ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/19

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТИПА ДИФFUЗНОЙ ГРАНИЦЫ ДЛЯ АНАЛИЗА
ДИНАМИКИ КАНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В НЕОДНОРОДНОМ
ДИЭЛЕКТРИКЕ**

Савенков Е.Б., Зипунова Е.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

Электрический пробой материала представляет собой резкую, практически мгновенную, деградацию диэлектрических свойств среды под воздействием сильных электромагнитных полей. Анализ этого явления представляет собой важную прикладную задачу, решение которой связано с обеспечением работоспособности материалов и конструкций, функционирующих в условиях сильных электромагнитных полей. Электрический пробой наблюдается в газах, жидкостях и твердых телах. Наиболее сложным и наименее изученным является именно последний случай. Теория электрического пробоя в твердых диэлектриках в настоящее время не является законченной. В настоящее время предложен целый ряд физических моделей этого процесса (см., например, обзор в [1]), однако построение комплексной модели этого процесса, пригодной для исследования методами вычислительного эксперимента, является нерешенной задачей.

Целью настоящей работы является попытка построения математической модели динамик развития канала электрического пробоя с учетом таких эффектов, как неоднородность среды, в которой развивается канал пробоя; неоднородность электрического поля; отсутствие априорной информации о скорости и направлении развития канала пробоя, возможность описания его сложной пространственной динамики (в частности, ветвления).

Рассматриваемая в настоящей работе модель является обобщением модели динамики канала пробоя, предложенной в работе [2]. Эта модель является феноменологической и относится к классу моделей «диффузной границы». Математические модели этого типа активно развиваются в настоящее время и применяются для решения широкого класса задач многофазной гидродинамики, материаловедения, теории развития трещин и многих других. Их основанная идея заключается в том, что распределение вещества в многофазной среде описывается так называемым параметром порядка (или фазовым полем), который является гладкой функцией точки пространства. При этом внутри областей, занятых фазами, значение параметра порядка близко к нулю или единице, а границам раздела фаз соответствуют области пространства конечной «толщины», в которых параметр порядка меняется быстро, но непрерывно. Эволюция параметра порядка описывается соответствующим уравнением, дополняющим полную систему уравнений, описывающих процесс. Модели диффузной границы позволяют рассматривать обобщенные термодинамические силы, действующие на границе раздела фаз (например, поверхностное натяжение) термодинамически непротиворечивым образом и без явного геометрического разрезания границ. В результате модель является однородной по пространству. Эволюция системы описывается выражением для энергии, зависящим не только от параметров состояния, но и от их пространственных производных. Таким образом, соответствующие модели относятся к классу моделей слабонелокальной (или градиентной) термодинамики.

В случае диффузной модели динамики канала пробоя одна фаза соответствует веществу, в котором развивается канал пробоя, а вторая - веществу внутри канала пробоя. Параметром, определяющим процесс развития канала пробоя, является величина энергии, необходимая для образования единицы его длины. Таким образом, модель является феноменологической и абстрагирована от конкретных физических механизмов развития канала пробоя (от них, тем не менее, зависит величина указанного параметра). При таком подходе критерий развития канала пробоя сходен с энергетическими критериями развития трещин в упругой среде в рамках концепции J-интеграла Черепанова и Райса.

Предложенная в работе [1] модель, тем не менее, не лишена недостатков. В частности, в число уравнений модели не входит закон сохранения энергии и не учитываются тепловые

Секция 1. Современные задачи и новые приложения физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

эффекты, такие как джоулев нагрев вещества в канале пробоя и соответствующие потоки энергии. Это делает модель качественно верной, но малоприменимой для анализа процесса развития канала пробоя в реалистичных ситуациях.

В настоящей работе предложена неизотермическая модель, которая является обобщением модели в [1] и лишенная указанных недостатков. Модель является консервативной и термодинамически непротиворечивой в смысле выполнения неравенства Клаузиуса-Дюгема в нужной форме, выражающего второй закон термодинамики. Построенное обобщение модели позволит перейти к анализу процесса электрического пробоя сложноустроенных сред (в частности, композиционных материалов) с детальным учетом их микроструктуры и полного набора значимых механизмов, сопровождающих процесс, см. [4].

1. Воробьев Г.А., Похолоков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие. — 2-е изд. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 245 с.
2. Pitike K.C., Hong, W. Phase-field model for dielectric breakdown in solids // Journal of Applied Physics 115, 044101 (2014); doi: 10.1063/1.4862929.
3. Provatas, Nikolas; Elder, Ken (2010). Phase-Field Methods in Materials Science and Engineering. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/9783527631520. ISBN 9783527631520
4. Вершинин Ю.Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. Основы феноменологической теории и ее технические приложения. Новосибирск: Издательство .Наука.. Сибирское отд-ние, 1968. — 211 с.
5. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. ISBN 5-7691-1023-6.