

03

## Регистрация микропузырьков в трансформаторном масле

© Л.А. Дарьян, А.П. Дрожжин, С.М. Коробейников,  
В.С. Тесленко, М.А. Аникеева

Новосибирский государственный технический университет  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
E-mail: ldarian@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2008 г.

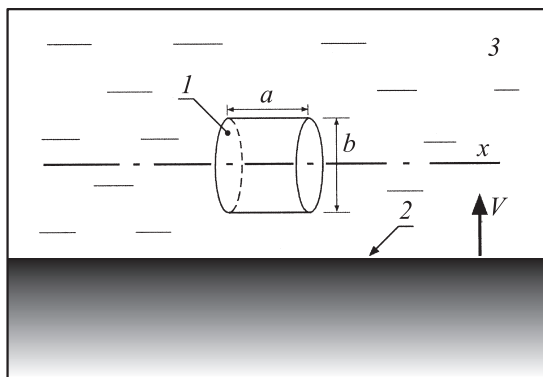
Исследован рост микропузырьков в трансформаторном масле (ТМ) под действием волны отрицательного давления. Экспериментально показано, что пузырьки в ТМ вырастают до регистрируемых размеров 100–200 мкм. Согласно приведенным расчетам, они могли появляться из зародышей микронных и субмикронных размеров.

PACS: 77.84.Nh, 47.55.D

Предположение о существовании микропузырьков и/или их образовании при воздействии электрического поля играет важную роль в объяснении механизма инициирования импульсного электрического пробоя жидкостей [1]. Экспериментально установлено, что в дистиллированной воде всегда существуют пузырьки микронных размеров [2]. Гипотеза о наличии микропузырьков в трансформаторном масле неоднократно высказывалась, однако опубликованные экспериментальные данные, подтверждающие или опровергающие указанную гипотезу, отсутствуют.

В настоящей работе сделана попытка экспериментального определения наличия и оценки размеров микропузырьков в образцах трансформаторного масла различного класса промышленной чистоты по методике, описанной в [3].

В основу методики эксперимента положен эффект увеличения геометрических размеров микропузырьков в жидкости при воздействии волны отрицательного давления. В трансформаторном масле генерировались биполярные ударные волны (УВ) электромагнитным излучателем, которые, отражаясь от свободной поверхности, создавали пониженное давление, достаточное для развития кавитации в ТМ.



**Рис. 1.** 1 — исследуемая область масла; 2 — фронт ударной волны; 3 — масло.  $X$  — ось оптической системы.  $V$  — вектор скорости ударной волны.  $a = 1.95 \pm 0.05$  mm,  $b = 1.64 \pm 0.1$  mm.

На рис. 1 схематически показана исследуемая область трансформаторного масла. размер  $a$  цилиндрической области определяется глубиной резкости оптической системы, а размер  $b$  — диаметром диафрагмы объектива. Таким образом, исследуемая область — это область наилучшей резкости, глубина которой определялась по резкому изображению проволоочки диаметром 0.14 mm, перемещаемой прецизионным винтом. Исследуемая область располагалась на глубине 20 mm от поверхности ТМ.

Слева от исследуемой области размещалась импульсная лампа ИСШ 400-3, которая излучала свет в течение около  $1 \mu\text{s}$  и освещала рассеивающий экран. Экран был выполнен из матовой пленки и обеспечивал равномерное освещение исследуемого объема масла. Момент запуска  $t_d$  лампы генерировался генератором задержек ГЗИ-6. Оптическая система состояла из цифрового фотоаппарата CANON (PowerShot S21S, количество растровых точек — 5.0 млн.), дополнительных линз и располагалась справа от исследуемой области. Размер растрового элемента на изображении составлял примерно  $3 \mu\text{m}$  на объекте. Измерение давления в исследуемой области проводилось пьезоэлектрическим датчиком с временным и пространственным разрешением  $0.05 \mu\text{s}$  и 0.5 mm соответственно.

**Таблица 1.** Результаты определения количества частиц в чистом масле ГК. Объем  $V = 100$  ml. КПЧ = 8.

2–5 $\mu\text{m}$	5–10 $\mu\text{m}$	10–25 $\mu\text{m}$	25–50 $\mu\text{m}$	50–100 $\mu\text{m}$	> 100 $\mu\text{m}$
72093	4919	1131	118	53	2

**Таблица 2.** Результаты определения количества частиц в чистом масле ГК (дубль в другом объеме пробы).  $V = 50$  ml ( $\times 2$ ). КПЧ = 8.

2–5 $\mu\text{m}$	5–10 $\mu\text{m}$	10–25 $\mu\text{m}$	25–50 $\mu\text{m}$	50–100 $\mu\text{m}$	> 100 $\mu\text{m}$
34264	3588	928	130	62	10

**Таблица 3.** Результаты определения количества частиц в смеси (450 ml масла ГК + 115 ml песка).  $V = 100$  ml. КПЧ = 13.

2–5 $\mu\text{m}$	5–10 $\mu\text{m}$	10–25 $\mu\text{m}$	25–50 $\mu\text{m}$	50–100 $\mu\text{m}$	> 100 $\mu\text{m}$
31267	133751	23831	334	82	4

**Таблица 4.** Результаты определения количества частиц в смеси (300 ml масла ГК + 100 ml песка).  $V = 100$  ml. КПЧ = 13.

2–5 $\mu\text{m}$	5–10 $\mu\text{m}$	10–25 $\mu\text{m}$	25–50 $\mu\text{m}$	50–100 $\mu\text{m}$	> 100 $\mu\text{m}$
38446	162367	29664	346	45	11

Исследованию подвергались образцы свежего трансформаторного масла типа ГК и смесь „ТМ + песок“. Для всех образцов ТМ определялся класс промышленной чистоты (КПЧ) с использованием прибора АЗЖ-975. Для этого было подготовлено по 2 лабораторных образца „чистого“ ТМ и смеси „ТМ + песок“. Подготовка масла из смеси „ТМ + песок“ проводилась следующим образом. В емкость со свежим трансформаторным маслом насыпался кварцевый песок, и емкость интенсивно взбалтывалась. После этой процедуры смесь отстаивалась в течение 24 h. Далее, ТМ аккуратно сливалось в ячейку для экспериментов.

Результаты определения КПЧ исследованных образцов ТМ сведены в таблицы 1–4. Как следует из таблиц 1 и 2, трансформаторное масло,

не находившееся в эксплуатации, но не подвергнутое дополнительной очистке, имеет КПЧ-8. В то же время, как следует из таблиц 3 и 4, для трансформаторного масла с песком после двух суток отстаивания КПЧ составляет 13. Следует отметить значительное увеличение количества частиц малых фракций (от 5 до  $25 \mu\text{m}$ ) в смеси „ТМ + песок“. Более мелкие фракции не анализировались.

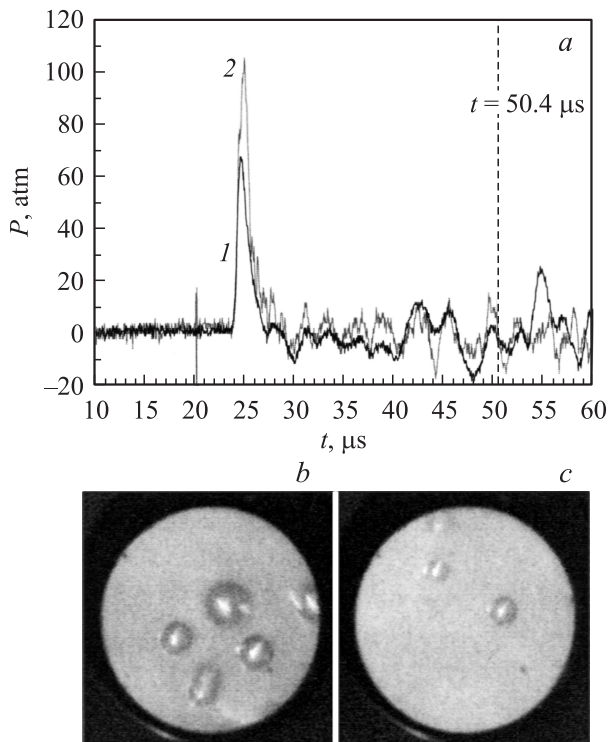
Регистрации микропузырьков проводились в следующих образцах ТМ: 1 — в трансформаторном масле из смеси „ТМ + песок“; 2 — в „чистом“ ТМ; 3 — в „чистом“ ТМ, насыщенном пузырьками воздуха путем барботажа в течение 60 min.

Для времен задержки  $t_d$  было получено несколько серий фотографий кавитационных микропузырьков, до 20 штук в каждой. Время задержки отсчитывалось от момента запуска ударной волны. Наибольшее количество фотографий кавитационных пузырьков получено при времени задержки  $t_d = 50.4 \mu\text{s}$ . Этому моменту времени соответствует наибольшая вероятность появления кавитационных пузырьков. На рис. 2 показаны осциллограммы давления в окрестности исследуемой области и фотографии кавитационных пузырьков в масле со взвешенной мелкой фракцией песка (вариант 1). На рис. 2, *a* видно, что амплитуда волны разрежения 1 через  $t_d = 48 \mu\text{s}$  больше волны 2, т.е. с увеличением энергии ударной волны происходит искажение волны разрежения. Указанное явление происходит из-за развития кавитационных пузырьков, которые искажают реальное поле давлений в исследуемой области. Минимизации влияния воздействия кавитационных пузырьков на регистрируемые значения амплитуды давления производилась путем оптимизации выбора величины энергии УВ.

Количество пузырьков в единице объема, рассчитанное по фотографиям с учетом размеров регистрируемой области, составляет  $1214 \text{cm}^{-3}$  (для рис 2, *b*) и  $728 \text{cm}^{-3}$  (для рис. 2, *c*).

При проведении экспериментов для образцов ТМ 2 и 3 на снятых фотографиях отчетливые кавитационные пузырьки не были зафиксированы в исследуемой области. На некоторых фотографиях просматриваются расфокусированные размытые изображения объектов. На основании этого можно заключить, что микропузырьки существуют и в чистом масле, однако их концентрация недостаточна для надежной регистрации, их концентрация меньше примерно  $100 \text{cm}^{-3}$ .

Поскольку зарегистрированные в экспериментах пузырьки выросли из зародышей меньших размеров, была предпринята попытка реконструкции, т.е. расчета начальных размеров зародышей пузырьков из

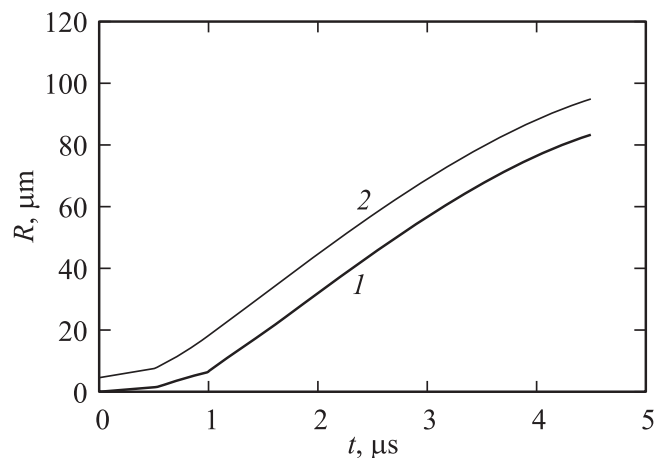


**Рис. 2.** *a* — осциллограммы давления  $P$  в исследуемой области при различных амплитудах ударной волны; *b, c* — кавитация в масле с песком для двух разных экспериментов при амплитуде  $l$  в момент времени  $t_d = 50.4 \mu\text{m}$ .

решения следующего дифференциального уравнения:

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4}{\rho} \frac{\eta}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2}{\rho} \frac{\sigma}{R} = \frac{1}{\rho} (P_{in} - P_{out}),$$

где  $R$  — текущий радиус пузырька,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\eta$  — вязкость,  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $P_{in}$  — внутреннее давление в пузырьке,  $P_{out}$  — внешнее давление. При этом реальный профиль волны давления был идеализирован по сравнению с экспериментальными данными (рис. 2, *a*), т. е. было принято, что внешнее давление уменьшалось



**Рис. 3.** Расчетная зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени. Радиус зародыша: 1 —  $0.5 \mu\text{m}$ , 2 —  $5 \mu\text{m}$ .

до  $-1.1 \text{ МПа}$  за  $2 \mu\text{s}$ , а затем за  $2 \mu\text{s}$  восстанавливалось до нулевого значения и было постоянным еще в течение  $2.4 \mu\text{s}$  вплоть до момента регистрации. Результаты расчета динамики пузырька представлены на рис. 3. Видно, что скорость роста пузырька мала как на начальной стадии роста, когда влияет поверхностное натяжение, так и после окончания импульса отрицательного давления, когда пузырек растет за счет инерции. Сопоставление размеров зарегистрированных пузырьков с расчетными размерами зародышей, из которых они развились, позволяет сделать вывод о том, что видимые пузырьки появились из зародышей микронных и субмикронных размеров, которые существовали до момента воздействия волны давления.

Таким образом, впервые проведены экспериментальные исследования, подтверждающие существование зародышей микропузырьков микронных и субмикронных размеров в трансформаторном масле. Показано, что количество микропузырьков в ТМ в значительной степени зависит от наличия механических загрязнений: для ТМ с КПЧ-8 их концентрация менее  $100 \text{ см}^{-3}$ , в то время как для ТМ с КПЧ, равным 13, наличие микропузырьков концентрацией порядка  $1000 \text{ см}^{-3}$  не вызывает сомнений.

**Список литературы**

- [1] *Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
- [2] *Бесов А.С., Кедринский В.К., Пальчиков Е.И.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 16. С. 23–27.
- [3] *Санкин Г.Н., Тесленко В.С.* // ДАН. 2003. Т. 393. № 6. С. 762–765.