

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕЧЕИСКАТЕЛЯ ЭЛЕГАЗА «КАРАТ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА И УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Долин А.П., канд. техн. наук
Карапузиков А.И., канд. техн. наук, Ковалькова Ю.А.

Рассмотрен принцип действия лазерного течеискателя, позволяющего с высокой чувствительностью детектировать в открытой атмосфере в реальном режиме времени такие газы, как элегаз. Дано описание опытно-промышленных испытаний прибора «Карат». Приведены примеры определения интенсивности утечки элегаза в соответствии с ГОСТ 7746-2001 и проверки герметичности электрооборудования методом обнаружения локальных утечек. Показана эффективность использования лазерного течеискателя «Карат» в качестве детектора мест утечек элегаза.

Ключевые слова: электрооборудование; элегаз; лазерные течеискатели; интенсивности утечки; проверка герметичности

Работы по оптико-акустическому газоанализу, проводимые Институтом лазерной физики СО РАН совместно с томским Институтом оптики атмосферы СО РАН, позволили в 2005-2006 гг. создать лазерный течеискатель, который с рекордной чувствительностью детектирует в открытой атмосфере в реальном режиме времени такие газы, как элегаз (SF_6), аммиак, этилен, фреоны и др. Экспериментальный образец прибора, а позднее промышленные образцы течеискателей получили название «Карат». Этот прибор благодаря своим техническим характеристикам представляет интерес в первую очередь для детектирования утечек SF_6 в элегазовом высоковольтном электрооборудовании (выключателях, измерительных трансформаторах, КРУЭ и др.), поэтому одно из назначений прибора — поиск мест утечек элегаза в процессе монтажа, ремонта и эксплуатации элегазового оборудования. Кроме того, прибор позволяет проводить количественные измерения интенсивности утечек из элегазовых объектов и определять скорость ухода элегаза. Благодаря высокой пороговой чувствительности прибор используется производителями элегазового оборудования для определения качества изделий.

Пороговая концентрационная чувствительность по газу SF_6 в воздухе составляет 1 ppb ($0,65 \cdot 10^{-8}$ г/л). Пороговая чувствительность прибора по потоку газа SF_6

(при скорости забора пробы $1 \text{ см}^3/\text{с}$) составляет, не менее $10^{-9} \text{ см}^3/\text{сек}$ или 0,2 мг в год при условии полного перехвата.

Принцип действия прибора основан на генерации акустических волн при селективном поглощении оптического излучения молекулами детектируемой газовой примеси в атмосфере. Акустический сигнал, пропорциональный концентрации газа, регистрируется микрофонами. Прибор содержит малогабаритный импульсно-периодический CO_2 -лазер с длиной волны в области 10,6 мкм, оптико-акустический (ОА) детектор, микронасос для забора пробы, пульт управления, встроенный аккумулятор питания. Микроконтроллер, управляющий работой течеискателя, задает режим работы лазера, проводит измерение и обработку сигналов и т.д.

Используемый принцип детектирования обеспечивает высокую селективность обнаружения элегаза в воздухе в реальных условиях, что неоднократно подтверждалось в ходе натурных испытаний и в процессе эксплуатации прибора. Течеискатель реагирует только на вещества, имеющие поглощение на длине волны 10,6 мкм. При этом коэффициент поглощения элегаза на 2-3 порядка превосходит поглощение других примесей в воздухе в обычных условиях. Использование относительно высокой скорости прокачки анализируемой пробы воздуха и высокое быстродействие ОА детектора сокращают до 2-5 с время восстановления прибора при регистрации высоких концентраций обнаруживаемых веществ.

Конструктивная схема прибора обеспечивает малое энергопотребление, поэтому встроенный аккумулятор напряжением 12 В позволяет «Карату» работать без подзарядки в течение 8 час. Лазерный течеискатель прост в эксплуатации и не требует сложного технического обслуживания. Для расширения возможностей измерений и протоколирования результатов прибор имеет USB порт, позволяющий подключать его к компьютеру. В течеискателе предусмотрено запоминание до 999 результатов измерений.

Прибор имеет следующие технические характеристики.

Детектируемый газ	SF ₆
Чувствительность по SF ₆	1 ppb (0,65 · 10 ⁻⁸ г/л); 1 · 10 ⁻⁹ см ³ /сек или 0,2 мг/год
Тип детектора	оптико-акустический
Скорость прокачки пробы (опция)	10 см ³ /с
Время отклика	2 с
Время подготовки к работе	0,5 мин
Индикация течи	цифровая, звуковая
Энергопотребление	10 ВА
Время работы без подзарядки	8 ч
Размеры	
– течеискателя	280×190×108 мм
– пульта	240×60×31 мм
– длина щупа	150-900 мм
Масса	4,5 кг

Полевые испытания прибора по обнаружению мест утечек проводились в 2007 г. на подстанции 500 кВ «Арзамасская». Экспериментальная модель прибора «Карат» сравнивалась с близким по чувствительности отечественным плазменным течеискателем типа ТП-3 (производство НПО «Техномаш», г. Москва) и достаточно широко используемым в РФ прибором типа DIL0-3-033-R002 фирмы «Dilo Company», США.

Температура окружающего воздуха при испытаниях составляла +30-+35 °С. Поиск утечек элегаза проводился на двух элегазовых выключателях типа ВГУ-220 и ВГУ 500, которые были выведены из эксплуатации для проведения техобслуживания.

В ходе испытаний оценивалась применимость данной модели течеискателя «Карат» для поиска утечек элегаза в полевых условиях, удобство использования, сравнительная точность измерений и т.д. Результаты проведенных испытаний по обнаружению утечек элегаза приведены в таблице.

Результаты испытаний показали, что лазерный течеискатель «КАРАТ» и плазменный прибор ТП-3 по своей чувствительности существенно превышают возможности течеискателя DIL0-3-033-R002. Данные результаты согласуются с чувствительностью указанных приборов, приведенных в их паспортах. Подтверждено,

что лазерный течеискатель «Карат» обладает высокой селективностью к детектируемому элегазу и не подвержен эффекту «отравления» при регистрации больших концентраций.

Указанные в таблице замечания были устранены в процессе последующей доработки прибора. Так, в промышленные образцы лазерных течеискателей «Карат» были внесены следующие изменения.

1. Для удобства определения мест утечек в труднодоступных местах для забора воздушной пробы прибор был оснащен гибким щупом, сохраняющим свою форму при изгибе.

2. Была изменена индикация результатов измерений на пульте управления так, чтобы она была видна в условиях сильной солнечной активности.

3. Добавлена звуковая тональная индикация детектируемого газа с переключаемым уровнем чувствительности, которая позволяет точно определять место и уровень интенсивности течи.

4. Прибор получил функцию запоминания результатов измерений и компьютерный USB интерфейс для сохранения и дальнейшей обработки полученных данных.

Были проведены также контрольные испытания течеискателя «Карат» в заводских лабораториях. Одним из объектов испытаний являлся макет полимерной крышки производства ЗАО «ФЕНИКС-88». Макет представлял собой полимерную крышку ППТЭ-110-4 УХЛ 1 с уменьшенной на 14% строительной высотой (1150 мм вместо номинальной 1344 мм) со штатными фланцами. Остальные размеры соответствовали номинальным для крышки трансформатора тока типа TG145 N.

Целью испытаний были определение интенсивности утечки элегаза в соответствии с ГОСТ 7746-2001 и проверка герметичности крышки методом обнаружения локальных утечек в соответствии с инструкцией ООО «АББ Электроинжиниринг» № СТ.002-98 «Контроль герметичности трансформаторов тока TG145 N». Для сравнения, кроме «Карата», использовался течеискатель типа LS790B с чувствительностью 1×10⁻⁶ см³/с. Для испытаний крышка была заглушена с двух сторон технологическими крышками

№ утечки	DIL0-3-033-R002	ТП-3	«КАРАТ-Э» (экспериментальный образец)
1	Не обнаружена	Обнаружена	Обнаружена
2	Обнаружена	Обнаружена	Обнаружена
Замечания по работе с приборами			
	Недостаточный уровень чувствительности	Для работы требуется вакуумный насос и трехфазное электропитание.	На ярком солнце плохо виден цифровой индикатор концентрации элегаза.
		Легко «отравляется» при высокой концентрации обнаруживаемых веществ, что приводит к перебою в работе до нескольких минут.	Звуковая сигнализация срабатывает только при высоких концентрациях элегаза (большой интенсивности течи).
		Реагирует на большое количество веществ-загрязнителей в окружающей атмосфере.	Для оперативности измерений желательно питание течеискателя. От встроенного аккумулятора. Необходим более удобный для работы в эксплуатационных условиях пробоотборник.

с уплотнениями, после чего в ней было создано избыточное давление элегаза 0,48 МПа. На одной из крышек были установлены денсиметр с уплотнением и наполнительный клапан системы DIL0.

Для определения интегральной годовой утечки макет покрышки был помещен в полиэтиленовый замкнутый чехол (рис. 1) на 600 ч, после чего была определена концентрация элегаза в чехле и проведен расчет величины утечки согласно ГОСТ 7746-2001. После выдержки в течение 600 ч падения давления газа согласно показаниям денситометра не обнаружено.

При введении щупа течеискателя «Карат» в чехол в нижней части была измерена концентрация элегаза в чехле — $43,55 \times 10^{-6}$ г/л. Расчет годовой утечки в процентах от массы элегаза в покрышке был проведен по формуле согласно ГОСТ 7746-2001, п.9.7.2.

$$q = 1,45 \cdot 10^5 \cdot \frac{\Delta C \cdot P_0 \cdot \Delta V}{t \cdot P_{\text{ном}} \cdot V_{\text{гт}}},$$

где $\Delta C = 43,55 \times 10^{-6}$ г/л — разность концентрации газа в замкнутом объеме за время выдержки; $P_0 = 1$ кгс/см²; $\Delta V = 200$ л — разность между замкнутым объемом и наружным объемом макета; $P_{\text{ном}} = 5,8$ кгс/см² — номинальное давление газа в измерительном трансформаторе (абсолютное); $V_{\text{гт}} = 32$ л — объем газа в макете; $t = 600$ ч — время между измерениями.

Зафиксированная годовая утечка элегаза $q = 0,011\%$.

При проведении испытаний локальных утечек элегаза течеискателем типа LS790В и лазерным течеискателем «Карат» на теле покрышек обнаружено не было. Однако течеискателем «Карат» была обнаружена течь на технологическом наполнительном клапане; измеренная концентрация в области течи составила около 65×10^{-6} г/л. Клапан был заглушен с целью ликвидации

течи, контрольная проверка течи не обнаружила. Покрышка была повторно помещена в герметичный чехол на 18 час.

После выдержки в течение 18 час. в нижней части была измерена разность концентрации элегаза в чехле $1,17 \times 10^{-6}$ г/л, что соответствует количественной годовой утечке $q = 0,01\%$ массы элегаза.

В результате этих испытаний сделаны следующие выводы.

1. Испытание на герметичность методом локальных утечек в соответствии с инструкцией № СТ.002-98 «Контроль герметичности трансформаторов тока TG145 N» макет покрышки выдержал с положительным результатом.

2. Замеренная концентрация элегаза после выдержки в течение 600 час. может быть вызвана повышенной утечкой по технологическому наполнительному клапану. Однако даже с учетом течи по клапану расчетное значение годовой утечки составило величину 0,011% массы элегаза за год, что значительно меньше требуемой по ГОСТ 7746-2001 и техническим требованиям ТТ 3494-030-06968694-2007.

3. Повторное испытание по определению годовой утечки с выдержкой в замкнутом пространстве в течение 18 час. показало годовую утечку на уровне 0,01% массы элегаза за год, что подтверждает предыдущее испытание с выдержкой в замкнутом пространстве в течение 600 час.

4. Использование высокочувствительного лазерного течеискателя «Карат» позволяет существенно сократить время измерения количественной утечки элегаза при испытаниях электрооборудования.

В дальнейшем этот вывод был подтвержден испытанием серии аналогичных покрышек производства ЗАО «Феникс-88» и электрооборудования других производителей. В частности, на территории ЗАО «Феникс-88» для проведения испытаний был изготовлен герметичный контейнер, куда помещалась покрышка, наполненная элегазом во время испытаний (рис. 2). Для лучшего перемешивания элегаза в соответствии с требованиями ГОСТ 7746-2001 внутри контейнера устанавливался вентилятор. В процессе испытаний с помощью лазерного течеискателя «Карат» измерялась концентрация элегаза непосредственно после установки покрышки в контейнер и затем через известные интервалы времени. Замеры концентрации элегаза в контейнере производились путем введения измерительного щупа лазерного течеискателя внутрь контейнера через отверстие диаметром 7 мм в крышке. После этого по приведенной выше методике рассчитывалась годовая утечка тестируемых изделий.

Изменение концентрации на протяжении 30 мин. для образцов покрышек составило от 0 до 4 ppb ($0-2,6 \cdot 10^{-8}$ г/литр),



Рис. 1. Полимерная покрышка ППТЭ-110-4 УХЛ 1 в герметичном полиэтиленовом чехле во время испытаний



Рис. 2. Испытания покрышки ППТЭ-110-4 УХЛ 1 на интегральную утечку элегаза

что соответствовало годовой утечке элегаза не более 0,15% по массе в год. Измеренная величина утечки SF₆ удовлетворяет требованию ТУ — не более 0,7% в год по массе. Зарегистрированная утечка включала в себя течи через вероятные неплотности прилегания технологических заглушек и особенно использованных вентилялей.

Важную роль в процессе измерений играет накопление элегаза в помещении для испытаний. Это создает нежелательный фон, влияющий на точность измерений. По этой причине все манипуляции по наполнению покрышек элегазом проводились в другом помещении с хорошей вентиляцией. Уровень элегазового фона в помещении контролировался лазерным течеискателем «Карат» и во время измерений не превышал 10 ppb или $6,5 \cdot 10^{-8}$ г/л.

Таким образом, испытания высоковольтного электрооборудования на действующих объектах энергетики и в условиях заводских лабораторий показали эффективность использования лазерного течеискателя «Карат» в качестве детектора мест утечек элегаза при техническом обслуживании и как средство аттестации изделий по количественному определению интенсивности утечек элегаза. Испытания выявили

ряд преимуществ нового прибора перед существующими аналогами. В частности, было показано, что для определения годовой утечки элегаза из высоковольтного электрооборудования требуется время порядка 1 часа. Методические наработки и опыт, полученный в ходе испытаний и эксплуатации прибора, используются при дальнейшем совершенствовании конструкции и улучшении параметров лазерных элегазовых течеискателей.

Одним из направлений этой работы являются снижение погрешности измерений концентрации элегаза в воздухе, повышение уровня автоматизации измерений, надежности и т.д. Ведутся работы по разработке системы, позволяющей проверять утечки высоковольтного оборудования без снятия напряжения.

Долин Анисим Петрович — доцент, начальник отдела ОАО «ФСК ЕЭС», г. Москва (495) 4114065 apdol@mail.ru

Карапузиков Александр Иванович — заведующий лабораторией «ИК лазерных систем» ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск

Ковалькова Юлия Алексеевна — директор по маркетингу, ООО НТЦ «ЭДС», г. Москва



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

ЭЛЕКТРОИНЖИНИРИНГ ДИАГНОСТИКА И СЕРВИС

ООО НТЦ «ЭДС»
111250 Москва
ул. Красноказарменная, 14
тел.: (495) 918 05 11
e-mail: info@ntc-eds.ru
www.ntc-eds.ru

Лазерный течеискатель «КАРАТ»

Предназначен для обнаружения и измерения утечек элегаза (SF₆) на объектах электроэнергетики в высоковольтном электрооборудовании. Прибор может использоваться как производителями элегазовых выключателей, измерительных трансформаторов, вводов, КРУЭ, для проведения заводских испытаний, так и предприятиями, выполняющими текущее обслуживание и ремонт элегазового электрооборудование для поиска дефектов в эксплуатационных условиях.

По SF₆ прибор регистрирует течи интенсивностью до: 1×10^{-9} см³/сек или 0,2 мг в год и позволяет определять концентрации от 1 ppb до 100 ppb (до 10000 ppb под заказ).

Принцип действия течеискателя основан на оптико-акустическом эффекте, возникающем в результате поглощения газом SF₆ излучения CO₂ лазера на длине волны вблизи 10,6 мкм.

В течеискателе предусмотрено запоминание до 999 результатов измерений.



Технические данные:

- Определяемая концентрация SF₆: 1 ppb до 100 ppb
- Определяемая скорость утечки: 1×10^{-9} см³/сек
- Скорость прокачки: 0,5 – 1 л/мин
- Время отклика: 1-2 сек
- Энергопотребление: 10 ВА
- Время работы без подзарядки: 8 ч
- Размеры: 320×190×115 мм
- Вес: 4 кг

Основные направления деятельности ООО НТЦ «ЭДС»

- Жесткая ошиновка ОРУ и ЗРУ от 35 кВ:
 - расчет, проектирование, поставка, испытание отстройки от ветровых резонансов
- Комплексные диагностические обследования:
 - систем оперативного постоянного тока (СОПТ)
 - силовых и измерительных трансформаторов
- Техническое освидетельствование электрооборудования
- Оценка остаточного ресурса электрооборудования
- Программные продукты (расчет жесткой ошиновки до и выше 110 кВ, экранированных токопроводов, токов КЗ, САПР цепей вторичной коммутации)
- Приборы и новые технологии для диагностики и ремонта




