

# Динамические процессы в трансформаторном масле при локальном импульсном энерговыделении

В. П. Ефремов и А. Д. Киверин

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: alexeykiverin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2018 г.

**Аннотация.** В работе методами численного моделирования с использованием полуэмпирического уравнения состояния трансформаторного масла исследованы динамические процессы в среде, развивающиеся в результате локализованного энергетического воздействия. Показано, что одну из определяющих ролей в развитии динамических процессов в замкнутых объемах при энергетическом воздействии на среду играет ударная волна, формируемая в результате фазового перехода. Продемонстрирован механизм откола жидкости вблизи межфазной границы в результате воздействия со стороны ударной волны, распространяющейся в системе и переотражающейся от внешней оболочки, ограничивающей объем. Показано, что в случае малых пространственных размеров системы явление откола является основным физическим механизмом, определяющим генерацию газа в системе. В крупномасштабных системах и при использовании протяженных во времени источников энергии определенную роль начинает также играть процесс испарения жидкости на межфазной границе. <https://doi.org/10.33849/2018116>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работа высоковольтного маслонаполненного электрооборудования связана с рисками возникновения пожаров и взрывов. Современные большие трансформаторы, используемые в современных энергетических сетях, могут вмещать в себя до сотен тонн минерального масла [1], представляющего из себя смесь нефтепродуктов, таких как нафтенy, полиароматические углеводороды и парафины [2]. Аварийный выброс столь большой массы трансформаторного масла следует рассматривать как одну из наиболее опасных потенциальных угроз.

Рассмотрим следующий возможный сценарий развития аварийной ситуации. При возникновении короткого замыкания в сети внутри маслонаполненного оборудования может произойти высоковольтный пробой трансформаторного масла. При этом в высоковольтной дуге может выделиться энергия до 50 МДж, а характерное время горения дуги может исчисляться от миллисекунд до секунд [3], передача энергии сконцентрирована в относительно малой пространственной области, внутри горячей высоковольтной дуги. Локальная передача энергии с высокой концентрацией ведет к разогреву и распаду жидкости в области пробоя. При этом выделяется достаточно большое количество газа. Так, в работе [3] было показано, что при пробое трансформаторного масла выделяется до 110 литров газа на 1 МДж. Расширение нагретой парогазовой смеси определяет формирование волн сжатия в окружающей жидкости, в результате чего оболочка маслонаполненного оборудования может быть существенно деформирована или разрушена. Разлет фрагментов разрушенной оболочки является одним из факторов, определяющих повреждение оборудования электростанции. Более того, при повреждении оболочки маслонаполненного оборудования в окружающую среду попадает как само трансформаторное масло, так и газообразные продукты его распада в области высоковольтной дуги.

В свою очередь, разлив трансформаторного масла и попадание горючих продуктов распада в атмосферу могут явиться источниками возникновения пожаров и взрывов. Газообразные продукты распада трансформа-

торного масла состоят в большей степени из водорода и ацетилена, которые, перемешиваясь с атмосферным воздухом, формируют облако газообразной взрывчатой смеси, воспламенение которой может протекать в форме объемного взрыва. Так, например, 30 октября 2012 года при аварии на подстанции Con Edison (New York, USA) наблюдался взрыв в воздухе над территорией подстанции.

Для выработки критериев и разработки мер пожаро- и взрывобезопасности важно понимать особенности развития элементарных процессов, определяющих развитие возможного аварийного сценария. В частности, необходим детальный анализ развития динамических процессов в трансформаторном масле, развивающихся при локальном подводе энергии и определяющих разрушение оболочки маслонаполненного оборудования. Ранее в работе [4] был проведен анализ режимов динамического нагружения оболочки цилиндра объемом 75 литров при локальном подводе энергии в объеме  $\sim 10$  мл. Были рассмотрены режимы, реализуемые при использовании источников энергии различной интенсивности и длительности. Было показано, что для оценки рисков разрушения оболочки маслонаполненного оборудования важную роль играют сценарии, реализуемые при использовании коротких импульсов энергии. Здесь в качестве референтного режима целесообразно принять реализуемый при вложении большей части энергии за первый полупериод переменного электрического тока ( $\sim 10$  мс), обеспечивающего горение электрической дуги. Соответственно, если большая часть энергии выделяется в таком или более коротком импульсе, то концентрации энергии достаточно, с одной стороны, для инициирования фазового перехода в области подвода энергии, а с другой стороны, для генерации ударной волны, которая в дальнейшем и определяет процесс динамического нагружения оболочки.

Целью настоящей работы ставилось исследовать детали развития гидродинамического процесса при использовании коротких энергоемких источников энергии и выявить базовые физические механизмы, определяющие, с одной стороны, генерацию парогазовой компо-

ненты, а с другой — частотный режим динамического нагружения оболочки маслонаполненного объема.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

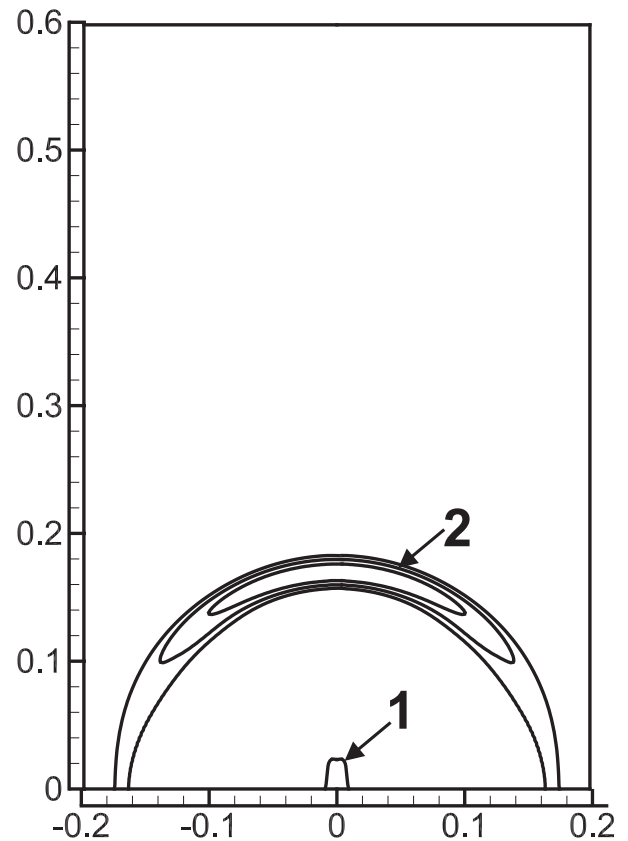
Подобно постановке задачи, рассмотренной в работе [4], будем рассматривать динамику жидкости внутри 75 литрового цилиндрического объема, геометрия которого представлена на рисунке 1. Источник энергии будем моделировать непрерывным подводом энергии по закону  $\Delta Q \sim \sin(\pi t/\tau)$  в цилиндрической области объемом  $\sim 3$  мл, расположенной на оси цилиндра у нижнего его основания. Гидродинамику процесса будем моделировать с использованием традиционных балансных уравнений Навье–Стокса с учетом теплопроводности, вязкости и широкодиапазонного уравнения состояния. В качестве уравнения состояния будем использовать предложенное ранее в [4] полумпирическое уравнение состояния, построенное с использованием критерия подобия уравнений состояния для различных жидкостей [5] на основе уравнения состояния воды [6]. Рассматривалось трансформаторное масло с начальной плотностью  $895 \text{ кг/м}^3$  и плотностью в критической точке, равной  $230 \text{ кг/м}^3$  [7]. Расчет уравнения состояния в газофазной области при  $\rho \leq \rho_{cr}$  проводился согласно модели, предложенной в [7] на основе термодинамических расчетов для продуктов распада трансформаторного масла [8]. Коэффициенты переноса для трансформаторного масла, включая область продуктов распада, были предложены в [7] на основе потенциала Букингема [9] в рамках закона соответственных состояний.

Ниже анализ динамических процессов в трансформаторном масле рассмотрен на примере режима, реализуемого при подводе энергии  $\sim 2.6 \text{ кДж}$  за время  $1 \text{ мс}$ . Плотности энергии в этом режиме достаточно, чтобы на масштабах области энерговыделения произошел фазовый переход, в результате чего сформировался парогазовый пузырь (1) и ударная волна (2), представленные на рисунке 1 на фиксированный момент времени. Граничные условия на границах соответствуют абсолютно жестким стенкам, что исключает рассмотрение эффектов откола жидкости вблизи стенок после выхода ударной волны на свободную границу. Таким образом, анализ сосредоточен на процессах, протекающих в центральной области объема, где происходит выделение энергии.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим динамику жидкости при локальном объемном подводе энергии в рамках принятой постановки задачи. На ранней стадии можно наблюдать расширение непрерывно нагреваемой жидкости в окружающую ее холодную область. Это ведет к формированию слабых волн сжатия, распространяющихся в холодной среде. Волны сжатия выравнивают давление в области подвода энергии, что определяет квази изобарный характер нагрева среды. Ввиду малой сжимаемости, амплитуда волн сжатия в жидкости относительно невелика, что говорит об относительно малом вкладе этой начальной стадии на развитие динамических нагрузок на оболочку, ограничивающую замкнутый объем.

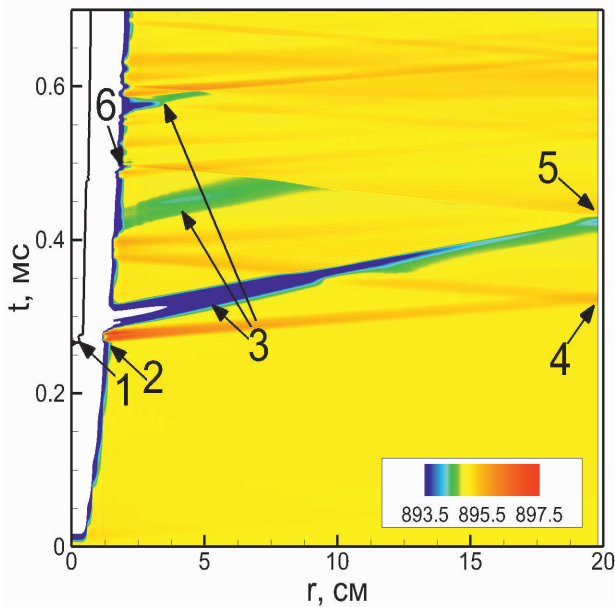
Наиболее важной стадией с точки зрения динамического отклика среды на локальный нагрев является



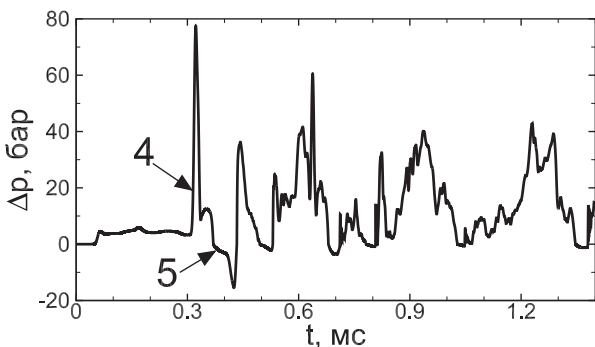
**Рисунок 1.** Геометрия задачи. Цилиндрический объем радиусом  $0.2 \text{ м}$  и высотой  $0.6 \text{ м}$  заполнен трансформаторным маслом при нормальных начальных условиях. 1 — парогазовый пузырь; 2 — ударная волна.

нагрев жидкости до критического состояния, соответствующего фазовому переходу жидкость–пар. В момент фазового перехода наблюдается скачок термодинамических параметров. Плотность изменяется скачком от величины  $\sim 230 \text{ кг/м}^3$  до  $\sim 140 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует переходу из жидкого состояния в газообразное, минуя двухфазную область. При этом давление претерпевает скачок на  $\Delta p = 3.7 \text{ кбар}$ . В результате этого, имеет место генерация ударной волны в среде, расталкиваемой парогазовой средой. Внутрь парогазового пузыря при этом входит волна разрежения, которая после пересечения центра пузыря выходит в жидкость вслед за отошедшей ударной волной. При этом, если давление в трансформаторном масле в области волны разрежения падает до величины  $0.45 \text{ кбар}$ , то имеет место откол жидкости вблизи поверхности пузыря [10]. Согласно проведенным расчетам, результаты которых представлены на рисунке 2, откол на межфазной границе в рассмотренных условиях происходит при падении давления до величины ниже  $0.45 \text{ кбар}$  (что достигается, например, в момент времени  $\sim 0.5 \text{ мс}$ , точка 6 на рисунке 2).

На датчике давления (рисунок 3) можно наблюдать на рассмотренной выше стадии приход двух следующих друг за другом импульсов сжатия и разрежения. Импульс сжатия отражается от абсолютно жесткой оболочки и возвращается в область парогазового пузыря. Волна сжатия проходит фазовую границу внутрь парогазового пузыря, при этом в область жидкости входит волна разрежения, которая также может привести к от-



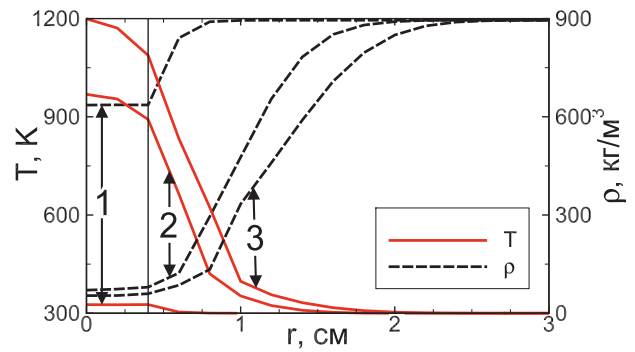
**Рисунок 2.** Пространственно-временная развертка гидродинамического процесса в сечении, проходящем через центр источника энергии параллельно основанию цилиндрического объема. 1 — граница парогазового пузыря; 2 — формирование ударной волны; 3 — волны разрежения в жидкости; 4 — отражение ударной волны от оболочки; 5 — приход волны разрежения на датчик; 6 — откол. Цветом показано поле плотности в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .



**Рисунок 3.** Профиль давления на датчике, расположенном на пересечении нижней поверхности цилиндрического объема и его образующей. Маркерами 4 и 5 указаны моменты времени прихода на датчик ударной волны и волны разрежения соответственно (маркировка совпадает с введенной на рисунке 2).

колу жидкости. Волны разрежения на рисунке 2 отмечены маркером “3”. Интересно отметить, что, как это будет показано ниже, скорость ударной волны, формируемой в результате фазового перехода, оказывается почти в 3 раза выше скорости звука в холодной среде. В связи с этим, независимо от геометрии объема, вслед за приходом волны разрежения на боковую поверхность всегда приходит отраженная ударная волна (точка 5 на рисунке 2), что также можно наблюдать на записи датчика давления (точка 5 на рисунке 3).

Далее в системе устанавливается колебательный режим (рисунок 3), частоты которого определяются акустическими временами, характеризующими распро-



**Рисунок 4.** Профили температуры (сплошные красные линии) и плотности (штриховые) в окрестности парогазового пузыря в различные моменты времени: 0.1 мс (1), 0.6 мс (2) и 1.1 мс (3). Вертикальная тонкая линия — граница области энерговыделения.

странение ударных волн и волн разрежения в замкнутом объеме, заполненном жидкостью. При этом на фоне длинноволновых возмущений, характеризуемых последовательностью формирующихся волн разрежения, распространяющихся в среде со скоростью звука ( $1350 \text{ м}/\text{с}$  в трансформаторном масле), развиваются и более высокочастотные возмущения, характеризуемые распространяющимися в объеме ударными волнами ( $D \sim 3800 \text{ м}/\text{с}$ ) и процессом их интерференции. Характерная частота низкочастотных возмущений может быть оценена как отношение диаметра цилиндрического объема к скорости звука —  $0.3 \text{ мс}$ , что соответствует данным, приведенным на рисунке 3. Высокочастотная мода характеризуется отношением диаметра цилиндрического объема к скорости ударной волны и составляет величину  $0.1 \text{ мс}$ . Момент насыщения спектра возмущений дополняется дополнительными модами за счет интерференции ударных волн может быть оценен как время, за которое ударная волна достигает противоположного основания цилиндра и возвращается обратно —  $0.3 \text{ мс}$ . Как можно видеть из представленных на рисунках 2 и 3 данных, возникновение дополнительных мод возникает непосредственно после прохождения  $0.3 \text{ мс}$  после формирования ударной волны.

В динамике описанную последовательность развивающихся процессов можно наблюдать на рисунке 2, где представлена пространственно-временная развертка процесса в сечении, проходящем через центр пузыря параллельно основанию цилиндрического объема. Цветовая гамма показывает изменение плотности относительно начального значения, при этом показана только область с плотностью выше  $888 \text{ кг}/\text{м}^3$  (начальная плотность выбрана равной  $895 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), область меньшей плотности окрашена белым. Граница парогазового пузыря отмечена изолинией плотности  $230 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Области повышенной плотности (красная гамма) соответствуют состоянию вещества за фронтами ударных волн. Области пониженной плотности (синяя гамма) соответствуют волнам разрежения.

Парогазовый пузырь продолжает свое расширение в процессе энерговыделения (рисунок 4). При этом теплопроводность жидкости обеспечивает разогрев прилегающих к межфазной поверхности слоев жидкости, и в толщу жидкости распространяется фронт испарения.

Для выявления ведущего механизма газообразования в системе целесообразно оценить временные масштабы, характеризующие распространение фронта испарения и откола на межфазной границе. Как это было указано выше на основе анализа данных, представленных на рисунках 2 и 3, в выбранной геометрии характерный период прихода ударной волны из толщи жидкости на межфазную границу равен 0.1 мс. Ввиду того, что именно этот физический процесс ведет к отколу жидкости вблизи межфазной границы, указанный масштаб времени можно использовать для оценки интенсивности газообразования в результате откола. С другой стороны, основным механизмом распространения фронта испарения является теплопроводность, и, согласно результатам численного моделирования, полученным с использованием выбранной модели теплопереноса в трансформаторном масле, можно оценить характерную скорость и характерную толщину теплового фронта как 4.3 м/с и 1.4 см соответственно. С учетом этого можно заключить, что характерный временной масштаб, определяющий интенсивность газообразования за счет распространения из области энерговыделения фронта испарения, можно оценить как 3.0 мс. Таким образом, для выбранных условий (интенсивности источника энергии и геометрии замкнутого объема) процесс газообразования за счет откола оказывается на порядок более интенсивным, чем процесс испарения. В более крупных объемах и при использовании более длительных импульсов энергии основная роль в процессе газообразования будет принадлежать, напротив, процессу испарения на межфазной границе.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное численное исследование развития динамических процессов в трансформаторном масле в результате интенсивного энергетического воздействия позволило выделить ведущие физические механизмы, определяющие динамику жидкости в рассматриваемых условиях. Показано, что определяющую роль в динамике жидкости играют фазовые превращения в области выделения энергии. На фазовой границе при резком изменении фазового состояния вещества формируется система ударная волна – волна разрежения, определяющая дальнейшее развитие процесса. Периодически отражающаяся от стенок замкнутого объема ударная волна выходит на межфазную границу, приводя к формированию в жидкости волны разрежения и отколу жидкости вблизи фазовой границы. При этом длительное поддержание подвода энергии обеспечивает испарение жидкости на межфазной границе за счет переноса тепла из эпицентра энерговыделения. В результате в системе реализуется два основных механизма газообразования: за счет испарения на межфазной границе и в результате откола. В зависимости от параметров ис-

точника энергии и от геометрии замкнутого объема может превалировать один или другой механизм. В крупных объемах при длительных энерговыделениях ведущая роль принадлежит процессу испарения. В малых объемах и на ранних стадиях процесс газообразования определяется отколом, индуцированным периодическим взаимодействием ударных волн с межфазной поверхностью. Ввиду того, что, как правило, внутренний объем маслонаполненного оборудования характеризуется весьма плотным заполнением, следует ожидать, что основным механизмом газообразования и формирования динамических нагрузок на внутренние элементы системы и оболочку будут высокочастотные колебания, связанные с распространением ударной волны в замкнутом загроможденном пространстве.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума Российской Академии Наук I.13 “Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heathcote M J 2007 *J & P Transformer Book* 13th ed (Oxford: Newnes)
2. Henderson H E 2013 *Chemically modified mineral oils Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology* Chemical Industries ed Rudnik L R (Boca Raton, Florida: CRC Press)
3. Darian L A *et al* 2010 A new approach to design of oil-filled transformers with high fire and explosion safety 2010 *CIGRE SESSION* (Moscow: Russian National Committee of CIGRE) pp A2–106
4. Efremov V P, Ivanov M F, Kiverin A D and Utkin A V 2017 *Shock Waves* **27** 517–522
5. Garrett G R, Chhabildas L C and Reinhart W D 2006 *Shock Compression of Liquids AIP Conf. Proc.* vol 845 (AIP) pp 81–84 ISBN 0735403414
6. Кузнецов Н М 1961 *ПМТФ* **2** 112–120
7. Фортов В Е, Сон Э Е, Азметов Х Х, Апфельбаум Е М, Бондарь В С, Горюшин Ю А, Дарьян Л А, Дементьев Ю А, Зибаров А В, Зицерман В Ю, Иванов М Ф, Иорис В С, Киверин А Д, Минцев В Б, Полищук В П, Темис Ю М, Уткин А В и Шурупов А В 2010 Взрыво и пожаробезопасность высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования. *ОИВТ: Итоги и перспективы: Сборник статей, посвященный 50-летию Объединенного института высоких температур РАН* (Москва: Издательство ОИВТ РАН) с. 493–513
8. Belov G V, Iorish V S and Yungman V S 2000 *High Temp.* **38** 191–196
9. Errington J R and Panagiotopoulos A Z 1998 *J. Chem. Phys.* **109** 1093–1100
10. Банникова И А, Зубарева А Н и Уткин А В 2018 *ЖТФ* **88** 514–520