

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ И ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

* Дарьян Леонид Альбертович, ОАО «ФСК ЕЭС», заместитель начальника Департамента систем передачи и преобразования электроэнергии, к.т.н.

* Дементьев Юрий Александрович, ОАО «ФСК ЕЭС», начальник Департамента систем передачи и преобразования электроэнергии.

+ Ефремов Владимир Петрович, Объединённый институт высоких температур РАН, руководитель отделения, к.ф.-м.н.

+ Полищук Владимир Павлович, Объединённый институт высоких температур РАН, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

+ Шурупов Алексей Васильевич, Объединённый институт высоких температур РАН, Директор Шатурского филиала Объединённого института высоких температур РАН, к.ф.-м.н.

* ОАО «ФСК ЕЭС»

+ Объединённый институт высоких температур РАН

Через масштабных аварий на энергетических объектах, сопровождающихся взрывами высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования (ВМЭО), свидетельствует о существовании серьезной проблемы в обеспечении взрывобезопасности и взрывозащищённости оборудования. Необходимость повышения взрывобезопасности и взрывозащищённости ВМЭО отражена в проекте «Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года» и в «Положении о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС».

В основу стандартной методики испытаний ВМЭО на взрывобезопасность заложен метод инициирования электрической дуги во внутреннем объеме ВМЭО. Требования к этому методу представлены в стандарте МЭК 61869, «Измерительные трансформаторы» (редакция 2007 г.). Кроме этого, существуют стандартизованные методы испытаний на взрывобезопасность для других видов основного оборудования:

- «Типовая методика испытаний вентильных разрядников и ОПН на соответствие условиям безопасности»;

- Публикация МЭК 298 «Комплектные распределительные устройства переменного тока в металлической оболочке на номинальные напряжения от 1 до 72,5 кВ включительно».

В России и в странах СНГ за последние годы отраслевые испытательные стенды и лаборатории по разным причинам практически утратили возможность проведения испытаний ВМЭО на взрывобезопасность и взрывозащищённость по стандартизованной методике, основанной на инициировании электрической дуги. Восстановление и модернизация этих стендов, требующая замены значительной части оборудования, связана с существенными финансовыми затратами. В то же

время нельзя решить проблему создания взрывобезопасных конструкций ВМЭО без проведения полномасштабных испытаний и отсутствии расчетных методик.

При повреждении внутренней изоляции в ВМЭО, либо при появлении высоковольтного импульса происходит инициирование электрического разряда с образованием парогазовой смеси. Возникающий при этом фронт давления приводит к взрывному разрушению корпуса ВМЭО. Нередко при попадании воздуха в парогазовую смесь происходит ее самовоспламенение, при этом ущерб от возникшего пожара, как правило, в несколько раз превышает стоимость вышедшего из строя ВМЭО.

В представленной работе рассматривается применение альтернативного метода испытаний ВМЭО на взрывобезопасность, основанного на инициировании ударно-волнового воздействия внутри оборудования без образования электрической дуги. При этом используется химическая энергия взрывчатых материалов (ВМ). В этом случае можно отказаться от дорогостоящих испытательных установок. Основным условием достоверности результатов, получаемых при применении альтернативного метода испытаний, является соблюдение подобия ударно-волновых процессов, развивающихся в ВМЭО при возникновении электрического разряда и при альтернативном методе испытаний.

ОАО «ФСК ЕЭС» совместно с институтами Российской Академии наук проводит работы по созданию альтернативного метода испытания на взрывобезопасность ВМЭО в рамках целевой научно-исследовательской программы «Взрывобезопасность». Предварительная оценка технико-экономических показателей позволяет рассчитывать на значительное снижение затрат при проведении испытаний на взрывобезопасность ВМЭО по новой методике. Более того, если удастся установить гидравлическое подобие между ударно-волновыми процессами в трансформаторном масле (ТМ) и в воде, то испытания на взрывобезопасность можно будет проводить при заполнении конструкций ВМЭО водой. Это позволит еще более удешевить стоимость испытаний за счет обеспечения их пожаробезопасности.

Для создания новой методики испытания необходимо решить комплекс задач, а именно:

- экспериментальные исследования нестационарного дугового разряда (ДР) в трансформаторном масле (ТМ) и в воде при различных начальных условиях;
- разработать модели расчета ударно-волновых процессов в жидкости (ТМ и воде), развивающихся под действием электрического разряда и энергии ВМ с учетом реакции корпуса ВМЭО и реальной геометрии течения;
- установить область гидравлического подобия течений, порождаемых электрическим разрядом и энергией взрывчатых материалов.

В настоящей работе приведены предварительные результаты, полученные при решении поставленных задач.

Интенсивность ударно-волновых процессов при возникновении электрического разряда, в частности, ДР, определяется зависимостью мощности разряда от времени ее существования и суммарной величиной выделившейся энергии. Диапазон значений токов короткого замыкания (КЗ) при внутреннем повреждении ВМЭО составляет, примерно, (20-50) кА. С учетом времени срабатывания защитных устройств, длительность горения ДР составляет десятки миллисекунд, а выделяющаяся при этом энергия – порядка 10 МДж. При более

тяжелых авариях время горения ДР может достигать сотен миллисекунд, а энергия - порядка 100 МДж.

Характер зависимости мощность ДР от времени отслеживает изменение тока ДР при КЗ и напряжении промышленной частоты. Максимум развиваемой мощности наблюдается через 1-5 мс после возникновения КЗ. Через 5-10 мс ток ДР обращается в ноль, после чего опять достигает максимального значения, зависящего от геометрии разрядного промежутка и характеристик внешней цепи. Поэтому воздействие ДР на ВМЭО носит, строго говоря, импульсно-периодический характер.

Увеличение давления в ВМЭО при возникновении ДР происходит вследствие расширения образовавшегося парогазового пузыря. Поэтому важнейшей величиной, определяющей интенсивность ударно-волновых процессов в ТМ, является коэффициент газообразования V_g , представляющий собой отношение объема образовавшихся газообразных продуктов разложения изоляции (ГПРИ) к величине энергии, выделившейся электрического разряда. По данным [1], представленным на рисунке 1, коэффициент газообразования логарифмически зависит от величины энергии и при энергии 1 МДж составляет около 2,2 м³, т.е. коэффициент газообразования составляет 2200л/МДж. В то же время есть основания считать, что эти значения V_g сильно завышены. Действительно, подобная величина газообразования означает, что для образования одной молекулы газа требуется энергия около 0,05 эВ, что примерно на порядок меньше теплоты испарения молекул ТМ (0,6 эВ) и на два порядка меньше характерных значений энергии связи в молекулах ТМ (4-5 эВ).

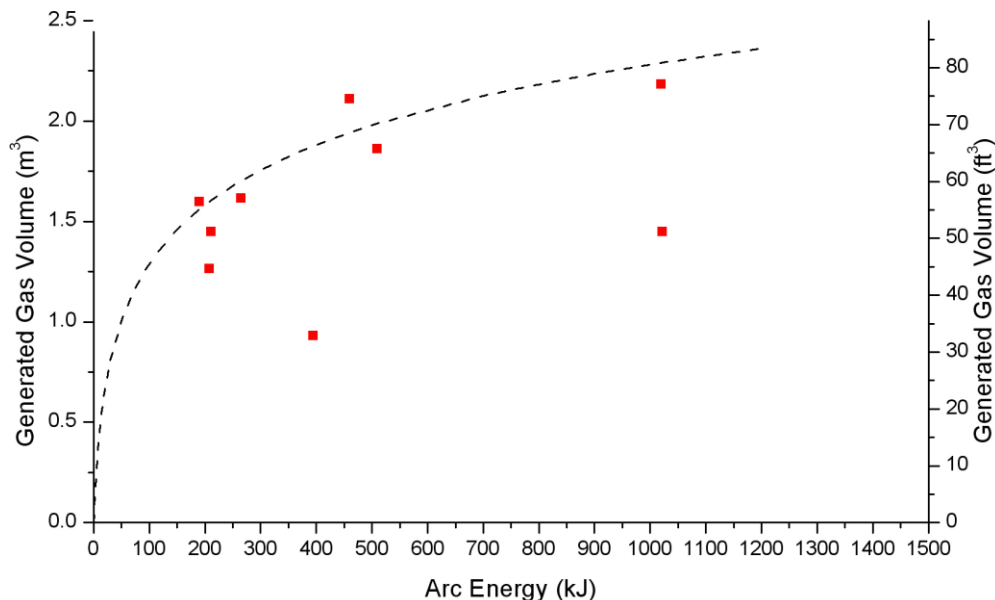


Рис. 1. Газообразование в трансформаторном масле под действием дугового разряда [1]

Ранее проведенные исследования [2] разложения трансформаторного масла по действию частичных разрядов (ч.р.) показали, что в зависимости от условий развития ч.р. значение V_g может отличаться на два порядка, примерно, от 1-го до 100 л/МДж. Интересно отметить, что согласно полученным в этой работе

экспериментальным данным, увеличение мощности ч.р. приводит к уменьшению значения коэффициента газообразования. Особенностью проведенных в [2] исследований является то обстоятельство, что суммарные значения энергии ч.р. составляли от десятых долей единицы до нескольких сотен Дж при мощности ч.р. – от нескольких единиц до нескольких сотен милливольт. В связи с этим были выполнены исследования [3], направленные на получение экспериментальных значений коэффициента газообразования в трансформаторном масле в области относительно высоких энергий, характерных для дугового разряда.

Эксперименты проводились в разрядной камере, показанной на рисунке 2.

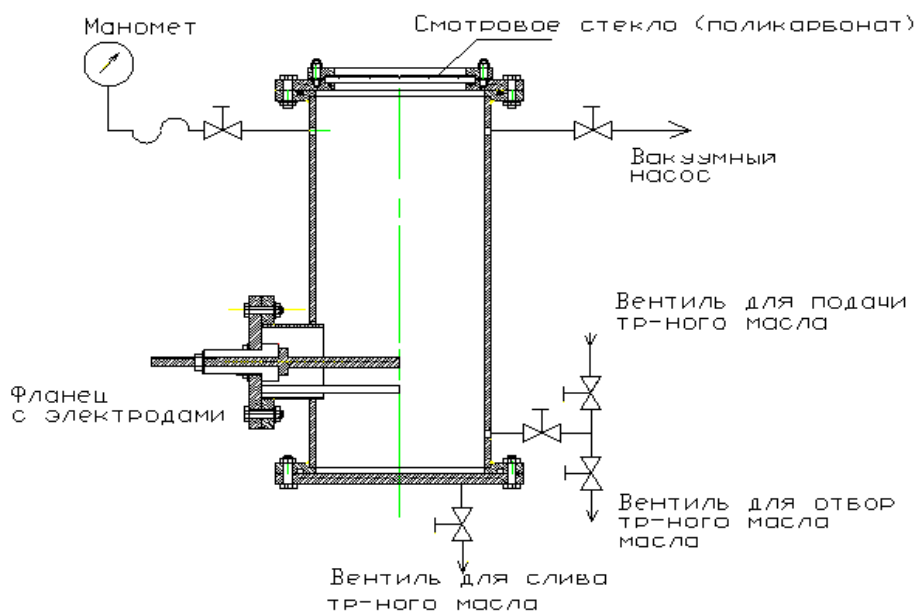


Рис. 2. Эскиз разрядной камеры [3]

Для отбора проб масла и его закачки предусмотрены шаровые вентили. Они исключали контакт масла с воздухом. Масло марки ГК закачивалось с помощью вакуумного насоса через вентиль в нижней части разрядной камеры. Объем масла составлял 8 литров. Electrodes располагались горизонтально на глубине 50 мм от поверхности масла. Высота воздушной подушки над маслом была 296 мм, что соответствовало объёму воздуха 10 л. Во время экспериментов воздух из камеры откачивался, и она заполнялась азотом при атмосферном давлении.

Катодом дуги служил стальной цилиндр диаметром 15,5 мм, анодом – латунный цилиндр диаметром 23,5 мм. Расстояние между электродами – 17 мм, длина рабочей части электродов – 105 мм. Расстояние от электродов до верхнего уровня масла было 50-60 мм. Для инициации разряда электроды соединялись медной проволокой диаметром 0,1 мм и длиной 10 мм.

В качестве источника энергии использовался емкостной накопитель с номинальной энергией 800 кДж при напряжении 5 кВ и повышающий трансформатор. В экспериментах записывались осциллограммы тока и напряжения, фиксировалось динамическое давление в ТМ и установившееся

давление в газовой «подушке», из которого определялся объем выделившегося в дуге газа.

Максимальное значение тока в дуге достигало 50 кА, длительность разряда 3-5 мс. В некоторых экспериментах ток прекращался, несмотря на то, что напряжение на разряде превышало 1 кВ.

Осциллограммы тока и напряжения в опыте, в котором было достигнуто суммарное тепловыделение в дуге 51 кДж, приведены на рисунках 3 и 4, рассчитанная «осциллограмма» мощности для этого же эксперимента показана на рисунке 5. В этом опыте объем образовавшихся газов составил 5,6 л.

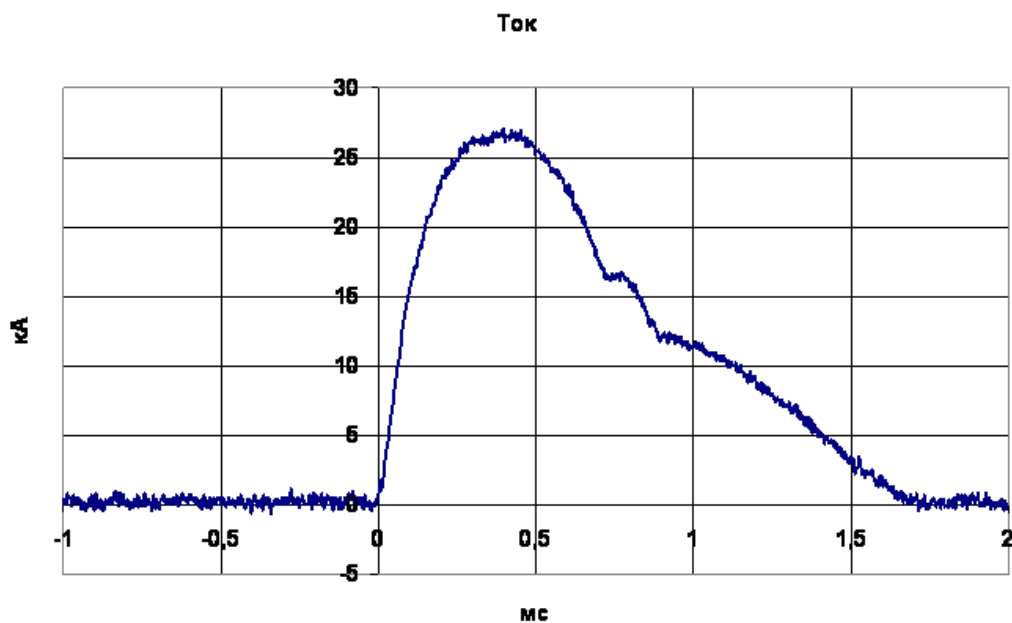


Рисунок 3 – Осциллограмма тока при энергии дуги 51 кДж

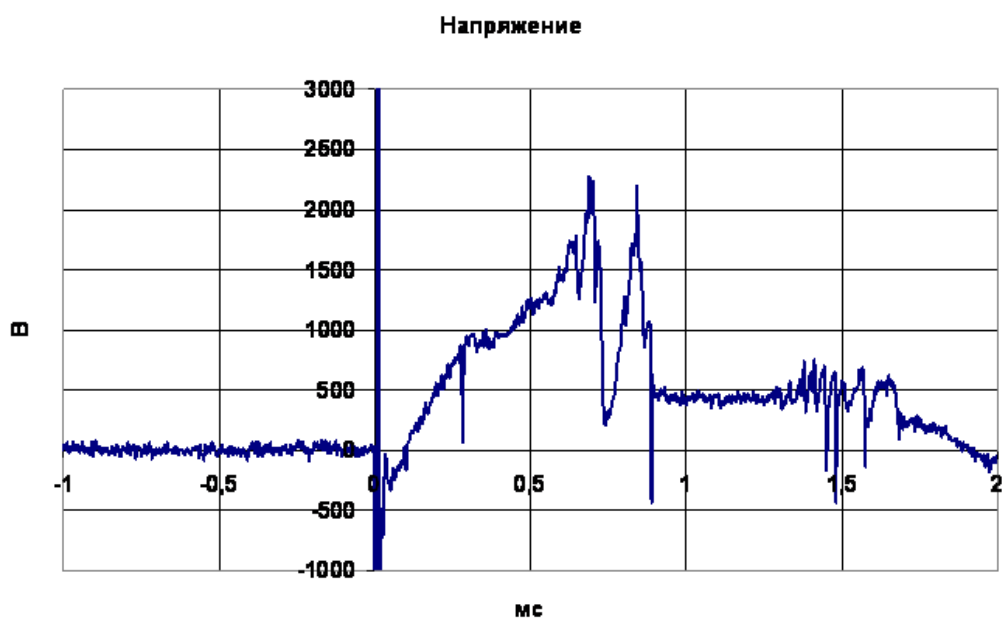


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения при энергии дуги 51 кДж
Из данных представленных на рисунке 3 и рисунке 4 видно, что примерно

через 0,7 с после начала разряда, на осциллограммах тока и напряжения наблюдается особенность. Подобные особенности наблюдались во всех экспериментах, причем в одном из опытов, ток дуги, после достижения минимального падения напряжения, начинал возрастать. Как показывает анализ, это связано с тем, что под действием пондеромоторных сил дуга «сносится» на край электродов. После чего она вытягивалась, и напряжение на промежутке возрастало до тех пор, пока не возникал шунтирующий пробой. Эти эксперименты показывают важность учета движения дуги под действием собственного магнитного поля.

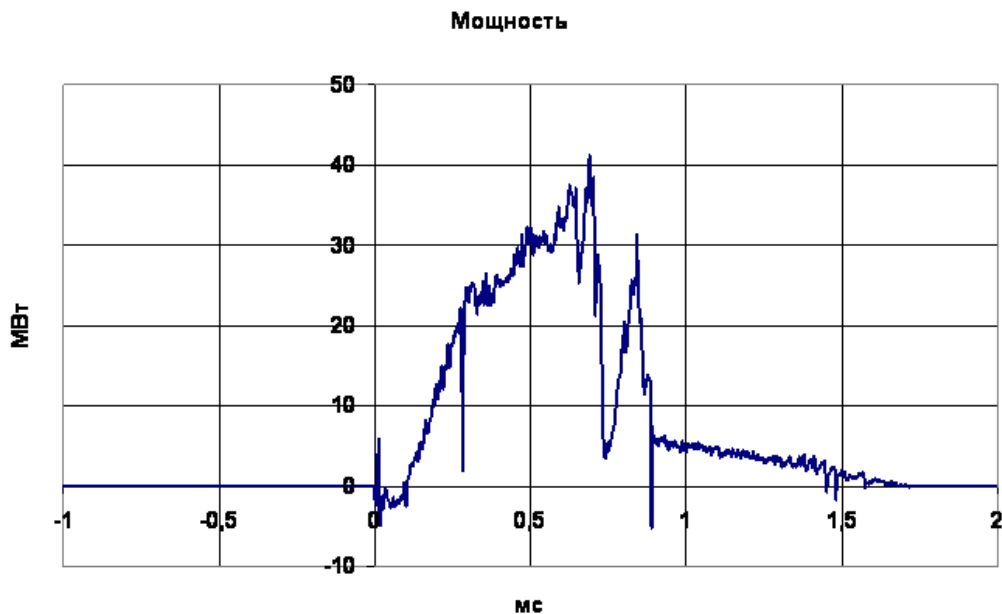


Рисунок 5 – «Осциллограмма» мощности при энергии дуги 51 кДж

Как показывают оценки, характерное значение напряженности электрического поля в дуге составляло порядка 300 В/см. По измерениям величина импульсного давления в ТМ превышала 1МПа.

На рисунке 6 приведены результаты измерения объема выделившегося газа в зависимости от тепловыделения в дуге, полученные в описанных экспериментах [3]. Из этого рисунка следует, что коэффициент газообразования составляет 110 л/МДж. Также на рисунке 6 приведены данные о скорости газообразования, полученные *N.P. Guk* ($V_g=85$ л/МДж) и *O.R. Hansen* ($V_g=100$ л/МДж). Как видно, результаты [3] хорошо согласуются с результатами этих авторов, а также с данными [2], но почти на два порядка отличаются от результатов, приведенных в [1]. Можно отметить, что в пользу надежности данных, представленных на рисунке 6, говорит тот факт, что при $V_g \approx 100$ л/МДж для образования одной молекулы газа требуется примерно 2 эВ, что примерно вдвое меньше энергии связи в молекулах ТМ и сопоставимо с энергией испарения этих молекул.

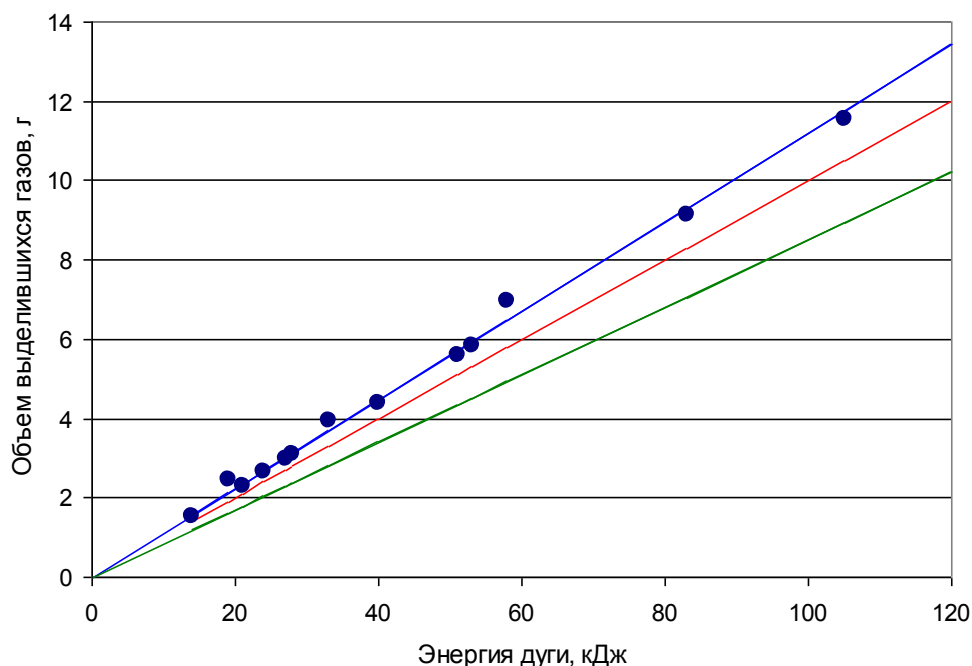


Рисунок 6 – Коэффициент газообразования по результатам [3] (•)

Экспериментальные результаты, полученные в [3], использовались для апробации численной модели ударно-волнового течения в ТМ, описанной в [4]. В этой модели использовалось двумерное приближение, воздействие ДР на трансформаторное масло определялось увеличением объема парогазовой смеси при коэффициенте газообразования $V_g=110$ л/МДж, электрическая мощность ДР задавалась из эксперимента (рис. 5). Так как необходимые для расчета характеристики ТМ (уравнение состояния, ударная адиабата и откольная прочность) неизвестны, то в [4] использовались соответствующие величины для воды. Модель позволила рассчитать силовое воздействие расширяющегося рабочего тела на стенки камеры. Сопоставление результатов расчетов и экспериментов позволяет говорить, как минимум, о качественном совпадении.

В [4] также проведены расчеты течения парогазовой смеси под действием химической энергии ВМ (тринитротолуола). Показано, что при надлежащем выборе вида ВМ и величины его заряда можно обеспечить гидравлическое подобие ударно-волновых процессов, возникающих в жидкости под действием дуги и под действием энергии взрыва.

Развитие представленных исследований позволит создать в достаточно близкой перспективе не только сравнительно недорогие методики определения взрывобезопасности реальных конструкций ВМЭО, но и более дешевые, и в то же время достаточно надежные, расчетные методики.

Список литературы

1. S. Muller, R. Brady, G. de Bressy, P. Magnier, G. Perigaud, Prevention of Transformer Tank explosion. Part 1: Experimental Tests on Large Transformers // Proceedings of PVP2008, 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 27-31, 2008, Chicago, Illinois, USA.
2. Л.А. Дарьян, В.Г. Аракелян. Особенности разрушения изоляционных жидкостей

под действием частичных разрядов. Электротехника.-1997.-№5.-с. 58-61.

3. *L.A. Darian, A.V. Kozlov, S.N. Luzganov, M.N. Povareskin, V.P. Polistchook, A.N. Uchvatov, N.E. Tsyba, A.V. Shurupov*, Study of Gas Formation in the Transformer Oil in the Pulse Arc Discharge // *Physics of Extreme States of Matter- 2009. Chernogolovka. 2009. P. 244.*

4. *V.P. Efremov, A.V. Shurupov, V.P. Polishchuk, V.E. Fortov, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, E.M. Apfelbaum, V.S. Iorish, K.V. Khishchenko, Dementiev Ya.A., L.A. Darian*, Physical and Numerical Modeling of Processes on the Large Power Objects Explosion // *Physics of Extreme States of Matter- 2009. Chernogolovka. 2009. P. 69.*