

Изучение ветвления катодонаправленного стримера в воздухе посредством трёхмерной математической модели

БЕЛОГЛОВСКИЙ А.А., РУШАЛЬЩИКОВА А.В.

Исследовано ветвление катодонаправленного стримера в воздухе с использованием его трёхмерной математической модели. Стримерный разряд определяет начальные условия дугового пробоя изоляционных воздушных промежутков, находит применение в высоковольтных электротехнологиях и т.д. Поэтому знание условий ветвления стримера необходимо для практического применения его математических моделей в различных областях техники и электрофизики высоких напряжений. Представлен обзор предложенных в литературе гипотез, объясняющих ветвление стримеров. Среди них выделена модель, связывающая его с появлением и развитием крупных электронных лавин перед стримерной головкой. Показано, что такой механизм ветвления может реализоваться при условии, что к моменту контакта со стримером параметры таких лавин близки к критическим.

Ключевые слова: катодонаправленный стример, ветвление, электронная лавина, математическое моделирование

Интерес к изучению стримерного электрического разряда обусловлен четырьмя причинами.

Во-первых, стримерный разряд предшествует пробоем воздушных изоляционных промежутков при давлениях, близких к атмосферному, и, следовательно, определяет начальные условия его формирования [2].

Во-вторых, стримеры возникают у заземленных объектов в сильном электрическом поле лидера молнии [1, 2]. Таким образом, они предшествуют появлению встречного лидера и потому определяют начальные условия его формирования и развития.

В-третьих, представляется возможным использовать стримерный разряд в плазмохимических высоковольтных электротехнологиях [1, 3]. Головки стримеров являются источником сильного электрического поля, в котором образуются химически активные частицы (радикалы), участвующие затем в реакциях в воздушной среде. Это позволяет использовать стримерный разряд в качестве источника радикалов.

В-четвёртых, стримерная корона является источником электромагнитных и акустических помех, создаваемых воздушными линиями электропередачи (ВЛ) [1].

Таким образом, стримерный разряд — это один из классических объектов исследования специалистов, работающих в области техники и электрофизики высоких напряжений. Стример представляет собой тонкий плазменный канал радиусом $0,01 \div 0,10$ см, который распространяется в межэлектродном пространстве со скоростью $10^7 \div 10^8$ см/с [1, 4]. Его длина увеличивается с $0,03 \div 0,05$ см до единиц или десятков сантиметров. Сочетание малого диаметра, большой длины и скорости распро-

странения делает стример сложным объектом для прямых наблюдений и определяет значительную роль его изучения посредством вычислительных экспериментов.

Занявшие более полувека изыскания [4–10] показали, что распространение стримера определяется внешним электрическим полем, полем его объёмного заряда и фотоионизацией окружающего газа излучением разряда. Это обусловило сложность его теоретического исследования. Даже в рамках простейшей диффузионно-дрейфовой модели развитие стримера описывается нелинейной системой уравнений неразрывности потока заряженных частиц с «самосогласованным» электрическим полем. Ещё больше усложняет картину необходимость описания трёхмерной пространственно-временной структуры разряда [7, 10] с учётом ветвления и одновременного параллельного развития множества стримеров. Несмотря на продолжавшиеся многие десятилетия экспериментальные и теоретические исследования ветвления и целый ряд гипотез, призванных объяснить его природу, среди них сложно выделить основную концепцию, объясняющую все особенности ветвления.

В статье авторы попытались по результатам вычислительных экспериментов обосновать концепцию ветвления катодонаправленного стримера [11], объясняющую его появление развитием крупных электронных лавин перед стримерной головкой в её сильном электрическом поле. Также проведена оценка условий, при которых может реализоваться такой механизм ветвления.

Краткий обзор гипотез, объясняющих ветвление стримеров. Можно выделить три группы гипотез, объясняющих ветвление.

1. Ветвление объясняется появлением перед стримерной головкой различных неоднородностей:

развитие крупных лавин в сильном электрическом поле перед стримерной головкой, возникающих из-за неравномерности распределения начальных электронов вблизи неё [11, 14, 15];

стохастические локальные колебания давления вблизи стримерной головки [16, 17];

локальные усиления электрического поля вокруг присутствующих в воздухе пылинок и частиц аэрозоля [16].

2. Ветвление объясняется спонтанным развитием электростатической неустойчивости головки стримера [18–21].

3. Ветвление связывается с волнами вторичной ионизации, распространяющимися в канале стримера [22, 23].

Исторически первой является, вероятно, гипотеза, связывающая ветвление стримера с появлением перед головкой крупных электронных лавин. В [11] предложена модель ветвления катодонаправленного стримера, основанная на появлении случайной неоднородности в распределении заряженных частиц в зоне ионизации перед его головкой, где в процессе ионизационного развития в сильном поле головки и канала накапливается заряд, который, в свою очередь, создает локальное превышение напряжённости поля над её средним уровнем в стримерной головке. Такое локальное усиление поля инициирует формирование ветви. В качестве локальных неоднородностей в [11] выступают крупные лавины, появление которых может быть следствием неравномерности распределения начальных электронов, появившихся благодаря фотоионизации газа излучением разряда, или результатом случайных вариаций коэффициента ударной ионизации. Возможность подобного механизма ветвления была предварительно подтверждена в [14, 15] в рамках упрощённых трёхмерных моделей.

В [16, 17] посредством математического моделирования исследована возможность ветвления стримера благодаря случайным локальным колебаниям давления перед его головкой.

В [16] показано, что взаимодействие стримерной головки с встретившейся на её пути неоднородностью давления, имеющей радиус, сопоставимый со стримером, приводит к его ветвлению, если давление в ней на 8% выше, чем в окружающем воздухе. При этом внутри неоднородности уменьшается приведённая напряжённость поля E/N , что влечёт снижение интенсивности ударной ионизации, и стример начинает «обтекать» такую неоднородность, что и порождает его ветвление.

Наоборот, стример начинает ветвиться в направлении области пониженного давления,

удаленной от оси его распространения [17], поскольку в ней значение E/N выше, чем в окружающей среде, и появившиеся здесь благодаря фотоионизации начальные электроны порождают лавины, развивающиеся в условиях более интенсивной ударной ионизации. Однако согласно [17] для реализации такого механизма ветвления требуется, чтобы область пониженного давления не была слишком удалена от оси распространения стримера, а давление в ней было примерно на 35% ниже, чем в окружающем воздухе. Отсюда следует, что появление вблизи пути стримера локальных областей пониженного давления является одной из причин формирования мощных электронных лавин, способных инициировать его ветвление. Следовательно, этот механизм косвенно подтверждает объясняющую ветвление гипотезу, предложенную в [11].

В [16] было также рассмотрено влияние крупных, радиусом 80 мкм, диэлектрических аэрозольных частиц на ветвление катодонаправленного стримера. Оказалось, что частица с низкой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon < 2,5$) «окутывается» плазмой стримера, вследствие чего он может ветвиться. Если же $\epsilon > 2,5$, то стример останавливается для зарядки частицы, а затем за счёт сильного поля на её противоположной стороне продолжает своё развитие без ветвления.

Таким образом, согласно результатам [16, 17] ветвление катодонаправленного стримера можно объяснить взаимодействием его головки с областями с локальными колебаниями давления и искажающими поле диэлектрическими частицами аэрозоля, встретившимися на его пути, но если только они имеют размер, сопоставимый с его собственным диаметром.

Принципиально иная концепция ветвления стримера, связанная с неустойчивостью его головки, предложена в [18, 19].

В [18] для анодонаправленного (отрицательно) стримера сформулирована и обоснована гипотеза о том, что его фронт ионизации сохраняет стабильность до тех пор, пока длина стримера не достигнет критического значения, обратно пропорционального значению коэффициента ударной ионизации. Когда длина превышает это значение, стабильность нарушается и происходит ветвление.

Модель [19] основана на гипотезе о том, что по мере продвижения стримера вглубь разрядного промежутка происходит смещение точки, в которой достигается максимальная напряжённость поля в стримерной головке, с её оси к краю. При увеличении длины стримерного канала увеличивается радиус головки и уменьшается толщина слоя избыточного объёмного заряда в ней, а сам этот слой уплощается. Поэтому в какой-то момент времени

максимум напряжённости поля начинает смещаться из центра на периферию головки, что и означает начало ветвления. Это подтверждается представленными в [19] результатами математического моделирования анодонаправленного стримера в однородном поле. Такой механизм называется Лапласовой неустойчивостью стримерной головки.

Ветвление, объясняемое лапласовой неустойчивостью, также было получено в [20 и 21] для катодонаправленного стримера в заполненном воздухе промежутке «игла—плоскость». В некоторый момент головка теряет стабильность и приобретает вогнутую форму.

Ещё одна концепция, объясняющая ветвление волнами вторичной ионизации, распространяющимися в канале стримера, предложена в [22 и 23]. Она основана на гипотезе о том, что внутри канала стримера, у электрода, за счёт ионизационных процессов образуется избыточный положительный заряд, который даёт начало новому (повторному) стримеру, который, следуя по каналу первичного стримера, дойдя до его головки, выталкивается вбок в направлении максимальной напряжённости суммарного поля головок и внешнего поля.

Чтобы оценить возможность реализации того или иного из рассмотренных механизмов ветвления, следует обратиться к результатам экспериментальных исследований этого явления.

Характерным примером являются результаты исследования катодонаправленных стримеров в воздухе и азоте, имеющем чистоту 99,9%, представленные в [24], где было показано, что в азоте ветвление происходит интенсивнее, ветви тоньше и короче, нежели в воздухе. В азоте стримеры развиваются зигзагообразно, а в воздухе они более прямые. Кроме того, в воздухе у острия иглы отчётливо видно излучающее облако, которое менее выражено в азоте. Аналогичные результаты были получены в [9], где изучалось развитие катодонаправленных стримеров в азоте и азотно-кислородной смеси, содержащей 20 % кислорода и 80 % азота.

Описанная картина, по-видимому, противоречит только предположению о том, что к ветвлению приводит самопроизвольное развитие лапласовой неустойчивости стримерной головки. Дело в том, что в соответствии с [19] оно происходит, если толщина слоя объёмного заряда в головке была много меньше его радиуса кривизны, т.е. требуется, чтобы радиус кривизны стримерной головки был велик. Поскольку в воздухе радиус стримеров больше, чем в азоте, то эта гипотеза могла бы объяснить более интенсивное ветвление именно в воздухе, а не в азоте. Однако имеющиеся экспериментальные данные говорят, что это не так: в азоте

расстояние между последовательными ветвлениями одного стримера меньше, чем в воздухе.

Остальные гипотезы нельзя исключить полностью, но сложно считать их основным объяснением ветвления стримеров в воздухе.

Так, учитывая, что в [24 и 9] эксперименты проводились в специальных камерах, в которых контролировался состав газа, давление и содержание примесей, можно ожидать в газе примерно одинаковой концентрации аэрозольных частиц и областей со случайными локальными колебаниями давления. Поэтому трудно объяснить наблюдаемое различие интенсивности ветвления в воздухе или азоте названными неоднородностями. Скорее разумно допустить, что они инициировали некоторое число ветвлений, примерно одинаковое в обоих случаях.

Развитие волны вторичной ионизации происходит за сотни наносекунд, что подтверждается результатами расчётов, приведёнными в [25] для катодонаправленного стримера в воздухе. Развитие же стримерной вспышки в [24 и 9] происходило при длительности импульса напряжения 130 нс, поэтому сложно объяснить формирование множества ветвей только волнами вторичной ионизации.

Согласно модели [11] ветвление инициируют мощные лавины, развивающиеся перед стримерной головкой. Оценим, в какой мере эта модель способна выявить разницу структуры стримерных вспышек в чистом азоте и его смесях с кислородом.

В смесях азота и кислорода большую роль в распространении стримеров играет фотоионизация газа излучением разряда вблизи канала стримера и перед его головкой [13]. Большинство фотонов поглощается вблизи стримера, порождая множество начальных электронов, что способствует продвижению стримера вглубь промежутка и его радиальному расширению (следовательно, увеличению его радиуса). В чистом азоте этот эффект отсутствует, и стримеры распространяются благодаря начальным электронам, появляющимся за счёт других процессов, не связанных с прямой фотоионизацией. Они менее интенсивны, и потому при прочих равных условиях в азоте стримеры тоньше, их скорость ниже [24].

При более низкой интенсивности фотоионизации в азоте перед головками катодонаправленных стримеров появляется меньше, чем в воздухе начальных электронов, которые порождают развивающиеся в направлении головок электронные лавины и тем самым обеспечивают продвижение стримеров вглубь разрядного промежутка. Поэтому в азоте поток электронных лавин к головкам менее интенсивен и равномерен, чем в воздухе. Кроме

того, начальные электроны могут появляться не только на линии распространения стримера, но и на некотором удалении от неё. Совместно эти факторы объясняют зигзагообразное распространение стримеров в азоте, к которому приводят небольшие лавины, движущиеся под малыми углами к направлению распространения стримера, и частые ветвления, которые инициируют большие лавины, движущиеся к стримерным головкам под большими углами.

В воздухе фотоионизация газа излучением разряда происходит более интенсивно, чем в азоте, и, следовательно, она порождает множество начальных электронов перед стримерными головками. Это означает, что поток развивающихся к ним лавин интенсивнее и равномернее, чем в азоте. Поэтому, чтобы инициировать ветвление, нужны более крупные лавины, чем в азоте, а в соответствии со статистикой лавинного усиления [1, 4] вероятность их появления меньше. Это объясняет, почему в воздухе ветвление в воздухе происходит реже, а стримеры более прямолинейны, чем в азоте.

Нужно также учитывать, что высокая интенсивность фотоионизации газа излучением разряда в воздухе приводит к тому, что радиус стримерных головок и каналов в воздухе больше, чем в азоте [26]: интенсивная фотоионизация приводит к уменьшению максимальной напряжённости электрического поля в головке, но к более медленному её спаду перед головкой, чем при отсутствии фотоионизации. Хотя большинство фотонов поглощается вблизи стримерной головки, некоторые из них удаляются на большое расстояние от стримера и поглощаются вблизи границы зоны ионизации перед его головкой. Порождённые ими лавины проходят большой путь в более сильном поле по сравнению с азотом и накапливают большой заряд к моменту контакта с головкой первичного стримера. Собственное поле таких лавин в воздухе должно быть сильнее, чем в чистом азоте, что помогает им инициировать ветвление.

Исходя из этих соображений в данной статье ветвление катодонаправленного стримера моделируется на основе концепции [11], предполагающей, что к нему приводит развитие мощных электронных лавин в сильном электрическом поле перед стримерной головкой.

Исследование ветвления катодонаправленных стримеров. Ветвление катодонаправленных стримеров в данном случае изучается на основе предложенного в [11] механизма, предполагающего, что его инициирует развитие мощных электронных лавин в сильном поле перед стримерной головкой. Однако в этой концепции остаётся неопределённым понятие «мощной лавины». Далее пред-

ставлены результаты проведённых авторами вычислительных экспериментов по исследованию симметричного развития двух электронных лавин в суммарном электрическом поле объёмного заряда первичного стримера и зарядов на электродах. Цель исследования — оценка реализуемости принятого механизма ветвления и уточнение необходимых для этого параметров лавин к моменту их контакта с головкой первичного стримера.

Выбор симметричной задачи обусловлен двумя причинами. Во-первых, это позволило сократить число влияющих параметров задачи и тем самым сосредоточиться на изучении влияния количества электронов во встречных лавинах, а не на многочисленных вариантах их взаимного расположения относительно первичного стримера. Во-вторых, учёт симметрии задачи позволил сократить затраты вычислительных ресурсов, что также дало возможность сосредоточиться на существовании решаемой задачи.

Математическое описание лавины и стримера здесь основано на диффузионно-дрейфовой модели разрядных процессов [1, 12], которая описывает изменение в пространстве и времени концентраций свободных электронов N_e , положительных N_+ и отрицательных N_- ионов, скалярного потенциала электрического поля φ и вектора его напряжённости E . В модели учитываются процессы дрейфа электронов в газе, в электрическом поле, ударной ионизации газа электронами, их прилипания, развала отрицательных ионов, ионно-ионной и электронно-ионной рекомбинации, фотоионизации газа излучением разряда.

На основе этой модели был предложен вычислительный алгоритм [12], который отличается повышенным быстродействием и устойчивостью, что впервые позволило использовать его в качестве рабочего инструмента для исследования трёхмерных объёмных стримерных структур разряда в воздухе от электронных лавин и лавинно-стримерного перехода до ветвления стримеров.

Модель реализована в расчётной области с однородным электростатическим полем (рис. 1). В момент времени $t=0$ к нижней плоскости ($z=0$) прикладывается потенциал $U \geq 0$, в дальнейшем остающийся неизменным. Потенциал верхней плоскости ($z=D$) равен 0.

Развитие разряда начинается с трёх неоднородностей в начальном распределении электронов. С большей из них начинается формирование первичного стримера, она расположена на оси z расчетной области на расстоянии z_1 над анодом (см. рис. 1). Концентрация электронов в её центре достигает максимального значения $N_{\max 1}$, а по мере удаления от него она снижается по нормальному закону, уменьшаясь в e раз на расстоянии r_1 от центра. Две

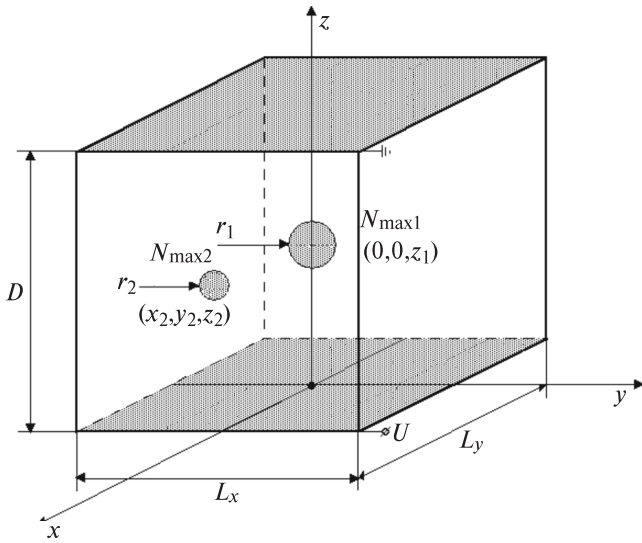


Рис. 1. Расчётная область (начало декартовой системы координат — середина нижней грани)

меньшие неоднородности инициируют ветвление и чтобы обеспечить симметрию задачи, расположены в координатной плоскости xOz симметрично относительно оси z на расстоянии Δx от неё. Их центры находятся в точках с координатами $x_{2,3} = \pm \Delta x$, $y_{2,3} = 0$, $z_{2,3} = z_1 + \Delta z$, а концентрация электронов в них достигает значения $N_{\max 2,3} \ll N_{\max 1}$ и по мере удаления от центра снижается, уменьшаясь в e раз на расстоянии $r_{2,3} \leq r_1$ от центра.

На рис. 2 приведен пример начального распределения концентрации электронов при $z_1 = 0,05$ см, $r_1 = 0,007071$ см, $N_{\max 1} = 10^9$ см⁻³, $z_{2,3} = 0,075$ см ($\Delta z = 0,025$ см), $x_{2,3} = \pm 0,015$ см ($\Delta x = 0,015$ см), $r_{2,3} = 0,005$ см, $N_{\max 2,3} = 10^8$ см⁻³.

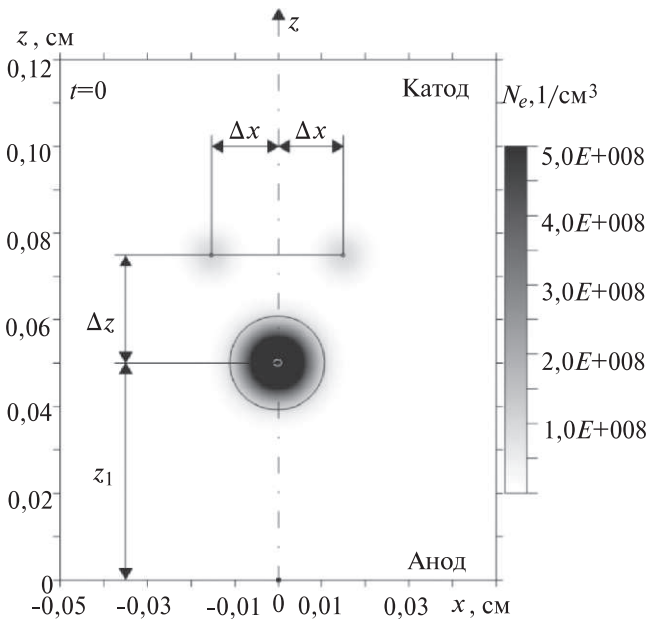


Рис. 2. Пример начального распределения концентрации электронов N_e в координатной плоскости xOz расчётной области

Разрядный промежуток заполнен сухим воздухом при нормальных атмосферных условиях. В начальный момент в нём равномерно распределены положительные и отрицательные ионы в равных концентрациях $N_0 = 10^3$ см⁻³.

В качестве характерного примера далее приведены результаты вычислительного эксперимента, полученные для расчетной области с параметрами: $D = 0,12$ см, $L_x = 0,10$ см, $L_y = 0,08$ см, $E_0 = 80$ кВ/см; к аноду приложено напряжение $U = E_0 D = 9,6$ кВ. Начальное распределение электронов определяют значения параметров, указанные ранее для рис. 2. Расчёты проведены для трёх значений максимальных концентраций электронов $N_{\max 2,3} = 10^6; 10^7$ и 10^8 см⁻³.

Результаты, характеризующие изменение во времени t концентрации электронов N_e , показаны на рис. 3.

Из анализа рис. 3 можно заключить следующее. Во-первых, начальные неоднородности с $N_{\max 2,3} = 10^7$ и 10^8 см⁻³ породили электронные лавины, которые инициировали ветвление стримера. Во-вторых, начальные неоднородности с $N_{\max 2,3} = 10^6$ см⁻³ не смогли положить начало ветвлению, а взаимодействие порождённых ими лавин с головкой первичного стримера привело лишь к её раздуванию. Очевидно, такие различия обусловлены разницей параметров лавин, возникших из-за развития малых начальных неоднородностей и взаимодействующих с первичным стримером.

Для оценки электронных лавин, порождаемых малыми случайными неоднородностями, на момент встречи с первичным стримером $t = 0,8$ нс были отдельно рассчитаны его параметры и характеристики взаимодействующих с ним лавин.

Выполненные расчёты параметров первичного стримера ($N_{\max 1} = 10^9$ см⁻³ и $N_{\max 2,3} = 0$) показали, что к моменту $t = 0,8$ нс он достигает длины $\sim 0,055$ см, максимальная напряжённость поля в его головке ≈ 141 кВ/см, минимальная напряжённость в канале снижается примерно до 50 кВ/см, а плотность объёмного заряда в нём близка к нулю. Таким образом, можно говорить о сформировавшемся стримере с квазинейтральным плазменным каналом.

Расчёт параметров лавин, формирующихся из малых начальных неоднородностей (без учёта взаимодействия со стримером, т.е. $N_{\max 1} = 0$, $N_{\max 2,3} = 10^6, 10^7$ и 10^8 см⁻³), дал следующие результаты на момент $t = 0,8$ нс.

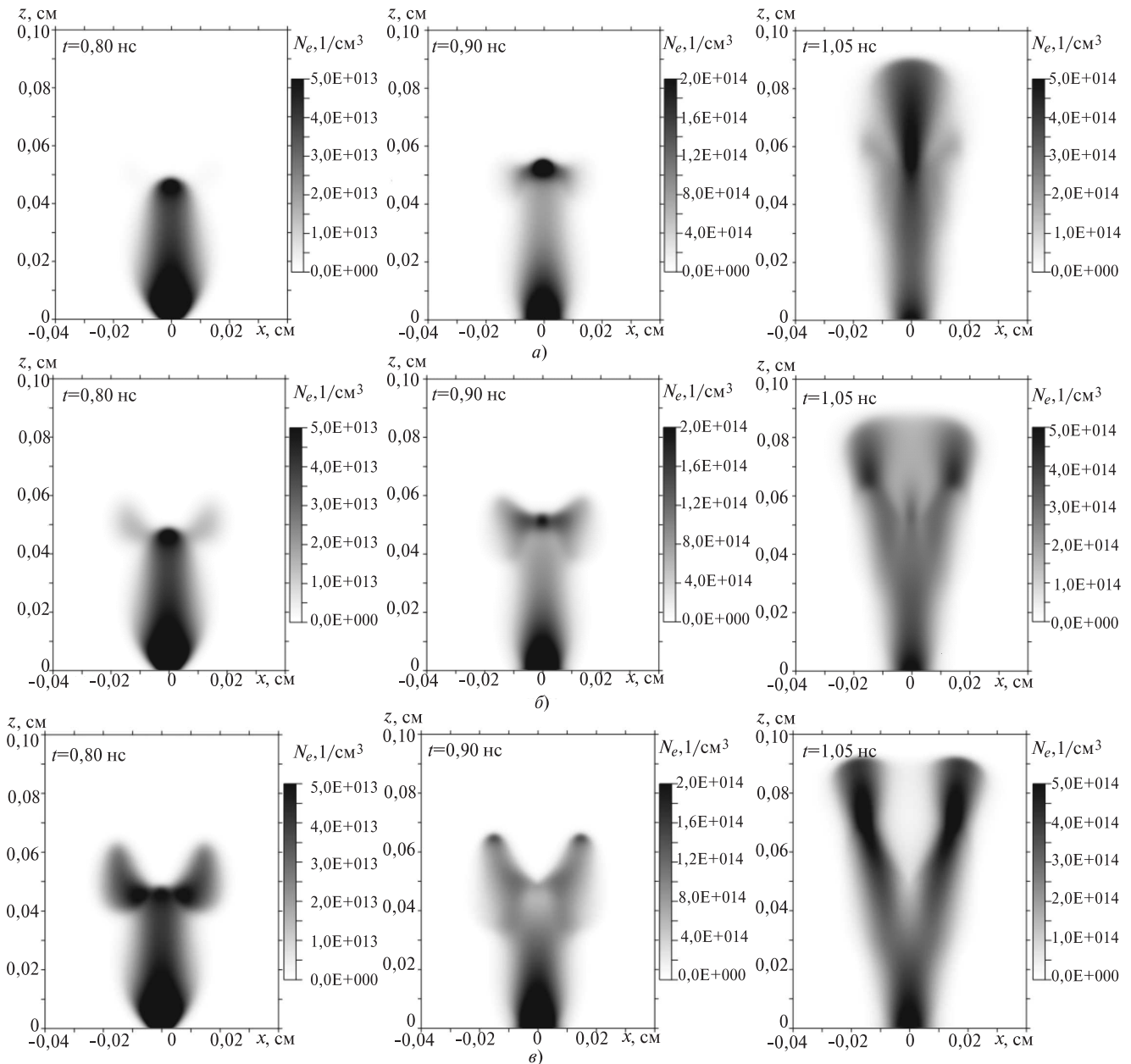


Рис. 3. Расчётные распределения значений N_e в координатной плоскости xOz при $E_0 = 80$ кВ/см: а — $N_{\max 2,3} = 10^6$ см $^{-3}$; б — 10^7 см $^{-3}$; в — 10^8 см $^{-3}$

1. Концентрация электронов $N_{\max 2,3} = 10^6$ см $^{-3}$.

Напряжённость поля E в промежутке остаётся близкой к её исходному значению $E_0 = 80$ кВ/см, наибольшее её отклонение составляет $\sim 0,875\%$. Суммарное число электронов в лавине составляет $\sim 2 \cdot 10^6$, что, по меньшей мере, на порядок меньше их критического числа [27]. Следовательно, в данном случае к моменту $t = 0,8$ нс в разрядном промежутке сформировалась лавина с параметрами, далёкими от критических.

2. Концентрация электронов $N_{\max 2,3} = 10^7$ см $^{-3}$.

Максимальное отклонение E от E_0 составляет $\sim 7\%$. Наибольшее значение напряжённости поля

~ 82 кВ/см, а наименьшее ~ 75 кВ/см. Максимальная концентрация электронов в головке лавины достигает $\sim 6 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, а их общее число $\sim 10^7$, что близко к полученному в [27] их критическому числу. Отсюда следует, что в этом случае к моменту $t = 0,8$ нс формируется лавина, близкая к лавинно-стримерному переходу.

3. Концентрация электронов $N_{\max 2,3} = 10^8$ см $^{-3}$.

Максимальное отклонение E от E_0 достигает $\sim 25\%$. Наибольшее значение напряжённости ~ 92 кВ/см, а наименьшее ~ 61 кВ/см. Максимальная концентрация электронов в головке лавины превышает $2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, их общее число приближается к $\sim 10^8$, т.е. в данном случае к моменту $t = 0,8$ нс произошёл ла-

винно-стримерный переход и из малой лавины уже формируется стример.

Исходя из этих результатов можно сделать вывод, что ветвление стримера могут инициировать встречные электронные лавины, которые к моменту контакта с первичным стримером, или уже совершили лавинно-стримерный переход, или их параметры близки к критическим.

Выводы. 1. Среди множества гипотез, объясняющих ветвление стримера (развитие крупных лавин в сильном поле перед его головкой, стохастические локальные колебания давления вблизи неё, локальные усиления электрического поля вокруг присутствующих в воздухе частиц аэрозоля, развитие электростатической неустойчивости стримерной головки, распространение волн вторичной ионизации в его канале), в качестве основной выделена одна: к ветвлению приводит развитие крупных лавин в сильном поле перед стримерной головкой, возникающих из-за неравномерности распределения начальных электронов вблизи неё. Остальные механизмы нельзя исключить полностью, но сложно считать их основным объяснением ветвления стримеров в воздухе.

2. Математическое моделирование ветвления катодонаправленных стримеров в воздухе показало возможность инициации ветвления катодонаправленного стримера в воздухе в результате его взаимодействия с двумя электронными лавинами, которые появляются перед его головкой сбоку от линии, вдоль которой он распространяется. Реализация такого механизма ветвления возможна при условии, что эти лавины к моменту контакта со стримером уже совершили лавинно-стримерный переход или их параметры близки к критическим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. И.П. Верещагина. — М.: Издат. дом МЭИ, 2010, 704 с.
2. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001, 320 с.
3. **Gallimberti I.** Impulse Corona Simulation for Flue Gas Treatment. — Pure & Appl. Chem, 1988, vol. 60, No. 5, pp. 663—674.
4. **Петер Г.** Электронные лавины и пробой в газах. — М.: Мир, 1968, 390 с.
5. **Loeb L.** Electrical Coronas. — Berkley: University of California, 1965, 694 p.
6. **Meek J.M., Craggs J.D.** Electrical Breakdown of Gases. — John Wiley and Sons, 1978, 508 p.
7. **Creyghton Y.L.M.** Pulsed positive corona discharges (Fundamental study and application to flue gas treatment). — Ph. D. Thesis. Eindhoven University of Technology (the Netherlands), 1994, 238 p.
8. **Briels T.M.P., Kos J., Winands G.J.J., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2008, vol. 41, 234004.
9. **Nijdam S., van de Wetering F.M.J.H., Blane R. et al.** Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2010, vol. 43, 145204.
10. **Nijdam S., Geurts C.G.C., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Reconnection and merging of positive streamers in air. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2009, vol. 42, 045201.
11. **Badaloni S., Gallimberti I.** Montecarlo simulation of streamer branching. — Proc. 11th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Prague, 1973, 196 p.
12. **Белогловский А.А., Верещагин И.П.** Трёхмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учётом ветвления: экономичный расчёт электрического поля. — Электричество, 2011, № 11, с. 17—24.
13. **Железняк М.Б., Мнацаканян А.Х., Сизых С.В.** Фотоионизация смесей азота и кислорода излучением газового разряда. — ТВТ, 1982, т. 20, № 3, с. 423—428.
14. **Верещагин И.П., Белогловский А.А., Михеев А.Г., Белоусов С.В.** О моделировании ветвления стримера. — Известия Академии наук. Энергетика, 2002, № 1, с. 112—125.
15. **Akyuz M., Larsson A., Coora V., Strandberg G.** 3D simulations of streamer branching in air. — Journal of Electrostatics, 2003, vol. 59, pp. 115—141.
16. **Babaeva N., Kushner M.** Effect of inhomogeneities on streamer propagation: I. Intersection with isolated bubbles and particles. — Plasma sources science and technology, 2009, vol. 18, 035009.
17. **Papageorgiou L., Georghiou G.E., Metaxas A.C.** Three-dimensional numerical modeling of gas discharges at atmospheric pressure incorporating photoionization phenomena. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2011, vol. 44, 045203.
18. **Sinkevich O.A.** Anode streamer branching. — High Temperature, 2003, vol. 41, pp. 695—705.
19. **Ebert U., Montijn C., Briels T. et al.** The multiscale nature of streamers. — Plasma Sources Sci. Technol., 2006, vol. 15, s. 118.
20. **Куликовский А.А.** Математическое моделирование стримерного пробоя газов и вычислительный эксперимент в полях различных конфигураций: Автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук. — М.: МГУ, 1998, 40 с.
21. **Kulikovskiy A.A.** The role of photoionization in positive streamer dynamics — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2000, vol. 33, p. 1514.
22. **Соколова М.В., Темников А.Г.** Физические предпосылки модели ветвления положительного стримера в воздухе. — Вестник МЭИ, 1998, № 4, с. 34—40.
23. **Темников А.Г., Соколова М.В.** Расчет процесса ветвления положительного стримера в воздухе. — Вестник МЭИ, 1998, № 5, с. 119—123.
24. **Briels T.M.P., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Positive streamers in air and nitrogen of varying density: experiments on similarity laws. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2008, vol. 41, 234008.
25. **Alexandrov N.L., Bazelyan E.M.** The Peculiarities of Long-Streamer Propagation in Gases with Strong Electron Attachment. — Proc. XIII Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications (Glasgow), 3—8 September 2000, vol. 1, pp. 430—433.
26. **Верещагин И.П., Белогловский А.А., Колобайцев М.А., Мирзабекян Г.З.** Влияние фотоионизации на распространение катодонаправленных стримеров в воздухе. — Вестник МЭИ, 2012, № 2, с. 67—72.
27. **Белогловский А.А., Ильина Ю.Г.** Численный расчёт критических параметров электронной лавины в воздухе. Фёдоровские чтения — 2015. XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. Москва, 11—13 ноября 2015 г./Под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. — М.: Издат. дом МЭИ, 2015, с. 166—170.

[23.03.16]

Авторы: Белогловский Андрей Анатольевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) — ныне Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ» в 1989 г. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка метода расчета

электрического поля коронного разряда в системах электродов сложной конфигурации» в МЭИ. Доцент кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

Рушальщикова Анна Владимировна окончила Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ» в 2012 г. Заместитель руководителя тендерного отдела компании АО «ИНСИСТЕМС».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 7, pp. 15–22.

Studying the Branching of a Cathode Directed Streamer in Air Using Its 3D Mathematical Model

BELOGLOVSKII Andrei Anatol'yevich (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

RUSHAL'SHCHIKOVA Anna Vladimirovna (JSC «INSISTEMS», Moscow, Russia) — Deputy Manager of the Department

Branching of a cathode directed streamer in air is investigated using its 3D mathematical model. Streamer discharge determines the initial conditions for arc breakdown of insulating air gaps; in addition, it finds application in high-voltage electrical technologies, etc. Therefore, knowledge of the conditions under which streamer branching takes place is necessary for practical applications of its mathematical models in different fields of high voltage engineering and electrophysics. Different hypotheses explaining the branching of streamers that have been suggested in the literature are reviewed. A model is separated among them that interrelates this phenomenon with incipience and development of large electron avalanches before a streamer head. It is shown that such branching mechanism can take place if the parameters of such avalanches become close to their critical values by the moment at which they come in contact with the streamer.

Key words: cathode directed streamer, branching, electron avalanche, mathematical modeling

REFERENCES

1. **Electrofizicheskiye osnovy tekhniki vysokikh napryazhenii** (Electrophysical bases of high-voltage engineering)/Edit.by I.P. Vereshchagin. Moscow, Publ. House MPEI, 2010, 704 p.
2. **Bazelyan E.M., Raizer Yu.P.** *Fizika molnii i molniyezashchity* (The physics of lightning and lightning protection). Moscow, Publ. «Fizmatlit», 2001, 320 p.
3. **Gallimberti I.** Impulse Corona Simulation for Flue Gas Treatment. — Pure & Appl. Chem, 1988, vol. 60, No. 5, pp. 663–674.
4. **Reter G.** *Elektronnye laviny i proboi v gazakh* (Electron avalanches and breakdown in gases). Moscow, Publ. «Mir», 1968, 390 p.
5. **Loeb L.** Electrical Coronas. — Berkley: University of California, 1965, 694 p.
6. **Meek J.M., Craggs J.D.** Electrical Breakdown of Gases. — John Willey and Sons, 1978, 508 p.
7. **Creyghton Y.L.M.** Pulsed positive corona discharges (Fundamental study and application to flue gas treatment). — Ph. D. Thesis. Eindhoven University of Technology (the Netherlands), 1994, 238 p.
8. **Briels T.M.P., Kos J., Winands G.J.J., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2008, vol. 41, 234004.
9. **Nijdam S., van de Wetering F.M.J.H., Blane R. et al.** Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2010, vol. 43, 145204.
10. **Nijdam S., Geurts C.G.C., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Reconnection and merging of positive streamers in air. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2009, vol. 42, 045201.
11. **Badaloni S., Gallimberti I.** Montecarlo simulation of streamer branching. — Proc. 11th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Prague, 1973, 196 p.
12. **Beloglovskii A.A., Vereshchagin I.P.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 11. pp. 17–24.
13. **Zheleznyak M.B., Mnatsakyan A.Kh., Sizykh S.V.** *Teplofizika vysokikh temperatur — in Russ. (Thermal Physics of High Temperature)*, 1982, vol. 20, No. 3, pp. 423–428.
14. **Vereshchagin I.P., Beloglovskii A.A., Mikheyev A.G., Belousov S.V.** *Izvestiya Akademii nauk. Egergetika — in Russ. (Proc. of the Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2002, No. 1, pp. 112–125.
15. **Akyuz M., Larsson A., Coora V., Strandberg G.** 3D simulations of streamer branching in air. — Journal of Electrostatics, 2003, vol. 59, pp. 115–141.
16. **Babaeva N., Kushner M.** Effect of inhomogeneities on streamer propagation: I. Intersection with isolated bubbles and particles. — Plasma sources science and technology, 2009, vol. 18, 035009.
17. **Papageorgiou L., Georghiou G.E., Metaxas A.C.** Three-dimensional numerical modeling of gas discharges at atmospheric pressure incorporating photoionization phenomena. — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2011, vol. 44, 045203.
18. **Sinkevich O.A.** Anode streamer branching. — High Temperature, 2003, vol. 41, pp. 695–705.
19. **Ebert U., Montijn C., Briels T. et al.** The multiscale nature of streamers. — Plasma Sources Sci. Technol, 2006, vol. 15. p. 118.
20. **Kulikovskii A.A.** Matematicheskoye modelirovaniye strimernogo proboya gazov i vychislitel'nyi eksperiment v polyakh razlichnykh konfiguratsii: Avtoreferat dis.... D-ra. fiz.-mat. nauk. (Mathematical modeling of the streamer breakdown of gases and computer experiment in the fields of different configurations: Abstract of Diss. for the Degree of Dr. Sci. (Eng.)). Moscow, Moscow State University, 1998, 40 p.
21. **Kulikovskiy A.A.** The role of photoionization in positive streamer dynamics — J. Phys. D.: Appl. Phys., 2000, vol. 33, p. 1514.
22. **Sokolova M.V., Temnikov A.G.** *Vestnik MEI — in Russ. (Bull. of Moscow Power Engineering Institute)*, 1998, No. 4, pp. 34–40.
23. **Temnikov A.G., Sokolova M.V.** *Vestnik MEI — in Russ. (Bull. of Moscow Power Engineering Institute)*, 1998, No. 5, pp. 119–123.
24. **Briels T.M.P., van Veldhuizen E.M., Ebert U.** Positive streamers in air and nitrogen of varying density: experiments on similarity laws. — J. Phys. D.: Appl. Phys, 2008, vol. 41, 234008.
25. **Alexandrov N.L., Bazelyan E.M.** The Peculiarities of Long-Streamer Propagation in Gases with Strong Electron Attachment. — Proc. XIII Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications (Glasgow), 3–8 September 2000, vol. 1, pp. 430–433.
26. **Vereshchagin I.P., Beloglovskii A.A., Kolobaitsev M.A., Mirzabekyan G.Z.** *Vestnik MEI — in Russ. (Bull. of Moscow Power Engineering Institute)*, 2012, No. 2, pp. 67–72.
27. **Beloglovskii A.A., Il'ina Yu.G.** *Fedorovskiy chteniya — 2015: XLV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya.* (Proc. XLV Intern. Scientific-practical Conf.). Moscow, November 11–15, 2015/Edit. by B.I. Kudrin. Publ. House MPEI, 2016, pp. 166–170.