

## ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ АВАРИЙНОГО СМЕШЕНИЯ ЖИДКИХ СРЕД\*

Д.В. Волосников<sup>1</sup>, П.В. Скрипов<sup>2</sup>

*Институт теплофизики УрО РАН (1);  
Уральский институт Государственной  
противопожарной службы МЧС России (2)*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Пономаревым*

**Ключевые слова и фразы:** короткоживущие состояния; масла и летучие примеси; спонтанное вскипание; управляемый импульсный нагрев.

**Аннотация:** Представлена методика термостабилизации импульсно перегретого зонда с характерным временем опыта  $10^{-3}$  с для контроля типичных летучих примесей в маслах теплоэнергетического и холодильного оборудования, а также в моторных маслах. В опыте масло нагревалось по заданной траектории (в координатах время – температура) вплоть до его спонтанного вскипания. Обнаружена взаимосвязь параметров теплообмена зонда с типом масла и содержанием примеси. Область изменения содержания примеси составляла от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  масс. доли.

---

### Введение

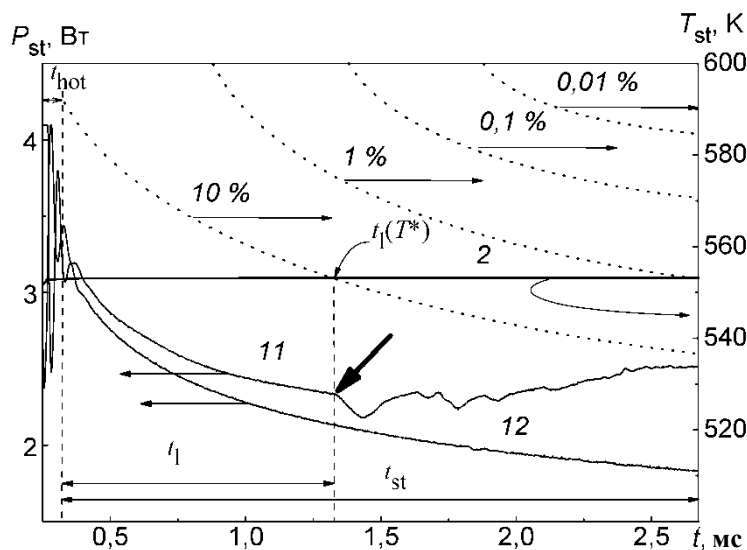
История развития экспериментальных методов определения теплофизических свойств жидких сред насчитывает сотни последователей и тысячи работ [1–3]. Несмотря на многообразие методов, обычные теплофизические измерения сводятся к регистрации отклика на небольшое температурное возмущение в исследуемом образце  $\delta T(t) = T(t) - T_0 \sim 1 \dots 0$  К, где  $T_0$  – начальная температура,  $t$  – время. Такой подход позволяет получать данные о равновесных тепловых свойствах в зависимости от параметров состояния (температуры и давления).

Для моделирования процессов с мощным тепловыделением важно уметь сопоставлять свойства импульсно перегретых жидкостей и контролировать изменение их исходного состава. Последнее актуально при создании систем автоматического предупреждения аварийных ситуаций в работе различного маслonaполненного оборудования.

Одна из проблем, возникающих при работе маслonaполненного оборудования, заключается в постепенном или залповом загрязнении рабочих тел летучими добавками. Известно, что незначительное наличие опасной добавки может привести к аварийной ситуации [4]. Попадание влаги в трансформаторное масло вызывает его окисление и может способствовать пробоем изоляторов. Загрязнение водой масла в турбоагрегатах на электростанциях вызывает локальный перегрев и аварийное отключение генерирующих машин. В двигателях автомобилей опасными добавками являются топливо и охлаждающая жидкость, действие которых может вызывать течь сальников или перегрев и заклинивание двигателя.

---

\*Избранные доклады Международной теплофизической школы МТФШ–6, Тамбов, ТГТУ, 2007 г.



**Рис. 1. Обобщенная схема опыта по обнаружению летучих примесей в маслах.** Линия 2 – температура зонда  $T_{st}(t) = 553$  К. Значение мощности  $P(t, T_{st})$  зависит от содержания примеси. Кривая 12 – чистое масло, кривая 11 – масло с 10 %-й примесью. Штриховые линии показывают изменение времени жизни масла с температурой для различного содержания примеси. Проценты (объемные) – уровень примеси в масле.  $t_l$  – время жизни масла до вскипания после выхода на режим. Стрелочка указывает на момент вскипания

Наша задача состояла в применении опыта импульсного теплового зондирования сложных жидкостей [5] к обнаружению летучих примесей в маслах. Ее решение может послужить важным дополнением к известным методам контроля содержания влаги в маслах.

Для решения задачи была выбрана методика термостабилизации импульсно нагретого зонда [6]. Суть методики состоит в создании кратковременных изотермических условий в веществе, перегретом относительно исходной температуры. В опыте регистрируется электрическая мощность  $P(t, T_{st})$ , необходимая для термостабилизации зонда при избранной температуре  $T_{st}(t) > T_0$ . Подход обеспечивает пропорциональное увеличение амплитуды сигнала-отклика с перегревом и позволяет определять время жизни жидкости при заданной температуре до вскипания  $t_l$ . Момент вскипания отмечается характерным возмущением хода опытной величины  $P(t, T_{st})$  (рис. 1). Установив взаимосвязь между параметрами теплообмена в опыте с изменениями состава вещества, можно разработать датчики аварийного смешения масел с летучими примесями в диапазоне концентраций  $10^{-2} \dots 10^1$  % (об.).

### Метод термостабилизированного импульсного нагрева зонда

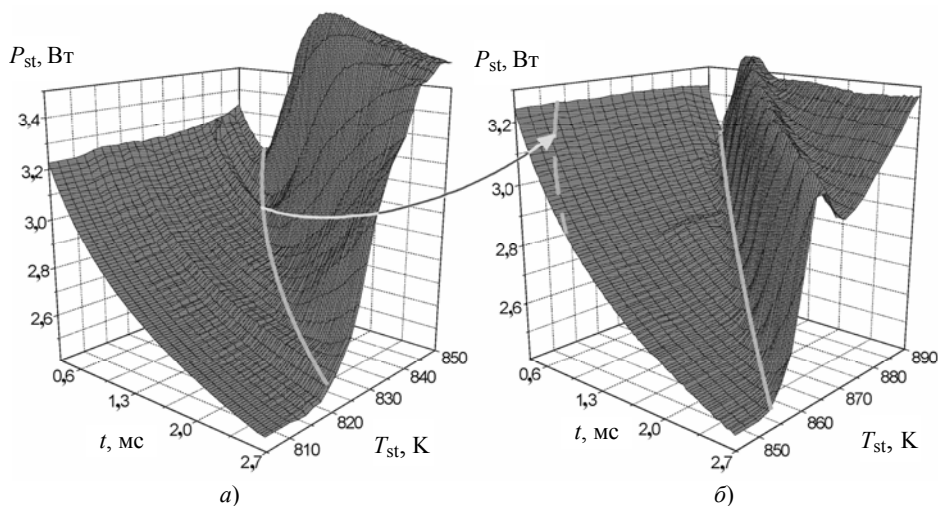
Суть метода (см. рис. 1) заключается в быстром нагреве зонда за время порядка  $t_{hot} \sim 10^{-4}$  с до выбранного значения температуры и дальнейшем поддержании этого значения температуры в выбранном интервале времени  $T_{st}(t > t_{hot}) \approx const$ . Характерное время эксперимента составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  с. В опыте регистрируется величина электрической мощности нагрева зонда  $P(t, T_{st})$ , необходимая для поддержания постоянной температуры зонда. Повышение величины перегрева ( $T_{st}(t) - T_0 \sim (2 \dots 4) \cdot 10^2$  К) сопровождается повышением чувствительности методики.

Метод позволяет работать не только в области устойчивых состояний масла, то есть ниже температуры начала его терморазрушения в квазистатическом процессе  $T_{d\infty} = T_d(t \rightarrow \infty)$ , но и в области короткоживущих состояний  $T_{d\infty} < T_{st}(t) < T^*$ , где  $T^*$  – температура спонтанного вскипания масла в импульсном процессе (см. рис. 1). Нами обнаружено, что значение  $T^*$  масла сильно зависит от содержания примесей. Наличие воды, топлива или охлаждающей жидкости резко сокращает время нахождения масла в области короткоживущих состояний.

### Проведение эксперимента

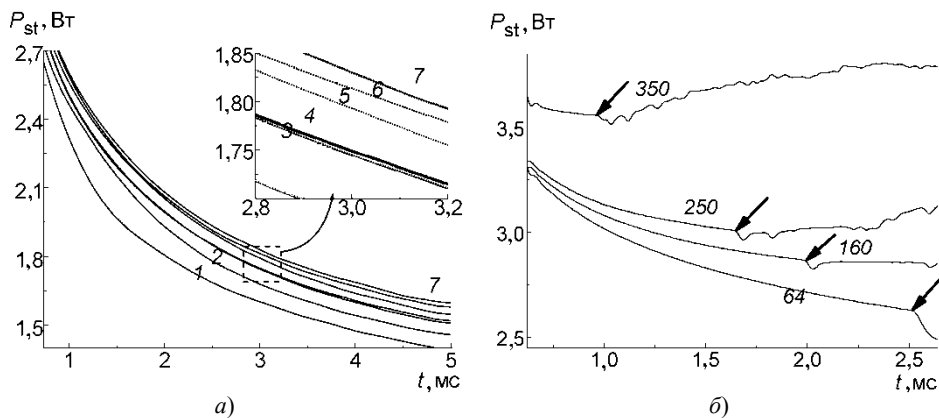
Первые опыты были поставлены на узкофракционированном полипропиленгликоле ППГ-2000 производства фирмы Lancaster. Первый образец был взят без предварительной подготовки («как поставлено») и содержал около 0,8 % масс. влаги. Второй образец получен путем вакуумирования первого образца при температуре 70 °С. Длительность отгонки контролировалось по прекращению повышения температуры вскипания вещества во времени [7]. Экспериментальные данные для этих образцов представлены на рис. 2. Каждая поверхность состоит из значений электрической мощности  $P(t)$ , необходимой для поддержания избранных значений температуры термостабилизации  $T_{st}(t)$ , в зависимости от времени. Значение температуры  $T_{st}$  является параметром и изменяется от опыта к опыту. Присутствие влаги вызывает сокращение времени жизни вещества при заданной температуре (см. сплошную и пунктирную линии на рис. 2).

Следующая серия опытов была проведена для образцов чистых моторных масел и масел с определенным содержанием летучих примесей (бензина А-92 или тосола felix-40). На рис. 3, а представлены экспериментальные кривые теплообмена зонда со средой  $P(t; T_{st})$ , при выбранном значении температуры  $T_{st} = 280$  °С для группы энергетических масел (кривые 1 и 2) и группы моторных масел (кривые 3–7). Существенная разница между значениями  $P(t; T_{st})$  для этих групп масел указывает на возможность выявления контрафактных синтетических моторных масел. Для образцов 5–7 на рис. 3, а были проведены опыты с набором концентраций бензина или тосола в диапазоне 1...15 %. Температура термостабилизации зонда в импульсе составляла  $T_{st} = 280$  °С. Увеличение доли летучего компонента



**Рис. 2. Изменение электрической мощности, необходимой для термостабилизации зонда в полипропиленгликоле ППГ-2000 при различных температурах.**

Сплошные линии на графиках отделяют области интенсивного вскипания для образца с уровнем влагосодержания 0,8 % масс. (а) и для вакуумированного образца (б)



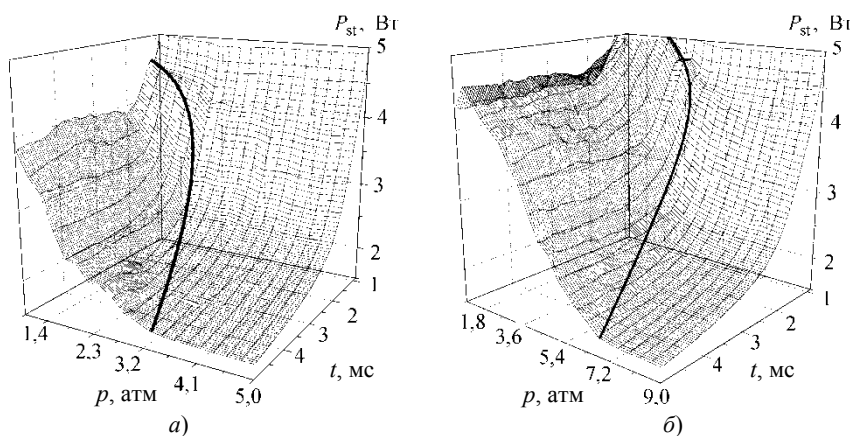
**Рис. 3. Изменение электрической мощности, необходимой для термостабилизации зонда:**

*a* – в энергетических (1–2) и моторных (3–7) маслах,  $T_{st} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 1 – трансформаторном; 2 – турбинном Тп-22С; 3 – shell helix 15w40;  
 4 – shell helix plus 10w40; 5 – total quartz 9000 5w40; 6 – shell helix ultra 5w40;  
 7 – texaco havoline 5w40; *б* – в холодильном масле Bitzer BSE 32,  $T_{st} = 488\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 числа у кривых дают содержание влаги в граммах на тонну масла

приводило к систематическому повышению амплитуды греющего импульса  $P(t; T_{st})$  и сокращению времени жизни системы при заданной температуре.

Известно, что температура спонтанного вскипания масла зависит от внешнего давления [8]. При повышении давления значения температуры в опыте  $T_{st}$  могут быть повышены. На рис. 4 приведены результаты опытов, которые демонстрируют возможность обнаружения добавки топлива в масле для диапазона рабочих давлений двигателя.

Были проведены опыты по обнаружению влаги в энергетических и в холодильных маслах на уровне сотых-тысячных долей процента. На рис. 3, б представлены данные для четырех обводненных образцов компрессорного масла Bitzer BSE 32. Температура термостабилизации зонда в импульсе составляла  $T_{st} = 488\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Влагосодержание в образцах было измерено в специализированной



**Рис. 4. Электрическая мощность, необходимая для термостабилизации зонда при  $T_{st} = 454\text{ }^{\circ}\text{C}$  в исходном синтетическом масле total quartz 9000 5w40 (а) и при добавлении в него 4 % бензина (б). От импульса к импульсу меняется внешнее давление. Сплошные линии отделяют области интенсивного вскипания**

региональной лаборатории по контролю качества масел. Погрешность лабораторного метода составляет 1 ppm. Подобные опыты с обводненными образцами турбинного и трансформаторного масел показали возможность обнаружения влаги в маслах на уровне 0,001 %.

### Заключение

Показана возможность применения методики импульсного нагрева зонда в режиме термостабилизации для тепловой диагностики сложных жидких систем. Планируется исследовать применимость метода управляемого импульсного нагрева к обнаружению типичных примесей в различных видах топлива (бензин, авиационный керосин).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ «Ведущие научные школы», проект НШ – 4429.2006.8 и РФФИ, проект 07-08-96048\_Урал.*

#### Список литературы

1. Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей / Л.П. Филиппов. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1970. – 240 с.
2. Григорьев, Б.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций / Б.А. Григорьев, Г.Ф. Богатов, А.А. Герасимов. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1999. – 370 с.
3. Метод и измерительное устройство для исследования теплофизических характеристик жидких полимерных материалов при сдвиговом течении / С.В. Мищенко [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т. 15, № 1А. – С. 14–22.
4. Балашов, А.М. Загрязненность масла как причина разрушения турбоагрегата / А.М. Балашов // Вести в электроэнергетике. – 2004. – № 4. – С. 44–64.
5. Исследование фазовой диаграммы и теплофизических свойств систем масло-хладагент методом импульсного нагрева / В.П. Железный [и др.] // Холодильн. техника и технология. – 2003. – Т. 85, № 5. – С. 29–33.
6. Скрипов, П.В. Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях / П.В. Скрипов, А.А. Старостин, Д.В. Волосников // Докл. акад. наук. – 2003. – Т. 390, № 2. – С. 192–195.
7. Heat Pulse Monitoring of Curing and Polymer-Gas Systems / P.V. Skripov, S.E. Puchinskis, V.P. Begishev, A.I. Lipchak, P.A. Pavlov // J. Appl. Polym. Sci. – 1994. – V. 51. – P. 1607–1619.
8. Comparison of Thermophysical Properties for Oil/Refrigerant Mixtures by Use of Pulse Heating Method / P.V. Skripov, A.A. Starostin, D.V. Volosnikov, V.P. Zhelezny // Int. J. Refrig. – 2003. – V. 26. – P. 721–728.

---

### Impulse Thermo-Physical Control over Accidental Mixing of Liquid Media

D.V. Volosnikov<sup>1</sup>, P.V. Skripov<sup>2</sup>

*Institute of Thermal Physics, Urals Branch of RAS (1);*

*Urals Institute of State Fire-Fighting Service of Ministry of Emergency of Russia (2)*

**Key words and phrases:** controlled impulse heating; oil and volatile impurity; short-lived states; spontaneous boiling.

**Abstract:** The technique of thermo-stabilization of impulse-overheated probe with specific experience time  $10^{-3}$  is applied to control over typical volatile impurities in oil used for thermo-energetic and refrigerator equipment and motor oil. During the experiment oil was heated according to the given trajectory (in time – temperature coordinates) until its spontaneous boiling. The interrelationship between probe heat transfer parameters and the type of oil and impurity content is revealed. The area of changing impurity content varies from  $10^{-4}$  to  $10^{-1}$  of mass concentration.

---

### **Wärmephysikalische Impulskontrolle der Notvermischung der Flussmittel**

**Zusammenfassung:** Es ist die Methodik der Thermostabilisierung der überhitzten Sonde mit der charakteristischen Versuchszeit  $10^{-3}$  dargelegt. Sie ist für die Kontrolle der typischen flüchtigen Beimischungen in den Ölen der wärmeenergetischen Anlagen und der Kühlanlagen, und auch in den Motorölen verwendet. Während des Versuches wurde das Öl nach der aufgegebenen Trajektorie (in den Koordinaten die Zeit – die Temperatur) bis zu seinem spontanen Aufkochen erwärmt. Es ist die Wechselbeziehung der Parameter des Wärmeaustausches der Sonde mit dem Typ des Öls und mit dem Gehalt der Beimischung entdeckt. Das Gebiet der Veränderung des Gehaltes der Beimischung bildete von  $10^{-4}$  bis zu  $10^{-1}$  Massenanteile zusammen.

---

### **Contrôle thermophysique d'impulsion du mélange de dépannage des milieux liquides**

**Résumé:** Est présentée la méthode de la thermostabilisation de la sonde surchauffée d'impulsion avec une expérience caractéristique du temps  $10^{-3}$  avec l'emploi pour le contrôle des additions volatiles typiques dans les huiles de l'équipement thermoénergétique et frigorifique, ainsi que dans les huiles de moteur. Dans l'expérience l'huile se rechauffait jusqu'à la trajectoire donnée (dans les coordonnées temps – température) jusqu'à l'ébullition spontanée. Est trouvée la liaison mutuelle des paramètres de l'échange thermique de la sonde avec le type de l'huile et le contenu de l'addition. Le domaine du changement du contenu de l'addition était de  $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  des masses de la part.

---