04

Электрический разряд в конденсированной среде при фазовых переходах

© *Д.Н. Герасимов, Ю.А. Жукова*

Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия
E-mail: deniger@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2024 г.
В окончательной редакции 26 января 2025 г.
Принято к публикации 4 февраля 2025 г.

Исследован электрический разряд в масле И-40А при его кристаллизации. Затвердевание жидкости с горящим внутри нее разрядом не привело к прекращению разряда. В то же время пробой одиночной замороженной капли не происходит даже при напряжениях, на порядок превышающих пробойное напряжение в жидкости. Спектроскопия электрического разряда в одиночной капле демонстрирует его идентичность разряду в большом объеме жидкости.

Ключевые слова: жидкие диэлектрики, электрический пробой, кристаллизация, плавление, спектр излучения.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.10.60330.20219

К настоящему моменту электрический разряд в жидкости гораздо меньше изучен, чем газовый разряд. В частности, вопрос о том, что первично при электрическом пробое жидкости — образование паровой фазы или собственно электрический разряд, до сих пор является дискуссионным [1]. В связи с этим логично изучать электрический разряд в жидкости при фазовых переходах в ней. В монографии [2] приводятся результаты исследования разряда в жидкости при изменении термодинамических параметров SF_6: какие-либо резкие изменения пробойной напряженности электрического поля не обнаружены ни при переходе от однофазной системы к двухфазной (при кипении), ни при закритических параметрах. Автор [2] делает вывод, что „фазовый переход не играет в данном случае такой значительной роли, которая ему уделялась в исследованиях механизма пробоя жидкостей“.

В настоящей работе исследуется влияние на электрический пробой среды фазового перехода жидкость–твердое тело.

Первоначально проводились опыты на экспериментальной установке, описанной в [3]: рассматривался разряд в масле И-40А между двумя электродами, погруженными на глубину ~ 10 mm. Электроды изготовлены из меди с покрытием ZnCl: диаметр 1 mm, расстояние между электродами 2 mm. Ток в цепи измерялся с помощью мультиметра Fluke 17B, погрешность измерений во всем диапазоне значений составила $1.5\% + 3$. Напряжение определялось по показаниям генератора.

При подаче напряжения между электродами загорался электрический разряд, подробно рассмотренный в [3]. Далее жидкость замораживалась: сверху заливался жидкий азот, образовывалась ледяная корка, целиком закрывавшая разрядную область (и поверхность жидкости, и электроды). Согласно показаниям термопарного датчика, температура льда опускалась ниже $-20\,^{\circ}$C, что вполне соответствует данным о температуре кристаллизации масла И-40А: $-15\,^{\circ}$C (ГОСТ 20799–88).

В начале опыта при комнатной температуре в описанной выше конфигурации разряд в жидкости наблюдался при напряжении $U = 2.5$ kV и токе в цепи $I = 37\,\mu$A (рис. 1). Во время залива жидкого азота (процедура занимала около 2 min) кратковременно ток в цепи понижался до $2.8\,\mu$A при напряжении 10.9 kV, т. е. разряд существенно ослабевал, но полностью не прекращался. Для указанного значения тока погрешность составила $0.3\,\mu$A, свечение в этот момент не наблюдалось. После образования льда в течение ~ 7 min напряжение колебалось от 2.6 до 4.0 kV при токе $38-62\,\mu$A; свечение

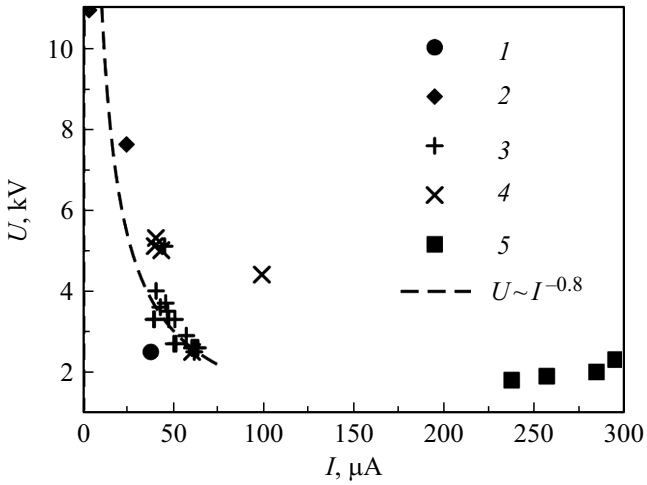

Рис. 1. Вольт-амперная характеристика разряда в масле И-40А при фазовом переходе. *1* — жидкость, *2* — затвердевание, *3* — лед, *4* — плавление, *5* — жидкость после плавления льда.

не наблюдалось, что может объясняться и непрозрачностью льда. Во время заметного оттаивания льда появлялись отдельные вспышки, ток в цепи кратковременно повышался до 98 μA, напряжение при этом составляло 4.4 kV, после чего параметры разряда возвращались к прежним значениям: $U = 2.5-5$ kV, $I = 39-60\,\mu$A. Вспышки продолжались в течение ~ 2 min. За это время область разряда полностью освободилась ото льда и стала почти прозрачной. Затем вспышки прекратились, и в течение ~ 1 s режим горения разряда резко изменился: свечение не регистрировалось ($U = 1.8-2.3$ kV и $I = 238-295\,\mu$A). Подобная смена режимов наблюдалась во множестве экспериментов.

Можно сделать вывод, что кристаллизацией жидкости не удалось прервать электрический разряд в ней: хотя свечение и не регистрировалось, ток в цепи продолжал наблюдаться во все моменты времени. Более того, электрические параметры разряда во льду примерно соответствуют значениям, наблюдаемым при разряде в жидкости. За исключением последней фазы процесса, точки вольт-амперной характеристики неплохо ложатся на единую зависимость, которую можно в первом приближении аппроксимировать степенной функцией (рис. 1). Следует также отметить, что в рассмотренном процессе образование паровой фазы в разрядной области не наблюдалось, в том числе и после оттаивания жидкости.

Затем способ создания твердой фазы был изменен. Дальнейшие эксперименты проводились для одиночной капли масла И-40А, висящей (за счет сил поверхностного натяжения) между двумя электродами, расположенными в воздухе на расстоянии ~ 1 mm друг от друга. Капля замораживалась парами жидкого азота, размещенного в резервуаре под рабочим участком, при этом она оставалась столь же прозрачной, как и в жидком состоянии. После заморозки на рабочий участок подавалось напряжение до 14 kV, пробой и свечение не наблюдались. После удаления резервуара с жидким азотом капля плавилась (это было заметно по изменению ее формы), и в ней наблюдался стационарный электрический разряд при напряжении $\sim 1.4-1.6$ kV.

Спектр наблюдаемого в жидкой капле свечения, полученный с помощью спектрометра AvaSpec-2048 (разрешение 2.4 nm), показан на рис. 2. Он заметно зашумлен, так как область разряда мала, а свечение достаточно слабое. В целом данный спектр аналогичен приведенному в [3], где исследовался разряд между двумя электродами, полностью погруженными в жидкость, и наблюдается как при электрическом разряде в масле И-40А, так и в различных видах его люминесценции. Отличие спектра электрического разряда в одиночной капле от исследованного в [3] заключается в отсутствии линии H_α, а также в наличии весьма яркого пика A.

Пик A на спектре (рис. 2) наблюдается не во всех экспериментах. По-видимому, он соответствует двум перекрывшимся линиям излучения 435.13 и 435.15 nm

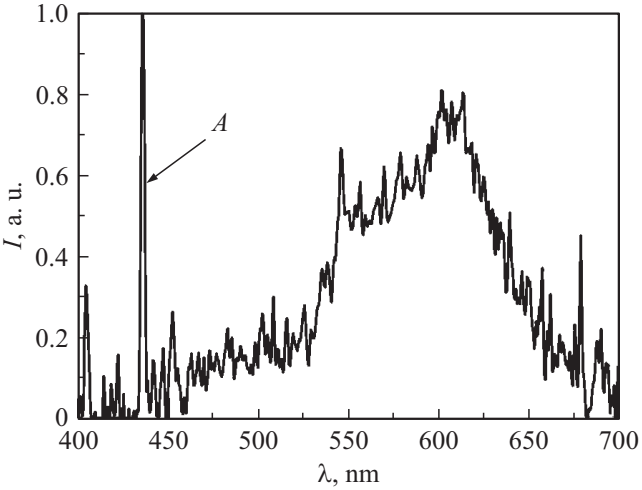

Рис. 2. Спектр излучения разряда в одиночной капле масла И-40А.

иона кислорода при переходах с уровня $2s^2 2p^2(^1D)3p$. Третья в рассмотренном диапазоне линия на длине волны 576.1 nm, соответствующая переходу с данного уровня, не наблюдается из-за гораздо более низкой вероятности перехода [4]. Хотя происхождение этой линии находится за пределами рассматриваемой темы, следует упомянуть, что подобный пик наблюдался в [5] при исследовании иных углеводородных жидкостей.

Таким образом, для одиночной капли наблюдается пробой жидкой фазы, сопровождаемый ее свечением при напряжении ~ 1.5 kV, в то время как пробоя твердой фазы не происходит и при напряжении 14 kV. Столь существенная разница в напряжении может означать, что для электрического пробоя жидкости существенны механизмы, невозможные в твердом теле. Таким механизмом может быть образование паровой фазы внутри жидкой: хотя всплытие пузырей в капле, конечно, не наблюдалось, возможно, в ней формировалась стационарная газовая полость, трудно диагностируемая при столь малых размерах.

В итоге результаты проведенных экспериментов на одиночной замороженной капле могут быть интерпретированы как свидетельство необходимости формирования газовой фазы внутри жидкости перед ее электрическим пробоем. Однако непрерывный ток разряда при фазовых переходах внутри большого объема жидкости нуждается в дополнительном исследовании и объяснении. Также на данном этапе исследований можно заключить, что некоторые режимы протекания тока в жидкости могут не сопровождаться высвечиванием среды.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] P. Vanraes, A. Bogaerts, Appl. Phys. Rev., **5**, 031103 (2018). DOI: 10.1063/1.5020511
[2] Ю.В. Торшин, *Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков* (Энергоатомиздат, М., 2008).
[3] D.A. Biryukov, D.N. Gerasimov, S.B. Morgunova, E.I. Yurin, Anal. Lett., **56**, 1102 (2023). DOI: 10.1080/00032719.2022.2117820
[4] *Электронная база данных NIST* [Электронный ресурс]. https://www.nist.gov
[5] M. Yamaji, T. Sekiguchi, M. Hoshino, H. Shizuka, J. Phys. Chem., **96**, 9353 (1992). DOI: 10.1021/j100202a054