

объясняется, во-первых, тем, что напряженность поля в воздушных порах больше той напряженности поля, которая была бы в том же искровом промежутке и при той же разности потенциалов, если бы не было вовсе кристаллов азидов свинца, и, во-вторых, влиянием сечения воздушных каналов на пробивное напряжение. При $k < 33\%$ электрическая прочность прессованного азидов свинца уменьшается с увеличением k , вследствие того что в воздушных порах увеличивается напряженность электрического поля. При $k > 33\%$ с увеличением k продолжает увеличиваться напряженность электрического поля, однако преобладающее влияние оказывает увеличение пробивного напряжения вследствие уменьшения сечения воздушных каналов, которые и приводят к росту электрической прочности прессованного азидов свинца. Увеличение пробивного напряжения с уменьшением сечения воздушных каналов наблюдал А. Гемант [8], производивший опыты с парафиновыми пластинками, в которых создавались воздушные каналы определенного сечения. Уменьшением величины воздушных каналов объясняется и рост электрической прочности прессованного азидов свинца с уменьшением величины кристаллов (при одинаковой плотности).

Электрическая прочность прессованного азидов свинца уменьшается при увеличении площади электродов или межэлектродного расстояния, увеличивающих объем диэлектрика с высокой предпробивной напряженностью электрического поля. Чем больше объем диэлектрика между электродами, тем больше вероятность появления места, слабого для пробоя, что и приводит к снижению электрической прочности прессованного азидов свинца. Слабым местом для пробоя можно считать сравнительно широкий воздушный канал при условии усиления электрического поля.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных указывает на то, что пробой прессованного азидов свинца происходит по воздушным каналам в условиях усиленного электрического поля в них.

Установленные в этой работе зависимости электрической прочности прессованного азидов свинца относятся, очевидно, и к ряду других двухфазных диэлектриков (прессованных порошков, непропитанной бумаги, пористой керамики и др.).

Поступила 24 XI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. М и к Д., К р э г с Д. Электрический пробой в газах. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. С к а н а в и Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., Физматгиз, 1958.
3. В о р о б ъ е в А. А., В о р о б ъ е в Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М., «Высшая школа», 1966.
4. Б а л ы г и н И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.—Л., «Энергия», 1964.
5. Ф р а н ц В. Пробой диэлектриков. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
6. В о р о б ъ е в А. А. Техника высоких напряжений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1945.
7. В о р о б ъ е в Г. А., М е с я ц Г. А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М., Атомиздат, 1963.
8. Г е м а н т А. Электрофизика изолирующих материалов. Л., «Кубуч», 1932.
9. G r o s s B. Static charges on dielectrics. Brit. J. Appl. Phys., 1950, vol. 1, No. 10.

УДК 536.24:532.54

О ТЕПЛОБМЕНЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Ф. Х. Байбулатов, В. Ф. Минин, А. В. Смирнов

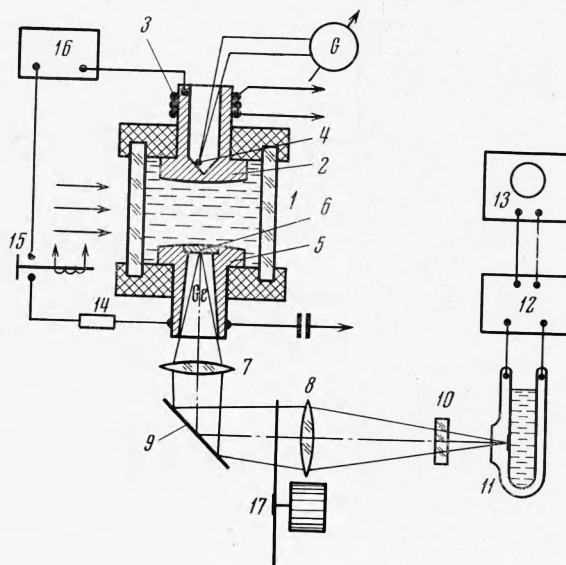
(Новосибирск)

Исследовалось явление теплопереноса между двумя электродами (верхним — подогреваемым и нижним), погруженными в жидкий диэлектрик. Одновременно производились киносъемки интерференционной картины межэлектродного пространства и бесконтактное измерение температуры тонкого слоя жидкости над нижним электродом. Показано, что от момента включения поля до появления скачка температуры над нижним электродом существует время задержки, совпадающее со временем продв.

жения горячих областей масла между электродами, полученным из кинокадров. Делается вывод, что основным механизмом усиленного теплопереноса в жидкости при включении поля являются турбулентные гидродинамические течения между электродами.

Теплообмен между проводящими телами, находящимися под различными электрическими потенциалами и погруженными в диэлектрическую жидкость или газ, был предметом исследований в ряде работ [1-8] и может иметь прикладное значение [5,7].

И. Е. Балыгин наблюдал резкое увеличение теплопроводности трансформаторного масла между двумя электродами при подаче на них постоянного напряжения, когда разность температур масла, измеряемая двумя термометрами вблизи верхнего подогреваемого и нижнего электродов, быстро спадала при включении электрического поля (см. работу [3], которая цитируется также в [9,10]). По оценкам автора, перенос тепла заряженными частицами, осуществляющими ток проводимости в масле, на много порядков ниже наблюдаемого значения. Поэтому для интерпретации экспериментальных



Фиг. 1

результатов автор делает сомнительное предположение об образовании в масле большого числа слабо связанных ионных комплексов, диссоциирующих в электрическом поле E порядка нескольких киловольт на сантиметр, ответственных за увеличение теплопроводности и в то же время не участвующих в создании тока проводимости.

Известно (в том числе авторам работ [3, 9, 10]), что жидкая диэлектрическая среда, находящаяся между электродами, приходит в движение при подаче на них напряжения [4-6, 11, 12]. Г. А. Устроумов в качественных экспериментах [11] наблюдал при наложении постоянного электрического поля возникновение потоков от верхнего горячего электрода вниз с последующим поворотом к стенкам и вверх, т. е. в направлении, противоположном естественной конвекции. В его другой работе [13] проведены теоретические оценки роли электрогидродинамических процессов и показано, что подвижная среда в электрическом поле не может быть в состоянии покоя и скорость движения жидкости пропорциональна E^2 для слабых полей и растет линейно E для сильных полей.

Поэтому более правдоподобным, по-видимому, следует считать, что увеличение интенсивности теплообмена в электрическом поле в жидкой диэлектрической среде [1-8] в основном обусловлено не потоком заряженных частиц, а интенсивным электрогидродинамическим перемешиванием жидкости.

Цель работы — подтвердить это для случая теплопереноса в трансформаторном масле.

Экспериментальная установка схематически представлена на фиг. 1. Фторопластовая кювета 1 с плоскостепенными стеклянными окнами, заполненная трансформаторным маслом, устанавливалась в плече интерферометра Майкельсона. Верхний заземленный электрод 2 (медь, размер 40×40 мм², радиус кривизны 200 мм) мог нагреваться спиралью 3, а температура электрода измерялась миниатюрной термопарой 4.

Нижний высоковольтный электрод 5, установленный на расстоянии 10—20 мм от верхнего, имел окно 6 из монокристаллического германия (прозрачного для длин волн $\lambda > 2 \text{ мк}$ [14]) для вывода инфракрасного излучения масла. Германий при комнатной температуре имеет объемное сопротивление $\sim 50 \text{ ом/см}$ [15], что на 11 порядков меньше объемного сопротивления масла, и искажением электрического поля в приэлектродной области, вносимым этим окном, можно полностью пренебречь.

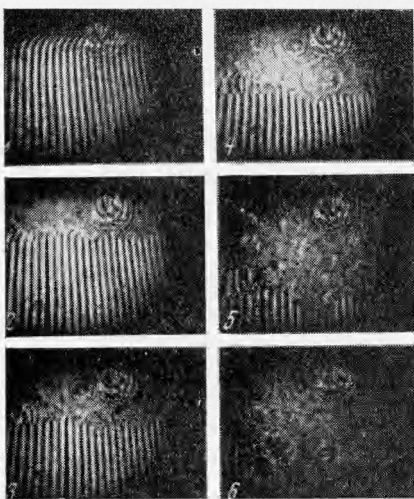
Так как масло обладает сильным поглощением в инфракрасной области спектра, то его температуру можно было определить по интенсивности теплового излучения в тонком слое ($\sim 0.5 \text{ мм}$), непосредственно примыкающем к поверхности германиевого окна. Для приема ИК-излучения из этой области использовалась оптическая система из двух линз 7 и 8, изготовленных из CaF_2 [14], поворотного зеркала 9 и светофильтра 10, прозрачного в полосе поглощения масла. Модулированный с частотой 400 гц вращающимся секторным прерывателем 17 [16] лучистый сигнал регистрировался охлаждаемым жидким азотом ИК-приемником 11 (InSb, фотогальванический режим [17]), усиливался селективным усилителем 12 (У2-6) и регистрировался на экране осциллографа 13 (С1-29).

Напряжение на высоковольтный электрод подавалось через предохранительное сопротивление 14 ($R = 25 \text{ к}$) и реле 15 от регулируемого высоковольтного выпрямителя 16 Тесла Вs 222. Киносъемки межэлектродного пространства производились в свете гелий-неонового лазера (0.63 мк) камерой Пентазет-16.

Таким образом, на установке одновременно можно было вести как киносъемку явления (ее интерференционную картину) в межэлектродной области, так и регистрацию температуры жидкости вблизи поверхности нижнего электрода.

Измерения проводились следующим образом. По возможности быстро, за время порядка 10 сек, нагревался массивный верхний электрод, затем нагрев выключался, запускалась кинокамера и включалось электрическое поле. Дифференцированный импульс от нижнего электрода одновременно запускал развертку осциллографа и отметчик времени кинокамеры, так что начало процесса точно фиксировалось и на киноплёнке.

Основная цель экспериментов состояла в том, чтобы показать, что при нагреве верхних слоев масла ($20^\circ \text{ C} < T < 100^\circ \text{ C}$) и включении



Фиг. 2

электрического поля ($0 < E < 25 \text{ кв/см}$), т. е. при выполнении всех условий экспериментов в работе [3], никакого увеличения теплопроводности и теплопереноса не наблюдается до тех пор, пока верхние нагретые слои масла за счет электрогидродинамических течений не приблизятся к поверхности нижнего электрода.

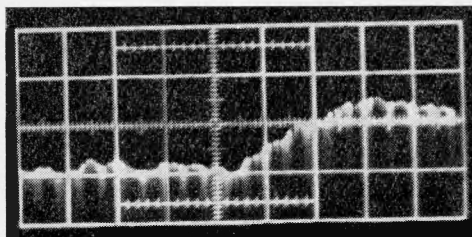
Из большого числа измерений прежде всего было установлено, что, действительно, определяемый по моменту появления ИК-сигнала скачок температуры масла над поверхностью нижнего электрода возникает не сразу после включения электрического поля, а лишь спустя достаточно большое время, и что это время задержки τ совпадает с временем продвижения сверху вниз границы горячей области масла, полученным из кинокадров. При медленном нагреве верхнего электрода явление оставалось прежним, понижалась лишь точность определения τ , так как прогревалась большая область жидкости, и передний фронт нарастания ИК-сигнала становился более пологим.

Существенной зависимости явления от полярности приложенного к электродам напряжения обнаружено не было. Так как верхний электрод был достаточно массивным, то без дополнительного его прогрева опыт можно было повторить несколько раз, если после выключения поля от предыдущего эксперимента до включения поля в последующем эксперименте выдерживалось 1—2 мин для установления теплового градиента в кювете, однако скачок температуры с каждым разом становился меньше, так как верхний электрод остывал, а средняя температура масла повышалась.

В случае, когда напряжение все время оставалось включенным, ИК-сигнал спадал в течение примерно 10 мин по мере остывания верхнего электрода и кюветы. При этом все время наблюдалось интенсивное турбулентное движение жидкости в одних участках сверху вниз, в других наоборот. Эта картина оставалась качественно одинаковой, если верхний электрод нагревался всего на $1\text{--}2^\circ \text{ C}$, что было уже достаточно для оптической визуализации течений.

На фиг. 2 приведены кинокадры продвижения границы горячей области масла при первом включении поля, полученные с интерферометром; кадры 1—6 соответ-

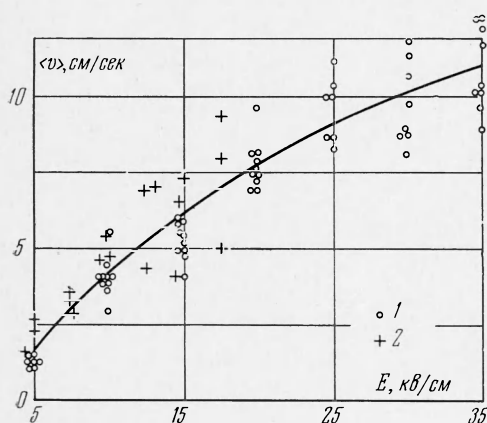
ствуют времени ϕ , прошедшему после включения напряжения, $\phi = 50, 140, 170, 190, 235, 260$ мсек; при этом напряжение между электродами $U = 35$ кВ, расстояние между электродами $L = 2$ см. На фиг. 3 приведена характерная осциллограмма сигнала, пропорционального излучению жидкости над поверхностью нижнего электрода; при этом $U = 35$ кВ, $L = 1$ см, $T \approx 35^\circ\text{C}$, скорость развертки 20 мсек/см.



Фиг. 3

Средняя скорость продвижения границы $\langle v \rangle = L/\tau$ (где L — расстояние между верхним и нижним электродами), пересчитанная из кинокадров и осциллограмм (при $L = 1$ см, $T = 40^\circ\text{C}$), приведена на фиг. 4, где точки 1 получены по ИК-сигналу, точки 2 получены по кино съемке (начальная температура масла 20°C).

Анализ этой фигуры показывает, что полученная экспериментальная зависимость $\langle v \rangle (E)$ качественно согласуется с теоретическими оценками характерной скорости турбулентного движения [13]. При этом численные значения скорости в последнем случае, оцененные по формуле (20) работы [13], по порядку величины совпадают с измеренными значениями.

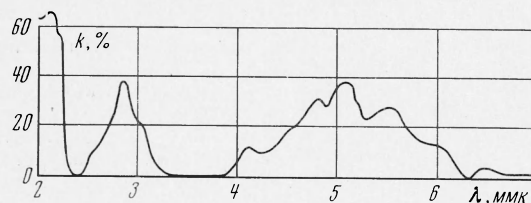


Фиг. 4

График зависимости $\langle v \rangle (E)$ по внешнему виду близок к графикам, изображающим эффективность электрического поля или относительное увеличение теплоотдачи в зависимости от E в ряде работ [4–6, 8] в жидкой диэлектрической среде. Интенсивный рост начинается при напряженности поля $E 2,5$ кВ/см. Эта величина согласуется со значениями критической напряженности поля, при которой наблюдается быстрый рост относительного коэффициента теплоотдачи. У разных авторов эти значения лежат в пределах $0,7 \div 2$ кВ/см [5, 6, 8].

При увеличении начальной температуры верхнего электрода наблюдалось возрастание значений $\langle v \rangle$, что имеет место также для эффективности теплопереноса при увеличении температурного перепада в жидкости [4, 6, 8]. Эти совпадения, по-видимому, не случайны, а объясняются тем, что

в рассматриваемой области значений (E, T) по крайней мере в жидких диэлектриках теплопередача между проводящими телами, к которым приложено напряжение, осуществляется не за счет потока заряженных частиц, а за счет турбулентных движений самой жидкости между электродами, т. е. за счет ее интенсивного перемешивания.



Фиг. 5

То, что в рассматриваемой области (E, T) не происходит какая-либо заметная диссоциация ионных комплексов, подтверждают также измерения инфракрасного спектра пропускания трансформаторного масла. Для этого была специально изготовлена плоская кювета с плоскопараллельными окнами из NaCl [14], с системой нагрева кюветы и двумя параллельными высоковольтными электродами, между которыми заливалось масло. Спектр пропускания масла (толщина слоя 1 мм) снимался на ИК-спектрометре

при различных температурах и напряжениях. При этом для $20^\circ \text{C} < T < 100^\circ \text{C}$, $0 < E < 12 \text{ кВ/см}$ никакого различия в спектре пропускания по сравнению со спектром при выключенном поле и комнатной температуре (фиг. 5) обнаружено не было, что подтверждает отсутствие существенных превращений в масле на молекулярном уровне, которые неизбежно отразились бы на его спектре пропускания.

Таким образом, полученные результаты приводят к выводу, что действие на жидкий диэлектрик температуры и электрического поля в рассматриваемой области не приводит ни к резкому возрастанию теплопроводности жидкости, ни к заметному изменению ее структуры на молекулярном уровне, а возрастание теплопередачи в диэлектрической жидкости обусловлено интенсивным турбулентным движением среды между электродами.

Поступила 21 IX 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. A h s m a n n G., K r o n i g R. The influence of electric fields on the convective heat transference in liquids. Appl. Sci. Res., 1950, vol. A2, No. 3, pp. 235—244.
2. S e n f t l e b e n H., L a n g e - H a h n R. Der Einfluß elektrischer Felder auf den warmeübergang in Flüssigkeiten. Z. Naturforsch., 1958, Bd. 13a, H. 2, S. 99—105.
3. Б а л ы г и н И. Е. О теплопроводности некоторых диэлектриков в электрическом поле. Инж.-физ. ж., 1960, № 3, стр. 54—58.
4. Б о л о г а М. К., Б у р б у л я Ю. Т., К о ж у х а р ь И. А. Теплоотдача при естественной конвекции диэлектрических жидкостей в электрическом поле. В сб. «Тепло- и массоперенос», М., «Энергия», 1968, т. 1, стр. 699—703.
5. П л а у д е К. К., Г р и с л и с В. Я., П у я т с В. В., М е й е р с А. Э. Теплообмен в непроводящих жидкостях в однородном электростатическом поле. Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н., 1968, № 6.
6. П у я т с В. В. О гидродинамической неустойчивости диэлектрических жидкостей в электростатическом поле. Изв. АН Латв ССР, Сер. физ. и техн. н., 1969, № 2, стр. 72—76.
7. Г р и с л и с В. Я., М е й е р А. Э., О з е р с А. П. Влияние электрического поля на теплообмен в коаксиальных каналах. Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н., 1969, № 4, стр. 89—93.
8. Б о л о г а М. К., Б у р б у л я Ю. Т., Х о р и н а Е. Л. Экспериментальное исследование воздействия электрических полей на теплообмен в щелевых каналах. Электронная обработка материалов, 1969, № 5, стр. 51—58.
9. Б а л ы г и н И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.—Л., «Энергия», 1964.
10. С т е п а н о в Е. М., Д ь я ч к о в Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., «Металлургия», 1968, стр. 274.
11. О с т р о у м о в Г. А. Некоторые гидродинамические явления, сопровождающие прохождение тока через изолирующие жидкости. ЖЭТФ, 1956, т. 30, вып. 2, стр. 282—286.
12. G r o s s M. J., P o r t e r I. E. Electrically induced Convection in dielectric liquids. Nature, 1966, vol. 212, No. 5068, pp. 1343—1345.
13. О с т р о у м о в Г. А. К вопросу о гидродинамике электрических разрядов. Ж. техн. физ., 1954, т. 24, вып. 10, стр. 1915—1919.
14. В о р о н к о в а Е. М., Г р е ч у ш н и к о в Б. Н., Д и с т л е р Г. И., П е т р о в И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., «Наука», 1965.
15. Х о г а р т К. Германий. В сб. «Материалы, используемые в полупроводниковых приборах», М., «Мир», 1968.
16. Б а й б у л а т о в Ф. Х. О модуляции светового пучка кольцевого сечения. Оптико-механ. пром-сть, 1969, № 10, стр. 21.
17. Д ж е м и с о н Дж. Э., М а к - Ф и Р. Х., П л а с с Дж. Н., Г р у б е Р. Г., Р и ч а р д с Р. Дж. Физика и техника инфракрасного излучения. М., «Советское радио», 1965, стр. 161—162.