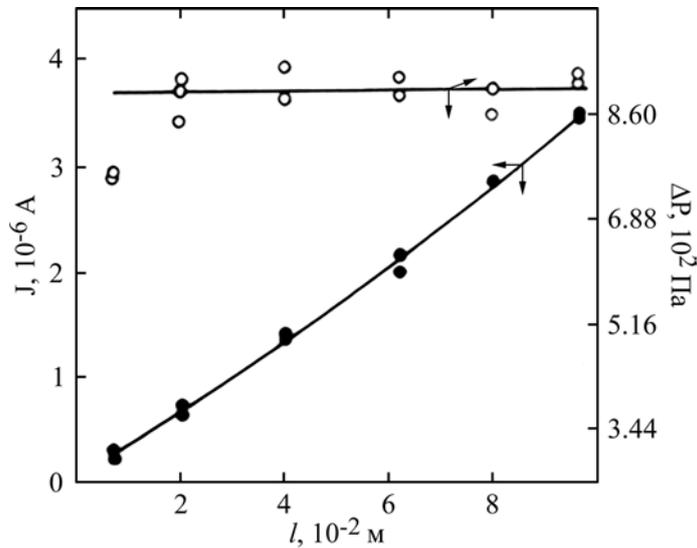


Рис. 34. Зависимости напора и тока утечки от длины электродов, $E = 100$ кВ/см.

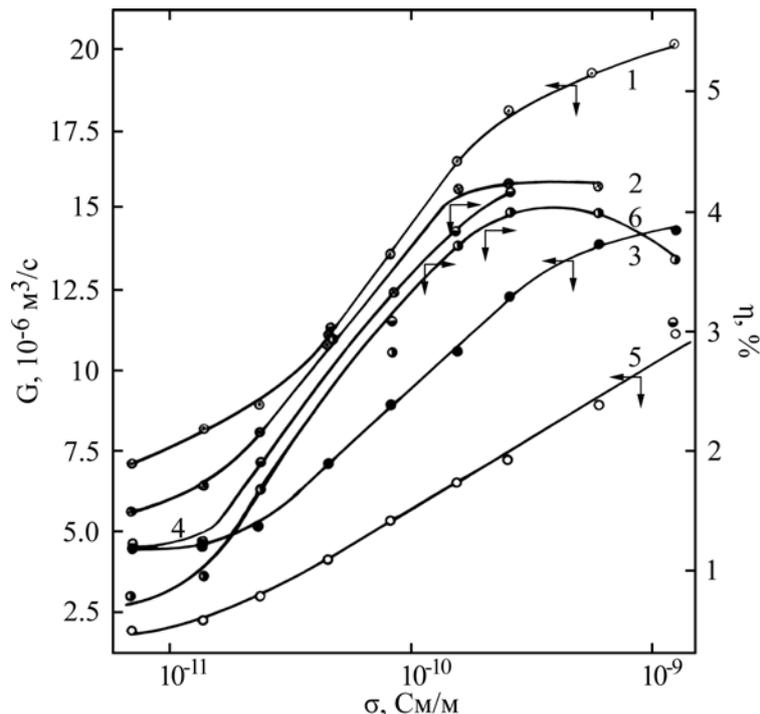


Рис. 35. Зависимости расхода и КПД ЭГД-насоса от проводимости среды при различных напряженностях электрического поля, E (кВ/см): 1, 2 – 192; 3, 4 – 154; 5, 6 – 115; $d = 1,3$ мм; $S_1 = 1,5$ мм.

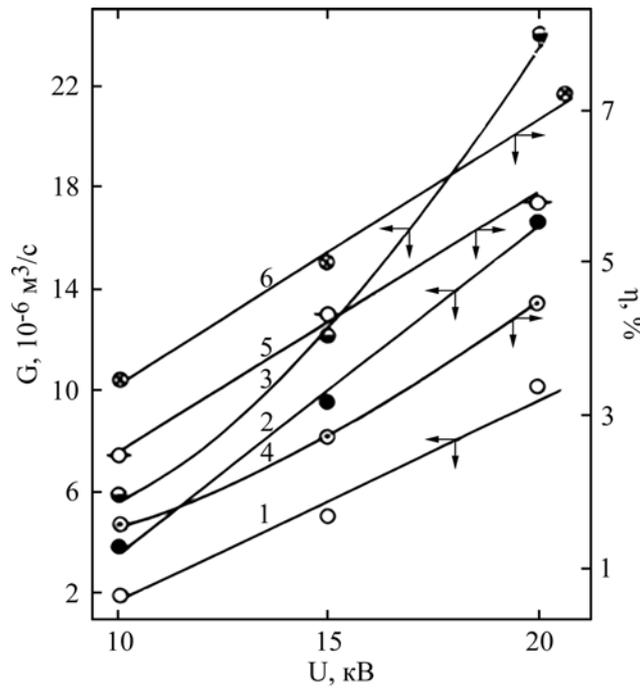


Рис. 36. Зависимости расхода и КПД (η) от напряжения при различной температуре трансформаторного масла, $^{\circ}\text{K}$: 1, 4 – 297; 2, 5 – 315; 3, 6 – 327.

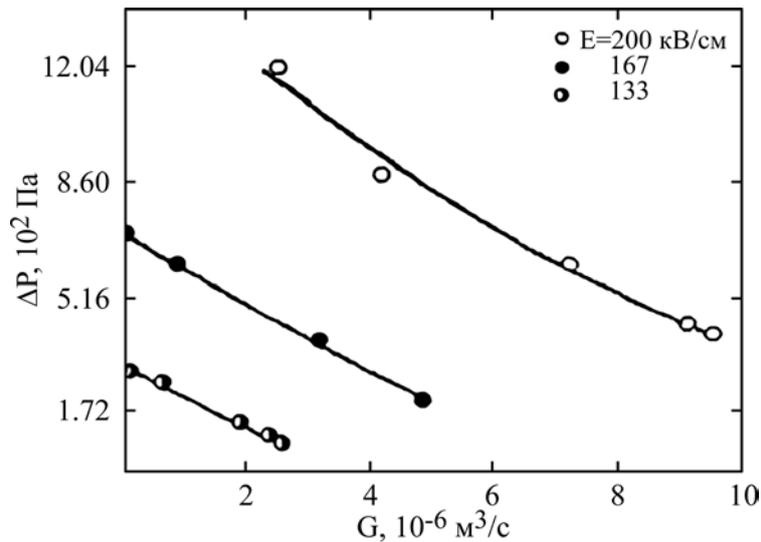


Рис. 37. Напорно-расходные характеристики ЭГД-насоса при различных напряженностях электрического поля, $\sigma = 1,25 \times 10^{-11}$ См/м: $d = 1,5$ мм, $\delta = 4,1$ мм, $S_1 = 1,5$ мм.

δ , S_1 , соответствующее наибольшему статическому напору, равно 1,5:2:1 мм. Зависимость характеристик ЭГД-насоса от полярности электродов представлена на рис. 33.

Изменение полярности эмиттера с отрицательного на положительное приводит к ухудшению производительности насоса, что, как отмечалось в случае электродов «лезвие-лезвие с изоляционным покрытием», связано с электроотрицательностью рабочей среды (кривые 1 и 2). При последующем изменении полярности эмиттера обратно на отрицательное наблюдается снижение расхода по сравнению с первоначальным его значением (кривые 1 и 3). Видимо, на поверхности положительного эмиттера происходит образование осадка. Удлинение (l)

электродов при неизменной напряженности поля практически не оказывает влияния на статический напор насоса (рис. 34).

Некоторое снижение напора при малых l связано с конструктивной особенностью установки. Отсутствие зависимости напора от длины электродов может быть использовано для улучшения расходной характеристики насоса. Повышение проводимости рабочей среды (добавлением бутилового спирта) сопровождается ростом скорости прокачивания (рис. 35).

Зависимость КПД (η) от проводимости достигает максимального значения в интервале $\sigma = (2 \times 10^{-10}; 6 \times 10^{-10})$ См/м, что согласуется с результатами, полученными для системы электродов «лезвие-лезвие с изолированной

кромкой». При этом КПД системы не превышает 4,5%. В значительной степени производительность насоса зависит от температуры трансформаторного масла (рис. 36).

С повышением температуры рабочего вещества улучшаются характеристики насоса (кривые 1, 2, 3 и 4, 5, 6), что объясняется уменьшением вязкости трансформаторного масла и увеличением плотности объемных зарядов в межэлектродном промежутке, обусловленными наличием термической неоднородности. Напорно-расходные характеристики рассматриваемого насоса в чистом трансформаторном масле приведены на рис. 37.

С ростом напряженности поля между электродами зависимость $\Delta P = f(G)$ сдвигается в область больших напоров и расходов. По своему характеру они подобны зависимостям, приведенным на рис. 23.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдены оптимальные параметры поля, среды, канала и расстояния между электродами рассмотренных конструкций ЭГД-насосов. Показано, что нанесением диэлектрического покрытия на электроды можно повысить производительность ЭГД-насосов. Наибольшее значение КПД достигнуто в системе электродов «лезвие-лезвие с изолированной кромкой» по абсолютной величине, не превышающей 10%. Максимальный статический напор получен в трехстержневой системе с перфорированным изоляционным покрытием эмиттера при $d: \delta, S_1 = 1,5:2:1$ мм. При этом установлено отсутствие зависимости статического напора от длины электродов, что имеет важное значение для улучшения характеристик насоса. Выявлено, что некоторое снижение производительности ЭГД-насоса со временем вызвано поляризационными процессами на границе «электрод-жидкость», уменьшением электропроводности рабочего вещества (в результате электроочистки) и образованием осадка на поверхности электродов, которое особенно сильно проявляется в системе «лезвие-лезвие с изолированной кромкой». Наряду с отмеченными факторами эффективность работы ЭГД-насоса зависит от соотношения гидравлического сопротивления внешнего контура, по которому прокачивается диэлектрическая среда, и напора, создаваемого в межэлектродном промежутке. Учитывая, что гидравлическое сопротивление внешней нагрузки может меняться в широких пределах, то одноступенчатые модели ЭГДН не всегда могут обеспечивать необходимые напоры и расходы перека-

чиваемой жидкости. Поэтому в зависимости от необходимых выходных характеристик одноступенчатые насосы устанавливаются параллельно и последовательно. Наиболее полно для этих целей подходят конструкции с тремя стержневыми (проволочными) электродами, позволяющими легко улучшить расходные характеристики насоса за счет их параллельного размещения, образующими электроды-решетки, расположенные друг против друга. Повышение напора достигается использованием многоступенчатого насоса, состоящего из электродов-решеток. Единственным недостатком трехстержневой системы электродов является ограниченность поверхности электродов коллектора, оказывающая значительное влияние на степень нейтрализации потока рабочей жидкости (о чем свидетельствует воздействие четвертого электрода на структуру ЭГД-течения). В связи с этим возникает взаимное влияние соседних ступеней, снижающее эффективность работы многоступенчатого насоса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seki, Yu., Kuwajima, Yu. and Maeda, S., Optimization of the electrode arrangement and reliable fabrication of flexible EHD pumps, *J. Robotics Mechatronics*, 2020, vol. 32, no. 5, p. 939. doi: [10.20965/jrm.2020.p0939](https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0939).
2. Vasilkov, S., Poluektova, K.D. and Stishkov, Yu., Experimental and numerical study of an electrohydrodynamic pump operating due to the field-enhanced dissociation near a dielectric barrier, *Phys. Fluids*, 2020, vol. 32, no. 10, 107102. doi: [10.1063/5.0022353](https://doi.org/10.1063/5.0022353).
3. Daaboul, M., Traoré, P., Modh, S. and Louste, C., Influence of electrode spacing on a symmetrical washer-type electrohydrodynamic conduction pump, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1322, Electrostatics 2019 and Dielectrics 2019, 8–12 April 2019, Manchester, UK, 012033.
4. Sato, T., Maeda, S. and Yamanishi, Y., Study of low energy micro EHD pump by designed electric field, *29th Int. Symp. Micro-NanoMechatronics and Human Sci.*, MHS 2018, Nagoya, Japan. doi: [10.1109/MHS.2018.8886968](https://doi.org/10.1109/MHS.2018.8886968).

5. Feng, J., Wan, Z., Wen, W., LI, Ya., et al., Influence of chamber dimensions on the performance of conduction micropump, *J. Micromech. Microeng.*, 2016. vol. 26, 055014. doi: [10.1088/0960-1317/26/5/055014](https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/5/055014).
6. Hojjati, M., Esmailzadeh, E., Sadri, B. 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, p. 294. doi: [10.1016/j.colsurfa.2011.10.007](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.10.007).
7. Jafari, M., Esmailzadeh, E. and Farrokhi, N., Experimental study of the effects of fluid physical properties on conduction pump performance, *Mech. Eng.*, 2020, vol. 52, no. 4, p. 223. doi: 10.22060/mej.2019.14866.5961.
8. Tsukiji, T., Tajima, T. and Suzuki, R., Application of the EHD flow to a pump, *Proc. 4th World Congr. Mech., Chem. Mater. Eng. (MCM'18) Madrid, Spain – August 16 – 18, 2018*. doi: 10.11159/htff18.117 HTFF 117-1.
9. Cho, D., Kang, S. and Suh, Y., Development of a bi-directional electrohydrodynamic pump: Parametric study with numerical simulation and flow visualization, *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 6, p. 1. doi: 10.1177/16878 | 40 | 6655777.
10. Yazdani, M. and Yagoobi, J.S., The effect of uni/bipolar charge injection on EHD conduction pumping, *J. Electrostat*, 2015, vol. 75, p. 43.
11. Stuetzer, O.M., Instability of certain electrohydrodynamic system, *Phys. Fluids*, 1959, vol. 2, no. 6, p. 642.
12. Stuetzer, O.M., Ion drag pressure generation, *J. Appl. Phys.*, 1959, vol. 30, no. 7, p. 984.
13. Stuetzer, O.M., Ion drag pumps, *J. Appl. Phys.*, 1960, vol. 31, no. 1, p. 136.
14. Жакин, А.И., Электрогидродинамика, *УФН*, 2012, т. 182, № 5, с. 495.
15. Васильев, Л.А., *Теневые методы*. М.: Наука, 1968, 400 с.
16. Schmidt, B., Schlieren Visualization, 2015, https://shepherd.caltech.edu/T5/Ae104/Ae104b_handout2015.pdf, p. 9.
17. Fossa, M., Misale, M. and Tanda, G., Schlieren visualization of water natural convection in a vertical ribbed channel, *33rd UIT (Italian Union of Thermofluid-dynamics) Heat Transfer Conf., J. Phys.: Conf. Series* 655 (2015) 012005. doi:10.1088/1742-6596/655/1/012005
18. Sato, T., Sakuma, S., Hijikuro, M., Maeda, S., et al., Design of electrohydrodynamic devices with consideration of electrostatic energy, *Cyborg Bionic Syst.*, 2021, p. 5158282. <https://doi.org/10.34133/2021/5158282>.
19. Стишков, Ю.К., Остапенко, А.А., Зависимость интенсивности и КПД электрогидродинамических течений от низковольтной проводимости жидкости, *Магнитная гидродинамика*, 1979, № 1, с. 74.
20. Горячкин, С.Н., Искажение однородного электрического поля частицами примесей в трансформаторном масле, *Изв. вузов СССР, Энергетика*, 1970, № 1, с. 10.
21. Липштейн, Р.А., Шахнович М.И., *Трансформаторное масло*, М.: Энергоатомиздат, 1983, 296 с.
22. Шахнова, М.И., Данилова, А.И., Борщевская, И.С., Электрофизическая стабильность трансформаторных масел различного химического состава в электрическом поле, *Электрофизические процессы в жидких диэлектриках и научные проблемы применения изолирующих жидкостей в энергетике*, Томск, 1976, с. 126.

Summary

The results of investigations of electrohydrodynamic (EHD) flows using the schlieren method in the following systems of electrodes: “a blade – isolated edge blade”, “a blade – two rods”, and “a rod with a perforated isolation coating – two rods” are presented. On the base of the obtained results, single-stage EHD pumps were designed. Their head and flow specifications were studied depending on various factors. It was shown that the performance of the EHD pumps can be increased by application of dielectric coatings on the electrodes. The maximal efficiency was obtained in the system of electrodes “a blade – a blade with isolated edge”, the maximal static pressure – in a three-rod system with a perforated isolation coating of the emitter. The advantages of a three-rod system were specified related to the improvement of the flow characteristics of the pumps due to their parallel arrangement and increasing of the pump pressure by using multi-stage pumps with grid electrodes.

Keywords: electrohydrodynamic flow, electrohydrodynamic pump, stage, electrohydrodynamic system, schlieren method, dielectric fluid, pump pressure, pump capacity, dielectric coating, perforation, grid electrode, pump efficiency, pump performance