

УДК 537.532/528

Экспериментальные исследования механизма лидерного разряда в элегазе

Ю. В. Торшин

ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Использование альтернативных методов регистрации положительного импульсного разряда в элегазе с одновременной записью предразрядного тока позволили получить новые доказательства существования лидерного механизма пробоя в этой среде при минимальном пробивном напряжении. Зафиксирована тонкая структура лидера, определены размеры лидера и стримерной зоны, измерены скорость и величина предразрядного тока, проведены оценки температуры и концентрации электронов в веществе канала лидера и в стримерной зоне.

Шестифтористая сера (элегаз) широко используется в качестве изоляции высоковольтных аппаратов, несмотря на то, что в последние годы не исключается возможность влияния этого газа на возникновение "парникового эффекта". Последнее обстоятельство может уменьшить его производство и повысить технологические требования к изготовлению оборудования, но в любом случае не может привести к ослаблению интереса к исследованию механизма развития разряда в этой среде, обладающей уникальными свойствами, которые делают ее незаменимой при создании аппаратов с газовой изоляцией.

В интервале давлений, при котором элегаз используется в качестве изоляции высоковольтных аппаратов, пробивное напряжение может быть существенно ниже рассчитанного по условию самостоятельности разряда, что обычно связывается с переходом от стримерной к лидерной форме разряда [1], однако в подавляющем числе случаев такие представления являются чисто умозрительными и не основаны ни на конкретных наблюдениях или на оценках конкретных параметров разряда. Но только в отдельных работах [2—5] предприняты попытки экспериментальной регистрации явления в области отклонений от закона Пашена. Следует подчеркнуть, что исследования механизма разряда в элегазе связаны со значительными экспериментальными трудностями, обусловленными высокими скоростями процесса, развивающегося в среде с низкой плотностью. Кроме того, само понятие "лидерный процесс" не является физически строгим и до конца изученным явлением. При интерпретации экспериментальных данных по механизму пробоя длинных воздушных промежутков (ДВП) под лидерным процессом понимается канал искрового разряда, прогрессивно развивающегося вплоть до пробоя промежутка [6]. Наиболее характерными внешними признаками, свидетельствующими о возникновении лидерного процесса, является шнурование канала, существенно меньший диаметр канала по сравнению с его длиной, наличие развитой в пространстве стримерной зоны (или зоны ионизации) на его вершине, состоящей из множества стримерных каналов. Развитие лидера имеет квазинепрерывный характер и может сопровождаться дискретными вспышками (ступенчатый процесс развития) и предразрядным током в виде дискретных импульсов. Перекрытие промежутка лидером приводит к его немедленному пробую. Однако, несмотря на достаточно длительный период

изучения проблемы, убедительной физической картины явления не создано, а конкретные данные по основным параметрам лидера в ДВП по сведениям из различных источников могут существенно различаться между собой. В элегазе, как в наиболее используемом газе (для внутренней изоляции), конкретные экспериментальные данные по исследованию механизма разряда, если рассматривать их отдельно от авторских интерпретаций, весьма незначительные.

Из приведенных в работе [2] фотохронограмм можно обнаружить, что при низком давлении развиваются диффузные каналы, а при давлении около или выше атмосферного — регистрируется контрагированный отшнурованный от электрода канал, который и назван лидером. Последний состоит из собственно канала и каплевидного утолщения на его конце, названного авторами стримерной зоной и имеет ступенчато-вспышечный характер распространения. В работе [3] отмечен ступенчатый характер развития канала и зафиксированы изменения длины ступени и диаметра канала при изменении давления. Однако размеры или тонкая структура канала не зафиксированы. По данным [4] вначале у электрода возникала диффузная вспышка (названа стримерной короной), затем на ее границе появлялся отшнурованный вспыхивающий канал диаметром около $80 \cdot 10^{-6}$ м (назван предшественником), продвигающийся к электроду, на вершине которого возникала вторая диффузная вспыхивающая зона. Канал и зона названы лидером и вторичной или лидерной короной. Согласно [5], развитие разряда наблюдается в виде нескольких нерегулярных вспышек канала, а по данным [2—5] — основным результатом наблюдений в элегазе являются контрагированный канал и вспышечный характер его распространения. Возникновение канала и пробой промежутка при очень низких средних напряженностях поля являются косвенными доказательствами существования лидерного процесса. Очевидно, что этих данных недостаточно не только для создания физической картины явления, но и для корректного утверждения о существовании лидерного механизма разряда в элегазе. Требуется дальнейшее изучение этого явления с применением более совершенных методов диагностики. Нужны данные по тонкой структуре лидера и размерам его элементов, по динамике стримерно-лидерного перехода, по основным характеристикам — скорости, предразрядному току, напряженности поля в канале, на основании которых можно было бы провести оценки основных параметров плазмы наблюдаемых образований.

Экспериментальная техника и методика

Принципиальная схема экспериментальной установки описана в [7]. Основными ее элементами были оптическая система шлирен регистрации методом Теплера, система регистрации тока, электронно-оптические преобразователи типа (ЭОП), фотоумножители (ФЭУ), источник напряжения, камера. Используемая шлирен-система, в отличие от используемых в подобного рода исследованиях, позволяет исследовать достаточно крупные (до $20 \cdot 10^{-3}$ м) оптические неоднородности в широком интервале плотности вещества и рассчитана на регистрацию от одного до шести кадров одновременно с наносекундным временным и микронным пространственным разрешением. Основные элементы системы: импульсный твердотельный лазер на неодимовом стекле, зеркальная оптическая линия задержки из двух плоских зеркал, поворотный зеркально-призмный блок, блок фокусирующих линз, система

"ножей" Фуко и блок фотоаппаратов. Шлирен-система состоит из нескольких десятков специальных оптических элементов, позволяющих задерживать, расщеплять, разводить в пространстве опорный луч света лазера. Длина волны света (после преобразователя частоты) составляет 532 нм, длительность импульса (на его полувысоте) составляет $(5-10) \cdot 10^{-9}$ с, энергия излучения в импульсе 40—50 мДж.

Система позволяет выбрать различные задержки между различными кадрами в зависимости от решаемых задач. Максимальная скорость регистрации системы достигает 200 млн. кадров в секунду. Коэффициент оптического увеличения системы составляет от 1,5 до 4. В данных опытах система работала в режиме двух- и трехкадровой регистрации с интервалом между кадрами $(81 \text{ и } 116) \cdot 10^{-9}$ с. Реальная пространственная разрешающая способность системы определялась с помощью специальных тест-объектов, которыми служили различные калиброванные микроскопические объекты (миры) и составила $4 \cdot 10^{-6}$ м. Из-за отсутствия тест-объектов меньшего размера предельное реальное разрешение системы не определено, и не исключено, что оно может быть еще выше (т. е. меньше $4 \cdot 10^{-6}$ м).

Ток измерялся с помощью безындуктивных омических шунтов, включаемых в дифференциальную схему для компенсации емкостного тока. Максимальная чувствительность по току была на уровне $0,1 \cdot 10^{-3}$ А, временное разрешение тракта измерения не хуже $10 \cdot 10^{-9}$ с.

Исследования проведены при воздействии положительного импульса длительностью $(0,5 \times 85) \cdot 10^{-6}$ с в промежутках стержень — плоскость длиной до $50 \cdot 10^{-3}$ м при изменении давления от $(2 \text{ до } 8) \cdot 10^5$ Па и радиуса стержня от $(66 \text{ до } 500) \cdot 10^{-6}$ м. Результаты предварительных исследований приведены в работе [8].

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 приведен типичный пример регистрации разряда электронно-оптическим методом в промежутке игла — плоскость при минимальном пробивном напряжении (65 кВ). На непрерывной развертке изображения (см. рис. 1, а) вначале на вершине иглы регистрируется возникновение вспышки диаметром около 10^{-4} м, которая затем развивается в пространстве и продвигается к плоскости со средней скоростью около $2 \cdot 10^4$ м/с. В момент перекрытия промежутка канал представляет собой достаточно однородное по длине светящееся образование диаметром около $2 \cdot 10^{-3}$ м.

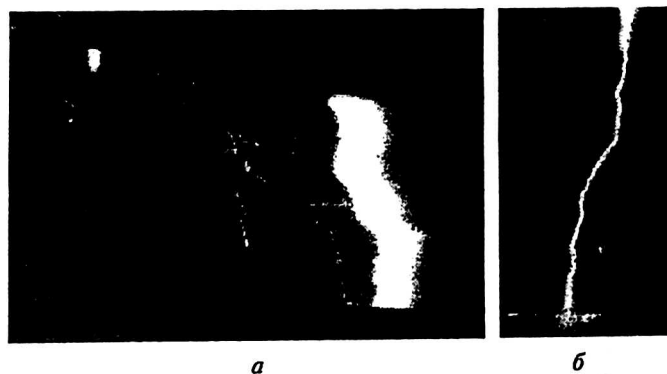


Рис. 1. Характерная картина развития разряда в элегазе, зафиксированная электронно-оптическим методом:
а — фотохронограмма; б — статический снимок

На рис. 2 даны шпирен-снимки на стадии зажигания разряда, полученные при различных экспозициях в однокадровом режиме. Здесь наблюдалось выделение макроскопического канала длиной $(60-100) \cdot 10^{-6}$ м, сопровождающееся импульсами тока и фототока. Канал имеет характерную коаксиальную структуру в виде светлой нити радиусом около $(6-8) \cdot 10^{-6}$ м, окруженной плотным темным цилиндром радиусом $(20-25) \cdot 10^{-6}$ м, что может свидетельствовать о существовании сильного градиента показателя преломления в зоне регистрации.

Такая структура с незначительным ветвлением сохраняется до длины $(0,5-1) \cdot 10^{-3}$ м. ЭОП регистрирует на этой стадии слабое диффузное свечение у иглы размером в несколько сотен микрометров.

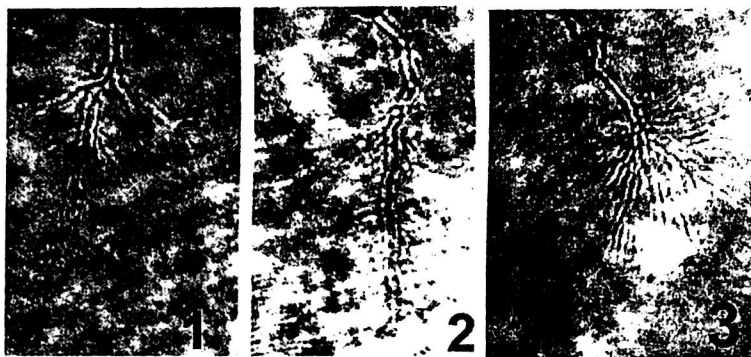


Рис. 2. Формирование первой ступени лидерного канала в элегазе:

- 1, 2 — предшествующие стадии;
3 — полная ступень лидера со стримерной зоной на вершине (длина около 10^{-3} м)
дана в уменьшенном масштабе по сравнению с каналами на кадрах 1 и 2

На второй стадии возникает типичная для лидерного процесса структура в виде отшнурованного канала и сосредоточенной на его вершине развитой в пространстве стримерной зоны, которую можно назвать первой ступенью лидера (см. рис. 2, 3). На третьей — наблюдается воспроизводство структур подобных первой ступени, что приводит к формированию разрядного канала с характерными чертами лидерного процесса рис. 3. Снимки (см. рис. 3) получены в двухкадровом режиме регистрации с интервалом между кадрами $81 \cdot 10^{-9}$ с и с одновременной записью предразрядного тока, регистрирующегося в виде дискретных импульсов с фронтом около $12 \cdot 10^{-9}$ с и амплитудой до $60 \cdot 10^{-3}$ А, следующих с интервалом в $(30-40) \cdot 10^{-9}$ с. По всей длине развитого лидерного канала на расстоянии около 10^{-3} м расположены стримерные зоны, состоящие из нескольких каналов. Чем ближе каждая из зон расположена к игле, т. е. более длительное время существует в промежутке, тем меньше в ней каналов. Наибольшее число каналов — более двадцати (в плоскостном изображении) расположено в стримерной зоне на конце канала. Регистрируемый лидерный канал и каналы в стримерной зоне имеют характерную структуру с сильным градиентом показателя преломления на периферии. Радиус лидерного канала около 10^{-5} м, а радиус стримерных каналов около $8 \cdot 10^{-6}$ м. На электронно-оптических снимках тонкая структура лидера и стримерной зоны, полученная шпирен-методом (см. рис. 3), не регистрируется (см. рис. 1).

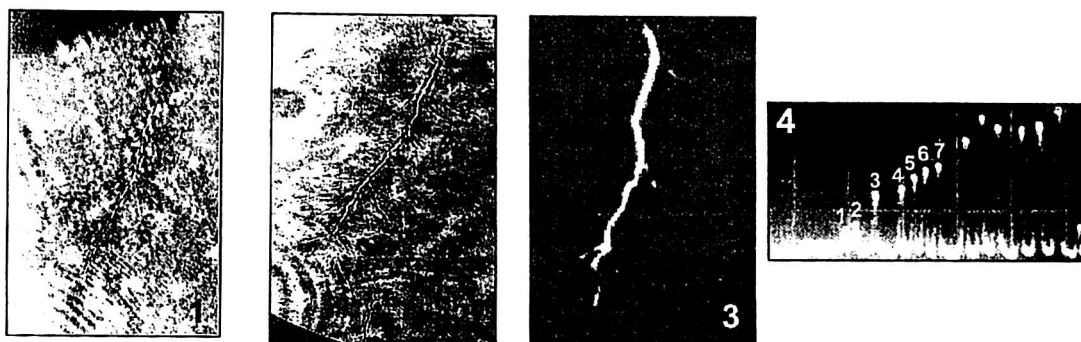


Рис. 3. Картина развития лидерного процесса и предразрядный ток в элегазе:
 1, 2 — двухкадровая шлирен-картина, интервал между кадрами $81 \cdot 10^{-9}$ с, экспозиция кадра $5 \cdot 10^{-9}$ с; 3 — однокадровый электронно-оптический снимок лидера; 4 — предразрядный ток, развертка $200 \cdot 10^{-9}$ с/дел, чувствительность $2 \cdot 10^{-2}$ А/дел

Совместный анализ полученных данных позволил сделать следующие основные выводы, касающиеся особенностей формирования и развития лидера в элегазе:

новая ступень лидера окончательно формируется в момент достижения максимальной амплитуды токового импульса. Формирование стримерной зоны начинается на спаде импульса тока, продолжается в паузе между импульсами и завершается в начале следующего импульса тока. Длина ступени лидера соответствует длине предшествующей ей стримерной зоны;

стримерные зоны, расположенные вдоль канала и на его вершине, имеют различную пространственную и структурную связь с каналом лидера. Зоны, расположенные вдоль канала, не связаны с веществом в лидерном канале, о чем свидетельствуют разрывы между внутренней светящейся частью лидера и стримерами (см. рис. 3). Зона, расположенная на вершине лидера, связана с веществом, заполняющим лирный канал, о чем свидетельствует плавный (без разрывов) переход от лидера к стримерам (рис. 4). Это позволяет считать, что распределение тока происходит главным образом между лидерным каналом и стримерной зоной на его вершине и дает основание оценить величину тока в стримерном канале порядка 10^{-3} А. Поскольку именно в стримерной зоне на вершине лидера происходит процесс зарождения и формирования нового отрезка лидерного канала, обеспечивающий распространение разряда в элегазе, последняя является активной стримерной зоной;

компьютерные исследования шлирен-снимков позволяют выявить тонкие структурные особенности локального места контакта лидера с активной стримерной зоной. На негативах или увеличенных снимках стримерной зоны видно (см. рис. 4, справа), что стримерные каналы не имеют единой общей точки с вершиной лидера, а возникают в нескольких местах на вершине и на кончике канала длиной порядка нескольких сотен микрон. Иными словами, стримеры разнесены в пространстве, а не сосредоточены в одной точке на вершине лидера.

Интересно, что на схемах лидерного процесса, обычно приводящихся в работах по лидерному процессу в воздухе (например, рис. 6.1 в [6]) в месте соединения лидерного канала и стримерной зоны изображается головка лидера, из которой распространяются пучки стримеров. На электронно-оптических снимках канала разряда в элегазе (см. рис. 1), на кончике вспы-

живающего канала также обнаруживается локальная светящаяся точка радиусом $\sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, которую можно принять за головку лидера. На самом же деле (согласно шликрен-снимкам) в этом месте находится стримерная зона, состоящая из нескольких каналов, которая не регистрируется с помощью ЭОП из-за его низкого пространственного разрешения;

формирование новой ступени лидера происходит в результате усиления свечения одного из стримеров зоны ионизации, как правило, наиболее близко расположенного к центральной силовой линии поля. При этом на его вершине возникают короткие новые стримеры (см. рис. 4, слева), которые затем достигают критической длины, сравнимой с длиной ступени лидера (около 10^{-3} м). На рис. 4 (справа) зафиксирован начальный момент формирования стримерной зоны на кончике одного из стримеров в начале его преобразования в лидер, о чем свидетельствует более высокий уровень свечения и начало формирования стримерной зоны, длина которой к моменту регистрации составляет около трети длины полной стримерной зоны.

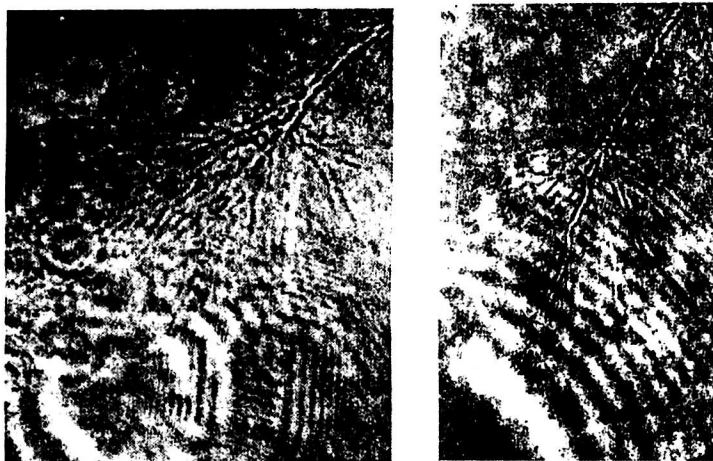


Рис. 4. Шликрен-снимки активных стримерных зон лидера из различных экспериментов (справа показана активная стримерная зона, приведенная на рис. 3, кадр 1 в увеличенном масштабе)

Через $81 \cdot 10^{-9}$ с в результате повторной вспышки завершилось полное формирование канала лидера с образованием его новой ступени с полной стримерной зоной. Очевидно, что если уменьшить время между кадрами, то можно будет зафиксировать другие стадии, которые проходит лидер в своем формировании — от начала увеличения интенсивности свечения и его распространения вдоль канала, выделения новых стримеров на вершине и их постепенного роста до полного завершения процесса формирования новой ступени и новой стримерной зоны. Следовательно, процесс формирования новой ступени лидера происходит непрерывно за счет нарастания ионизации в одном из стримерных каналов и завершается скачкообразным кратковременным увеличением тока в этом канале. Иными словами, формирование новой ступени лидера происходит в результате развития процесса, сопровождающегося формированием канала (вернее серии каналов) с непрерывно изменяющимися во времени свойствами, приближающимися к свойствам полноценного лидера. Отметим, что на рис. 3 и 4 зафиксирован момент стримерно-лидерного перехода в начале формирования новой ступени лидера;

исчезновение или резкое уменьшение интенсивности свечения в промежутке происходит на спаде импульса тока (см. рис. 3). Однако шлирен-съемка показывает, что предразрядная структура в этот момент не исчезает из промежутка, а по-прежнему остается связанной с электродом. Пауза между импульсами тока $(\sim 30-40) \cdot 10^{-9}$ с оказывается недостаточной для остывания и деионизации плазмы. Это обеспечивает протекание небольшого тока (см. рис. 3) около $(3-4) \cdot 10^{-3}$ А в паузе между импульсами. За время развития лидера напряжение на промежутке практически остается постоянным, а в лидерном и в стримерных каналах поддерживается ионизированное состояние. В результате сниженного порога ионизации вещества происходит его повторная ионизация и прораствание высоко проводящего лидера на всю длину стримерной зоны. Благодаря высокой напряженности поля на вершине лидера возникают несколько очагов ионизации, и формируется новая стримерная зона. Однако при ее прораствании на длину $\sim 10^{-3}$ м напряженность поля на ее границе, создаваемая объемным зарядом, может снизиться до значений, которые почти в три раза ниже напряженности поля, необходимой для ионизации в соответствии с условием самостоятельности разряда в элегазе. Процесс прораствания канала возобновляется и гарантируется вплоть до полного перекрытия промежутка только после однократного акта повторной ионизации одного из каналов стримерной зоны. Локальная скорость развития процесса составляет около $35 \cdot 10^3$ м/с и оказывается сопоставимой со скоростью электрона в элегазе.

Оценки состояния вещества в лидерном канале

Полученные выше экспериментальные данные по скорости, току, напряжению, размерам лидера позволяют провести несколько оценок (оценки достаточно грубые и могут быть приняты в первом приближении) состояния вещества в канале лидера. Скорость развития лидера составляет около $20 \cdot 10^3$ м/с, средний ток и длительность импульса тока около $3 \cdot 10^{-2}$ А и $12 \cdot 10^{-9}$ с, соответственно, средний радиус канала около 10^{-5} м. Аналогичные данные для стримерных каналов в зоне ионизации можно оценить как $35 \cdot 10^3$ м/с, 10^{-3} А, $35 \cdot 10^{-9}$ с, $8 \cdot 10^{-6}$ м. На основании этих данных плотность тока в лидерном канале составляет около 10^8 А/м², а число электронов — $2 \cdot 10^{24}$ м⁻³. Соответствующие данные для стримерного канала составляют $0,9 \cdot 10^8$ А/м² и $2 \cdot 10^{23}$ м⁻³. Температуру в канале лидера и стримера в грубом приближении можно оценить на основании уравнения теплового баланса, принимая во внимание невозможность развития конвекции за время развития лидера из-за высокой скорости последнего. При плотности элегаза $18,8$ кг/м³, удельной теплоемкости 908 Дж/(кг·К) температура в канале лидера в момент вспышки может составить около $5,9$ К, а в стримерном канале — около $1,75$ К.

Если принять во внимание приведенные оценки, то становится очевидным, что лидер в элегазе представляет собой очень тонкий прогретый до температуры термической ионизации канал, благодаря чему поддерживается достаточная проводимость в нем и обеспечивается его продвижение при очень низких средних напряженностях поля в промежутке.

Если принять эти оценки, то надо признать, что лидерное образование в элегазе является весьма опасным для элегазовой изоляции, учитывая известные характерные особенности этой среды. В элегазе из-за его более сильной электроотрицательности коэффициент прилипания существенно выше, чем в воздухе. В то же время коэффициенты ионизации отличаются не столь сильно. Для пробоя элегаза имеют значение не только абсолютные значения этих коэффициентов, но и разница между ними. По этой причине условие самостоятельности разряда в элегазе будет выполняться на меньшем расстоянии, чем в воздухе. Следствием этого является то, что пробивное напряжение в элегазе сильно зависит от наличия мест с локальным повышением напряженности поля. В условиях реальных аппаратов такими местами могут являться технологические дефекты различного происхождения. При зажигании разряда в местах локальных неоднородностей возможно возникновение высокопроводящего ионизированного лидерного канала, который сам представляет собой сильную неоднородность, способную продвигаться к противоположному электроду с высокой скоростью в очень слабом внешнем поле. Это обстоятельство следует иметь в виду при разработке и испытаниях элегазовых аппаратов. Появление дискретных импульсов с зарядом порядка 0,2—0,25 нКл может быть первыми признаками возникновения лидера, что является опасным для элегазовой изоляции при воздействии импульсного напряжения.

Выводы

1. Впервые проведена прямая оптическая визуализация и регистрация предразрядных структур в элегазе, в результате чего получены новые объективные доказательства существования лидерного процесса пробоя в элегазе и измерены его некоторые параметры.

2. Зарегистрированы тонкая пространственная структура лидера и его стримерной зоны, а также состояние стримерной зоны в момент формирования стримерно-лидерного перехода и образования новой ступени лидера. Определены радиус лидера и стримерных каналов в зоне ионизации, длина и число каналов в стримерной зоне, измерена характерная величина тока, сопровождающего развитие лидера. Установлено, что удлинение лидера происходит на длину предшествующей ему стримерной зоны и сопровождается импульсом тока. Оценены характерные времена формирования новой ступени лидера и развития стримерной зоны, а также измерены скорости их роста.

3. Оценочные расчеты, проведенные на основании экспериментальных результатов, позволили сделать заключение о термоионизованном состоянии вещества в канале лидера. Последнее обстоятельство вместе с полученным очень малым радиусом лидера указывают на высокую опасность возникновения такого канала в элегазовых аппаратах. Показано, что появление частичных разрядов интенсивностью в доли нанокулон может быть признаком развития лидерного процесса.

4. Дальнейшие экспериментальные исследования явления целесообразно сосредоточить на определении границ существования лидерного процесса в элегазе при минимальном пробивном напряжении, а также на изучении воз-

возможностей реализации и границ существования этого явления в смесях элегаза с другими газами.

5. Полученные объективные экспериментальные данные дают основания для разработки теоретических представлений о физическом механизме развития разряда в элегазе, которые могут быть сосредоточены на выяснении причин стримерно-лидерного перехода и формирования новой ступени лидера.

Литература

1. Ninth International Symposium on Gaseous Dielectrics, 2001 may 21—25, Turf Valley, USA.
2. *Bortnik I. M., Vertikov V. P.* Discharge Development in SF₆ 3-rd Intern. Symposium on High Voltage Eng, Milan, 1979. P. 32.
3. *Chalmers D., Farish O., Gilbert A., Dupuy J.* Leader Development in Short Point-plane Gaps in Compressed SF₆, IEE Proc., 1984. Part A. V. 131. P. 159—163.
4. *Gallimberti I., Wiegart N.* Streamer and Leader Formation in SF₆ and SF₆ mixtures under Positive Impulse Conditions: Streamer to Leader Transition//J. Phys. D.: Appl. Phys., 1986. V. 19, № 12. P. 2363.
5. *Niemeier L. & Pinnekamp F.* Leader discharges in SF₆//J. Phys. D. 1983, № 16. P. 1031—1045.
6. *Базелян Э. М., Раїзер Ю. П.* Искровой разряд. — М.: Изд-во МФТИ, 1997.
7. *Torshin Yu.* On the Existence of Leader Discharges in Mineral Oil. IEEE Trans. on DEIS, 1995. V. 2. P. 167—179.
8. *Torshin Yu.* Experimental Investigations of Predischarge Channels in Compressed SF₆ 6-th Intern. Symp. on High Voltage Eng., Graz, Austria, 1995. P. 2279.

Experimental investigations of the leader discharge mechanism in compressed SF₆

Yu. V. Torshin

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Using of alternative methods of registration of the impulse positive discharge in compressed SF₆ with a simultaneous recording of predischarge current have allowed to obtain the new proofs of existence of the leader breakdown mechanism in the gas under minimum breakdown voltage. The fine structure of the leader process is fixed, dementions of the leader and of the streamer zone are determined, velocity and amplitude of predischarge current are measured, the evaluations of temperature and concentration of electrons in substance of the leader channel and in streamer zone are conducted.