

С 344.1р

16/41-7с

П-34

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 5277



А.Ф. Писарев, Г.И. Селиванов, М.П. Баландин,  
Л.К. Лыткин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ  
ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТЯХ

1970

P13 - 5277

А.Ф. Писарев, Г.И. Селиванов, М.П. Баладин,  
Л.К. Лыткин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ  
ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТЯХ

ИЗДАНИЕ 1958  
МОСКВА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЭНЕРГЕТИКА

8/18558

## В в е д е н и е

На протяжении уже многих лет физики ряда лабораторий ведут исследования по электрическому пробоя паро-газовых пузырьков в жидкостях. Цель этих исследований различна. В одних случаях выясняется влияние разряда в пузырьках на электрическую прочность жидкостей, в других - изучаются вопросы динамики развития пузырьков в жидкости, когда к пузырькам непрерывно подводится электрическая энергия. В ряде случаев исследования направлены на разработку нового метода трековой регистрации частиц в псевдокипящих жидкостях. Одним из важных вопросов, с которыми приходится встречаться в таких исследованиях, является вопрос оптимального выбора характеристик электрического поля для пробоя пузырьков, отличающихся размером, давлением и природой заполняемого газа. Как ни удивительно, но в настоящее время отсутствует методика расчета параметров электрических полей, хотя необходимость в ней явно имеется. Ниже излагается методика расчета полей для пробоя пузырьков постоянным, импульсным и высокочастотным электрическим полем. В основу расчета положены основные критерии и некоторые экспериментальные зависимости электрического пробоя газа в малых зазорах. Рассмотрение методов проводится на конкретных примерах электрического пробоя пузырьков в

таких жидкостях, как гелий, водород, ксенон и неон. Эти жидкости, как известно, широко используются в пузырьковых камерах и исследование пробоя пузырьков в них представляет в настоящее время определенный интерес. Разумеется, представленная ниже методика пригодна для расчета электрических полей для пробоя пузырьков и в любых других жидкостях.

Пробой пузырьков в постоянном и импульсном  
электрических полях

Рассмотрим требования, которым должны удовлетворять электрические поля, способные вызвать разряд в пузырьках. В принципе существует три возможных способа пробоя пузырьков: постоянным, импульсным и высокочастотным полем. Однако пробивные характеристики постоянных и импульсных полей длительностью в несколько мсек близки друг к другу и мы не будем вводить специального различия между этими двумя типами полей.

В качестве основного критерия для расчета постоянного или импульсного пробивного напряжения в пузырьках примем известное эмпирическое условие Ретера  $\alpha d = 20$ , где  $\alpha$  - первый коэффициент Таунсенда, зависящий от рода газа и отношения  $\frac{E}{P}$ ,  $d$  - величина разрядного промежутка, которая в данном случае может быть приравнена к диаметру пузырька,  $P$  - давление пара в пузырьке и  $E \equiv E_2$ . Зависимость  $\alpha = f\left(\frac{E}{P}\right)$  для многих газов дана в литературе по газовому разряду. Очевидно, что для эффективного пробоя пузырька необходимо, чтобы  $\alpha > \frac{20}{d}$ .

В дальнейшем положим линейный размер пузырьков равным  $d$ , а напряженность поля в объеме камеры -  $E_1$  и в пузырьке -  $E_2$ . Диэлектрическую постоянную рабочей жидкости обозначим через  $\epsilon_1$ , а ее пара -  $\epsilon_2$ . Тогда связь между  $E_1$  и  $E_2$  выразится известным соотношением:

$$E_2 = E_1 \frac{3 \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2 \epsilon_1} \quad (1)$$

Рассмотрим на примере метод определения величины  $E_1$  для случая пробоя пузырьков в ксеноновой камере. В такой камере, как известно, давление пара в пузырьках приблизительно равно 20 атм. Диаметр пузырьков примем равным  $d = 1 \cdot 10^{-1}$  см, тогда  $a > 200$  см<sup>-1</sup> и  $\frac{a}{P} = \frac{200}{20.760} = 1,3 \cdot 10^{-2}$  (см мм рт. ст.)<sup>-1</sup>. По зависимости  $\frac{a}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right)$  из табличных данных /1/ находим значение  $\frac{E}{P} \approx 17$  в (см мм рт. ст.)<sup>-1</sup>. Отсюда напряженность поля в пузырьке

$$E = E_2 = 17P = 17 \cdot 20.760 = 260 \text{ кв/см.}$$

Для определения  $E_1$  воспользуемся формулой (1). Для жидкого ксенона  $\epsilon_1 = 1,83$ , а для пара под давлением 20 атм. -  $\epsilon_2 \approx 1$ . Подставляя эти данные в (1), находим  $E_2 = 210$  кв/см. Следовательно, для пробоя пузырьков в ксеноновой камере напряженность электрического поля в жидкости должна быть не менее 210 кв/см.

Аналогичным путем можно определить необходимые электрические поля для пробоя пузырьков и в других жидкостях. Так, для пробоя пузырьков диаметром 0,1 см в жидково дородной камере будем иметь:

$P = P \frac{T}{T_0} = 4 \frac{300}{27} = 44$  атм, где  $P$  - давление пара в пузырьках водорода, приведенное к комнатной температуре  $T$ , а  $P_0$  - давление пара в пузырьках при температуре жидкого водорода  $T_0$ :

$\frac{a}{P} = \frac{200}{44.760} \approx 6.10^{-3}$  (см мм рт. ст.)<sup>-1</sup>. По значению  $\frac{a}{P}$  из табличных данных /1/ находим  $\frac{E}{P} \approx 18$  в (см мм рт. ст.)<sup>-1</sup>. Отсюда следует, что напряженность пробивного поля в пузырьке водорода

$E_2 = 18 \cdot 44.760 \approx 600$  кв/см, а напряженность поля в жидкости в соответствии с формулой (1) ( $\epsilon_1 = 1,18$ ,  $\epsilon_2 = 1,02$ ) должна быть

$$E_1 \approx 500 \text{ кв/см.}$$

Для пробоя пузырьков в жидкогелиевой камере имеем:

$$P = P_0 \frac{T}{T_0} = 0,3 \frac{300}{2} = 45 \text{ атм и } \frac{a}{P} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ (см мм рт.ст.)}^{-1}.$$

Тогда, согласно /1/, отношение  $\frac{E}{P} = 5 \text{ в (см мм рт. ст.)}^{-1}$  и, следовательно,  $E_2 \approx 170 \text{ кв/см}$ , а  $E_1 \approx 150 \text{ кв/см}$ .

В ряде случаев расчет напряженности пробивного поля в пузырьках удобнее вести, используя экспериментальную зависимость пробивного напряжения  $E$  от величины  $Pd$ . Здесь  $P$  - давление газа в пробиваемом промежутке, которое можно отождествить с давлением газа в пузырьке диаметром  $d$ . Для газообразного водорода и гелия зависимость  $E \approx f(Pd)$  можно найти, например, в /1/. Так, рассчитывая этим методом напряженность поля для пробоя пузырьков водорода, получим  $E_1 = 480 \text{ кв/см}$  и  $E_2 = 550 \text{ кв/см}$ . Расчет для пузырьков гелия дает соответственно  $E_1 = 230 \text{ кв/см}$  и  $E_2 = 260 \text{ кв/см}$ .

Близкие к этим значениям пробивные поля получаются также и при расчете по уравнению Мика /1,2/:

$$\ln E = \ln ad + 0,5 \ln P - 1,5 \ln d + a d - 14,46, \quad (2)$$

где  $E_2$  - в В/см,  $P$  - в мм рт. ст.,  $d$  - в см и  $a$  в см<sup>-1</sup>, причем  $ad$  задается теоретическим условием Ретера /1/

$$ad = 17,7 + \ln d.$$

Данные, полученные двумя методами расчета, как видим, частично расходятся между собой. Это обстоятельство связано с приближением и экстраполяциями, которые пришлось допустить, используя сведения по пробоям газов для значений  $a/P$  и  $Pd$ , отличающихся от табличных данных, приводимых в литературе.

Здесь уместно сопоставить точность расчета пробивных полей с экспериментальными данными. В настоящее время известны результаты опыта<sup>/3/</sup> по пробоям пузырьков гелия, имеющих размер  $\approx 0,2$  см и давление газа  $\approx 1$  атм. Значение напряженности пробивного поля в средней точке плато оказалось равным  $\approx 13$  кв/см. Расчёт же для этого случая дает:  $\frac{a}{P} = \frac{100}{760} = 0,13$  (см мм рт. ст.)<sup>-1</sup>, в<sup>/1/</sup> находим  $\frac{E}{P} = 16$  в (см мм тр. ст.)<sup>-1</sup> или  $E_2 = 16 \cdot 760 = 12,2$  кв/см, что близко к экспериментальной величине.

Несмотря на приближенность выполненных расчетов можно, однако, сделать определенный вывод о том, что пробой паровых пузырьков в одноатомных жидкостях, используемых в пузырьковых камерах, должен наступать при напряженности электрического поля  $\approx 200$  кв/см, а в многоатомных жидкостях - при 500-800 кв/см. Можно показать также, что величины пробивных полей мало изменяются при вариации размеров пузырьков в 1,5 раза.

В случае применения импульсных полей для пробоя пузырьков по треку частиц в пузырьковых камерах импульсы должны накладываться на камеру в тот момент, когда размер пузырьков достигает заданной величины. Инициирование разряда в этих пузырьках будет вызываться электронами, которые порождаются в жидкости в момент прохождения частицы и остаются в пузырьках в процессе парообразования. Можно показать, что в каждом пузырьке, порожденном в конце  $\delta$ -электрона и имеющем размер 0,1 см, в среднем содержится до 10 электронов. Эти электроны могут находиться как в свободном состоянии, так и быть связанными с молекулами пара, если последние обладают электроотрицательностью. Это обстоятельство накладывает на электрическое поле дополнительные условия. Так, в случае свободных электронов время формирования импульса (длительность переднего фронта) должно быть достаточно коротким, чтобы за это время электроны не успели

уйти из объема пузырька на его стенки в результате дрейфового движения. Рассмотрим это конкретно. Смещение электронов  $x$  под действием нарастающего поля равно

$$x = \int_0^{\tau} v dt. \quad (3)$$

Здесь  $v$  — скорость дрейфа электронов, которая равна  $\mu E$ ,  $\mu$  — подвижность электронов в электрических полях и  $\tau$  — длительность переднего фронта импульса. Скорость нарастания напряженности электрического поля можно представить в первом приближении в виде линейной зависимости от времени:

$$E = \frac{U_{\max}}{\ell \tau} t, \quad (4)$$

где  $U_{\max}$  — амплитуда импульса и  $\ell$  — расстояние между электродами в камере. Интегрирование выражения (3) с учетом равенства (4), дает:

$$x = \frac{\mu U_{\max}}{2 \ell} \tau. \quad (5)$$

Т.к. смещение электронов должно быть меньше диаметра пузырька, то из (5) следует условие, накладываемое на величину  $\tau$ :

$$\tau \lesssim \frac{2 \ell d}{\mu U_{\max}}. \quad (6)$$

Оценим величину  $\tau$  для случая пробоя пузырьков пара в жидком ксеноне. Примем  $\ell = 1$  см,  $d = 0,1$  см и  $U_{\max} = 210$  кв.



Подвижность электронов в газообразном ксеноне, находящемся под давлением 20 атм, равна  $10 \text{ см}^2 / \text{в сек}^{1/2}$ . Подставляя эти данные в (6), будем иметь  $\tau \gtrsim 100$  нсек. Аналогичный расчет для свободных электронов в пузырьках водорода дает  $\tau \gtrsim 90$  нсек, а для гелия -  $\tau \gtrsim 60$  нсек.

В действительности, требование на величину  $\tau$  будет, по-видимому, менее жестким, т.к. процесс лавинообразования электронов в пузырьках начинается раньше, чем напряженность поля в них достигает своей максимальной величины. Такой процесс, как известно, сопровождается генерированием квантов ультрафиолетового излучения, которые будут дополнительно порождать электроны во всем объеме пузырька за счет фотоионизации. К сожалению, рассчитать этот процесс сколько-нибудь строго для пузырьков не представляется возможным.

Рассмотрим теперь другой случай, когда молекулы пара или газа в пузырьках обладают электроотрицательностью и захватывают электроны. Такие комплексы - отрицательные ионы - имеют в  $10^3$  раз меньшую подвижность, чем электроны в электрических полях и их выход из пузырьков в момент наложения поля будет происходить сравнительно медленно. В этом случае особых требований к величине  $\tau$  импульса можно не предъявлять. Однако амплитуда импульсов должна удовлетворять определенному условию, а именно, она должна быть достаточной для создания в пузырьке поля, способного оторвать электроны от ионов за заданное время. Эти электроны, как уже говорилось, нужны для инициирования разряда в пузырьках. Величина необходимого поля может быть определена из следующего уравнения <sup>/4/</sup>

$$\lg \tau = -13,17 + 0,5 \lg \phi - \lg E + \frac{29,67}{E} \phi^{3/2}, \quad (7)$$

где  $\tau$  — среднее время жизни отрицательного иона в электрическом поле в сек,  $E$  — напряженность поля в пузырьках в М в/см и  $\phi$  — потенциал электронного сродства молекул газа в эв. Уравнение (7) представлено в работе <sup>/4/</sup> в виде графиков зависимости  $\lg \tau$  от  $E$ , удобных для расчетов. Необходимость подобного расчета будет возникать всякий раз при работе с электроотрицательными жидкостями, в том числе с гелием и водородом, которым также присуща слабая электроотрицательность. Так, молекулы водорода имеют два резонанса в сечении захвата электронов при энергиях взаимодействия 8 и 15 эв <sup>/5/</sup>. Сечения захвата при этих значениях энергий примерно равны и составляют  $\sigma \approx 10^{-21}$  см<sup>2</sup>. При этом захват электронов сопровождается развалом молекул водорода на атомы в соответствии с реакцией  $H_2 + e \rightarrow H_2^- \rightarrow H^- + H$ . В конце реакции, как видим, образуется электроотрицательный ион атома водорода, электронное сродство которого равняется 0,75 эв <sup>/5/</sup>. Если попытаться оценить по формуле (7) напряженность электрического поля, способного вырвать электрон из  $H^-$  за доли секунды, то получим, что это поле должно иметь напряженность несколько Мв/см. Практически это означает, что электроны, захваченные атомами водорода, полностью выбывают из участия в инициировании разряда. И только свободные электроны в пузырьке, избежавшие прилипания к атомам водорода, могут вызвать электрический разряд. Однако в этом случае высоковольтное поле в камере должно быть сформировано, как указывалось выше, за время  $\tau < 90$  нсек.

Значительно легче могут быть сорваны электроны с ионов гелия  $He^-$ , потенциал связи которых равен 0,075 эв. В полях, напряженностью в несколько десятков кв/см, электроны покидают  $He^-$  за время  $10^{-5} - 10^{-6}$  сек <sup>/4/</sup>. Срыв электронов с ионов гелия может вызываться не только непосредственно электрическим полем, но и в результате соударения ускоренных ионов до энергии 0,075 эв.

Второй процесс особенно эффективен в разреженном газе, где ионы могут легко ускоряться до указанной энергии. Применительно к гелиевым камерам или камерам с другими жидкостями, но содержащими пузырьки гелия, эффект слабого прилипания электронов к атомам гелия является даже благоприятным фактором, т.к. прилипшие электроны могут долго оставаться в пузырьках и быть введены в разряд сравнительно несильными полями. В свете сказанного, требование на величину формирования фронта импульса  $\tau < 60$  нсек, установленное выше для гелия, в принципе можно не учитывать, если в пузырьке будут присутствовать отрицательные ионы.

Атомы ксенона не обладают электронным сродством и для образования разряда в пузырьках жидкости могут использоваться лишь свободные электроны. Поэтому установленное выше условие на быстроту формирования импульса  $\tau < 100$  нсек остается в силе.

Мы не рассматривали пока возможности электрического пробоя пузырьков в камерах, заполняемых органическими жидкостями и жидкостями, молекулы которых содержат в своем составе атомы галогенов. В последнем случае, т.е. при использовании галогеносодержащих жидкостей, осуществить электрический пробой пузырьков не представится, по-видимому, возможным, т.к. молекулы этих жидкостей отличаются сильным электронным сродством и очень большим сечением захвата медленных электронов <sup>/8/</sup>. В пузырьках таких жидкостей будут полностью отсутствовать свободные электроны, которые могли бы послужить источником для начала развития разряда. Связанные же электроны в отрицательных ионах практически невозможно освободить никакими доступными в экспериментальной практике электрическими полями.

Сведения по прилипанию электронов к молекулам органических жидкостей в настоящее время чрезвычайно скудны и сделать определенные выводы о возможностях пробоя пузырьков в этих жидкостях затруднительно.

Исходя из данных о большой подвижности отрицательных ионов в органических жидкостях под действием электрического поля, можно сделать лишь предположение, что предельные углеводороды, возможно, обладают слабой электроотрицательностью. Если это так, то инициирование разряда в пузырьках органических жидкостей будет наступать при напряженностях поля, сравнимых с напряженностью поля для пробоя пузырьков в водороде.

### Пробой пузырьков высокочастотным полем

При заданном давлении газа в пузырьке  $P$  и фиксированной длине волны высокочастотного поля  $\lambda$  пробой в газе наступает при напряженности поля <sup>/7/</sup>

$$E = E_0 \sqrt{1 + \left(\frac{78,6}{P}\right)^2}, \quad (8)$$

где  $E_0$  - так называемое эффективное поле, зависящее от частоты поля и частоты соударений электронов с атомами газа. Величина  $E_0$  обычно определяется из экспериментов. Так, для гелия в <sup>/7/</sup> на рис. 4.15 дается экспериментальная зависимость  $E_0 \lambda$  от  $P \lambda$ , где  $\lambda$  - характерная диффузионная длина смещения электронов в газе под действием высокочастотного поля. В случае пузырьков величина  $\lambda$  может быть принята приближенно равной диаметру пузырьков, деленному на  $\pi$  <sup>/7/</sup>.

Формула (8) справедлива для случая, когда частота поля меньше частоты соударений с атомами газа. Для полей с частотами в несколько МГц и давлений газа выше атмосферного формула (8) справедлива всегда.

Найдем теперь пробивную напряженность поля  $E$  для гелия.

Как и раньше, примем для пузырьков  $d = 0,1$  см и  $P = P_0 \frac{T}{T_0} = 45$  атм, тогда  $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$  см и  $P\lambda = 1026$  см мм  $\frac{T}{T_0}$  рт. ст.

По экспериментальной зависимости  $E_0 \lambda$  от  $P\lambda$  /7/ находим

$E_0 \lambda = 1000$  в, или  $E_0 \approx 38$  кв/см. Подстановка  $E_0$ ,  $P$  и  $\lambda$  (при  $f = 10$  Мгц) в (8) приводит к значению  $E \approx 33$  кв/см.

Аналогичный расчет для пробоя пузырьков в жидком водороде при давлении  $P = P_0 \frac{T}{T_0} = 44$  атм дает  $E \approx 300$  кв/см.

Для расчета пробоя пузырьков в жидком ксеноне, к сожалению, нет данных о зависимости  $E_0 \lambda$  от  $P\lambda$ . Однако для этих целей можно воспользоваться сведениями по пробоям газообразного аргона в высокочастотных полях /7/, т.к. электропробивные характеристики у аргона и ксенона близки друг к другу. В этом приближении находим, что пробой в пузырьках ксенона, находящихся под давлением 20 атм, наступит при напряженности поля  $E \approx 70$  кв/см.

В расчетах мы приняли частоту поля  $f = 10$  Мгц, что вполне удовлетворяет необходимому требованию быстроты нарастания полуволны напряжения в жидкости. Действительно, в этом случае время формирования  $\tau = \frac{1}{4} T = 25$  нсек, что меньше 100 нсек, установленных выше для ксенона и 60 нсек - для гелия.

Из приведенных расчетов видно, что средняя напряженность пробивного поля на высоких частотах в пузырьках пара также высока, как и при импульсном пробое.

Очевидно, что высокочастотное поле следует накладывать на жидкость в тот момент, когда пузырьки по следу частицы сформируются до необходимой для фотографирования величины. При этом длительность цуга высокочастотных колебаний может браться равной нескольким миллисекундам, т.к. искажение треков за счет разной скорости всплывания пузырьков за это время будет еще невелико.

## Некоторые замечания и выводы

Мы не рассматривали возможности инициирования разряда в пузырьках за счет холодной эмиссии электронов из стенок в газ. Такая возможность для пузырьков практически исключена, т.к. пузырьки лишены микронеоднородностей, которые сделали бы заметным процесс туннельного перехода электронов из стенок пузырька в пар в полях указанных величин.

В расчетах не учитывалось также влияние на разряд процесса выхода электронов из объема пузырьков на их поверхность. Учет этого процесса весьма затруднителен, хотя он и должен привести к некоторому повышению расчетных значений пробивных полей.

Выполненные в работе расчеты могут быть использованы при решении ряда прикладных задач. В частности, эти расчеты указывают на одну интересную возможность применения эффекта электрического пробоя в пузырьках для проявления треков частиц в пузырьковых камерах без использования традиционной системы освещения. В этом плане было бы важно выполнить опыт по пробую пузырьков в действующей камере.

## Л и т е р а т у р а

1. Дж. Мик, Лж. Крэгс. Электрический пробой в газах. И.Л.М., 1960.
2. Н.А. Капцов. Электрические явления в газах и вакууме. Гостехиздат, М.Л., 1950.
3. G. Charpak, Nucl. Instr. and Meth., 20, 482, 1963.
4. Ю.Н. Демков, Г.Ф. Друкарев. ЖЭТФ, 47, 918, 1964.
5. В.И. Хвостенко, В.М. Дукельский. ЖЭТФ, 33, 851, 1957.
6. Н.С. Бучельникова. УФН, 65, 351, 1958.
7. А. Мак-Доналд. Сверхвысокочастотный пробой в газах. Мир, М., 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 июля 1970 года.