

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА КОСОУГОЛЬНЫХ ВОЛНАХ

В. Я. УШАКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

Для изучения разрядных явлений в жидкостях впервые применена современная электронно-оптическая аппаратура — эопограф, имеющий высокую скорость временной развертки и многократное усиление света [1]. Одновременное использование эопографа для получения пространственно-временных картин разряда в жидкостях и двухлучевого осциллографа для записи разрядных токов и напряжения на промежутке позволило получить новые данные о развитии импульсного разряда в жидкостях. Высокие технические возможности эопографа позволили исследовать развитие разряда в жидкостях на волнах типа стандартной (1,5/70 мксек) без искусственного торможения разряда\*) и на косоугольных волнах в широком диапазоне крутизн (0,4 кв/мксек—450 кв/мксек). В настоящей статье излагаются результаты исследования пробоя жидкостей на косоугольных волнах напряжения (пробой на экспоненциально нарастающем фронте волны напряжения) и предлагается расчетно-экспериментальный метод получения вольтсекундных характеристик некоторых жидких диэлектриков.

В опытах применялись: трансформаторное масло прочностью 45—50 кв в стандартном пробойнике, этиловый спирт (технический) и дистиллированная вода ( $\rho = 3 \cdot 10^5$  ом см). Пробой жидкостей осуществлялся в электродной системе стержень — плоскость (С—П) при положительной (+ С—П) и отрицательной (—С + П) полярностях импульса. Межэлектродное расстояние составляло 20—165 мм.

Схема и методика экспериментов приведены в [2].

### Развитие разрядных процессов во времени

На основании проведенных экспериментов усреднением большого числа эопограмм составлены схемы импульсного пробоя трансформаторного масла и этилового спирта — характерных представителей неполярных и полярных жидкостей. На рис. 1, а представлена схема развития разряда в масле на положительной косоугольной волне при крутизне (А), равной 4 кв/мксек, и межэлектродном расстоянии (S), равном 2 см.

\*) Результаты этих исследований изложены в статье И. С. Стекольниковой и В. Я. Ушакова «Исследование разрядных явлений в жидкостях», принятой к печати в Журнале технической физики.

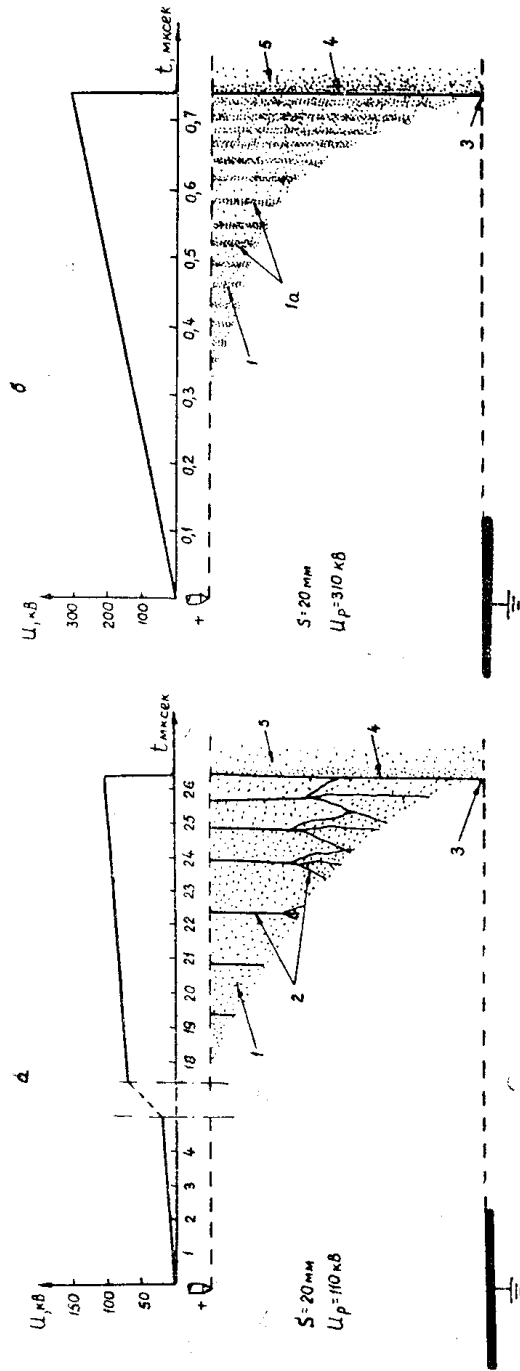


Рис. 1. Схема развития разряда в трансформаторном масле на положительных косоугольных волнах напряжения при  $A = 4 \text{ кВ/мксек}$  (а) и  $A = 400 \text{ кВ/мксек}$  (б) и  $S = 2 \text{ см}$ .  
 1 — свечение лидерного канала, 2 — вспышки лидерного канала, 3 — финальный скачок, 4 — главный канал, 5 — дуга.

По мере повышения потенциала стержня вблизи него с определенного момента времени начинаются ионизационные процессы, подавляемые некоторое время рекомбинацией электронов с ионами и захватом электронов молекулами среды. Когда потенциал стержня достигает критической величины, ионизация начинает преобладать над рекомбинацией и от стержня к плоскости распространяется интенсивный ионизационный процесс. В рассматриваемом случае прогрессивное развитие ионизации начинается при  $U = 72$  кв. При этом вблизи стержня появляется свечение 1, которое отщуровывается в лидерный канал. Лидерный канал в процессе развития постоянно светится 1 и на фоне этого свечения видны яркие вспышки 2 по всей длине канала, которым соответствуют кратковременные (доли мксек) импульсы тока. Вспышки лидерного канала и импульсы тока следуют через интервалы времени  $\approx 1,5$  мксек. Скорость движения лидера плавно возрастает от  $(1,5 \div 1,6) \cdot 10^5$  см/сек вблизи стержня до  $(4,5 \div 5) \cdot 10^5$  см/сек вблизи плоскости, а интервалы между вспышками сокращаются до  $0,6 \div 0,8$  мксек. Когда лидер проходит около 90—95% межэлектродного расстояния, поле между его головкой и плоскостью приближается к равномерному и пробой оставшейся части промежутка происходит скачком, который по аналогии с подобным явлением в длинной искре может быть назван «финальным скачком» 3. В момент замыкания лидером промежутка его канал ярко вспыхивает 4, напряжение на промежутке срезается, и в промежутке устанавливается дуга 5. Исследования переходной стадии разряда от лидера к дуге при скорости временной развертки зоографа  $\approx 6 \cdot 10^6$  см/сек не позволили определить скорость развития этого процесса. Это означает, что его скорость превосходит  $(5 \div 10) \times 10^8$  см/сек. Можно предположить, что при касании лидерным каналом плоскости замыкание промежутка происходит со скоростью, близкой к скорости распространения электромагнитной волны.

Лидер с отрицательного стержня имеет большую яркость свечения, менее ветвист и паузы между вспышками канала составляют  $\approx 1$  мксек. В остальном развитие отрицательного разряда аналогично описанному выше.

При увеличении крутизны  $A$  средняя скорость движения лидера возрастает, а интервалы между вспышками канала сокращаются. При  $A = 400$  кв/мксек (рис. 1, б) они равны  $0,05 \div 0,06$  мксек, у отрицательного лидера при  $A = 400$  кв/мксек они неразличимы.

На зоограммах разряда в этиловом спирте при  $A \leq 10 \div 15$  кв/мксек обращает на себя внимание толчкообразный характер движения лидера. На рис. 2, а показана схема развития разряда в спирте в промежутке  $+C-P$  при  $A = 0,4$  кв/мксек и  $S = 5$  см. В момент, когда напряжение на промежутке достигает значения  $\approx 20$  кв, вблизи стержня наблюдается свечение почти сферической формы 1. Затем после паузы в 1 мксек свечение появляется вновь в виде зачатка лидерного канала. Дальнейшее удлинение канала осуществляется толчками. Лидер состоит из канала 2 и головки (1а). На быстрых развертках видно (см. вставку на рис. 2, а), что во время толчков головка лидера в течение  $0,12 \div 0,13$  мксек ( $t_1 - t'_1$ ) продвигается в глубь промежутка со скоростью  $\approx 1 \cdot 10^6$  см/сек, а канал при этом светится. Левая граница канала четко очерчена 2 и постепенно переходит в диффузное свечение 2а с уменьшающейся яркостью. Во время пауз длительностью 0,9—1,1 мксек свечение в промежутке не фиксируется. При движении лидера к плоскости паузы между толчками сокращаются до 0,5—0,7 мксек, а эффективная скорость движения головки лидерного канала возрастает от  $(6 \div 5) \cdot 10^4$  см/сек до  $1,5 \cdot 10^5$  см/сек. Завершающая стадия разряда аналогична выше описанной для трансформаторного масла.

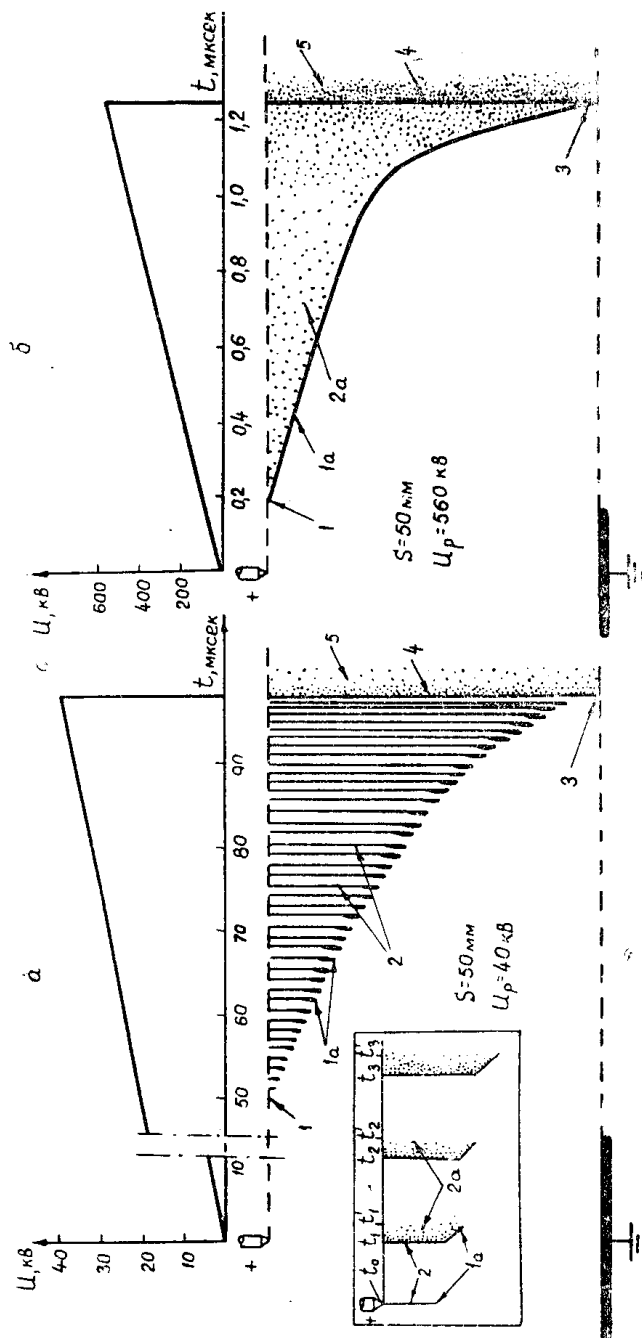


Рис. 2. Схемы развития разряда в этиловом спирте на положительных косоугольных волнах на-  
пряжения при  $A = 0,4$  кв/мксек (а) и  $A = 400$  кв/мксек (б) и  $S = 5$  см.  
1 — первое видимое свечение в промежутке, 1а — головка лидерного канала, 2 — лидерный канал,  
2а — диффузное свечение канала, 3 — финальный скачок, 4 — главный канал, 5 — дуга.

При увеличении  $A$  до  $\approx 10$  кв/мксек время движения головки лидера во время толчка увеличивается, а длительность пауз между толчками соответственно сокращается. При  $A > 10-15$  кв/мксек паузы неразличимы (рис. 2, б).

Развитие разряда в спирте в системе  $-C + П$  и в дистиллированной воде в системе  $+C - П$  [2] во многом подобно таковому для спирта в системе  $+C - П$ . Временная развертка отрицательного лидера в воде даже при малых  $A$  представляет собой равномерно светящийся треугольник. Схема разряда подобна изображенной на рис. 2, б.

Наиболее интересным в результатах проведенных экспериментов является следующее: а) лидерный характер пробоя жидкостей, б) толчкообразный характер движения лидера в полярных жидкостях при малых  $A$  и смена его на непрерывный при  $A \geq 10 \div 15$  кв/мксек., в) зависимость скорости и характера разрядных процессов в жидкостях от их физико-химических свойств.

Обозначая отшнурованный канал, развивающийся с электрода большой кривизны, лидером, отметим некоторые отличия этого процесса от лидерного процесса в воздухе. Как известно [3], в воздухе впереди лидерного канала распространяется зона ионизации в виде короны лидера, напоминающей первичную импульсную корону. Корона лидера уже на ранних стадиях развития разряда перекрывает большую часть межэлектродного промежутка.

В жидкостях при  $S = 2 \div 16,5$  см ни первичная корона, ни корона лидера не были зафиксированы, хотя опыты показали, что применяемая аппаратура позволяет регистрировать корону в воздухе через разрядную камеру из оргстекла, заполненную дистиллированной водой. Трудно также предположить, что свечение зоны ионизации в жидкостях соответствует красной или инфракрасной области спектра, в которой чувствительность эопографа минимальная (ЭОП с сурьмяно-цезиевым фотокатодом). Полученные данные показывают, что ионизация в жидкой и газообразной средах происходит неодинаково из-за значительных различий в условиях ее развития в этих средах: а) малая длина свободного пробега электронов в жидкостях ( $\lambda_{жидк} \approx 0,001 \lambda_{возд}$ ), б) значительная диссоциация молекул жидкостей и др. Вероятно, ионизация в жидкостях происходит только в непосредственной близости от головки лидерного канала. Следует полагать, что в жидкостях — средах более плотных, чем воздух, зона ионизации имеет большую концентрацию носителей зарядов. Это позволяет ей даже при малых размерах генерировать в единицу времени такое количество носителей зарядов, которое поддерживает высокую проводимость лидерного канала.

Как уже отмечалось выше, в полярных жидкостях при  $A \leq 8-15$  кв/мксек лидерный канал продвигается толчкообразно. Можно ожидать, что образование вблизи головки лидерного канала объемного заряда того же знака, что и знак лидера, снижает напряженность  $E$  на головке канала и прекращает его продвижение в глубь промежутка. Свечение канала лидера в паузах значительно ослабляется, однако проводимость канала остается достаточно высокой, и потенциал электрода выносится на головку лидераного канала. При высоких напряженностях поля на границе зоны ионизации фронт ионизации перемещается к плоскости, что эквивалентно удалению объемного заряда от головки лидерного канала. Повышение  $E$  на головке канала происходит благодаря такому удалению заряда от головки и частичной его нейтрализации, а также из-за повышения потенциала электрода при возрастании амплитуды волны напряжения. При больших  $A$  напряженность на головке во время паузы быстрее восстанавливается до критического значения и больший отрезок времени ее величина остается достаточной для

поддержания ионизации с головки лидерного канала. Этим объясняется сокращение пауз между толчками лидера и увеличение эффективной скорости движения головки канала при увеличении  $A$ . При смене толчкообразного движения лидера на непрерывное в спирте для  $+C-P$  и  $-C+P$  и в воде для  $+C-P$  темп возрастания скорости при увеличении крутизны замедляется.

В масле, где траектория движения головки лидерного канала непрерывна даже при малых  $A$ , подобное явление не наблюдается. Несмотря на то, что в масле феноменология разряда несколько отлична от описанной для полярных жидкостей, переработка участка межэлектродного промежутка, охваченного ионизацией, в хорошо проводящий канал осуществляется, вероятно, так же, как и в полярных жидкостях.

Различия в феноменологии и скорости развития разряда при положительной и отрицательной полярностях стержней, в полярных и неполярных жидкостях обусловлено в основном различием условий образования и распространения объемного заряда перед головкой лидерного канала. Так, например, ярко выраженный эффект полярности в воде, молекулы которой подвержены значительной диссоциации, можно объяснить тем, что из-за рекомбинации электронов с ионами  $H^+$  перед головками положительного и отрицательного лидеров сосредотачивается объемный заряд, состоящий, в основном, из ионов  $OH^-$ . Объемный заряд увеличивает напряженность на головке положительного лидера и способствует его развитию. Действие же этого заряда на отрицательный лидер противоположно. Ранее подобные соображения высказывались в [4]. В тех жидкостях, диссоциация молекул которых незначительна, эффект полярности выражен в меньшей мере.

Ранние исследования разряда в полярных и неполярных жидкостях [5] показали, что жидкости более полярные имеют меньшую электрическую прочность. Позднее [6] для постоянного и переменного напряжения при малых  $S$  (около 1 мм) была найдена зависимость  $E_{пр}$  от  $\varepsilon$  для 30 жидкостей. Зависимость имеет вид:

$$\lg E_{пр} = -k \cdot \varepsilon + c. \quad (1)$$

Для импульсных напряжений нами установлена зависимость  $E_{пр}$  и средней скорости разряда ( $V_{ср}$ ) от  $\varepsilon$ . Скорости развития лидерного процесса в жидкостях с большей  $\varepsilon$  выше, а  $E_{пр}$  ниже. Исключение составляет дистиллированная вода в электродной системе  $-C+P$ .

При больших  $A$  тормозящее действие объемного заряда уменьшается, а поэтому различия условий его образования и нейтрализации в разных жидкостях слабо отражаются на скорости развития лидера. При  $A=400$  кв/мксек значения  $V_{ср}$  для различных жидкостей близки. Наиболее четко зависимости  $V_{ср}$  и  $E_{пр}$  жидкостей от  $\varepsilon$  проявляются при развитии разряда на хвосте волны, когда ее амплитуда близка к 50%-ной разрядной. На рис. 3 показаны зависимости  $E_{пр}$  (кривая 1) и  $V_{ср}$  (кривая 2) от  $\varepsilon$  для пяти жидкостей. Пробой жидкостей осуществлялся в электродной системе  $+C-P$  при  $S=5$  см. Волна напряжения имела форму 1,5/70 мксек. Зависимость  $V_{ср}$  от  $\varepsilon$  может быть представлена уравнением

$$\lg V_{ср} = 0,151 \cdot \varepsilon + 5,07. \quad (2)$$

Зависимость  $E_{пр}$  от  $\varepsilon$  в интервале изменения  $\varepsilon$  от 2 до 16 (как это имело место в [6]) может быть представлена уравнением типа

$$\lg E_{пр} = -k_1 \cdot \varepsilon + c_1, \quad (3)$$

однако значения коэффициентов  $k_1$  и  $c_1$  отличны от  $k$  и  $c$  в (1). Во всем диапазоне изменения  $\varepsilon$  от 2,3 до 80 зависимость  $E_{пр}$  от  $\varepsilon$  урав-

лением (3) не описывается. Трудно, конечно, представить, что вся совокупность факторов, влияющих на развитие разрядного процесса, сводится к диэлектрической проницаемости среды. И тем не менее зависимости, полученные нами и в [6], нельзя отнести к чистым случайностям. Если предположить, что в электрическом поле в поляр-

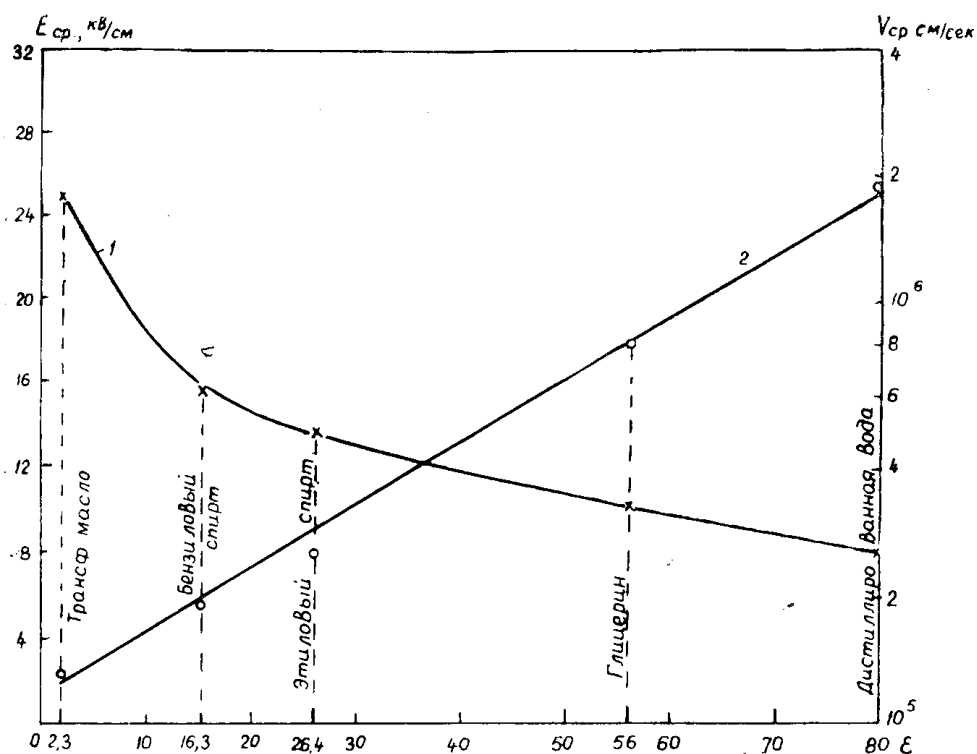


Рис. 3. Зависимость пробивной напряженности (1) и средней скорости развития разряда (2) от диэлектрической проницаемости среды.

ных жидкостях могут образовываться мостики из диполей, тогда, согласно кванто-механическим расчетам [7,8], условия движения электронов будут значительно облегчены. При этом облегчаются и условия развития разряда.

Определенную роль в развитии разряда в жидкостях (особенно в полярных) могут играть внутренние микрополя [9].

### О расчете вольтсекундных характеристик

В связи с разработкой вопросов практического использования энергии искрового разряда [10] и координацией изоляции аппаратов на высокие и сверхвысокие напряжения [11] особую актуальность приобрело исследование импульсной электрической прочности жидких диэлектриков при приложении к ним экспоненциально возрастающего напряжения (косоугольные волны). Представляется поэтому необходимым разработать упрощенный метод получения вольтсекундных характеристик жидкостей, который сократил бы трудоемкую работу по экспериментальному снятию вольтсекундных характеристик. Эмпирические уравнения вольтсекундных характеристик [12, 13] и методы пересчета вольтсекундных характеристик для одной формы волны напряжения на волны другой формы, рассмотренные в [3], применимы только для воздушной изоляции.

Легко заметить, что при пробое жидкостей на косоугольных волнах, форма которых описывается уравнением  $U = A \cdot t$ , разрядное напряжение можно представить в виде суммы двух составляющих

$$U = U_{н.л.} + \frac{A \cdot S}{v_{ср}}, \quad (4)$$

где  $U_{н.л.}$  — напряжение, при котором начинается развитие лидера,  $A$  — крутизна волны,  $v_{ср}$  — средняя скорость развития лидера,  $S$  — величина межэлектродного расстояния. Второе слагаемое в (4) представляет собой прирост напряжения за время развития лидера от стержня до плоскости.

Эксперименты показали, что  $V_{ср}$  зависит от  $A$  и не зависит от  $S$ ; что непосредственно следует из лидерного механизма пробоя жидкостей в неоднородном поле.

Начало лидерного процесса зависит от напряженности поля на поверхности электрода, а также должно зависеть от  $A$  из-за инерционности ионизационных процессов. Если принять острое высоковольтного электрода, заточенного на конус, за сферу с радиусом  $r$ , то  $E$  на поверхности такой сферы определится выражением [14]

$$E = 0,9 \cdot \frac{U}{S} \cdot \frac{S + r}{\varepsilon \cdot r}.$$

При  $r \ll SE \approx \frac{U}{r}$  т. е. с малой погрешностью можно принять, что напряженность на поверхности электрода не зависит от межэлектродного расстояния. Очевидно, что напряжение  $U_{н.л.}$  также не должно зависеть от  $S$  при  $S \gg r$ . Эксперименты подтвердили это предполо-

Таблица 1

Жидкость	$\alpha$		$\beta$		$\gamma$		$\delta$		$\lambda$		$\varphi$		$\psi$		Примечания
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
Трансформаторное масло	0	$\frac{6,28}{6,28}$	25,5	$\frac{11,2}{11,2}$	55	$\frac{64}{64}$	5	$\frac{5,63}{6,61}$	1	$\frac{0,932}{0,417}$	0,27	$\frac{0,227}{0}$	0,7	$\frac{1}{0}$	$\frac{3-150}{150-600}$
Этиловый спирт	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{22}{22}$	$\frac{18,2}{18,2}$	$\frac{28}{28}$	$\frac{37,3}{37,3}$	$\frac{6,3}{3,4}$	$\frac{6,3}{2,54}$	$\frac{0,558}{0,57}$	$\frac{0,578}{0,655}$	$\frac{0,25}{0}$	$\frac{0,364}{0}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{0,4-10}{10-600}$
Дистиллированная вода	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{19,5}$	$\frac{41}{18,2}$	$\frac{56,4}{18,2}$	$\frac{13,2}{0,785}$	$\frac{0,827}{0,827}$	$\frac{0,51}{0,205}$	$\frac{0,0664}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,4-600}{6-600}$					

жение. Напряжение  $U_{н.л.}$  определялось по осциллограммам и эпограммам при синхронной их записи. Кроме того, контроль результатов осуществлялся сопоставлением токовых осциллограмм с осциллограм-



мами напряжения, так как момент появления лидера отмечается на осциллограмме импульсом тока. Описывая математически экспериментально найденные зависимости  $U_{н.л.}=f(A)$  и  $V_{ср}=f(A)$  и подставляя полученные выражения в (4), получим формулу, связывающую разрядное напряжение с крутизной и величиной межэлектродного расстояния. В общем виде формула записывается

$$U = \alpha (\lg A)^2 + \beta \cdot \lg A + \gamma + S \cdot \delta \cdot A^{\lambda - \tau (\lg A)^{\psi}} \quad (5)$$

Значения коэффициентов приведены в табл. 1.

В табл. 1. в графе „Примечания“ указаны пределы изменения  $A$ , для которых применимы приведенные коэффициенты. В формуле (5)  $A$  — крутизна волны напряжения ( $кв$ ),  $S$  — межэлектродное расстояние ( $см$ ),  $U$  — разрядное напряжение ( $кв$ ). Сопоставление вольтсекундных характеристик, рассчитанных по формуле (5), и экспериментальных, полученных разными авторами, указывают на их хорошее совпадение при  $S=0,5-5 см$ . При меньших  $S$  расхождения достигают существенных величин. Вероятно при  $S < 0,4 \div 0,5 см$   $U_{н.л.}$  зависит от  $S$  и становится заметно меньше  $U_{н.л.}$  для больших  $S$ .

### Выводы

1. При электрическом пробое жидкостей на косоугольных волнах развивается лидерный процесс, отличающийся от лидерного процесса в воздухе.

2. Характер разрядного процесса зависит от рода жидкости, полярности и крутизны волны напряжения.

3. Жидкости более полярные имеют меньшую электрическую прочность; разряд в них развивается с большей скоростью.

4. Роль физико-химических свойств жидкостей в развитии разрядного процесса уменьшается при уменьшении экспозиции напряжения (увеличении крутизны).

5. Проведенные эксперименты позволили вывести формулы для расчета вольтсекундных характеристик трансформаторного масла, этилового спирта и дистиллированной воды в электродных системах  $+C - П$  и  $-C + П$  для  $S = 0,5-5 см$  и  $A = 0,4 \div 600 кв/мксек$ .

6. Метод расчета можно распространить на другие жидкости, межэлектродные расстояния и электродные системы после проведения относительно несложных экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Н. Браго. Эпограф с усилением. Передовой научно-технический опыт, ВИНТИ, АН СССР, № П-62-15/1, 1962.
2. В. Я. Ушаков. Пробой диэлектриков и полупроводников, Сб. докл. на IV межвузовской конферен. по проб. диэлектр. и полупроводников, 207-211, Изд. Энергия, М.—Л., 1964.
3. И. С. Стекольников. Природа длинной искры, Изд. АН СССР, М., 1960.
4. В. С. Комельков. ЖТФ, т. 32, вып. 8, 1961.
5. А. Ф. Вальтер, Л. Д. Инге. ЖТФ, т. IV, вып. 9, 1934.
6. E. Mussat, A. Nikuradse, R. Ulbricht, Ztschr. Ang. Phys., 8, 1, 1956.
7. W. I. Baber, H. R. Hasse, Proc. Cambr. Phil. Soc., 31, 564, 1935.
8. J. S. Handler, Journ. Chem. Phys. 23, 1977, 1955.
9. А. А. Воробьев, Н. А. Приходько. Труды СФТИ, т. 4, вып. 3, 1936.
10. А. А. Воробьев. Изв. Томск. политехн. ин-та, т. 95, 331, 1958.
11. Герт, Джирку, Колоусек, Вискосил. Энергетика за рубежом. Уровни изоляции и внутренние перенапряжения в электрических системах, 55-90, ГЭИ, М.—Л., 1963.
12. А. А. Горев, Л. Е. Машкилейсон. Электричество, № 13, 32, 1935.
13. Kind Dieter, ETZ—A, Bd. 79, № 3, 65—69, 1958.
14. A. Bouwers, Elektrische Hochspannung, B., 1939.