

Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 3. Электроконвекция и электрогидродинамические насосы в системах охлаждения и термостатирования

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

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

Поступила в редакцию 05.04.2021

После доработки 30.11.2021

Принята к публикации 03.12.2021

Исследуется эффективность электрогидродинамической (ЭГД) системы охлаждения и термостатирования электронных и электротехнических устройств. Предложена конструкция электроконвективного охлаждения рентгеновского генератора, эффективность которого подтверждена на лабораторных макетах и натуральных образцах. Температура анода снижена в 2 раза, увеличена продолжительность работы излучателя, повышена надежность устройства. Представлены различные способы охлаждения высоковольтного трансформатора, позволяющие повысить удельную мощность, уменьшить массогабаритные параметры и температуру теплоносителя, увеличить ресурс. Проведены исследования с целью установления возможности термостатирования теплоотдающего элемента (блока) ЭГД методами при изменении как внешних, так и внутренних условий. Разработана и испытана конструкция ЭГД термостата с автоматической системой термостабилизации (температура поддерживается с точностью $\pm 0,05$ °C). Сконструирована рамка с ЭГД жидкостным контуром и ЭГД термостатом, позволяющими значительно снизить продольные температурные перепады и уменьшить ее деформацию. Показана высокая эффективность ЭГД методов охлаждения на примере блока светодиодов, малых элементов и узлов электронной техники, использования электродов-проволок с перфорированным изоляционным покрытием при охлаждении плоских теплоотдающих поверхностей, достигнуто семикратное увеличение коэффициента теплоотдачи.

Ключевые слова: электрогидродинамические системы, насосы, прокачка, турбулизация, охлаждение, термостат, термостабилизация; рентгеновский излучатель, электроды, высоковольтный трансформатор, рамка подвеса, блок светодиодов, изоляционное покрытие, перфорация, ресурс

УДК 532.5: 537 + 536.24:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.34>

ВВЕДЕНИЕ

Новые возможности в совершенствовании систем охлаждения и термостатирования элементов и узлов радиоэлектронной (микроэлектронной), оптоэлектронной, электротехнической аппаратуры открывает использование электроконвективных явлений, преимущества которых могут быть реализованы как с позиций турбулизации теплоносителя, его транспорта или их сочетания в замкнутых компактных циркуляционных контурах. Специфические особенности воздействия электрических полей на слабопроводящие жидкие теплоносители [1] обеспечивают практически безынерционную, высокоэффективную и легко регулируемую интенсификацию теплообмена. Предпочтительно применение электрогидродинамических (ЭГД) явлений, когда необходимы лишь незначительные конструктивные изменения устройства. Эти преимущества ЭГД эффектов использованы

при разработке системы электроконвективного охлаждения рентгеновского излучателя, высоковольтного трансформатора, в электрогидродинамическом термостате, в жидкостной рамке подвеса, светодиодах. Некоторые типы рентгеновских генераторов работают в среде жидкого диэлектрика, который используется как изолятор и теплоноситель для охлаждения преимущественно анода. Рентгеновские лучи возникают при торможении анодом сильно ускоренных электрическим полем заряженных частиц, возникших за счет термоэлектронной или автоэлектронной эмиссии из катода [2, 3]. При этом свыше 95% энергии электронов преобразуется в тепловую (в виде разогрева анода). Для охлаждения анода в рентгеновских трубках средней (несколько сотен ватт) и большой мощности (до 4 кВт) применяются системы проточного жидкостного охлаждения, что увеличивает габариты устройства и энергозатраты.

Применение ЭГД эффектов позволяет значительно снизить эти параметры и повысить ресурс работы охлаждаемых блоков и узлов аппаратуры в радиотехнике, электротехнике, оптоэлектронике, электроэнергетике.

ЭЛЕКТРОКОНВЕКТИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Исследование системы электроконвективного охлаждения импульсной двухэлектродной рентгеновской трубки проводилось на экспериментальной установке [рис. 1](#). Она включала тепловой макет рентгеновского излучателя 1, цепь высокого напряжения (в том числе источник тока АИИ-70), систему охлаждения макета (ультратермостат 2), схему температурных измерений (Ф-30, многопозиционный переключатель 3) и питания нагревателя (стабилизатор напряжения АОСН, ваттметр W).

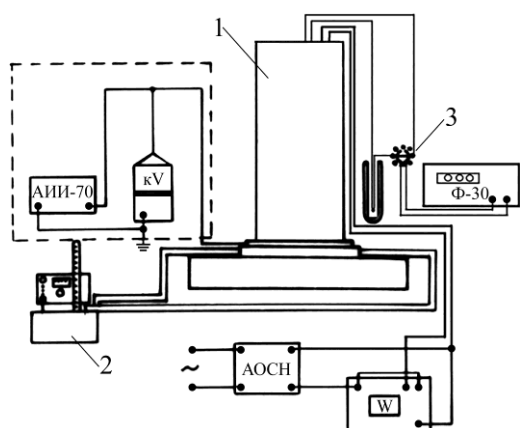


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Тепловой макет рентгеновского излучателя, представляющий собой прозрачную камеру 2 цилиндрической формы, разделенную на две части диэлектрической трубкой 9, снабженной на концах окнами для циркуляции жидкости, приведен на [рис. 2](#).

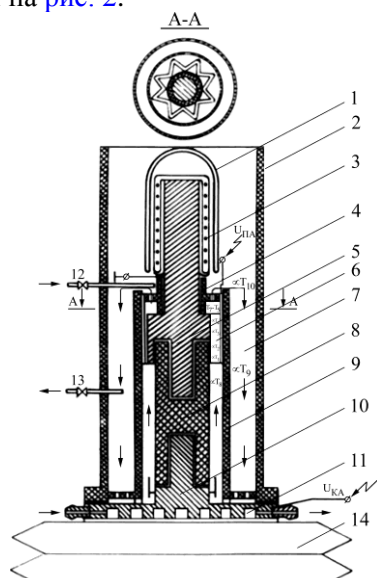


Рис. 2. Схема тепловой модели рентгеновского излучателя.

В диэлектрической трубке соосно камере и с зазором 10 мм размещался имитатор лампы 8, сменный анод 5, который представлял собой продольно оребренный цилиндр диаметром 60 мм и высотой 40 мм, содержащий омический нагреватель 3, теплоизолированный сверху сосудом Дьюара 1. Анод с общим количеством ребер 12, 18, 24 треугольного сечения, эффективность которого показана в работах [4, 5], высотой 10 мм и расстоянием между ребрами у их основания 1 мм, заземлялся, а на катод 10 подавался отрицательный потенциал от высоковольтного источника тока. В зависимости от количества ребер анода ширина ребра у основания соответственно составляла 9, 6, 4 мм. Анод окружен закрепленным на изолирующей втулке 4 противэлектродом 6, повторяющим форму анода и образующим с поверхностями его ребер плоские конденсаторы с зазором в 1,5 мм (сечение А-А, [рис. 2](#)), находящимся под плавающим потенциалом или потенциалом, отличным от анодного на 1,7–3,0 кВ. Металлическая стенка 11, ограничивающая камеру со стороны катода, служила холодильником, подключенным к термостату 2 ([рис. 1](#)). Камера заполнялась трансформаторным маслом 7 и располагалась на изолирующей подставке 14. На катоде размещались дополнительные электроды различной конструкции (лезвиеобразные, сетчатые, расположенные между анодом и катодом нормально к вектору напряженности электрического поля, лезвие с зубцами пилообразной формы, образующими игольчатые электроды) для выявления их роли в создании напора и циркуляции теплоносителя. Тепло, выделяемое на аноде, воспринималось циркулирующей жидкостью и сбрасывалось на холодильник 11. Температура по длине и высоте одного из ребер, а также жидкости измерялась медь-константановыми термопарами соответственно $T_1 \div T_4$, $T_5 \div T_7$, T_8 , T_9 , T_{10} , подключенными к цифровому вольтметру Ф-30. Термопары $T_1 \div T_4$ установлены в основании по длине ребра, $T_5 \div T_7$ размещены на глубине 10 мм от верхнего торца анода в ребре вдоль радиуса с шагом 4 мм (T_7 – основании ребра), T_8 – температура жидкости на входе анода во внутреннем канале (внутренней части камеры), T_9 – во внешнем канале (внешней части камеры), T_{10} – температура над анодом ([рис. 2](#)).

Внешняя и внутренняя части камеры снабжены штуцерами 12 и 13, подсоединенными к термостату с трансформаторным маслом, с помощью которого осуществлялась прокачка теплоносителя. Последняя применялась для определения оптимального количества ребер анода путем снятия зависимости температуры

анода от количества (соотношения ширины к высоте) ребер на нем. Затем при этом количестве ребер и заданной мощности нагревателя 50, 100, 150 Вт снимались показания термопар через определенные промежутки времени при наличии или отсутствии дополнительных электродов на катоде и аноде, включенном или выключенном холодильнике. Питание нагревателя (имитатора анода) осуществлялось от сети переменного тока через автотрансформатор АОСН. В качестве источника высокого напряжения использован однопериодный выпрямитель (на основе АИИ-70) отрицательной полярности. Высокое напряжение на противоэлектрод анода подавалось от высоковольтного источника ВС-23. Подготовка эксперимента начиналась с промывки рабочих поверхностей теплового макета (для исключения попадания примесей) с последующей заливкой профильтрованного трансформаторного масла в камеру. Снимались показания термопар и подавалось напряжение между катодом и анодом, соответствующее $E = 9$ кВ/см. Катод с дополнительными электродами различной конфигурации и анод образуют ЭГД насос, обеспечивающий циркуляцию масла по замкнутому контуру, как показано на рис. 2. В течение 2–3 часов рабочая среда подвергалась воздействию электрического поля с целью стабилизации проводимости масла и измеряемых величин. Затем включались термостат (холодильник) и нагреватель. Напряжение между катодом и анодом варьировалось и составляло 30 и 40 кВ, показания термопар снимались через каждые 30 мин. Эксперименты продолжались до достижения пределов допустимой температуры анода, серия включала опыты при различной мощности излучателя (50, 100, 150 Вт) и различных потенциалах на катоде, аноде и противоэлектроде. Аналогичные эксперименты проводились с использованием электродов различной конфигурации, установленных на катоде, влияющих на интенсивность циркуляции теплоносителя.

На рис. 3 представлены результаты оптимизации количества ребер анода. Температура анода (в основании ребра треугольного сечения, T_7) ниже в случае $n = 18$. Временные зависимости температуры анода при различных типах дополнительных электродов на катоде приведены на рис. 4, из которого следует, что интенсивность инъекции зарядов с заостренных кромок (лезвия пилообразной формы) выше, как следствие, и скорость прокачки теплоносителя и степень охлаждения анода. При этом изменение температуры по длине ребра анода составляло 3°C , по высоте ребра падение температуры не превышало $0,7^\circ\text{C}$, что свидетельствует об

эффективности ребра (соотношении между высотой и шириной).

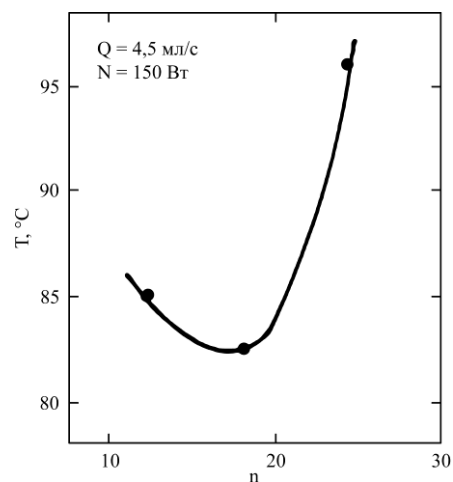


Рис. 3. Зависимость температуры анода от количества ребер.

Введение диэлектрических ребер, расположенных на равном расстоянии друг от друга по направляющей цилиндрической поверхности вокруг трубки δ (рис. 2) и предназначенных для уменьшения возвратных течений, не оказывает существенного влияния на интенсивность охлаждения анода, соответственно на прокачку теплоносителя (кривые 6 и 7, рис. 4).

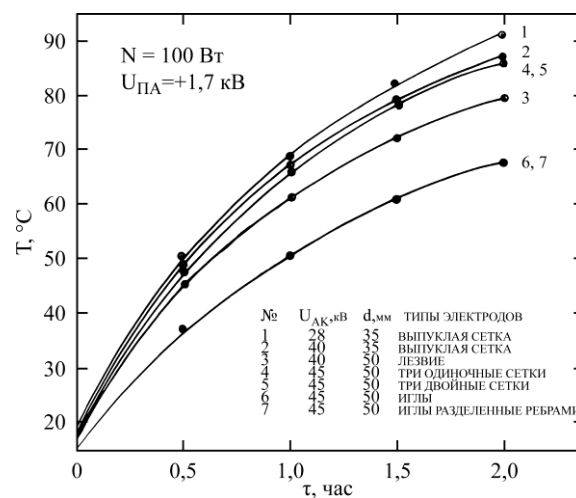


Рис. 4. Зависимость температуры анода от продолжительности работы излучателя.

Зависимости, представленные на рис. 5–7, показывают роль противоэлектрода и заостренных кромок в интенсификации охлаждения анода при разной мощности нагревателя. При отсутствии электродов для ЭГД охлаждения (колонки: нал. прот. «+»; нал. игол. элек. «+»; рис. 5) наличие электрического поля между анодом и катодом несколько увеличивает интенсивность охлаждения анода (кривые 1 и 4, рис. 5).

Введение заостренных кромок на катоде дополнительно интенсифицирует процесс (кривые 4 и 5, рис. 5) за счет возникновения прокачки и частичной турбулизации тепло-

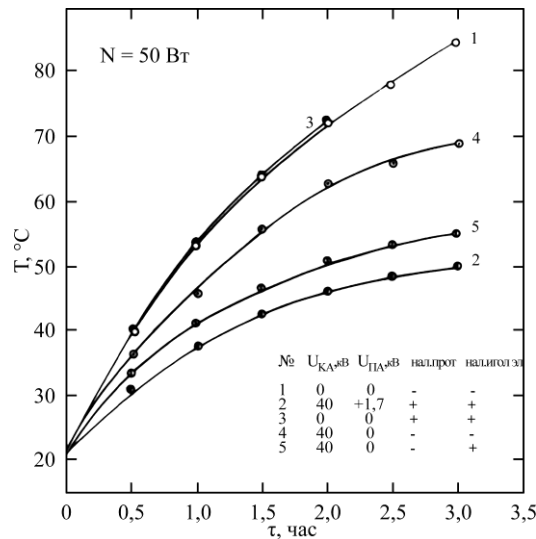


Рис. 5. Зависимость температуры анода от продолжительности работы излучателя.

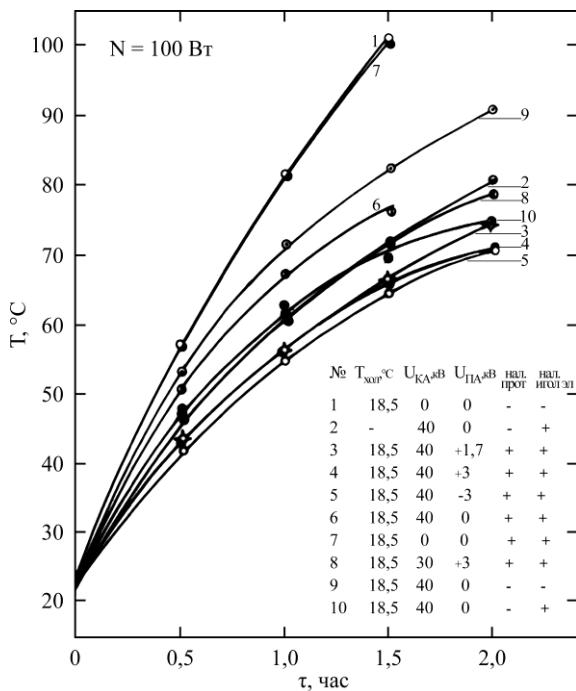


Рис. 6. Зависимость температуры анода от продолжительности работы излучателя.

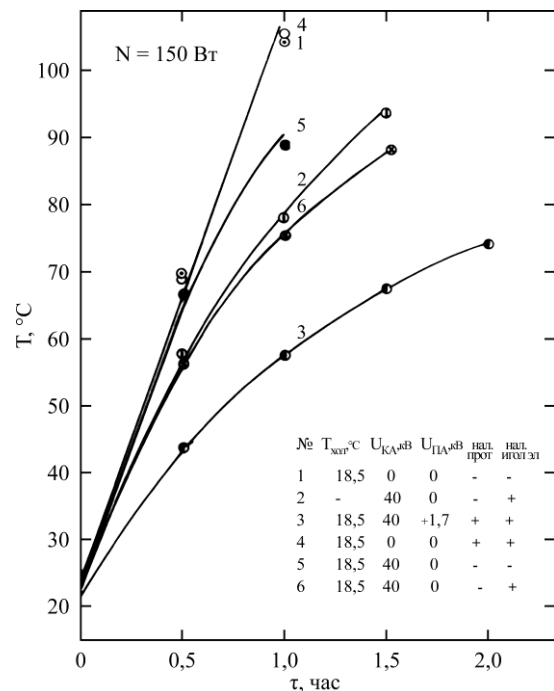


Рис. 7. Зависимость температуры анода от продолжительности работы излучателя.

носителя вблизи радиатора анода, на котором происходит нейтрализация заряженного теплоносителя. Интенсивность охлаждения при использовании игольчатых электродов, установленных на катоде, значительно возрастает с увеличением мощности нагревателя (рис. 6, кривые 9 и 10; рис. 7, кривые 5 и 6). Введение противоэлектрода приводит к увеличению гидравлического сопротивления зазора, образованного между поверхностями оребренного анода и противоэлектрода, в следствие чего отмечается некоторое снижение интенсивности охлаждения (кривые 6 и 10, рис. 6). Значительно повышается интенсивность охлаждения при подаче высокого напряжения на противоэлектрод, в отличие от анодного (кривые 3 и 6, рис. 6). При этом турбулизация теплоносителя вблизи радиатора анода усиливается с

повышением напряжения на противоэлектрод (кривые 3 и 4) и не зависит от его полярности (кривые 4 и 5).

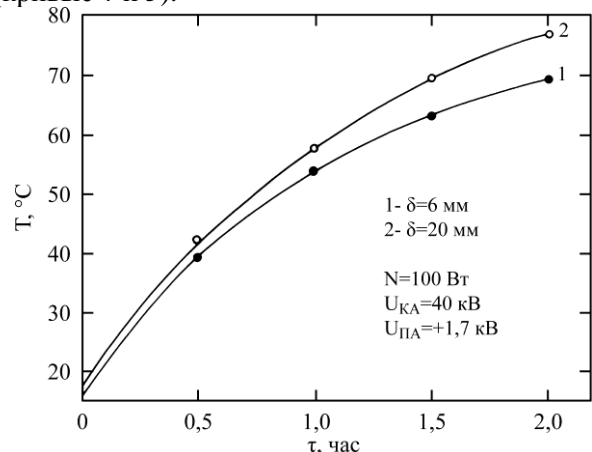


Рис. 8. Зависимость температуры анода от времени при канале различной ширины (δ).

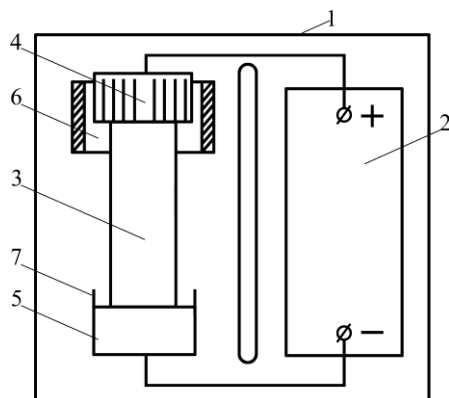


Рис. 9. Схема рентгеновского излучателя: 1 – кожух; 2 – источник питания; 3 – рентгеновская трубка; 4 – оребренный анод; 5 – катод; 6 – противоэлектрод; 7 – острийковые (игольчатые) электроды.

Скорость циркуляции теплоносителя зависит от ширины канала между стенками цилиндров 8 и 9 (рис. 2), о чем можно судить по изменению температуры анода (рис. 8). Сужение канала в межэлектродном промежутке (анод-катод) ЭГД насоса повышает его производительность за счет снижения интенсивности возвратных течений [6]. В условиях эксперимента это достигалось установкой дополнительных съемных колец между стенками цилиндров. В результате температура анода понизилась на 7 °С. Другим способом интенсификации циркуляции теплоносителя, а следовательно, охлаждения анода является размещение ЭГД насосов [6] вне рентгеновской трубки и, как следствие, возможность повышения напряженности поля между электродами. Учитывая полученные результаты, предложена конструкция электроконвективного охлаждения рентгеновского генератора (рис. 9). Испытания на лабораторных макетах и натурных образцах в условиях невесомости подтвердили высокую эффективность электроконвективной системы охлаждения. Это позволило снизить температуру анода до 2 раз, увеличить продолжительность работы излучателя, повысить надежность устройства.

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Без существенных конструктивных изменений можно добиться более эффективного электроконвективного охлаждения высоковольтного трансформатора, в котором имеется жидкий диэлектрический теплоноситель (трансформаторное масло). Это позволяет повысить удельную мощность трансформатора, уменьшить массогабаритные параметры и температуру теплоносителя, что увеличивает его ресурс. Различные способы охлаждения высоковольтных трансформаторов представлены на рис. 10.

В верхней части трубчатого элемента радиатора установлен ЭГД насос 2 (рис. 10а) с решетчатыми электродами [7], создающий прокачку теплоносителя. Для увеличения коэффициента теплоотдачи от трансформаторного масла к стенке радиатора может быть установлен дополнительный электрод в виде проволоки 4 с перфорированным (в виде насечек) изоляционным покрытием по оси трубы (рис. 10б) с помощью диэлектрических втулок 5.

Теплоотдача в трубе с соосно расположенной проволокой с перфорированным изоляционным покрытием и диэлектрическими втулками

Более простым решением является применение перфорированного провода с заостренным концом с асимметричными диэлектрическими втулками 5 (рис. 10б) определенной геометрии, создающими турбулизацию и циркуляцию теплоносителя по трубчатому радиатору.

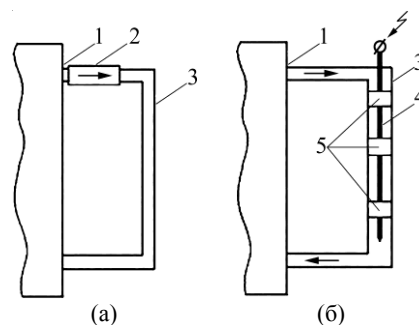


Рис. 10. Силевой трансформатор с ЭГД охлаждением: 1 – корпус трансформатора; 2 – ЭГД насос; 3 – радиатор; 4 – проволока с перфорациями; 5 – диэлектрические втулки.

Для определения эффективности такой системы электроконвективного охлаждения радиатора 3 (рис. 10б) высоковольтного трансформатора использована экспериментальная установка, представленная на рис. 11. Это замкнутый контур (расположенный в горизонтальной плоскости), состоящий из трубы 1 диаметром 21 мм, длиной 925 мм с соосным электродом-проволокой 2, с перфорированным изоляционным покрытием, диаметром 2 мм, оцентрированной четырьмя асимметричными втулками 3. Электрод 2 подключен через проходной изолятор 4 к источнику высокого напряжения 5. Контур снабжен электронагревателем 6 и холодильником 7, манометрическими трубками 18. Стенки контура теплоизолированы, электронагреватель подключен через ваттметр 9 к источнику стабилизированного напряжения 8. Холодильник в виде рубашки вокруг трубы 1 охлаждается водой, прокачиваемой термостатом 10. В гильзах 11 и 12 установлены спаи дифференциальной термопары для измерения разности температур теплоносителя и его абсолютных температур на

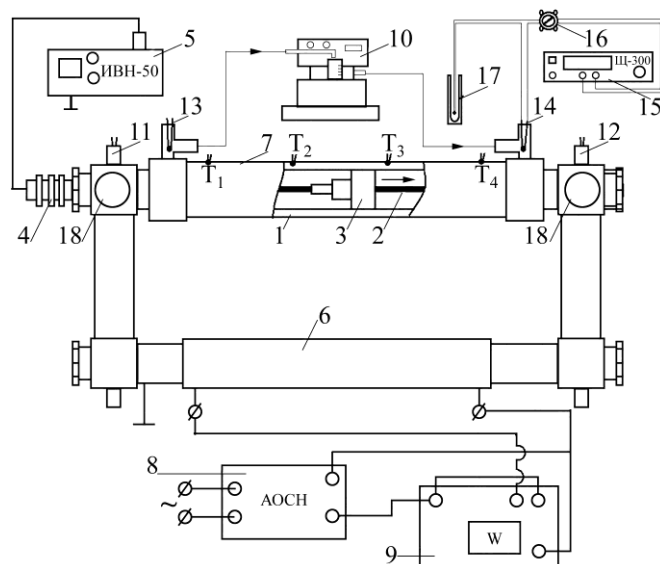


Рис. 11. Схема экспериментальной установки.

входе и выходе рабочего участка (трубы 1). Для измерения разности температур потока охлаждающей воды на входе и выходе холодильника использована дифференциальная термопара (спаи 13 и 14). Расход охлаждающей воды измерялся мерным способом. Температура стенки трубы 1 определялась термопарами $T_1 \div T_4$, T_1 расположена в начале трубы 1, T_2 – на расстоянии 250 мм, T_3 – на 675 мм, T_4 – на 925 мм от первой (в конце трубы 1). Показания термопар посредством многопозиционного переключателя 16 регистрировались комбинированным прибором 15 (Щ-300). Холодные спаи термопар погружены в сосуд Дьюара 17 с тающим льдом. Втулки 3 создают продольные составляющие силы электрического поля, способствуя вместе с заостренным концом проволоки прокачке жидкого теплоносителя по трубе. Перфорации (в виде насечек) на поверхности проволоки создают дополнительную турбулизацию теплоносителя, направленную перпендикулярно основному потоку, что естественно увеличивает теплоотдачу от жидкости к стенке.

Эксперименты проводились по методике, описанной выше, при различных мощностях нагревателя, температурах охлаждающей воды и высокого потенциала на проволоке. Так как холодильник и нагреватель находятся в одной горизонтальной плоскости, перенос тепла из зоны нагрева к холодильнику за счет естественной конвекции практически отсутствует. При подаче высокого потенциала на проволоку 2 возникает перекачивание теплоносителя по контуру, как следствие, перенос тепла от нагревателя к холодильнику, интенсивность которого возрастает с увеличением разности потенциалов между электродами (проволокой 2 и трубой 1). На основе результатов исследований получена обобщенная зависимость для

теплоотдачи в трубах с соосно расположенной проволокой, с перфорациями и диэлектрическими втулками:

$$\alpha D / \lambda = 0,034 \times (\varepsilon_0 \varepsilon E^2 D^2 / (\gamma \nu a))^{0,44} \times (ID / (LE \varepsilon_0 \varepsilon \nu))^{0,13},$$

где D – диаметр трубы; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя; ν – кинематическая вязкость; a – температуропроводность; γ – плотность теплоносителя; E – напряженность электрического поля между проволокой и трубой; I – ток утечки; L – длина трубы.

Характеристики ЭГД насоса с кольцеобразным электродом для охлаждения трансформатора

Для увеличения интенсивности циркуляции теплоносителя по коаксиальной трубе был разработан и исследован ЭГД насос с кольцеобразными электродами (рис. 12), являющийся модификацией трехэлектродной системы [8]. Эмиттер 1 представляет собой электропроводящее кольцо с перфорированным в виде насечек изоляционным покрытием, укрепленное на оправе 2 и соединенное с соосным высоковольтным электродом 3. Коллектор 4, выполненный в виде кольцевого зазора, имеет электрический контакт с трубой 5. Эмиттер электроизолирован трубкой 6 от трубы 5, а коллектор – от высоковольтной проволоки 3 трубкой 7. В качестве изоляционного материала использован фторопласт. ЭГД насос устанавливался в кольцевом зазоре между трубой и высоковольтным электродом 3. При измерении напорно-расходной характеристики выходной патрубков насоса соединялся с измерительной ячейкой. По времени ее заполнения и объему рассчитывался расход рабочего вещества. Одно-

временно регистрировалась разность уровней в пьезометре, соединенном с выходом насоса и сосуда. По высоте столба и плотности жидкости определялась напорная характеристика. Гидродинамической составляющей напора пренебрегали ввиду малой скорости прокачки по сравнению с гидростатической. В качестве рабочих жидкостей использовались фреон-113, смесь фреон-113–ацетон (~ 1%), керосин и трансформаторное масло.

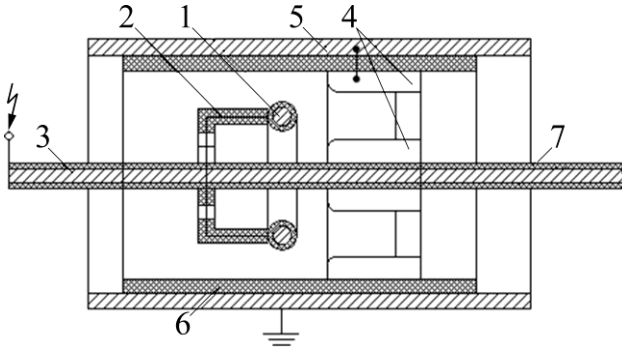


Рис. 12. Схема электрогидродинамического насоса.

На рис. 13–16 представлены напорные и расходные характеристики ЭГД насоса в зависимости от подаваемой разности потенциалов U . С увеличением U растет высота столба H жидкости в пьезометре (рис. 13), что свидетельствует об увеличении напорной характеристики насоса. С ростом разности потенциалов между электродами возрастает интенсивность инжекции зарядов с эмиттера, увеличивается плотность объемных зарядов в рабочей среде и, как следствие, улучшаются характеристики насоса.

По мере повышения расхода наблюдается снижение напора (рис. 14). При этом с изменением выражения εU^2 (ε – диэлектрическая проницаемость среды) в сторону больших значений давление (напор) увеличивается практически по линейному закону (рис. 15).

Известно выражение для определения напора и расхода электрогидродинамического насоса типа плоскость–плоскость [9]:

$$P = A \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{Bv}\right) \right] - Cv^2, \quad (1)$$

где A, B, C – параметры насоса:

$$A = 2 \frac{k-1}{k+1} \varepsilon \varepsilon_0 E_{cp}^2; \quad B = \frac{\tau}{d}; \quad C = \xi \frac{\gamma}{2};$$

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; τ – время релаксации зарядов; d – межэлектродное расстояние; γ – плотность рабочей жидкости; ε_0 – электрическая постоянная; v – скорость жидкости в насосе. Полагая верной структуру выражения (1) для насоса, определим из опытов коэффициенты A, B и C . Для исследованного насоса коэффициент k ,

представляющий собой отношение электропроводности на эмиттере к электропроводности на коллекторе, достаточно высокий и при $\frac{k-1}{k+1} \ll 1$,

k – постоянная величина для любых веществ, так как происходит полная электризация рабочей среды в межэлектродном промежутке. Напряженность поля определяется отношением разности потенциалов к межэлектродному расстоянию, которое для разных конструкций электрогидродинамического насоса будет различным:

$$E_{cp}^2 = U^2 / d_{cp}^2, \quad (2)$$

множитель $2 \frac{k-1}{k+1} \varepsilon \varepsilon_0 E_{cp}^2$ заменим выражением $A^* \varepsilon U^2$, где $A^* = 2 \frac{k-1}{k+1} \frac{\varepsilon_0}{d_{cp}^2}$.

Следуя этой методике, преобразуем и остальные члены выражения (1). Получим зависимость для напора и расхода электрогидродинамического насоса:

$$P = A^* \varepsilon U^2 \times \left[1 - \exp(-BI / (\varepsilon UG)) \right] - C\gamma G^2, \quad (3)$$

где G – расход рабочей жидкости, м³/с; I – сила электрического тока, А; ε – диэлектрическая проницаемость жидкости. Параметр A^* находится из условия $G = 0$:

$$P_{\max} = A^* \varepsilon U^2 = P_{\text{стат}} \Rightarrow A^* = P_{\text{стат}} / (\varepsilon U^2),$$

где $P_{\text{стат}}$ – статический напор, Н/м². Константы C и B определяются по методу последовательных приближений. Поскольку величина $\left[1 - \exp(-BI / (\varepsilon UG)) \right]$ слабо зависит от расхода G и близка к единице, то C находится при значениях расхода G , когда член $C\gamma G^2$ большой. Тогда, пренебрегая $\exp(-BI / (\varepsilon UG))$, получаем:

$$P = A^* \varepsilon U^2 - C\gamma G^2. \quad (4)$$

Подставив экспериментальные данные (в частности, из рис. 3) в выражение (4), определим значение константы C . Постоянная B определяется при малых значениях расхода G и найденном значении C из уравнения (3). Аналогично проводим следующее приближение, пока не достигнем удовлетворительного совпадения экспериментальных данных с зависимостью (3). Для рассматриваемого насоса параметры A^*, B и C составляют соответственно $8,5 \times 10^{-7}$ кгм/(с²·В²); $2,48 \times 10^5$ кгм/(с⁴·А²); $2,85 \times 10^{10}$ м⁻⁴. При этих значениях A^*, B и C расчетное соотношение (3) для напора и расхода электрогидродинамического насоса удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными (рис. 15 и 16).

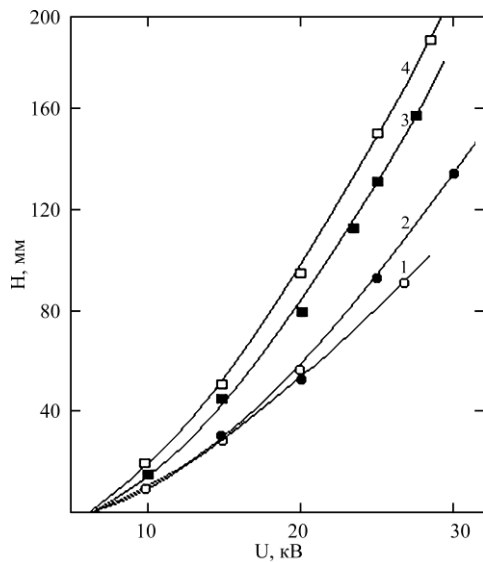


Рис. 13. Зависимость напора, создаваемого ЭГД насосом, от разности потенциалов на электродах. 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~1%); 3 – керосин; 4 – трансформаторное масло, $\nu = 0$.

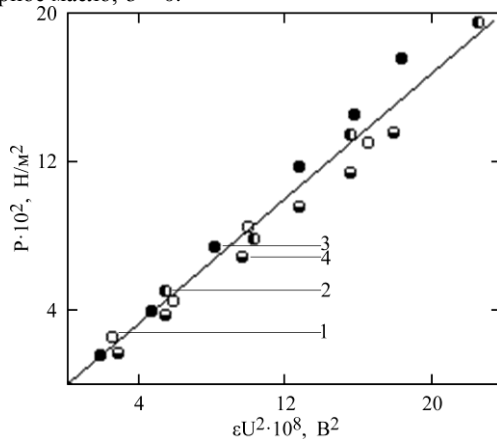


Рис. 15. Зависимость напора от комплекса ϵU^2 . 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~1%); 3 – керосин; 4 – трансформаторное масло.

Таким образом, на основе проведенных исследований сделан вывод, что ЭГД насос перфорированное кольцо-труба, характеристики которого могут быть рассчитаны по формуле (3), обладает необходимой производительностью для прокачивания рабочей среды. При этом расчеты показывают, что применение ЭГД радиатора, представляющего собой систему оребренных труб, для охлаждения силового трансформатора позволяет в 3–4 раза уменьшить массогабариты радиатора силового трансформатора средней мощности, вдвое уменьшить максимальную температуру масла и поддерживать заданный постоянный температурный режим благодаря возможности управления электроконвекцией.

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА, ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ТЕПЛО, ЭГД МЕТОДАМИ

Наиболее полно преимущества электроконвективного метода реализованы в ЭГД термостате (рис. 17).

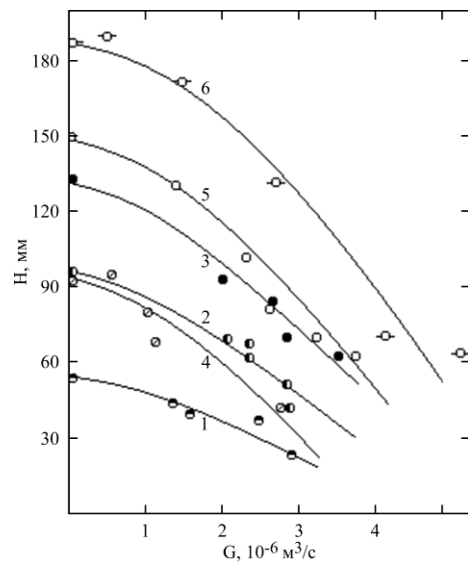


Рис. 14. Напорно-расходная характеристика. 1–3 – фреон-113-ацетон (~1%); 4–6 – керосин. U , кВ: 1, 4 – 20; 2, 5 – 25; 3, 6 – 28.

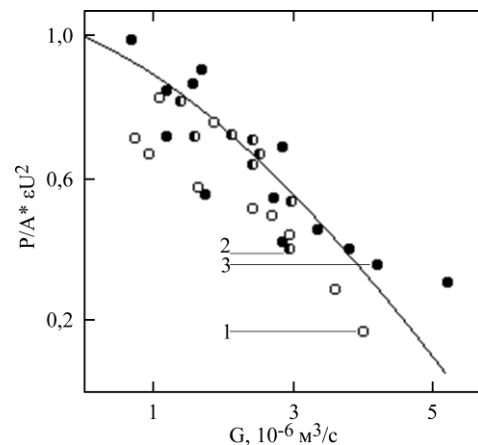


Рис. 16. Напорно-расходная характеристика. 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~1%); 3 – керосин.

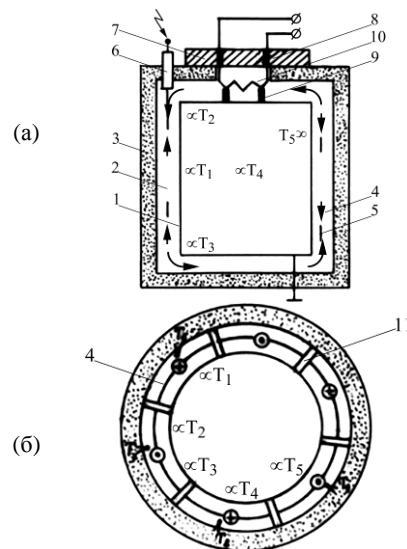


Рис. 17. Схема макета ЭГД термостата (а), (б) – вид сверху.

Термостатируемая камера 1 (рис. 17) – теплоотдающий элемент цилиндрической формы, заключен в рубашку с двойными стенками 2. Полость шириной 5 мм между двумя стенками, внешняя из которых является стенкой

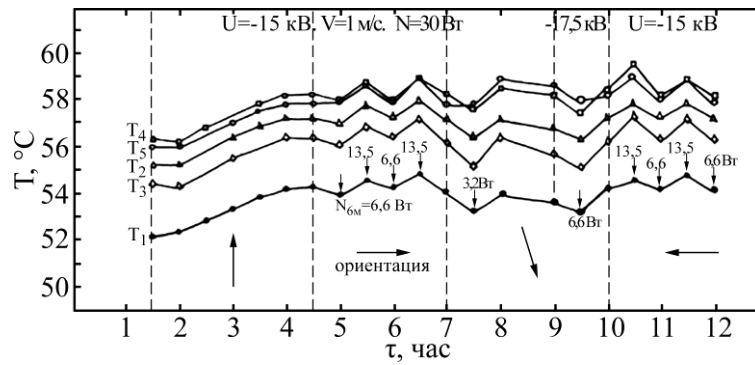


Рис. 18. Изменение температуры стенки ТЭ со временем при различной ориентации и разности потенциалов между электродами ЭГД насосов.

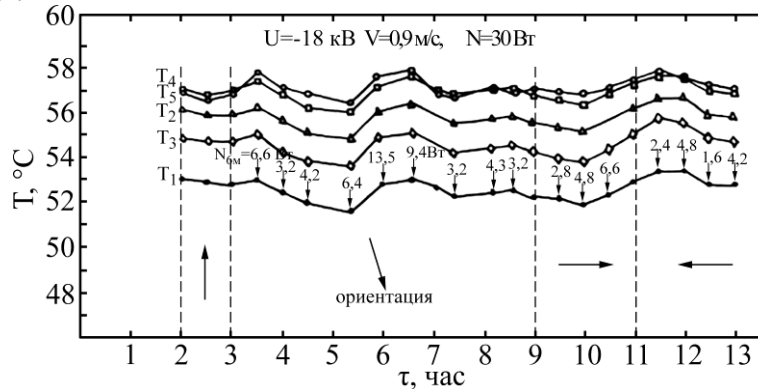


Рис. 19. Изменение температуры стенки ТЭ со временем при различной ориентации в поле сил тяжести.

термостата, разделена фторопластовыми перегородками II на шесть одинаковых сообщающихся на торцах секторов, в каждом из которых расположены по два последовательно соединенных ЭГД насоса типа лезвие-лезвие с изолированной кромкой, общим количеством 12 штук, закрепленных на наружной поверхности внутреннего цилиндра. Высоковольтные электроды 5 насосов через изолятор 6 подключены к высоковольтному источнику стабилизированного напряжения ИВН-50. Насосы в соседних секторах ориентированы в противоположные стороны так, что обеспечивают изменение направления прокачки теплоносителя на противоположное от сектора к сектору, как указано на рис. 176 знаками $\oplus(\uparrow)$, $\otimes(\downarrow)$. Во внутренней термостатируемой камере находится теплоотдающий элемент (ТЭ), которым может быть любой объект, к примеру, электронный блок. Объем ТЭ и зазор между ним и стенкой камеры заполнялись песком, обладающим теплопроводностью, эквивалентной радиоблокам. ТЭ представлял собой омический нагреватель мощностью, не превышающей 100 Вт, создающий тепловой поток от термостата к окружающей среде. Внешняя стенка термостата теплоизолирована, кроме теплопроводного участка, выполненного из медной пластины толщиной 12 мм, диаметром 190 мм, под которой в зазоре между стенками размещен буферный омический нагреватель 10, который через выводы в теплопроводной стенке включался к регулируемому источнику тока. На внутренней стенке термостатируемой камеры размещены

термопары T_1-T_5 . Температура теплоносителя в разных секторах измерялась термопарами T_6-T_9 . Питание основного нагревателя осуществлялось от сети переменного тока через автотрансформатор АОСН. Проводимость теплоносителя контролировалась по току утечки. Термостат, установленный на раме с карданной подвеской, размещался в камере. Карданная подвеска позволяла изменять положение термостата в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Камера представляла собой металлический короб, одна из сторон которого стыкуется посредством переходной части к кондиционеру. В переходной части установлены регулируемые жалюзи для изменения потока воздуха от кондиционера. Скорость потока воздуха, обдувающего термостат, измерялась анемометром АСО-3. Подготовка к экспериментам начиналась с промывки ЭГД термостата фреоном-113, фильтрации и длительной обработки жидкого теплоносителя (13% раствора трансформаторного масла с бутиловым спиртом) в электрическом поле. После заправки проводилось вакуумирование ЭГД термостата с целью удаления воздуха, содержащегося в жидком теплоносителе в виде пузырьков и в растворенном состоянии. Затем устанавливались необходимые мощности на буферном и основном нагревателях при неизменных внешних условиях (скорости обдува, ориентации, температуры окружающей среды). Подавалось высокое напряжение на ЭГД насосы и после выхода ЭГД термостата на стационарный режим изменялись как внешние, так и внутренние параметры

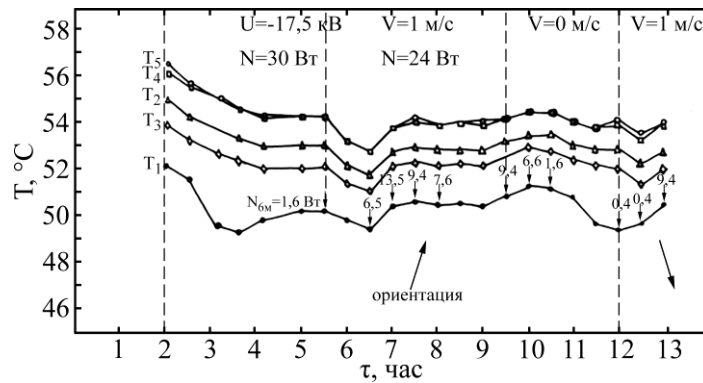


Рис. 20. Зависимость температуры стенки ТЭ от времени при изменении мощности основного нагревателя N и скорости обдува V .

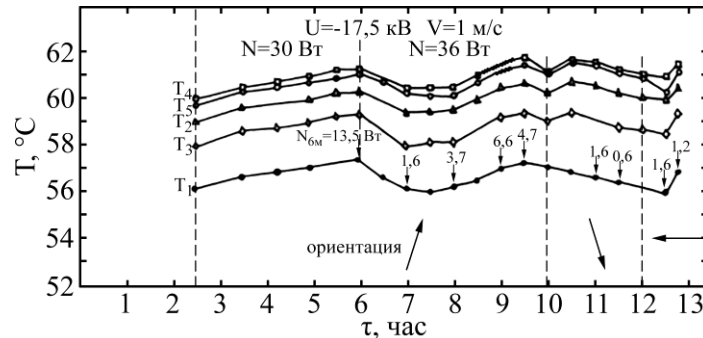


Рис. 21. Зависимость температуры стенки ТЭ от времени при изменении мощности основного нагревателя.

(напряжение на ЭГД насосах, мощности основного и буферного нагревателей). Диссипативная энергия ЭГД насосов и тепло, выделяемое теплоотдающим элементом, аккумулированное жидким диэлектриком, сбрасывались через медную крышку 7 (рис. 17) в окружающее пространство. Изменение внешних условий, способных повлиять на температуру ТЭ, компенсировалось варьированием мощности буферного нагревателя и напряжения на ЭГД насосах. Поскольку ЭГД течения достаточно интенсивны по сравнению с естественной термогравитационной конвекцией, интенсивность циркуляции и турбулизации теплоносителя под теплопринимающей поверхностью медной крышки 7 ЭГД термостата не зависело от ориентации в поле сил тяжести.

Цель исследований – установить возможности термостатирования (выявления условий стабилизации температуры) ТЭ ЭГД методами при изменении как внешних, так и внутренних условий. На рис. 18, 19 представлены зависимости температуры стенки ТЭ от ориентации при постоянной скорости обдува и мощности основного нагревателя.

Длинные стрелки указывают положение ЭГД термостата в пространстве, короткие – мощность буферного нагревателя. Варьируя мощность на буферном нагревателе, можно управлять температурой стенки ТЭ, изменяющейся с ориентацией. Увеличение разности потенциалов между электродами ЭГД насоса снижает температуру ТЭ (рис. 18). Точность термостатирования описанным методом в случае

$U = -15$ кВ (рис. 18) составляет $0,2 \pm 0,4$ °С, при $U = -18$ кВ (рис. 19) – $0,2 \pm 0,4$ °С.

Временные зависимости температуры в различных частях стенки термостатируемого элемента при различных мощностях на основном нагревателе представлены на рис. 20, 21.

С уменьшением мощности основного нагревателя N с 30 до 24 Вт температура ТЭ снижалась, но увеличение мощности буферного нагревателя компенсирует ее, точность термостатирования при этом составляла $0,1 \pm 0,4$ °С. В случае повышения мощности основного нагревателя с 30 до 36 Вт (рис. 21) также можно поддерживать температуру ТЭ постоянной с точностью $0,1 \pm 0,4$ °С. Влияние скорости обдува на временные зависимости температуры ТЭ показаны на рис. 20, 22, 23.

При снижении скорости обдува (рис. 20, 22) ухудшается интенсивность теплоотдачи крышки (теплопроводной плиты) термостата в окружающую среду и соответственно увеличивается температура теплоносителя. С увеличением скорости обдува (рис. 23) температура ТЭ понижается, что свидетельствует об улучшении теплоотдачи с крышки термостата. Изменение температуры ТЭ стабилизируется варьированием мощности буферного нагревателя. Повышение разности потенциалов приводит к возрастанию интенсивности инжекции зарядов (в большей степени) с эмиттеров ЭГД насосов (рис. 24), как следствие, к увеличению интенсивности циркуляции теплоносителя и теплосброса в окружающую среду,

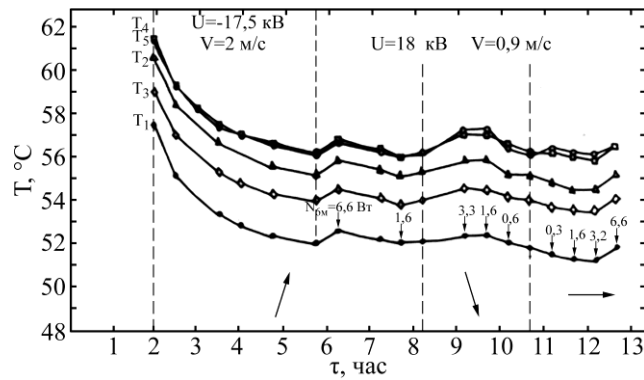


Рис. 22. Зависимость температуры стенки ТЭ от времени при изменении скорости обдува и ориентации.

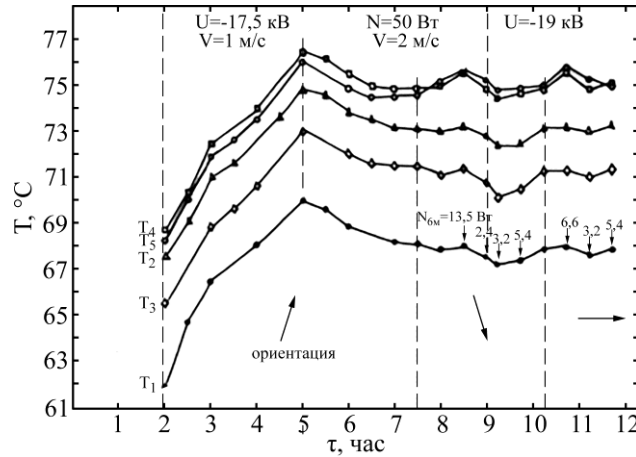


Рис. 23. Зависимость температуры стенки ТЭ от времени при изменении скорости обдува, ориентации и напряжения на ЭГД насосах.

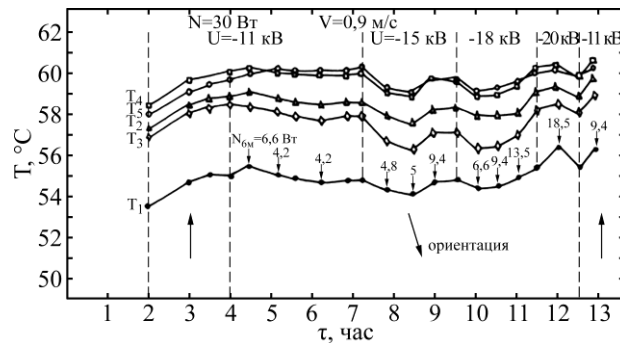


Рис. 24. Изменение температуры стенки ТЭ со временем при различной ориентации и разности потенциалов на электродах ЭГД насосов.

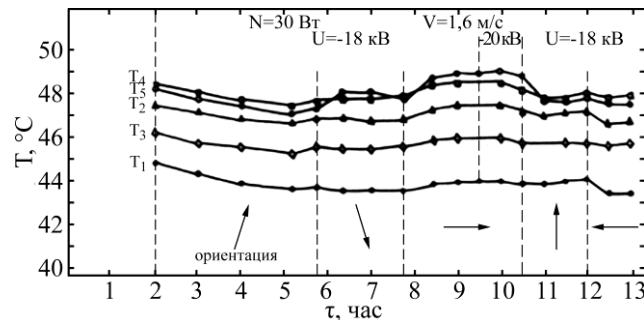


Рис. 25. Зависимость температуры стенки ТЭ от времени при изменении ориентации и разности потенциалов на электродах ЭГД насосов.

понижению температуры ТЭ, что компенсируется повышением мощности буферного нагревателя.

Зависимости температуры ТЭ от времени при отсутствии теплоподвода буферным нагревателем ($N_{б.н.} = 0$) и постоянных значениях

мощности основного нагревателя, скорости обдува и разности потенциалов на электродах ($U = -18$ кВ и $U = -20$ кВ) представлены на рис. 25. При изменении ориентации и неизменных перечисленных условиях температура ТЭ существенно не меняется. Это свиде-

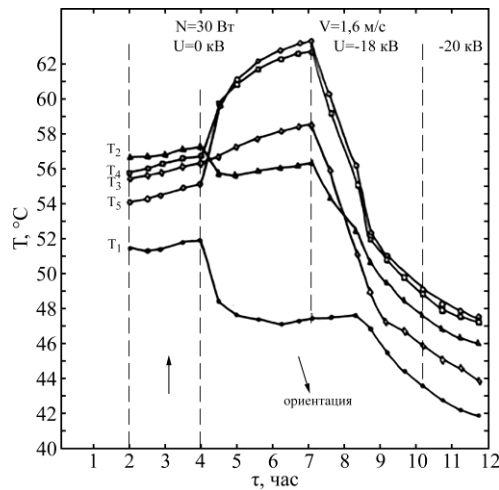


Рис. 26. Изменение температуры стенки ТЭ со временем при различной ориентации, наличии/отсутствии разности потенциалов на электродах ЭГД насосов и включения буферного нагревателя.

тельствует о том, что интенсивность турбулизации теплоносителя не зависит от ориентации ЭГД термостата в поле сил тяжести, что обеспечивает устойчивую работу устройства при любом направлении сил гравитации. Точность термостатирования составляет $0,1 \pm 0,4$ °C. Следует отметить, что эти результаты получены при постоянной температуре окружающей среды, а при изменении стабилизация температуры ТЭ обеспечивается изменением мощности буферного нагревателя. В отсутствие напряжения на ЭГД насосах и мощности на буферном нагревателе варьирование ориентации термостата существенно изменяет распределение температуры по поверхности ТЭ со временем (рис. 26). Термопары T_1 и T_2 регистрируют резкое падение температуры, а термопары T_4 и T_5 — увеличение. Это объясняется изменением направления свободной конвекции (потока теплоносителя) и положением термопар в пространстве. Подача высокого напряжения вызывает резкое падение температуры в различных частях ТЭ, что свидетельствует об эффективности работы ЭГД насосов. Температура стенки при мощности нагревателя $N = 30$ Вт уменьшается на $9 \div 16$ °C в течение 12 часов, что подтверждает возможность термостатирования электроконвекцией различных объектов (в частности, элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры) с изменяющейся ориентацией в поле сил тяжести.

Термостатирующее устройство с автоматической системой термостабилизации

С учетом полученных результатов сконструировано ЭГД термостатирующее устройство (ТУ) с встроенным источником высокого напряжения (рис. 27).



Рис. 27. Термостатирующее устройство: 1 — источник высокого напряжения; 2 — термосильфон; 3 — терморезистор; 4 — термоанемометр; 5 — буферный нагреватель.

Высоковольтный источник 1 (с размерами $50 \times 40 \times 35$ мм, 18 кВ) размещен внутри корпуса ТУ, который вместе с термосильфоном расположен на неразъемном его торце. Во внутреннем цилиндре ТУ находится имитатор ТЭ, мощность тепловыделения которого 65 Вт. С внутренней стороны разъемного торца ТУ расположен нагреватель (буферный) 5 мощностью 20 Вт, который в автоматическом режиме компенсирует изменения температуры окружающей среды и скорости обдува. Измерение температуры внутри цилиндра производилось шестью медь-константановыми термопарами, размещенными по образующей в различных секторах. Для контроля температуры наружной поверхности внутреннего цилиндра и теплоносителя использовались терморезисторы. Скорость прокачки теплоносителя контролировалась термоанемометром 4. ТУ 1 (рис. 28) крепилось на раме с карданной подвеской 2 и размещалось внутри камеры 3. Для обеспечения стабильной температуры ТЭ при постоянстве рассеиваемой им мощности необходима стабилизация как температуры теплоносителя $T_{ж}$, так и скорости его прокачки. Поэтому были определены чувствительность системы

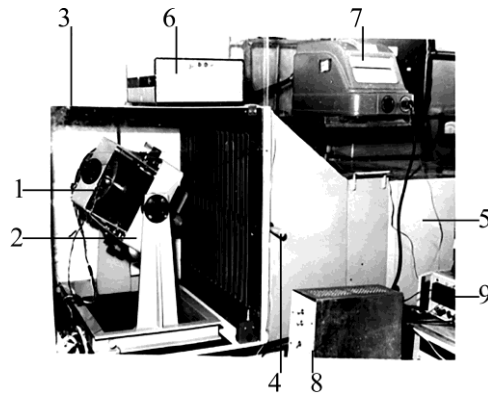


Рис. 28. Испытательный стенд: 1 – ТУ; 2 – карданная подвеска; 3 – камера; 4 – ручка жалюзи; 5 – кондиционер; 6 – высоковольтный источник; 7 – киловольтметр; 8 – электронный блок управления; 9 – регистраторы показаний датчиков температуры и термоанемометра.

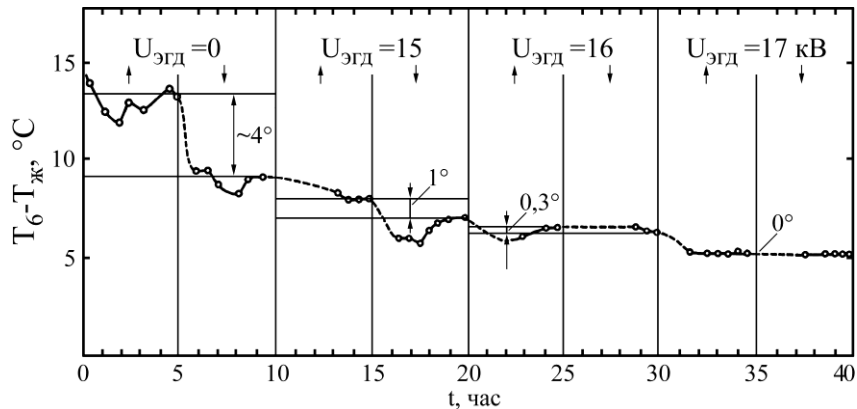


Рис. 29. Зависимость разности температуры термостатируемого объекта в точке T_6 и теплоносителя $T_{жс}$, от ориентации и напряжения питания ЭГД насосов (стрелками указана ориентация термостата в поле сил тяжести).

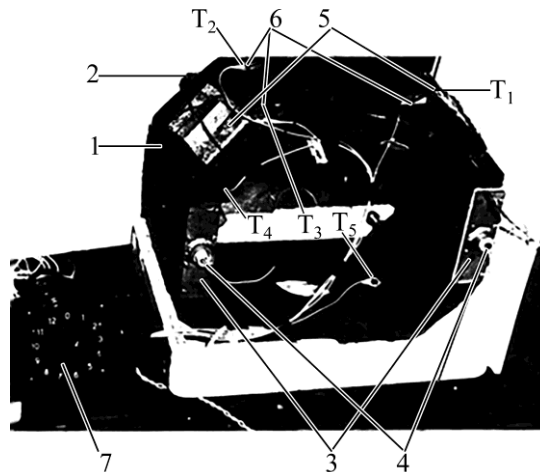


Рис. 30. Рамка карданова подвеса с ЭГД жидкостным контуром: 1 – корпус рамки; 2 – штуцер; 3 – крышки блоков ЭГД насосов; 4 – высоковольтные вводы; 5 – нагреватели-имитаторы; 6 – термопары; 7 – многопозиционный переключатель.

стабилизации скорости прокачки к изменению напряжения термоанемометра, необходимый диапазон изменения напряжения высоковольтного источника. Установлена чувствительность системы стабилизации температуры к изменению сопротивления терморезисторов. С учетом полученных данных проведены испытания ТУ с автоматической системой термостабилизации, результаты которого в виде зависимости разности температур ТЭ, регистрируемой термопарой (T_6), и теплоносителя ($T_{жс}$) представлены на рис. 29. При изменении температуры окружающей среды (воздуха) $\Delta T = \pm 2,5$ °C

автоматическая стабилизация температуры ТУ обеспечивалась с точностью $\Delta T = \pm 0,05$ °C.

ЭГД жидкостная рамка подвеса. По периметру рамки, на которой подвешивается ЭГД термостат, возникают температурные градиенты (из-за расположенных отдельных электронных блоков), что влияет на точность ориентации ТУ в пространстве. Для их снижения рама выполнена полой и заполнена 13% смесью трансформаторного масла с бутиловым спиртом. В целях уменьшения температурных градиентов рамки и, следовательно, ее деформации многоступенчатый ЭГД насосом обеспечивалась цирку-

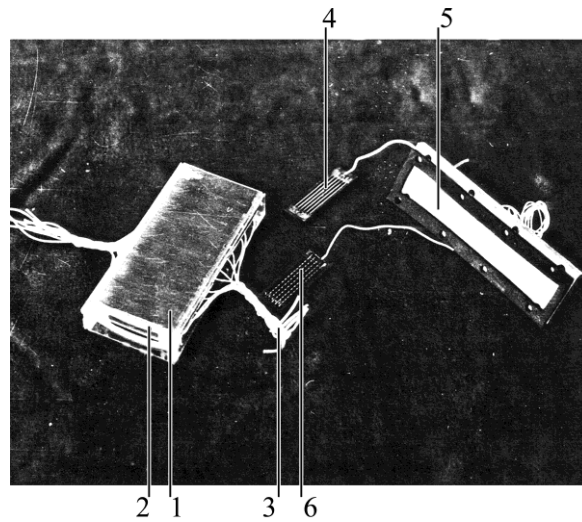


Рис. 31. Блок ЭГД насосов: 1 – корпус; 2 – фторопластовый ограничитель; 3 – токоподводы к ступеням многоступенчатого ЭГД насоса; 4 – электрод-коллектор; 5 – крышка гнезда для блока ЭГД насосов; 6 – электрод-эмиттер.

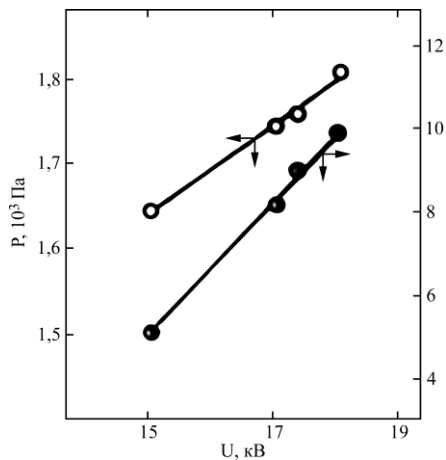


Рис. 32. Зависимость напора и расхода блока ЭГД насосов от напряжения. Межэлектродное расстояние 2 мм.

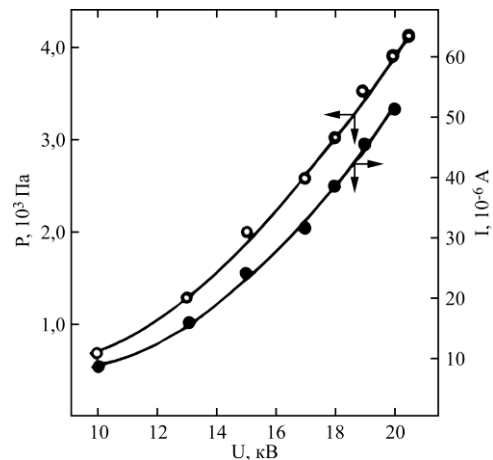


Рис. 33. Напорная характеристика блока ЭГД насосов. Межэлектродное расстояние 2 мм.

ляция теплоносителя в полости. Рамка (470×330×210 мм, рис. 30) снабжена заправочным штуцером 2. С торцов в специальные гнезда корпуса 1 вставлены четыре блока ЭГД насосов 3 (на рис. 30 показаны два, остальные два установлены с тыльной стороны рамки), гнезда герметизировались крышками 3, снабженными высоковольтными вводами 4. ЭГД насосы обеспечивали циркуляцию теплоносителя по замкнутому контуру в полости рамки.

На стенках рамки установлены нагреватели 5, имитирующие тепловыделяющие элементы. Контроль температуры стенок рамки осуществлялся медь-константановыми термопарами 6 ($T_1 \div T_5$, рис. 30), установленными в пазах, проделанных в корпусе. Electrodes (emitter and collector) EGDC pumps represent a grid [6] of stretched on a frame of copper wires with a diameter of 1 mm and a gap of 1.5 mm. Collector 4 (рис. 31) is made of bare wires, emitter is made of wires in lacquer insulation with perforations on the side surfaces, facing the

коллектору. Расстояние между эмиттером и коллектором устанавливалось с помощью диэлектрических прокладок толщиной 2 мм, между соседними ступенями – 10 мм (в одном блоке восемь ступеней).

Эксперименты осуществлялись по описанной выше схеме. После заправки рамки трансформаторным маслом проводились ее вакуумирование и подсоединение к штуцеру 2 (рис. 30) сильфона, компенсирующего расширение масла с температурой. Подавалась определенная мощность на нагреватели, измерялось распределение температурного поля рамки и с выходом рамки на квазистационарный температурный режим подавалось высокое напряжение на блоки ЭГД насосов.

На рис. 32 приведены зависимости напора и расхода блока ЭГД насосов от разности потенциалов, напор 1816 Па и расход $9,8 \times 10^{-6}$ м³/с достигнуты при напряженности поля 90 кВ/см.

Напорная статическая характеристика блока представлена на рис. 33. Максимальный статический напор составил 4186 Па (496 мм

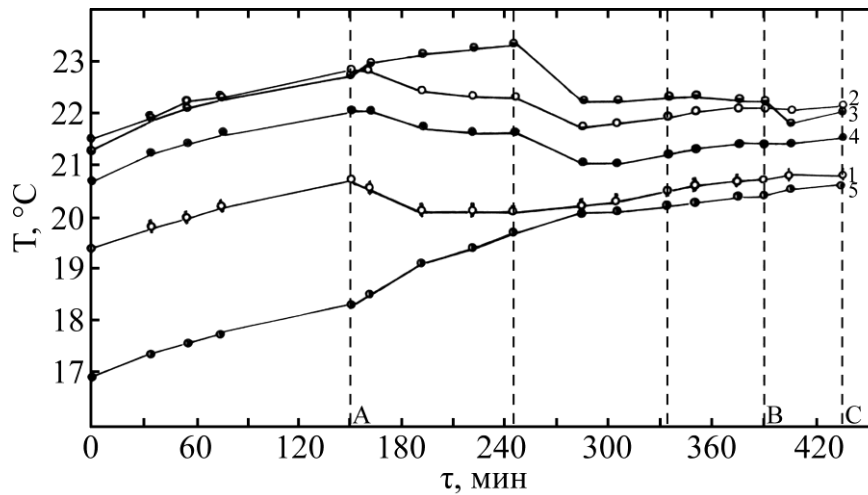


Рис. 34. Динамическая зависимость температурного поля рамки. Мощность нагревателя 9 Вт. *OA* – при отсутствии напряжения на блоках ЭГД насосов, *AB* – напряжение 20 кВ, *BC* – 22 кВ. 1, 2, 3, 4, 5 – номера термопар.

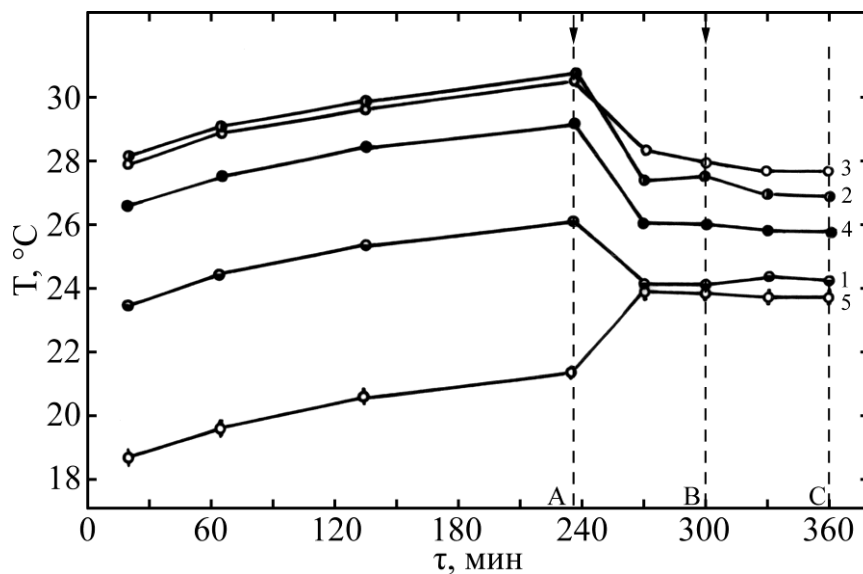


Рис. 35. Динамическая зависимость температурного поля рамки. Мощность нагревателя 20 Вт. *OA* – при отсутствии напряжения на блоках ЭГД насосов, *AB* – напряжение 20 кВ, *BC* – напряжение 22 кВ. 1, 2, 3, 4, 5 – номера термопар.

столба трансформаторного масла) при разности потенциалов 21 кВ. В рассматриваемой системе электродов пробивная напряженность $E_{пр}$ межэлектродного зазора снижается, с одной стороны, за счет развитого электроконвективного движения, с другой – из-за неполной нейтрализации заряженной среды на коллекторе, вызывающей увеличение ее электропроводности. Учитывая, что два блока ЭГД насосов в рамке работают параллельно, интенсивность прокачки увеличивается как минимум в 2 раза. Наличие по контуру следующей пары блоков ЭГД насосов дополнительно повышает скорость циркуляции.

Зависимости температуры стенки рамки от времени приведены на рис. 34, 35 при различных мощностях на нагревателях.

При отсутствии высокого напряжения на насосах (рис. 34, зона *OA*) при $N = 9$ Вт максимальный перепад температур по рамке достигает 5 °С (между термопарами 2 и 5).

С подачей напряжения (20 кВ) на блоки ЭГД насосов перепад снижался до 1,8 °С, а при $U = 22$ кВ – до 1,4 °С. ЭГД прокачка теплоносителя позволила уменьшить перепад температур в различных частях рамки в 3 раза. С увеличением рассеиваемой мощности нагревателей (рис. 35) также наблюдается уменьшение температурного перепада более чем в 2 раза. Таким образом, использование рамки с ЭГД жидкостным контуром позволяет значительно снизить продольные температурные перепады стенки, что уменьшает деформацию рамки.

СИСТЕМА ЭГД ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Эффективны ЭГД методы по сравнению с традиционными при использовании в системах охлаждения полупроводниковых приборов, в частности светодиодов. С развитием элементной базы радиоэлектронной техники в направлении

миниатюризации возрастают удельные выделяемые тепловые потоки и, как следствие, нарушаются температурные режимы отдельных элементов и узлов. Возникает проблема охлаждения малых электронных приборов. Традиционные способы, основанные на воздушном охлаждении, не всегда способны решить проблему. Необходима разработка высокоэффективных систем охлаждения, способных отводить значительные тепловые потоки. В последнее время находят применение жидкостные системы охлаждения, основанные на конвективном движении жидкого теплоносителя или фазовом переходе [10]. Основной их недостаток – необходимость размещения зоны теплоотвода (холодильника) выше зоны теплоподвода, что не всегда выполнимо. Поэтому для охлаждения имитатора блока светодиодов использована принудительная прокачка теплоносителя многоступенчатым ЭГД насосом решетчатого типа [6], отличающимся конструктивной простотой, малой габаритностью и потребляемой мощностью, отсутствием движущихся частей. Надежность функционирования и световые характеристики светодиодов зависят от температуры p - n перехода. Повышение температуры приводит к снижению яркости свечения и смещению рабочей длины волны светодиода. Необходимо обеспечение условий работы светодиодов при температуре, не превышающей 70–80 °С [11].

С этой целью исследования проводились на установке, схематически представленной на рис. 36, основной частью которой является имитатор блока светодиодов 1, представляющий собой диэлектрический цилиндр, заполненный электро- и термоизоляционным материалом. Подложка блока выполнена в виде пластины 2, подогреваемой сверху омическим нагревателем 3. С нижней стороны она охлаждалась заземленной медной полый пластиной 5, играющей роль конвективного теплообменника (ТО), через который ЭГД насосом 6 прокачивалась полиэтилсилоксановая жидкость по каналу замкнутого контура 7 из полиэтиленовой трубки \varnothing 7 мм и длиной 7 м. Сравнительно большая длина канала предусмотрена с целью подтверждения работоспособности системы в условиях большого гидравлического сопротивления, возникающего в случае расположения ЭГД насоса на большом расстоянии от охлаждаемого объекта. Тепло, аккумулированное жидкостью в теплообменнике 5, сбрасывалось заземленным холодильником 8 в окружающую среду. Имитатор блока светодиодов теплоизолирован, и в целях компенсации тепловых потерь

использован дополнительный омический нагреватель 4. Сильфон 9 предусмотрен для отвода расширяющейся с температурой жидкости из замкнутого контура. ЭГД насос выполнен цилиндрической формы из алюминиевого сплава, внутри которого последовательно размещены восемь ступеней [6]. Скорость прокачки диэлектрической жидкости в канале контура измерялась с помощью меток – воздушных пузырей \varnothing 40 мкм, которые вводились нагнетателем 10 через капилляр 11 диаметром волоска. Перепад давления на входе и выходе ЭГД насоса измерялся пьезометрами, подсоединенными к патрубкам 13 и 14. Температуры в имитаторе определялись медь-константовыми термопарами: T_1, T_2, T_3 – вдоль поверхности подложки 2; T_4, T_5 – по высоте имитатора между нагревателями 3 и 4; T_6, T_7 – вдоль тепловоспринимающей полый пластины 5; T_8, T_9 – охлаждающей жидкости на входе и выходе полый пластины 5.

На рис. 37 представлены зависимости температуры имитатора подложки блока светодиодов от напряжения на электродах насоса при различной подводимой электрической мощности N к нагревателю 3 (рис. 36). Характер зависимости средней температуры подложки $T = f(U)$ близок к нисходящей ветви полинома второй степени. Эта температура уменьшается на 6,5–11,5 °С в зависимости от мощности и не превышает 60 °С (рис. 37). Температура оказывает влияние на физические и электрофизические свойства теплоносителя, в первую очередь, на вязкость и подвижность ионов, знак «коронирующего» электрода (эммиттера), следовательно, на параметры ЭГД насоса. Максимальная мощность тепловыделения имитатора, при которой температура подложки не превышала 69 °С, составила 40 Вт. Температура теплоносителя на выходе из теплообменника 5 не превышала 27 °С. Наибольшее термическое сопротивление сосредоточено в контакте подложки со стенкой ТО. Несколько ниже термическое сопротивление контакта этой стенки с теплоносителем, которая охлаждалась исключительно прокачиваемой жидкостью. При этом изменение ориентации имитатора в поле сил тяжести не приводило к изменению характера зависимостей $T = f(U)$ (рис. 37), что свидетельствует об отсутствии воздействия термогравитационной конвекции в ТО на охлаждение подложки имитатора, то есть о том, что рассматриваемый способ охлаждения применим и в условиях невесомости. Определяющее влияние на теплоперенос через ТО

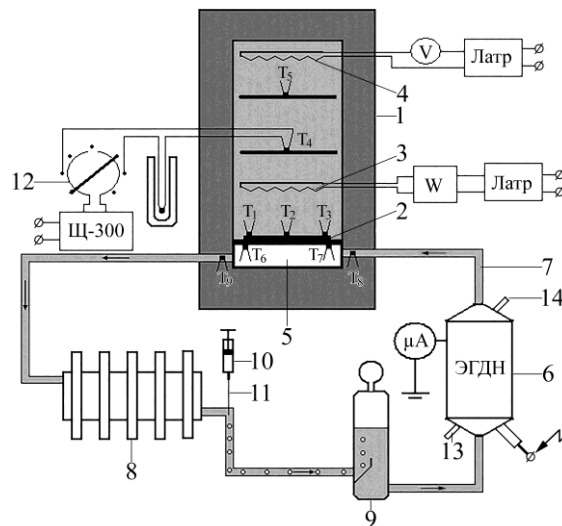


Рис. 36. Экспериментальная установка.

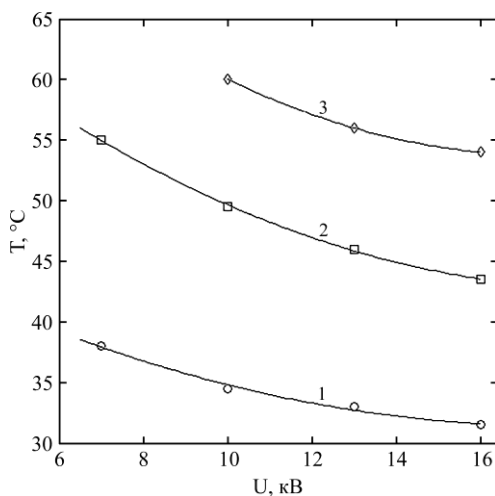
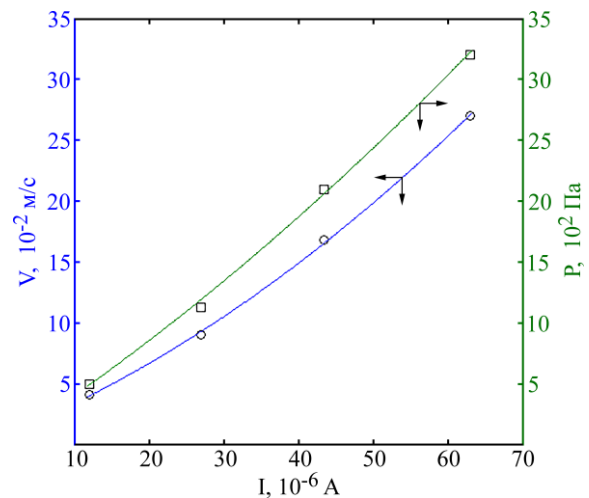
Рис. 37. Зависимость температуры подложки блока светодиодов от напряжения на электродах ЭГД насоса при мощности N , Вт: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30.

Рис. 38. Зависимости максимальной скорости (по сечению канала) прокачки жидкого теплоносителя по контуру и перепада давления на выходе и входе ЭГД насоса от тока утечки.

оказывает скорость прокачки теплоносителя, которая зависит от силы тока I , проходящего между электродами насоса (рис. 38). С увеличением напряжения возрастает инжекция зарядов (в большей степени) с эмиттера, увеличиваются ток с электродов и перепад давления, создаваемый насосом и, как следствие, скорость прокачки теплоносителя. Прикладываемое на электроды напряжение определяет среднее значение тока в межэлектродном промежутке, которое зависит от процессов, происходящих на границах электрод–жидкость в ЭГД насосе, под воздействием электрического поля. Именно эти процессы определяют электрический ток в жидкой среде и соответственно скорость прокачки, наибольшее значение (27 см/с) которой получено при $I = 60 \mu\text{A}$, $U = 16 \text{ kV}$ (рис. 38).

Статические значения давления, создаваемые ЭГД насосом (рис. 39) в исследованном диапазоне напряжений, практически не отличаются от динамических (см. рис. 38 и 39). В отсутствие

прокачки теплоносителя по контуру, то есть в режиме, считаемым гидростатическим, большая часть подводимой электрической энергии затрачивается на возвратные течения между электродами, соседними ступенями (ЭГД насос «работает на себя»). Выходные характеристики насоса зависят от гидравлического сопротивления канала, оказывающего значительное воздействие на формирование и интенсивность возвратных течений. В данном случае сказывается длина ЭГД канала, то есть его большое гидравлическое сопротивление. Поэтому для каждой системы охлаждения необходима разработка ЭГД насоса с определенными напорно-расходными характеристиками. Результаты свидетельствуют о том, что рассматриваемая ЭГД система применима для охлаждения малых элементов и узлов электронной техники. И следует отметить наличие больших возможностей для дальнейшего повышения их эффективности. В частности, применительно к светодиодам размещение выходных электродов p - n

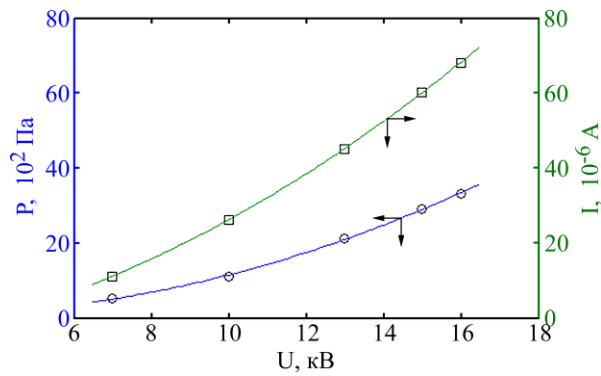


Рис. 39. Зависимости перепада давления на выходе и входе ЭГД насоса, тока утечки от напряжения на электродах насоса.

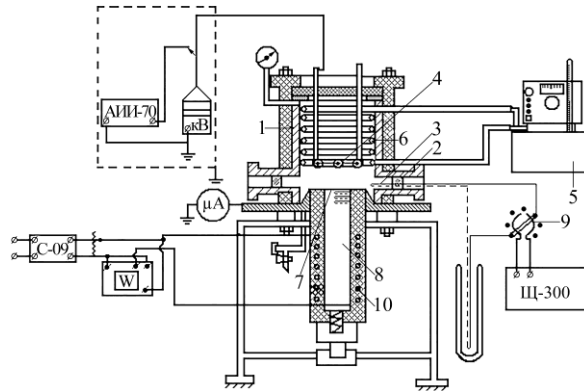


Рис. 40. Схема экспериментальной установки.

перехода в прокачиваемой диэлектрической жидкости с возможностью дополнительной турбулизации теплоносителя внешним электрическим полем, использование процесса фазового перехода и ЭГД прокачки двухфазного теплоносителя в зону охлаждения значительно снизят температуру p - n перехода.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕШЕТЧАТОГО ЭЛЕКТРОДА В ЗОНАХ ТЕПЛОПОВОДА И ТЕПЛОТВОДА

Для дополнительной турбулизации теплоносителя в зонах теплопровода и теплоотвода оказались высокоэффективными электроды-проволоки с перфорированным изоляционным покрытием [6]. Их применение позволяет организовывать одновременно с турбулизацией направленную прокачку теплоносителя перпендикулярно теплоотдающей (тепловоспринимающей) поверхности, вследствие чего утончается тепловой пограничный слой и увеличивается коэффициент теплоотдачи. В целях определения эффективности указанных электродов исследовалось охлаждение плоской поверхности. Экспериментальная установка (рис. 40) включала рабочую камеру, схемы питания нагревателя, измерения температур теплоотдающей поверхности и теплоносителя, цепь высокого напряжения и термостат для стабилизации температуры рабочего вещества. Рабочая камера 1 представляла собой вертикальный цилиндр $\varnothing 150$ мм,

высотой 110 мм, изготовленный из нержавеющей стали, снабженный тремя окнами. Окна предназначались для наблюдения электроконвекции, ввода металлической гильзы 2, в которой размещалась медь-константановая термопара 3, фиксирующая температуру рабочей среды. В верхней съемной крышке камеры из органического стекла устанавливался высоковольтный электрод 4. Температура теплоносителя поддерживалась постоянной с помощью термостата 5, подключенного к холодильнику 6. Высоковольтный электрод 4 выполнен в виде решетки из изолированных проводов с перфорациями в виде насечек со стороны противоэлектроды 7. Теплоотдающая поверхность — торец латунного стержня 8 $\varnothing 40$ мм с диафрагмой $\varnothing 80$ мм и толщиной 0,1 мм выполнена цельной. Такое конструктивное решение применено для сведения к минимуму растечек тепла по диафрагме. На определенных расстояниях от теплоотдающей поверхности по оси стержня располагались спаи дифференциальных термопар. Через двухполюсный переключатель 9 термопары подключались к комбинированному прибору Ц-300. В нижней части латунного стержня устанавливался омический нагреватель 10, подсоединенный к источнику стабилизированного напряжения. Подаваемая электрическая мощность измерялась ваттметром W. В качестве источника высокого напряжения использовался однополупериодный выпрямитель АИИ-70. В цепь высокого напряжения подключался

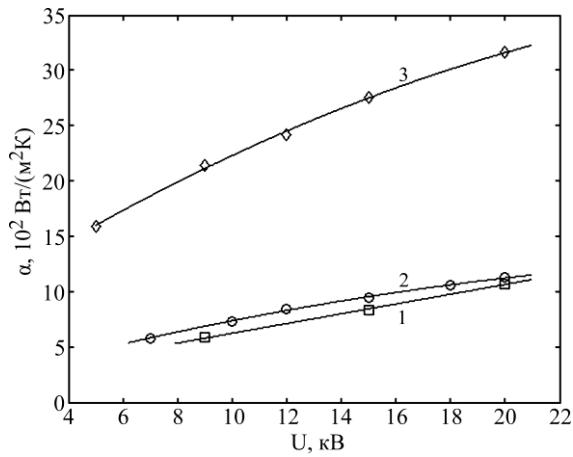


Рис. 41. Зависимость коэффициента теплоотдачи от напряжения при различной геометрии высоковольтного электрода: 1 – сетка 1,5×1,5 мм (из нержавеющей проводов \varnothing 0,1 мм); 2 – пластина; 3 – решетка из изолированных проводов \varnothing 1 мм с перфорацией.

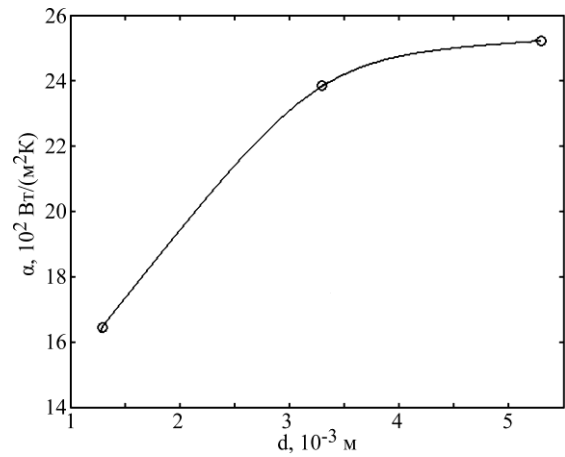


Рис. 42. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от межэлектродного расстояния d , $T_{жс} = 324$ °К.

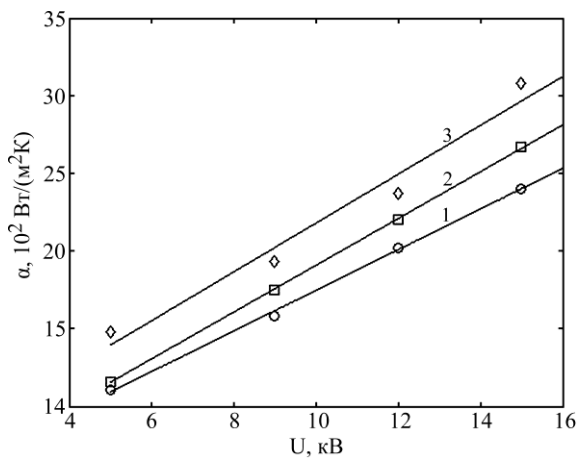


Рис. 43. Зависимость коэффициента теплоотдачи от напряжения при различной температуре теплоносителя ($T_{жс}$), °К: 1 – 308; 2 – 324; 3 – 341.

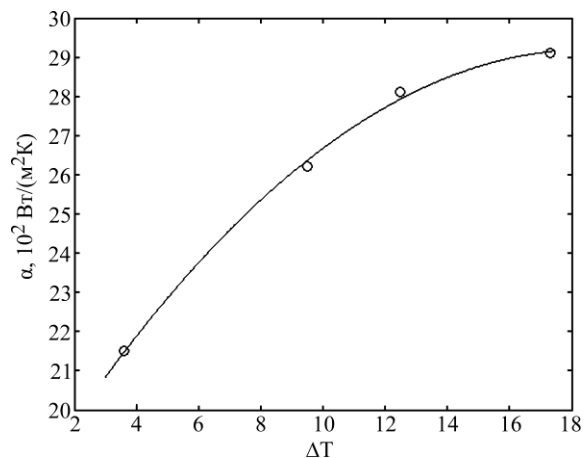


Рис. 44. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора, $T_{жс} = 324$ °К.

киловольтметр для измерения разности потенциалов между теплоотдающей поверхностью и высоковольтным электродом.

После достижения системой стационарного состояния при определенной мощности нагревателя и воздействии высокого напряжения регистрировались показания термпар и приборов. Затем варьированием разности потенциалов на электродах система перестраивалась на новый стационарный режим при постоянстве других параметров. В такой последовательности эксперименты проводились при различных напряженностях электрического поля, температурах теплоносителя, геометриях высоковольтного электрода и межэлектродных расстояниях. Эффективность охлаждения плоской стенки в значительной степени зависит от геометрии противоиэлектрода (высоковольтного, рис. 41), оказывающей существенное влияние на электризацию теплоносителя. Последняя более интенсивна в областях максимальной напряженности электрического поля, в частности на перфорациях. Диэлектрическая жидкость заря-

жается одноименным с решеткой зарядом, под действием сил кулона возникает электроконвективная турбулизация среды, интенсивность которой увеличивается с напряжением (кривая 3, рис. 41). В отличие от сетчатого и плоского электродов (кривая 1 и 2, рис. 41) решетка с перфорациями создает направленную прокачку теплоносителя перпендикулярно стенке 2 и транспортирует его из межэлектродного промежутка (МЭП), что повышает коэффициент теплоотдачи в 7 раз по сравнению с естественной конвекцией. С сужением МЭП ($d < 3$ мм) расстояния между перфорациями, теплоотдающей поверхностью и решеткой становятся соизмеримыми. Каждая перфорация начинает выполнять функцию отдельного электрода, аналогично игольчатоуму [1], и приводит к снижению скорости прокачки диэлектрической жидкости. Увеличивается гидравлическое сопротивление зазора между электродами, уменьшается интенсивность перемешивания теплоносителя и, как следствие, ухудшается теплообмен (рис. 42).

Повышение температуры теплоносителя $T_{жс}$ (рис. 43) и температурного напора ΔT – разности температур стенки и жидкости (рис. 44), в случае решетчатого электрода, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. Возрастает электропроводность и снижается вязкость трансформаторного масла с температурой [1], усиливаются турбулизация и прокачка рабочей среды. При этом наблюдается тенденция к ослаблению зависимости α от ΔT при больших температурных напорах (рис. 44), что связано с насыщением электризации жидкого диэлектрика, обусловленной термической неоднородностью.

Использование решетчатого электрода с перфорациями значительно ускоряет процесс охлаждения плоской стенки. Увеличивается коэффициент теплоотдачи в 7 раз, что обусловлено одновременной турбулизацией и прокачкой теплоносителя перпендикулярно теплоотдающей поверхности, и, как следствие, из межэлектродного промежутка. Электроды-провода с перфорированным изоляционным покрытием могут быть использованы для охлаждения (нагрева) любых поверхностей, независимо от их геометрии и размеров.

Применение малогабаритных (миниатюрных) ЭГД насосов предпочтительнее в испарительно-конденсационных системах (ИКС), в частности в пульсационных тепловых трубах [12, 13], в которых необходимы небольшие расходы теплоносителей. Для проверки их эффективности и выработки практических рекомендаций проведены исследования закономерности тепло-массопереноса в ИКС, в которой для прокачки теплоносителя из зоны нагрева в зону конденсации и обратно использовался ЭГД насос типа игла–кольцо [14]. Функционирование ИКС обеспечивалось при любой ориентации по отношению к полю тяжести. Вывод ЭГД насоса из зоны кипения и конденсации по сравнению со случаями, когда один из электродов служит одновременно и эмиттером, и теплоотдающей поверхностью, а противоположный (по аналогии) – коллектором электрических зарядов и поверхностью конденсации, имеет ряд очевидных преимуществ. Прежде всего, возможна быстрая рекуперация или замена преобразователя. Функционирует в более благоприятных условиях тепло-массопереноса при наличии только жидкой фазы (пузырьки в ЭГД насосе не допускаются), легко регулирует режим работы, менее вероятны электрические пробой и сопутствующие негативные явления. ЭГД насос позволяет стабилизировать поток парожидкостной смеси (без скачков температур и давления, которые крайне нежелательны в многочисленных инновационных устройствах),

увеличить диапазон тепловых нагрузок, подводимых к испарителю (ограниченному возникновением кризиса кипения), и интенсивность охлаждения стенки нагревателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность использования ЭГД методов в системах охлаждения и термостатирования отдельных элементов и блоков (аппаратуры) электроники, оптоэлектроники, электротехники. При этом одним из важнейших элементов являются ЭГД насосы. Расчеты показывают [9], что коэффициент полезного действия (КПД) насосов может быть значительно выше (в 2–3 раза), чем достигнутый экспериментально [6]. Следовательно, можно сделать вывод о больших резервах улучшения напорно-расходных параметров ЭГД насосов, особенно многоступенчатых. Учитывая, что в магистральных ЭГД насосах предпочтительнее использование электродов решетчатого типа с перфорированным диэлектрическим покрытием, необходимы дальнейшие исследования по влиянию электрофизических свойств изоляции, геометрических параметров проводов (образующих решетку) и самих решеток на производительность и КПД насоса, а также по снижению взаимного влияния ступеней в многоступенчатом насосе путем увеличения степени нейтрализации заряженной рабочей среды на коллекторах, использования зазора между ступенями как дополнительной ступени.

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. Болога, М.К., Гросу, Ф.П., Кожухарь, И.А., *Электроконвекция и теплообмен*, Кишинев: Штиинца, 1977, 320 с.
2. Вавилов, С.П., *Импульсная рентгеновская техника*, М.: Энергия, 1981, 283 с.
3. Буртелов, В.А., Кудряшов А.В., Шешин Е.П., Худа Халид Хамид Маджма, Компактные источники рентгеновского излучения, *Труды МФТИ*, Физика, 2019, т. 11, № 2, с. 116.
4. Ройзен, Л.И., Дулькин, И.Н., *Тепловой расчет оребренных поверхностей*, М.: Энергия, 1977, 256 с.

5. Керн, Д., Краус, А., *Развитие поверхности теплообмена*, М.: Энергия, 1977, 464 с.
6. Кожевников, И.В., Болога, М.К., Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 2. Одно- и многоступенчатые электрогидродинамические насосы, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 31.
7. Кожевников, И.В., Гросу, Ф.П., Болога, М.К., Характеристики многоступенчатого электрогидродинамического конвертора, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 5, с. 68.
8. Кожевников, И.В., Болога, М.К., 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.
9. Кожухарь, И.А., *Теплообмен в условиях электрической конвекции*, Автореф. дис. докт. тех. наук, Киев, 1992. 50 с.
10. Кисеев, В., Аминов, Д., Черкашин, В., Бурзин, Р., Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников, *Полупроводниковая светотехника*, 2011, № 3, с. 27.
11. Староверов, К., Система охлаждения для светодиодов, *Новости электроники*, 2008, № 17, с. 21.
12. Кузнецов, Н.О., Смирнов, Г.Ф., Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ), *Холодільна техніка і технологія*, 2005, № 5, с. 61.
13. Кравец, В.Ю., Наумова, А.Н., Вовкогон, А.Н., Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2010, № 1, с. 39.
14. Болога, М.К., Гросу, Ф.П., Кожевников, И.В., Поликарпов, А.А., и др., Теплообмен при электрогидродинамической прокачке в испарительно-конденсационной системе, *ЭОМ*, 2014, т. 50, № 3, с. 44.

Summary

The efficiency of the electrohydrodynamic (EHD) cooling and thermostating systems of electronic and electrical devices is investigated. A design of electroconvective cooling of an X-ray generator is proposed, the effectiveness of which is confirmed on laboratory models and full-scale samples. The anode temperature was reduced by a factor of two, the duration of the emitter operation increased, the reliability of the device improved. Various methods of cooling a high-voltage transformer are presented allowing to increase the specific power, reduce the weigh, size parameters, and temperature of the coolant, augment the resource. Studies have been conducted to establish the possibility of thermostating the heat-emitting element (block) by EHD methods when both external and internal conditions change. The design of an EHD thermostat with an automatic thermal stabilization system has been developed and tested (the temperature is maintained with an accuracy of ± 0.05 °C). A frame with an EHD liquid circuit and an EHD thermostat has been designed, which allows to significantly reduce longitudinal temperature differences and its deformation. The high efficiency of EHD cooling methods is shown by an example of a block of light-emitting diodes, small elements and components of electronic equipment, the use of electrodes – wires with a perforated insulating coating when cooling flat heat-emitting surfaces; a sevenfold increase in the heat transfer coefficient is achieved.

Keywords: electrohydrodynamic systems, pumps, pumping, turbulence, cooling, thermostat, thermal stabilization, X-ray emitter, electrodes, high-voltage transformer, suspension frame, light-emitting diodes block, insulation coating, perforation, resource