

*На правах рукописи*

ШАНГИН Виктор Владимирович

**ИМПУЛЬСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ЖИДКОСТИ КАК МЕТОД  
ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ПРИМЕСЕЙ  
В МАСЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность: 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

С появлением первых теплотехнических устройств возникла необходимость исследования теплофизических свойств применяемых рабочих тел. Естественное стремление к интенсификации теплотехнических процессов обусловило повышение требований к уровню наших знаний о свойствах жидкостей в процессах с мощным тепловыделением. **Предметом** данного исследования является теплообмен в системе “нагреватель-зонд, погруженный в изучаемое вещество”, в условиях заданного импульсного тепловыделения применительно к задаче быстрой оценки кратковременной термоустойчивости многокомпонентных сред в зависимости от состава среды, температуры и длительности воздействия. **Объектами** исследования служили технические образцы масел, применяемых в оборудовании Среднеуральской ГРЭС (СУГРЭС), насыщенные водяным паром или паром двуокиси углерода. Постановка задачи и ее решение осуществлены при взаимодействии со специалистами службы наладки теплотехнического оборудования филиала ОАО “ТГК-9” “Инженерно-технический центр Свердловской области” и лаборатории физико-химического контроля качества масел ОАО “Свердловэлектроремонт”. **Задача** предусматривала создание методики тестирования технических масел на устойчивость к заданному термическому воздействию и метода мониторинга летучих примесей, чувствительного к содержанию влаги в интервале 10-50 г/т (граммов влаги в тонне масла) для трансформаторного масла и 10-150 г/т для турбинного масла.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ-Урал «Исследование теплофизических свойств многокомпонентных жидкостей применительно к рабочим телам энергетического оборудования Свердловской области» (№ 07-08-96048).

**Актуальность темы.** Свойства масла при повышенных температурах существенно определяют надежность теплоэнергетического оборудования. Практически не изучен вопрос о взаимосвязи изменения состава масла с его кратковременной термоустойчивостью<sup>1</sup> в условиях локальных тепловыделений, характерных для ключевых точек маслосистемы агрегата (подшипники, изоляция,

---

<sup>1</sup> для краткости, далее по тексту – просто «термоустойчивость»

магнитопроводы). Известная проблема связана с изменением состава (следовательно, и свойств) масла, как в теплотехнических процессах, так и в процессах транспортировки, хранения и регенерации масла. Укажем, для примера, на аэрацию и обводнение масла при работе турбоагрегатов и компрессоров тепловых электростанций, образование агрессивных кислот в обводненном масле, терморазрушение углеводородных компонентов в термически напряженных циклах. Загрязнение масла летучими примесями, наиболее опасной из которых считается влага, вызывает непропорционально сильное снижение качества масла, в том числе, его термоустойчивости. Несвоевременность принятия мер в таких условиях может приводить к отказу техники.

Данные обстоятельства послужили мотивацией для разработки **нового подхода** к обнаружению летучих примесей в маслах, основанного на анализе отклика на кратковременное ( $t \sim 10^{-3}$  с) мощное тепловое воздействие **со строго задаваемыми параметрами** на малый объем (менее  $0,1 \text{ мм}^3$ ) образца. Идея подхода опирается на результаты исследования явления достижимого перегрева систем с ограниченной взаимной растворимостью компонентов – растворов, эмульсий и многокомпонентных жидкостей – в процессах импульсного нагрева и основана на выявленной взаимосвязи термоустойчивости импульсно нагретого микрообъема образца масла с содержанием в нем летучих примесей.

**Цель работы** состояла в исследовании термоустойчивости технических масел в зависимости от их состава, температуры и длительности воздействия и в разработке основы импульсного метода сопоставления термоустойчивости масел применительно к задаче быстрого обнаружения летучих примесей в маслах теплоэнергетического оборудования. Требования к методу включают быстроедействие, чувствительность к малому содержанию летучих примесей вне зависимости от природы примеси ( $\sim 0,001$  % по воде), незначительность методически вносимого возмущения; требования к устройству включают технологическую совместимость, автономность и удобство его применения.

### **Научная новизна:**

1. Выявлены температурно-временные условия нарушения термоустойчивости масел, импульсно нагреваемых до заданного значения температуры.
2. В опытах по импульсному нагреву масел в различных условиях тепловыделения найден режим нагрева, обеспечивающий сильный и воспроизводимый сигнал-отклик на появление в исходно чистой системе летучей примеси, в том числе, следов влаги (на уровне  $10^{-3}$  % для воды). Большой масштаб полезного сигнала, превышающий уровень шумов на порядок величины, создал предпосылки надежной работы разработанного устройства непосредственно в условиях производства.
3. Получена новая информация о влиянии малых добавок влаги, имплантируемых в масло из паровой фазы, на термоустойчивость масел в актуальной для энергетики области концентраций.
4. Разработан метод обнаружения летучих примесей в маслах с характерным временем измерения  $10^{-3}$  с, основанный на соотношении измеряемых данных по интенсивности теплообмена и термоустойчивости масел с массивом калибровочных значений.

**Достоверность результатов** обеспечивается: опорой методики на строго доказанные выводы теории перегретого состояния вещества, положения которой нашли применение в работе; проверкой методики на различных объектах; сопоставлением результатов контрольных опытов, проведенных соискателем, с результатами стандартных лабораторных испытаний на сертифицированном оборудовании, рекомендованных к применению в диагностических лабораториях предприятий энергетики; использованием для оценки погрешностей измерения электрических величин устройств, внесенных в Государственный реестр средств измерений; сопоставлением результатов контрольных измерений с результатами других авторов; обсуждением результатов диссертации на конференциях, получением рецензий от ведущих специалистов, использованием методики в практике с оценкой надежности результатов.

**Практическая значимость** нашей разработки обусловлена ее применимостью для мониторинга состояния масла в маслосистеме агрегата. Подобные устройства востребованы как на стадиях производства, хранения, транспортировки продукции, так и на стадиях заправки агрегата (входной контроль) и его эксплуатации (текущий контроль). Результаты измерений термоустойчивости масла формально соотносятся с концентрацией выбранной летучей примеси, но свидетельствуют не только о содержании примеси (например, вода в масле может существовать в различных формах с собственным уровнем опасности), а дают прямую оценку опасности *“термического пробоя”* масла, то есть, внезапного нарушения сплошности. Испытания показали, что созданное на основе защищаемого метода устройство, в соответствии с системой практических рекомендаций, может служить элементом системы контроля масел теплоэнергетического оборудования.

**Автор защищает:**

- методику импульсного теплового тестирования термоустойчивости масел;
- результаты исследования кратковременной термоустойчивости масел в условиях импульсного тепловыделения;
- метод обнаружения летучих примесей, растворенных в маслах, основанный на соотнесении измеряемых данных по интенсивности теплообмена и термоустойчивости масел с массивом калибровочных значений;
- рекомендации по практическому применению разработанного метода и устройства на примере теплотехнического оборудования СУГРЭС.

**Личный вклад автора.** Все представленные в работе результаты, от разработки методики измерений, создания испытательного стенда, проведения калибровочных измерений и измерений на действующем оборудовании, обработки результатов опытов, модернизации устройства и разработки методики его применения, подготовки основных публикаций до адаптации устройства к работе в условиях электростанции, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на III международной конференции (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007 г.) «Актуальные проблемы энергетики», 6-й и 7-й международной теплофизической школе (Тамбов, ТГТУ, 2007 и 2010 гг.), «Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством», международной конференции «Связь-Пром 2008» (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008 г.), II, III и IV Всероссийских конференциях (Екатеринбург, УрО РАН, 2008, 2009 и 2011 гг.) «Безопасность критических инфраструктур и территорий», I и II конференциях (Улан-Удэ, БГУ) «Наноматериалы и технологии», международных конференциях (Санкт-Петербург, СПбГУНиПТ, 2010 и 2012 г.) «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ», XIII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-13, Новосибирск, 2011 г.), 18<sup>th</sup> Symposium on thermophysical properties (Boulder, CO, USA, 2012), VIII Всероссийском семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике (Екатеринбург, УрФУ, 2013 г.).

**Публикации.** Материалы диссертации изложены в 17 работах, включая 5 работ в рекомендованных ВАК изданиях и 12 статей и тезисов докладов в сборниках научных трудов и материалов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы; содержит 154 страниц текста, включая 72 рисунка. Список литературы содержит 87 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и практическая значимость исследования, намечена его цель и осуществлен выбор пути ее достижения, представлена структура диссертации.

**В первой главе** даны сведения о перегретом и термонеустойчивом состояниях жидкости, введено понятие достижимого в опыте перегрева ( $T^* - T_s$ ), где  $T^*(p)$  – температура спонтанного вскипания жидкости,  $T_s(p)$  – температура равновесия жидкость-пар при заданном давлении  $p$ . Сопоставлены различные методики импульсного нагрева применительно к решению поставленной задачи. Представлены результаты изучения термоустойчивости масел, перегретых

относительно температуры начала их терморазрушения в квазистатическом процессе  $T_d$ .

Суть измерений состоит в записи параметров отклика на импульсное тепловыделение в масле при заданных параметрах функции нагрева. Источником тепла и одновременно чувствительным элементом служит тонкий проволочный зонд – термометр сопротивления, сопряженный со средой по температуре и по тепловому потоку. Измеряемыми в опыте параметрами служат, в зависимости от типа методики, напряжение разбаланса мостовой схемы или падение напряжения на зонде и на образцовом резисторе. По этим данным вычисляются значения среднemasсовой температуры зонда  $T(t)$ , мощности его нагрева  $P(t)$ , плотности теплового потока через его поверхность  $q(t)$  и теплового сопротивления вещества  $R_\lambda(t) = \Delta T(t)/q$  при заданном режиме нагрева [ $T(t)$  или  $P(t)$ ] для любого момента времени  $t$ . В опытах сопоставляются амплитудные и временные параметры отклика, регистрируемого в испытуемых образцах масла и в некоторых калибровочных образцах с известным содержанием примеси ( $c$ ).

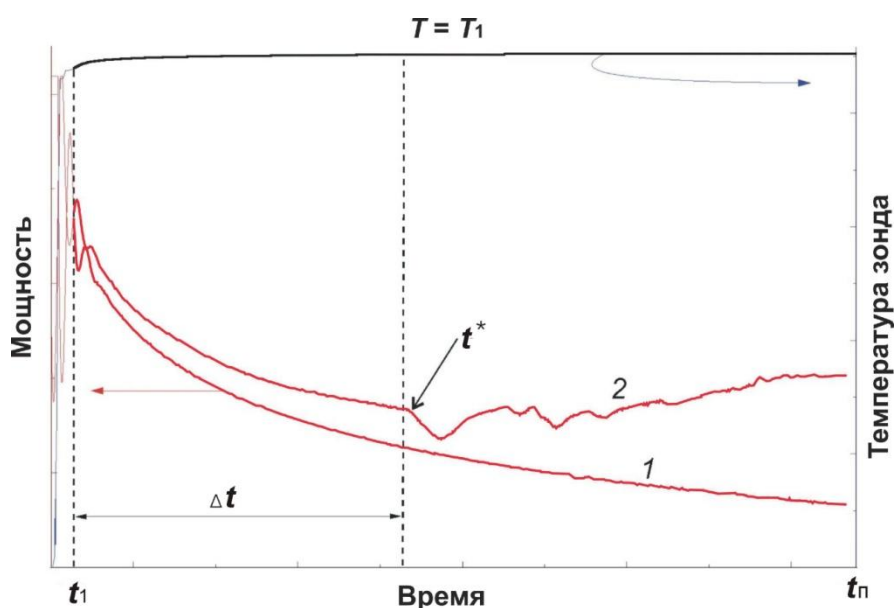


Рис. 1. Схема опыта в режиме термостабилизации зонда: изменение мощности нагрева, необходимой для нагрева зонда до заданной температуры  $T_1$  ( $t \leq t_1$ ), и его термостабилизации ( $t > t_1$ ) при температуре  $T_1$ , в термоустойчивом (кривая 1) и неустойчивом (кривая 2) образце. Здесь и далее значение  $t^*$  отмечает момент нарушения сплошности системы  $t^* = t^*(c; T_1)$ .

Сопоставление проводится для не вполне устойчивого состояния вещества, перегретого не только относительно температуры  $T_s$  летучей примеси, но и относительно температуры ее достижимого перегрева  $T_{л*}$ . Значения температуры



зонда на участке измерений выбираются в области температур между  $T_{л}^*$  и  $T_{м}^*$ , где индекс «м» относится к чистому маслу.

В опытах по монотонному импульсному нагреву со средней скоростью  $10^6$  К/с значения температуры  $T_{м}^*(p = 0,1 \text{ МПа})$  изученных нами минеральных масел изменялись в пределах от  $\sim 700 \text{ К}$  (трансформаторное масло) до  $\sim 850 \text{ К}$  (касторовое масло).

В общем случае, значение  $T_{м}^*$ , вследствие вовлеченности в процесс явлений терморазрушения и микрофазового разделения компонентов масла со своими характерными временами, зависит от длительности и траектории (в координатах  $t - T$ ) нагрева. В этой связи, были проведены опыты с маслами при различных траекториях их импульсного нагрева. Основные результаты были получены в режиме термостабилизации зонда, импульсно нагреваемого до заданного значения температуры  $T_1$  за время  $t_1$ ,  $T_1 = T(t > t_1) \approx const$  (рисунок 1).

В рамках этого режима, обеспечившего повторяемость температурных условий в серии опытов с набором образцов, были введены качественная и количественная характеристики термоустойчивости масла. Факт порогового нарушения сплошности системы, отмечаемый по моменту возмущения монотонного хода сигнала-отклика  $t = t^*$ , был принят за признак нарушения ее термоустойчивости. В качестве количественной характеристики была принята продолжительность жизни системы при заданной температуре  $t_L(T = T_1) = t^* - t_1$  до момента нарушения ее сплошности.

Опыт показал, что турбинное масло обладает меньшим тепловым сопротивлением, чем трансформаторное масло, во всей изученной области температур, включая область термонеустойчивости вещества, недоступную для исследований квазистатическими методами. Выяснено, что нарушение термоустойчивости масел при пошаговом повышении значения  $T_1$  начинает проявляться в сосредоточенном по температуре интервале, см. рисунки 2 и 3. Этот результат дает основания для введения термина «температура потери термоустойчивости масла  $T_1^*$ » применительно к данным условиям нагрева.

Выяснено, что режим термостабилизации зонда позволяет решить задачу обнаружения летучих примесей в маслах. Информативным оказалось сопоставление параметров отклика как на участке их плавного изменения ( $T_1 < T_1^*$ ), см. рисунок 4, за счет повышения интенсивности теплообмена при обводнении масла, так и на участке нарушения термоустойчивости, в виду систематического снижения температуры  $T_1^*$  в процессе обводнении масла и характерного возмущения сигнала-отклика при  $t > t^*(c)$ , где  $c$  – содержание влаги.

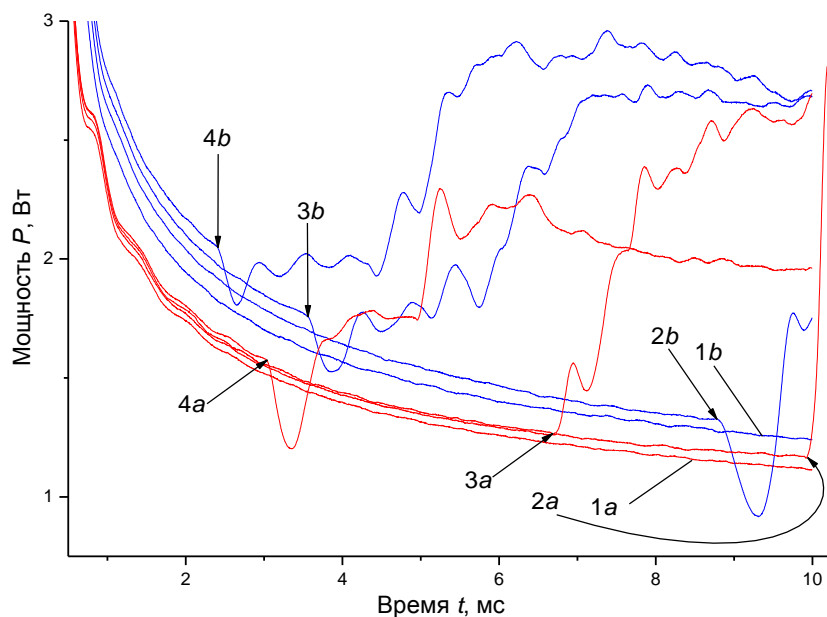


Рис. 2. Изменение мощности нагрева, необходимой для термостабилизации зонда в турбинном (синие линии) и трансформаторном (красные линии) масле при различных значениях характерной температуры зонда  $T_1$  [°C]: 380 (1a); 385 (2a); 386 (3a); 387 (4a); 401 (1б); 421 (2б); 425 (3б); 426 (4б).

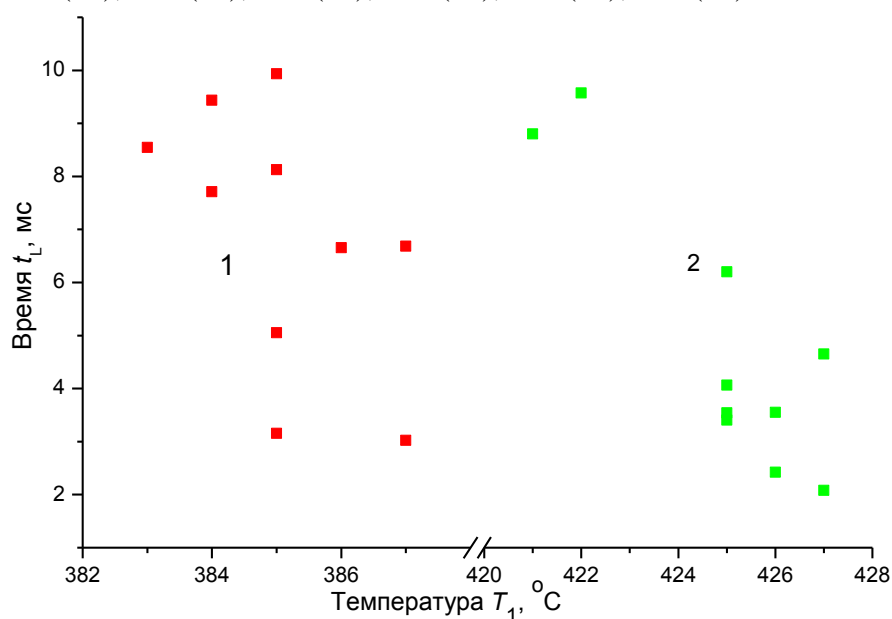


Рис. 3. Опытные значения продолжительности жизни  $t_L(T_1)$  трансформаторного (точки 1) и турбинного (2) масел при различных значениях характерной температуры  $T_1$ .

Обнаружено, что именно в условиях поддержания перегрева ( $T_1 > T_d$ ) формируется отчетливый отклик на появление в системе низкомолекулярного компонента вне зависимости от природы компонента. Этот фундаментальный результат и составил основу нашего подхода к обнаружению летучих примесей в маслах. Существенная крутизна зависимости  $T_1^*(c)$ , обнаруженная для данного режима нагрева, и значительное изменение площади под кривой  $P(t)$  при вскипании рассматриваются нами как обстоятельства, способствовавшие увеличению чувствительности метода к присутствию летучих примесей, в том числе, на уровне единиц граммов влаги в 1 тонне масла. В итоге, искомый тепловой режим зонда был построен на основе методики термостабилизации.

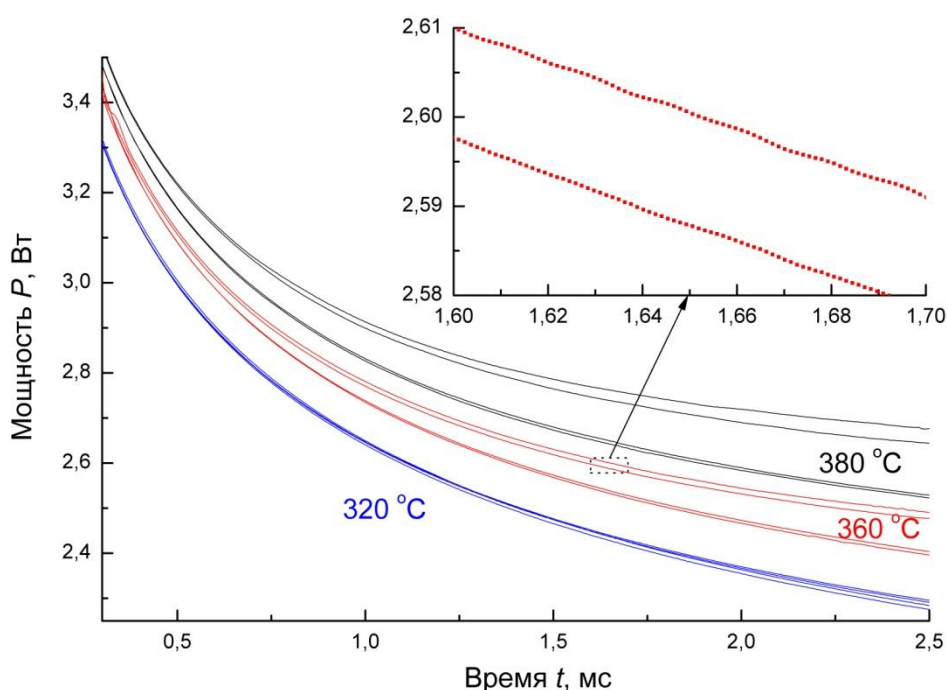


Рис. 4. Опыт в режиме термостабилизации при  $t > t_1$ : изменение мощности нагрева, необходимой для термостабилизации зонда при избранной температуре, в турбинном масле. Параметрами служат значения температуры  $T_1$  (цифры у кривых) и содержания влаги (30, 32, 36 и 38 г/т, соответственно, снизу вверх для кривых одного цвета).

**Во второй главе** описан теплофизический аспект метода косвенного контроля летучих примесей и блок-схема устройства для его осуществления. Обоснован выбор теплового режима зонда. Исходя из условия задачи, предусматривающего возможность применения устройства «на месте», система непрерывной обратной связи в методике термостабилизации была заменена на последовательность из двух импульсов нагрева с различной амплитудой и с

возможностью включения паузы между ними, обеспечивающую двукратный нагрев зонда до избранного значения температуры, см. рисунок 5.

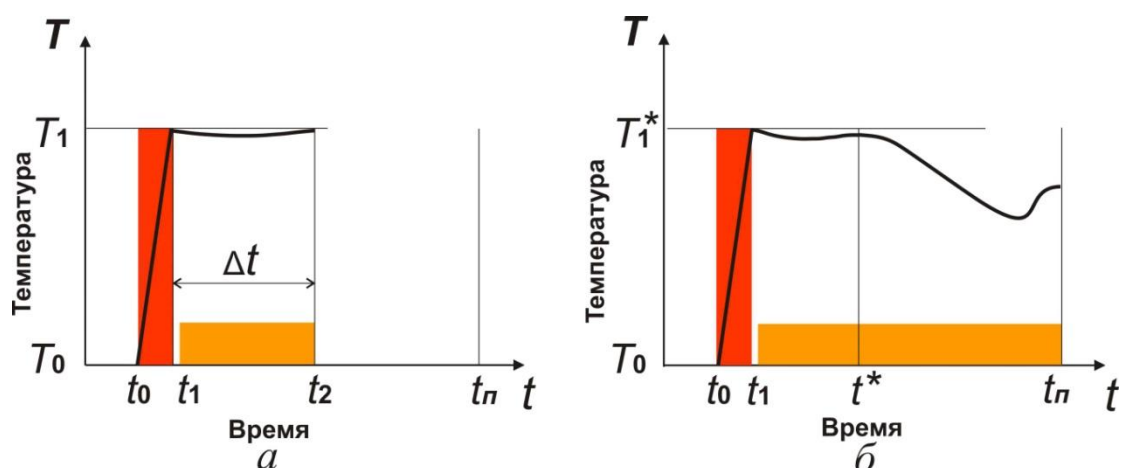


Рис. 5. Характерные траектории нагрева зонда в жидкости при условиях  $t_2 < t_{\Pi}$  (рис. а) и  $t_2 > t_{\Pi} > t^*$  (рис. б). Здесь  $t_1$  и  $t_2$  – моменты баланса моста, между которыми осуществляется отсчет времени;  $t_{\Pi}$  – полная продолжительность нагрева. Длительности участков нагрева ( $t_0 \div t_1$ ) и измерения ( $\Delta t$ ) составляют  $10^{-5}$  с и  $10^{-3}$  с, соответственно. Тенью условно показано соотношение мощностей нагрева на первом и втором участке.

Идея метода основана на возможности оценки термоустойчивости импульсно нагретой жидкости (“да”/“нет”) по значению температуры нарушения сплошности контакта жидкости с поверхностью зонда  $T_1^*$ . Временным масштабom задачи служит значение  $t_{\Pi}$ , выбираемое в пределах 10-20 мс. Пространственным масштабom задачи служит толщина прогретого слоя, составляющая в наших опытах с маслами единицы микрометров.

Нагрев зонда производится двумя импульсами с существенно различной мощностью. На первом этапе осуществляется быстрый перевод жидкости в область повышенной чувствительности отслеживаемого в опыте параметра к содержанию летучих примесей. За отрезок времени  $t_0 \div t_1$  температура зонда, а, следовательно, и температура пристеночного слоя жидкости возрастают до избранного значения температуры  $T_1 \rightarrow T^*$ , см. рисунок 5-а. Здесь  $T^*$  – температура спонтанного вскипания образца хорошо определенного состава, например, чистого масла. Это значение принимается за границу сверху для задаваемых в опыте значений  $T_1$ . Второй этап, за счет ступенчатого изменения мощности нагрева при  $t = t_1$ , состоит из процесса «остывание зонда – повторный нагрев до значения  $T_1$ ». Этот этап является измерительным. Действительно, длина

отрезка  $\Delta t(T_1) = t_2 - t_1$  при заданной функции нагрева, выбранная в качестве измеряемого параметра, зависит от интенсивности теплообмена зонда со средой, в итоге, и от содержания летучих примесей. Выбор мощности нагрева на втором импульсе осуществляется таким образом, чтобы значение  $t_{\Pi}$  не достигалось в области термоустойчивости жидкости.

Очевидно, что при повышении концентрации летучей примеси  $c$  время жизни жидкой фазы при заданном значении  $T_1$  сокращается. На определенном шаге приращения значения  $c$  момент вскипания *впервые* попадает в измерительный интервал, т.е. начинает выполняться условие  $t^* < t_{\Pi}$  (рисунок 5-б), эквивалентное условию потери термоустойчивости жидкости. Вскипание сопровождалось резким повышением интенсивности теплообмена зонда со средой, что приводило к скачкообразному увеличению значения измеряемого параметра, в ряде случаев, на порядок величины. Параметры импульсов, необходимые для получения сосредоточенного вскипания с воспроизводимыми от опыта к опыту характеристиками, подбирались опытным путем.

**Блок-схема и принцип действия устройства.** Основу устройства (рисунок 6) составляет мостовая измерительная схема с резистивным датчиком температуры. Датчиком является нагреватель-зонд, погружаемый в жидкость.

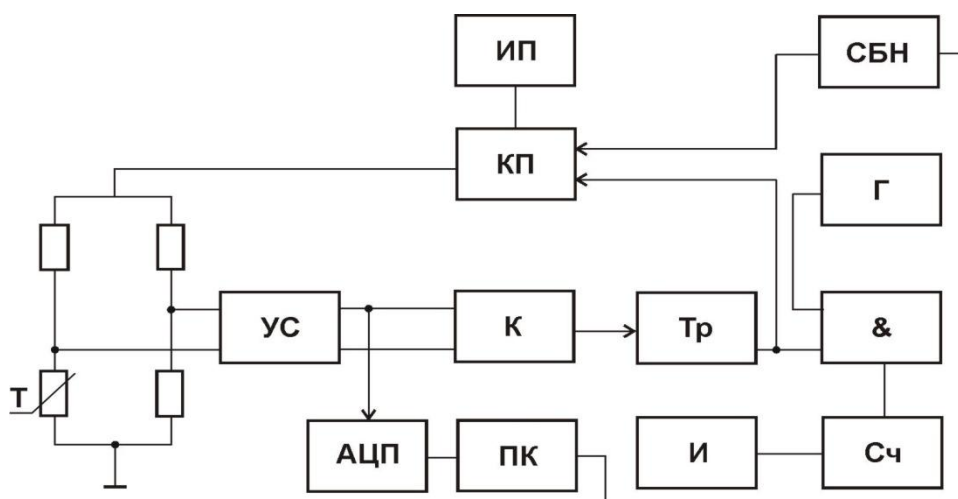


Рис. 6. Блок-схема устройства: Т – зонд (термометр сопротивления); ИП – источник питания; КП – коммутатор питания; СБН – схема быстрого нагрева; Г – генератор тактов; УС – дифференциальный усилитель; К – дифференциальный компаратор; Тр – триггер; & – схема логического суммирования; Сч – счетчик времени измерения; И – индикатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер.

Датчик снабжен подвижной арматурой, конструкция которой подбирается с учетом скорости потока в маслосистеме. Зонд представляет собой платиновую проволочку для термометрии диаметром 20 мкм и длиной 5 мм, закрепленную между двумя электрическими выводами. При изменении температуры зонд изменяет свое сопротивление по известному закону. Данное изменение сопровождается изменением разности потенциалов между выводами измерительной диагонали моста. Эту разность потенциалов принимает дифференциальный усилитель. Далее, полученное значение оценивается на дифференциальном компараторе. При достижении баланса мостовой схемы компаратор переключается и меняет режим питания зонда.

Измеряемый параметр – интервал времени  $\Delta t$  – определяется по двум точкам баланса моста, заранее настроенного на избранное значение сопротивления зонда. Компаратор выдает два коротких импульса, отмечающих, соответственно, начало и окончание интервала  $\Delta t$ . Триггер включается при начале измерения ( $t = t_1$ ) и отключается в конце измерения ( $t = t_2$ ). Продолжительность действия триггера измеряется с погрешностью, не более 0,1 %.

Питание моста осуществляется с помощью схемы СБН. Значение тока питания на первом участке  $I_1$  на порядок величины выше, чем значение тока на измерительном интервале  $I_2$ . Достижение значения  $T_1$  отмечается компаратором по моменту баланса моста. Последующее переключение режима питания на значение  $I_2 < I_1$  осуществляется с помощью связки: триггер – СБН – коммутатор питания. С этого момента начинается отсчет измерительного интервала. Значение  $I_2$  подбирается таким образом, чтобы стадия остывания зонда сменялась стадией его последующего нагрева до значения  $T = T_1$ . Повторное достижение баланса моста ( $t = t_2$ ) останавливает опыт. Коммутатор питания выключает нагрев зонда. Значение  $\Delta t$  фиксируется на индикаторе, а кривая  $T(\Delta t)$  поступает в компьютер через аналого-цифровой преобразователь. Цикл повторяется после паузы в автоматическом режиме. Интерпретация результатов осуществляется путем сравнения измеренных значений  $\Delta t(T_1)$  с таблицей калибровочных значений  $c(\Delta t)$ .

### *Автономное устройство непрерывного контроля летучих примесей.*

Развитием устройства на дискретных элементах (рисунок б) явилось создание прибора с автономным режимом работы. Функции ручного управления и записи результатов взял на себя измерительный блок, выполненный на базе микроконтроллера. Контроллер содержит интерфейсы для связи с периферийными устройствами. Применение интегрального таймера DS1302 и микросхем памяти долговременного хранения 24LC512 позволяет использовать устройство в режиме программируемого минирегистратора. Объем установленной памяти позволяет записать до 9000 отсчетов. Интервал времени между отсчетами программируется в широком диапазоне и обеспечивает возможность автономной работы от нескольких суток до нескольких недель.

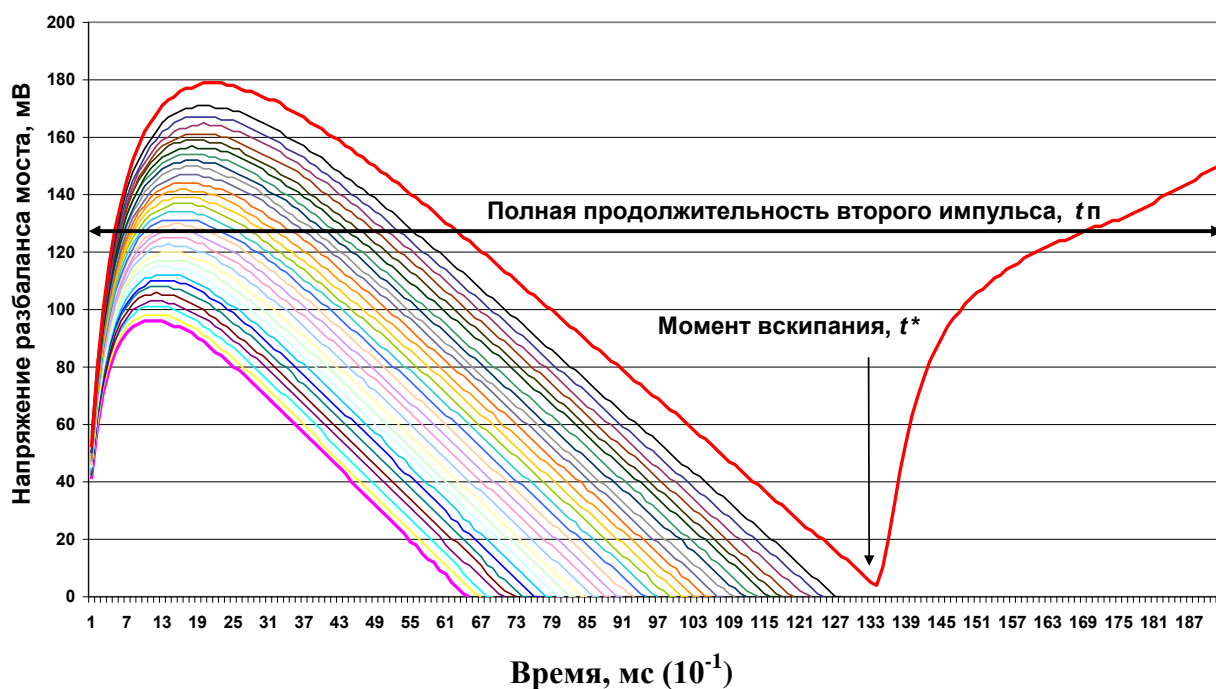


Рис. 7. Характерные результаты опыта по второму варианту измерений. Фрагмент отклика системы (масло Тп-22С) на импульсный нагрев с момента времени  $t = t_1(T_1)$ . Параметром опыта служит значение  $T_1$ . Верхняя кривая отвечает значению  $T_1^*$ . Продолжительность  $t_p = 19$  мс. Спонтанное вскипание масла сопровождается резким повышением интенсивности теплообмена и, как следствие, характерным возмущением хода регистрируемой кривой.

Исходя из условий применения устройства, предусмотрено *два варианта* измерений. **Первый вариант** основан на контроле значений  $\Delta t(T_1)$ ; его использование удобно в лабораторных условиях, в частности, в условиях термостатирования образцов. **Второй вариант** основан на поиске значения  $T_1^*$ , при котором впервые (при пошаговом повышении значения  $T_1$ ) проявляется

вскипание образца; в этом случае, под количественной характеристикой будем понимать значение температуры  $T_1^*$  при заданном значении  $t_{П}$ , см. рисунок 7. Его применение уместно при автономном режиме работы, в условиях изменения параметров технологического процесса, в частности, температуры масла.

**В третьей главе** представлены методика и результаты лабораторных испытаний устройства. Объектами изучения служили турбинное масло марки Тп-22С, применяемое в турбоагрегатах котлотурбинного цеха КТЦ-1 СУГРЭС, и трансформаторное масло марок ГК и ТкП, поступающее на регенерацию в электроцех.

**Калибровочные измерения.** Косвенный характер метода предполагает проведение калибровочных измерений на чистых образцах масла и образцах масел, аттестованных по содержанию известной примеси. Для подготовки образцов с различным содержанием примеси была применена система контролируемого насыщения масла летучим компонентом из паровой фазы. В качестве примеси, исходя из условий работы оборудования, была выбрана вода, а также двуокись углерода.

В открытом сосуде с исходным маслом растворялся водяной пар. Для улучшения растворимости масло нагревалось до  $(55 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . При достижении содержания влаги на уровне  $(300 \pm 25 \text{ г/т})$ , отслеживаемого по косвенному признаку, процесс прекращался. Порции обводненного масла добавлялись в набор проб исходного масла. Параметром служила объемная доля обводненного масла. Образцы с двуокисью углерода готовились подобным образом. Содержание влаги в пробах масла определялось в лаборатории ОАО «Свердловэлектроремонт», содержание двуокиси углерода – в лаборатории «МРСК Урала». Пробы транспортировались в лабораторию в герметизируемых сосудах из стекла, непосредственно в которых были проведены калибровочные измерения. Влияние примесей другой природы не учитывалось.

В полученном таким образом наборе образцов с различным содержанием примеси проводились измерения. Серия опытов начиналась и заканчивалась измерениями в исходном образце масла. Фрагменты массивов опытных данных,



совмещенных с данными лабораторного анализа, показаны на рисунке 8. В соответствии со вторым вариантом измерений (с. 15), калибровочная кривая с повышением содержания примеси монотонно снижается.

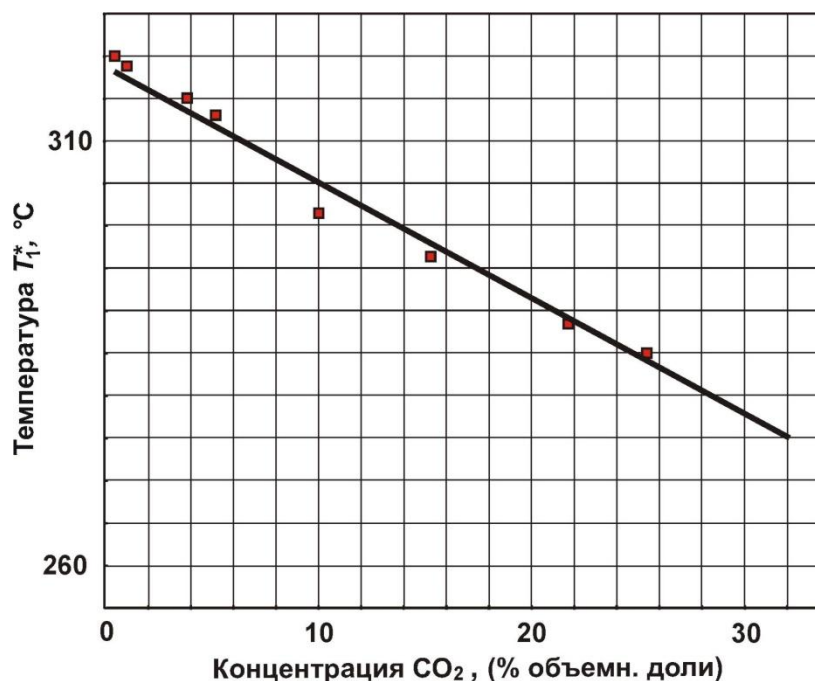
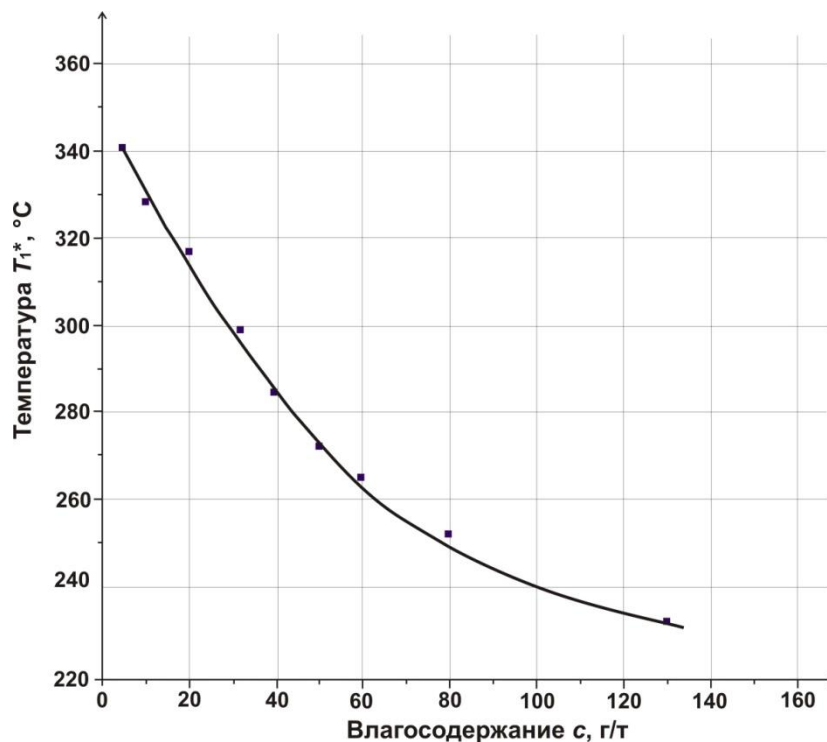


Рис. 8. Фрагмент калибровочного опыта по второму варианту методики на образце турбинного масла, в зависимости от содержания влаги в образце (вверху) и от содержания двуокиси углерода (внизу) при комнатной температуре. Насыщение масла паром двуокиси углерода проводилось при давлении пара, равном 1,2 атм.

Глава завершается *анализом погрешностей измерений*. Погрешность аппаратуры при сопоставлении термоустойчивости образцов масла оценивается величиной 0,5%. Основную составляющую погрешности соотнесения результатов измерений с концентрацией летучей примеси несут дополнительные факторы, связанные с точностью аттестации образцов, ошибкой калибровки, влиянием внешних условий, свойственных работе турбоагрегата (см. главу 4), наличием неучтенных примесей. Как показал опыт, эти факторы вносят погрешность порядка 10% в диапазоне влагосодержания 10-150 г/т.

**В четвертой главе** обсуждены результаты испытаний устройства на действующем оборудовании и этапы совершенствования конструкции его узлов. Контролировались процессы обводнения (пропаривания) турбинного масла турбоагрегатов КТЦ-1 и сепарации трансформаторного масла, поступающего в электроцех на регенерацию. Испытания проводились в режиме отбора проб и непрерывного контроля. Продолжительность автономной работы устройства составляла от одних суток до одной недели. Для сопряжения устройства с маслосистемой, в маслопровод за сливами с подшипников были врезаны штуцеры. Через штуцер вводилась арматура выносного датчика, осуществлялось ее погружение в поток масла и выбиралась скорость движения потока в измерительной ячейке относительно зонда, см. рисунок 9. Ниже представлена выборка результатов испытаний в режиме отбора проб (рисунки 10, 11) и в режиме непрерывного контроля (рисунок 12).

Проведенный цикл испытаний подтвердил, что опора методики измерений на взаимосвязь термоустойчивости импульсно нагретого микрообъема масла с содержанием летучих примесей является удачным применительно к задаче быстрого обнаружения летучих примесей в маслах. Устройство, реализующее эту методику, отвечает основным требованиям, предъявляемым к приборам экспресс-контроля, и может служить полезным дополнением к применяемой контрольно-измерительной аппаратуре.



Рис. 9. Вариант схемы сопряжения датчика с маслосистемой. Арматура датчика представляет собой коаксиальные детали, смещением которых друг относительно друга осуществлялось регулирование скорости движения масла в измерительном объеме.

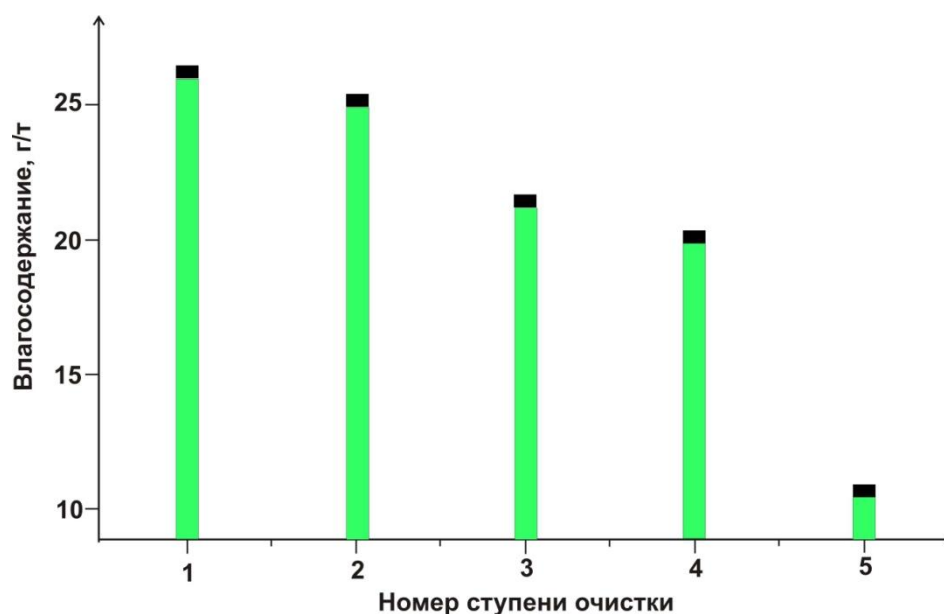


Рис. 10. Контроль процесса сепарации обводненного трансформаторного масла ГК по первому варианту методики. Отбор проб производился на каждой ступени обработки масла. Результаты измерений соотнесены с калибровочными данными по влагосодержанию в масле.

Наиболее существенным результатом нашей работы служит выяснение применимости устройства непосредственно в технологических условиях маслосистемы. Данный факт обуславливает возможность осуществления контроля критических точек технологической схемы в реальном масштабе времени, что важно при выявлении источников загрязнения, а также при пусковых и аварийных режимах работы оборудования.

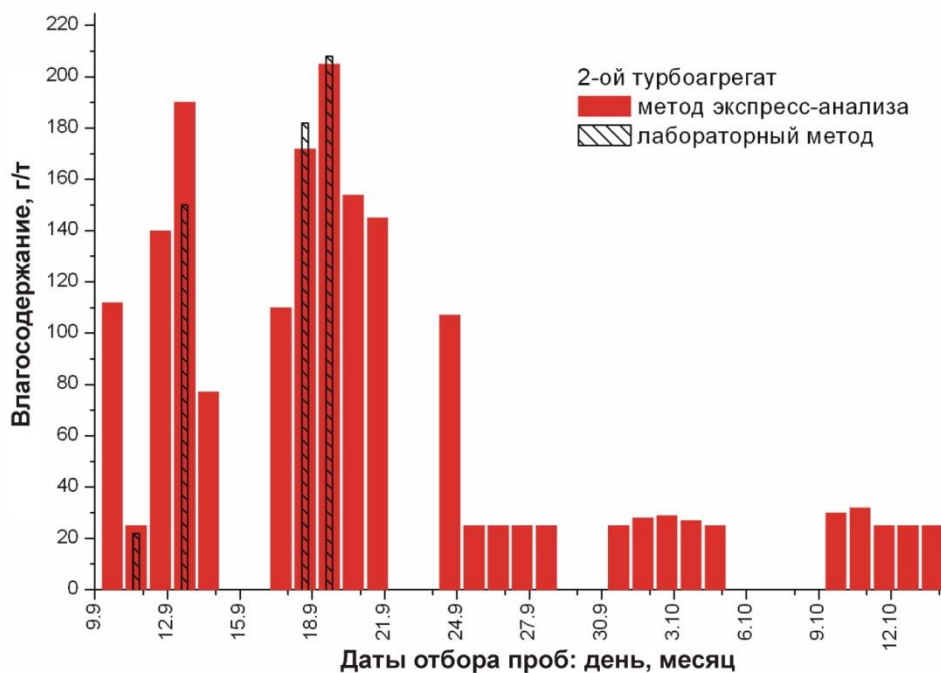


Рис. 11. Фрагмент диаграммы с данными анализа отбираемых проб масла Тп-22С (КТЦ-1 СУГРЭС, 2-й турбоагрегат) методом экспресс-контроля и выборочного контроля лабораторным (гидрид-кальциевым) методом. Результаты, полученные методом экспресс-контроля соотнесены с калибровочными данными по влагосодержанию.

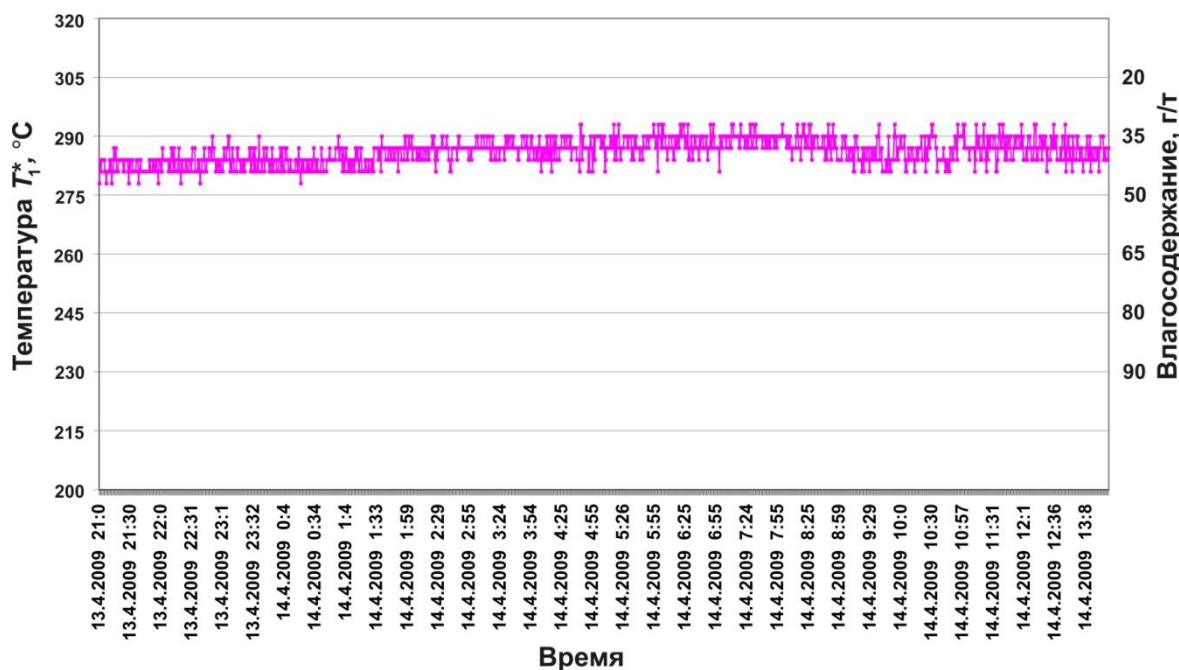


Рис. 12. Испытания автономного устройства в маслосистеме 6-го турбоагрегата КТЦ-1 по второму варианту методики. Фрагмент массива опытных данных по контролю турбинного масла. Суточный режим дежурства, апрель 2009 г. По оси «х» отложены дата и время измерения.

К основным осложняющим измерения факторам относятся сравнительно высокая скорость потока ( $\sim 1$  м/с) и непостоянство скорости и температуры потока. Конструкция подвижной арматуры зонда выбиралась с учетом условий

потока в разных типах маслосистем, снижая влияние фактора потока на результаты измерений до приемлемой величины, см. рисунок 12. Испытания подтвердили, что удобство предложенного сопряжения арматуры измерительного зонда с маслосистемой и простота пользования интерфейсом устройства способствуют, во-первых, возможности «сканирования» состояния различных участков маслосистемы и, во-вторых, автоматизации непрерывного контроля термоустойчивости масла с выводом информации на пульт оператора.

**В заключении** обобщены результаты применения метода импульсного теплового тестирования для быстрого обнаружения летучих примесей в маслах и намечены шаги по его развитию. Сделан **вывод**, что масла, импульсно нагретые до избранной температуры  $T_1 > T_d$ , могут кратковременно находиться в области термической неустойчивости без существенного изменения их свойств. Нарушение термоустойчивости, связанное, вероятно, с конечностью времени жизни термонестабильной жидкости и с уменьшением степени термодинамической совместимости компонентов масла при повышении температуры, начинает проявляться в сосредоточенном по температуре интервале значений. Эти значения зависят от природы масла и наличия в нем летучих примесей. В этой связи, метод дает оценку вероятности «термического пробоя» масла в заданных условиях тепловыделения.

#### **Основные результаты работы.**

1. На основе результатов опытов по исследованию термоустойчивости масел при их импульсном нагреве на поверхности проволочного зонда разработана основа методики импульсного теплового тестирования, чувствительная к присутствию летучих примесей в масле.
2. На основе методики импульсного теплового тестирования разработан метод косвенного контроля летучих примесей в маслах вне зависимости от природы примеси. Метод дает прямую оценку опасности «термического пробоя» масла в заданных условиях тепловыделения. Он состоит в определении на характерном отрезке времени значения температуры потери термоустойчивости масла, связанного с содержанием летучих примесей.

3. На основе метода создано автономное устройство быстрого обнаружения летучих примесей в маслах. Устройство состоит из выносного датчика и блока измерений, содержащего микроконтроллер с набором периферийных модулей. Интерпретация результатов осуществляется путем формального соотнесения измеренных значений с массивом калибровочных данных, полученных для набора образцов с различным влагосодержанием.
4. Проведены испытания устройства в условиях лаборатории (в режиме отбора проб) и на действующем оборудовании котлотурбинного цеха КТЦ-1 (в автономном режиме работы). Испытания показали, что защищаемый метод позволяет обнаруживать летучие примеси в маслах в реальном масштабе времени, а защищаемое устройство может служить автономным элементом системы мониторинга качества масел теплоэнергетического оборудования.

**В приложениях** рассмотрены типичные источники загрязнения масел летучими примесями, влияние примесей на технические условия работающего оборудования на примере трансформаторных и турбинных масел. Приведен обзор наиболее значимых методов контроля качества масла. Изложена методика стабилизации температуры импульсно нагреваемого зонда, на базе которой построено изучение термической устойчивости масел.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

*Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:*

1. Шангин, В.В. Мониторинг качества технологических жидкостей методом импульсного теплового тестирования / В.В. Шангин, С.А. Ильиных, П.В. Скрипов, А.А. Старостин // Известия вузов. Горный журнал. 2008.- № 6.- С. 75-80.
2. Шангин, В.В. Устройство и результаты мониторинга летучих примесей в технологических жидкостях методом импульсного теплового тестирования / В.В. Шангин, С.А. Ильиных, С.Э. Пучинский, П.В. Скрипов, А.А. Старостин // Известия вузов. Горный журнал. 2008.- № 8.- С. 148–153.
3. Шангин, В.В. Метод и устройство экспресс-контроля летучих примесей в маслах энергетического оборудования / В.В. Шангин, В.Г. Бухман, П.В. Скрипов, А.А. Старостин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010.- № 7-8.- С. 152–158.

4. Шангин, В.В. Устройство импульсного теплового контроля опасных примесей в критических точках маслосистем / В.В. Шангин, Д.В. Волосников, В.Н. Сафонов, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Приборы. 2012.- № 5.- С. 6–11.

5. Шангин, В.В. Влияние микроколичеств влаги на кратковременную термоустойчивость масел / В.В. Шангин, Д.В. Волосников, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Тепловые процессы в технике. Т.5. №9. 2013.- С. 424 – 432.

*Прочие основные публикации и работы:*

6. Шангин, В.В. Устройство экспресс-контроля летучих примесей в маслах / В.В. Шангин, А.А. Смотрицкий, Д.В. Волосников, А.А. Старостин // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством. Материалы 6-ой Межд. теплофизической школы. Ч. 1. Тамбов: ТГТУ, 2007.- С. 252–253.

7. Шангин, В.В. Экспресс-контроль летучих примесей в маслах теплоэнергетического оборудования / В.В. Шангин, В.А. Демин, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов, А.А. Старостин // В кн.: Актуальные проблемы энергетики. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007.- С. 330–332.

8. Шангин, В.В. Мониторинг летучих примесей в горюче-смазочных материалах импульсным методом теплового зонда. Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» / В.В. Шангин, П.В. Скрипов, А.А. Старостин, С.А. Старостин // Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.- С. 400–402.

9. Скрипов, П.В. Исследование теплофизических свойств многокомпонентных жидкостей применительно к рабочим телам энергетического оборудования Свердловской области / П.В. Скрипов, Д.В. Волосников, В.А. Демин, С.Э. Пучинскис, А.А. Смотрицкий, А.А. Старостин, В.В. Шангин // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Екатеринбург: РНТЦ, 2008.- С. 58–60.

10. Шангин, В.В. Обнаружение летучих примесей в маслах: метод, устройство, результаты / В.В. Шангин, П.В. Скрипов, А.А. Старостин, С.Э. Пучинскис // Сб. трудов межд. конф. «Наноматериалы и технологии». Улан-Удэ: БГУ, 2008.- С. 50–56.

11. Шангин, В.В. Развитие метода контроля летучих примесей в жидких средах / В.В. Шангин, П.В. Скрипов, А.А. Старостин, С.Э. Пучинскис // Сб. трудов 2-й научно-практической конференции с международным участием «Наноматериалы и технологии». Улан-Удэ: БГУ, 2009. С. 12–16.

12. Волосников, Д.В. Устройство обнаружения влаги в жидком топливе наземного и воздушного транспорта / Д.В. Волосников, П.В. Скрипов, А.А. Смотрицкий,

А.А. Старостин, В.В. Шангин // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством. Мат-лы 6-ой Межд. теплофизической школы. Ч. 2. Тамбов: ТГТУ, 2010.- С. 29–33.

13. Скрипов, П.В. Автоматизация экспериментов с проволочным зондом в режиме управляемого импульсного нагрева. Мат-лы межд. конф. «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» / П.В. Скрипов, А.А. Старостин, В.В. Шангин, А.Д. Ямпольский // Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2010.- С. 261–266.

14. Шангин, В.В. Теплофизический экспресс-контроль летучих примесей в маслах как средство предупреждения аварийных ситуаций. IV Всероссийская научно-техническая конференция «Безопасность критических инфраструктур и территорий» / В.В. Шангин, С.Э. Пучинскис, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Екатеринбург: УрО РАН, 2011.- С. 241–242.

15. Лукьянов К.В. Устройство для мониторинга состояния масла в энергетическом оборудовании / К.В. Лукьянов, Д.В. Волосников, А.А. Старостин, В.В. Шангин, В.Н. Сафонов, К.Л. Федорова, А.Н. Котов, Е.М. Шлеймович. // Сб. докладов конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике». Екатеринбург: УрФУ, 2013, С. 340 – 345.