

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ

Герасимов Владимир Ермагенович
Первый заместитель генерального директора –
главный инженер АО «РЭС»

АПРЕЛЬ 2025

1 Масляные выключатели еще широко используются

Несмотря на развитие элегазовых (SF₆) и вакуумных выключателей, масляные выключатели 110 кВ все еще эксплуатируются на многих подстанциях.

Масло в таких выключателях требует регулярного контроля и замены, что делает проблему его старения критической.

2 Старение масла приводит к отказам оборудования

- Окисление масла
- Образование осадков и шламов
- Рост влагосодержания
- Газообразование

3 Техническая актуальность

- Современные методы онлайн-мониторинга масла (анализ газов, диэлектрических свойств).
- Разработка новых присадок для продления срока службы масла.
- Улучшенные методы регенерации (сорбционная очистка, вакуумная обработка).

Интерес к теме старения масла остается высоким среди энергетиков, поскольку продление его службы снижает затраты и повышает надежность сети.

4 Экологическая значимость

Современные методы регенерации масла позволяют сократить количество отходов и снизить нагрузку на окружающую среду.

5 Экономическая значимость

Окисление –

при контакте с воздухом образуются
кислоты и шламы

Термическое разложение –

нагрев и перегрев масла ускоряет
его старение

Газообразование –

продукты разложения ухудшают
диэлектрические свойства

Влажность –

повышенное содержание воды снижает
пробивное напряжение

Контакт с металлами –

ускоряет каталитические реакции
и образование осадков

При правильном обслуживании срок службы масла увеличивается в 2–3 раза

Мероприятие	Обычный срок службы масла	Срок службы при улучшенном обслуживании
Без фильтрации и контроля	5–7 лет	Быстрое старение
С фильтрацией и дегазацией	10–15 лет	Стабильное качество
С регенерацией и защитой от кислорода	15–25 лет	Продление ресурса

КРИТЕРИИ ЗАМЕНЫ МАСЛА

Полная замена масла необходима, если хотя бы один из параметров превышает предельно допустимые нормы. Если масло теряет диэлектрическую прочность, окисляется или загрязняется, его необходимо заменять.

Параметр масла	Норма	Критическое значение (замена масла)
Диэлектрическая прочность	≥ 30 кВ	< 20 кВ
Кислотное число	$\leq 0,1$ мг КОН/г	$> 0,3$ мг КОН/г
Содержание влаги	≤ 50 ppm	> 200 ppm
Газосодержание	$\leq 1\%$ объема	$> 3\%$ (рост водорода, ацетилена)
Наличие осадков и шламов	Отсутствуют	Образуется осадок, масло мутнеет

1 Старение и деградация трансформаторного масла

- Со временем масло окисляется, образуются кислоты, осадки, шламы.
- Повышенное газосодержание (H_2 , CH_4 , CO_2) ухудшает гашение дуги.
- Накопление влаги снижает диэлектрическую прочность масла.

Последствия: ухудшение гашения дуги, пробой, утечка масла, необходимость частой замены.

2 Газообразование и снижение диэлектрической прочности

- При отключении тока масло разлагается, образуя газы (водород, метан, ацетилен).
- Если газы не успевают рассеяться, возможен повторный пробой при АПВ.
- Загрязнение масла снижает его пробивное напряжение.

Последствия: ухудшение изоляции,

3 Термомеханический износ контактов

- Дуга вызывает эрозию и выгорание контактов, особенно при частых коммутациях.
- Износ контактной системы приводит к увеличению сопротивления контактов, перегреву.
- Возможен механический перекося контактов, ухудшающий отключающую способность.

Последствия: повышенный износ, риск неполного отключения, необходимость частого ремонта.

4 Протечки масла и герметичность корпуса

- Старение прокладок, вибрации и температурные колебания вызывают утечки масла.
- Утечка снижает уровень масла, ухудшая его изолирующие и дугогасящие свойства.
- Возможно загрязнение окружающей среды при разливе масла.

Последствия: аварийные отключения, экологические проблемы, дополнительные расходы на обслуживание.

5 Сложность обслуживания и ремонта

- Масляные выключатели требуют регулярной замены и фильтрации масла.
- Необходимость контроля кислотного числа, газового состава, влажности.
- Замена масла и техническое обслуживание требуют длительного времени и персонала.

Последствия: увеличение затрат на эксплуатацию, риск отказа из-за несвоевременного ТО.

Образование газовых пузырей →
снижение диэлектрической прочности

Газовые пробойи между контактами →
нарушение отключающей способности

Давление внутри бака выключателя →
риск механического разрушения

Образование осадков и ухудшение
теплоотдачи

Неисправность механизма отключения

На начальном этапе эксплуатации (0–5 лет)

- Масло свежее, вязкость остается в норме.
- Обычно соответствует 10–12 мм²/с при 40°C (ISO VG 10 или аналог).
- Если масло качественное, изменения минимальны.

Через 5–10 лет эксплуатации

- Вязкость начинает постепенно увеличиваться из-за накопления окисленных соединений.
- В среднем вязкость повышается на 10–20% от первоначального значения.
- Если масло загрязняется влагой, вязкость может кратковременно снизиться.

Через 10–20 лет эксплуатации

- Вязкость может увеличиться на 30–50%, особенно если масло не заменялось или не регенерировалось.
- Масло становится более густым, что ухудшает его циркуляцию в выключателе.
- Возможны отложения шламов, которые дополнительно мешают движению масла.

После 20 лет эксплуатации (без замены)

- Вязкость может превышать 15–20 мм²/с при 40°C, что уже выходит за рамки нормы.
- Масло теряет свою способность к быстрой циркуляции, что ухудшает гашение дуги.
- Увеличивается риск кавитации, локального перегрева и выхода выключателя из строя.

КОЛИЧЕСТВО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В СЕТЕВОЙ КОМПАНИИ И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

КОЛИЧЕСТВО ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ	
	ВСЕГО
Масляный выключатель 110 кВ	214
Масляный выключатель 35 кВ	535
Масляный выключатель 1-20 кВ	4355
Элегазовый выключатель 110 кВ	68
Элегазовый выключатель 35 кВ	9
Элегазовый выключатель 1-20 кВ	373
Вакуумный выключатель 35 кВ	11
Вакуумный выключатель 1-20 кВ	3961

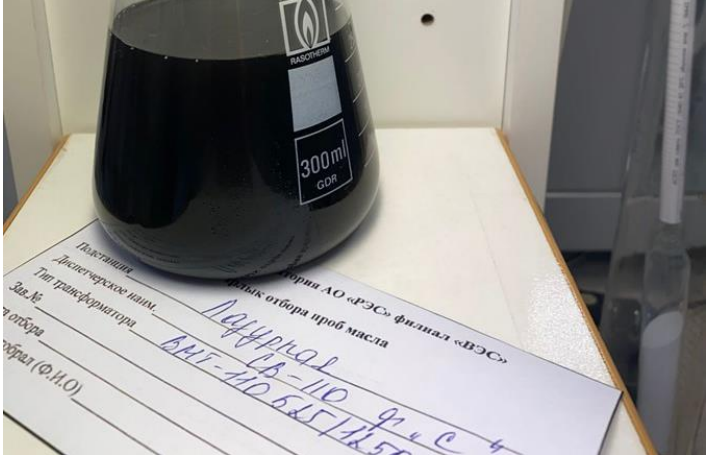
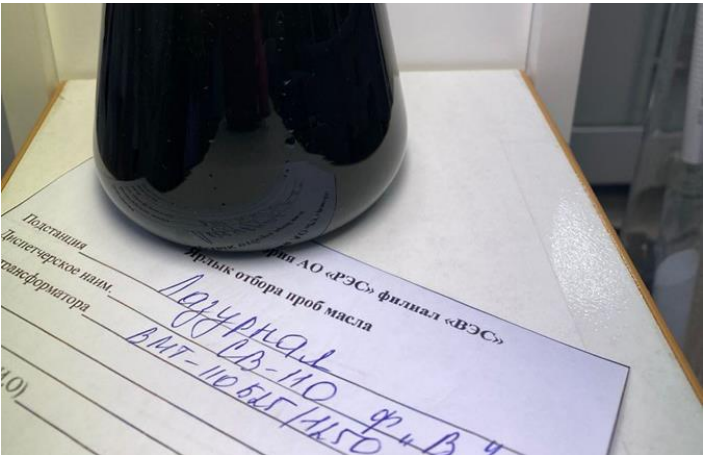
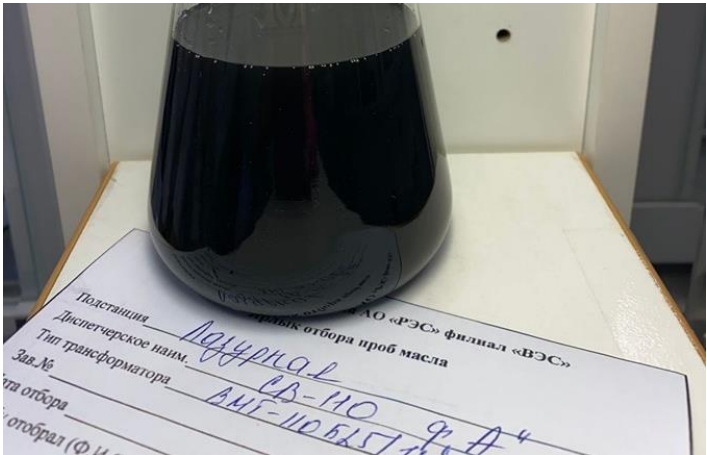
КОЛИЧЕСТВО ТЕХ. НАРУШЕНИЙ		
2022	2023	2024
199	235	219
40	101	118
2751	3955	4615

ПОВРЕЖДЕНИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В СЕТИ 6-110 КВ ЗА 2022-2024ГГ			
	6-10 кВ	20-35 кВ	110 кВ
Масляные выключатели	13	2	4
Выключатели всего	32	6	9

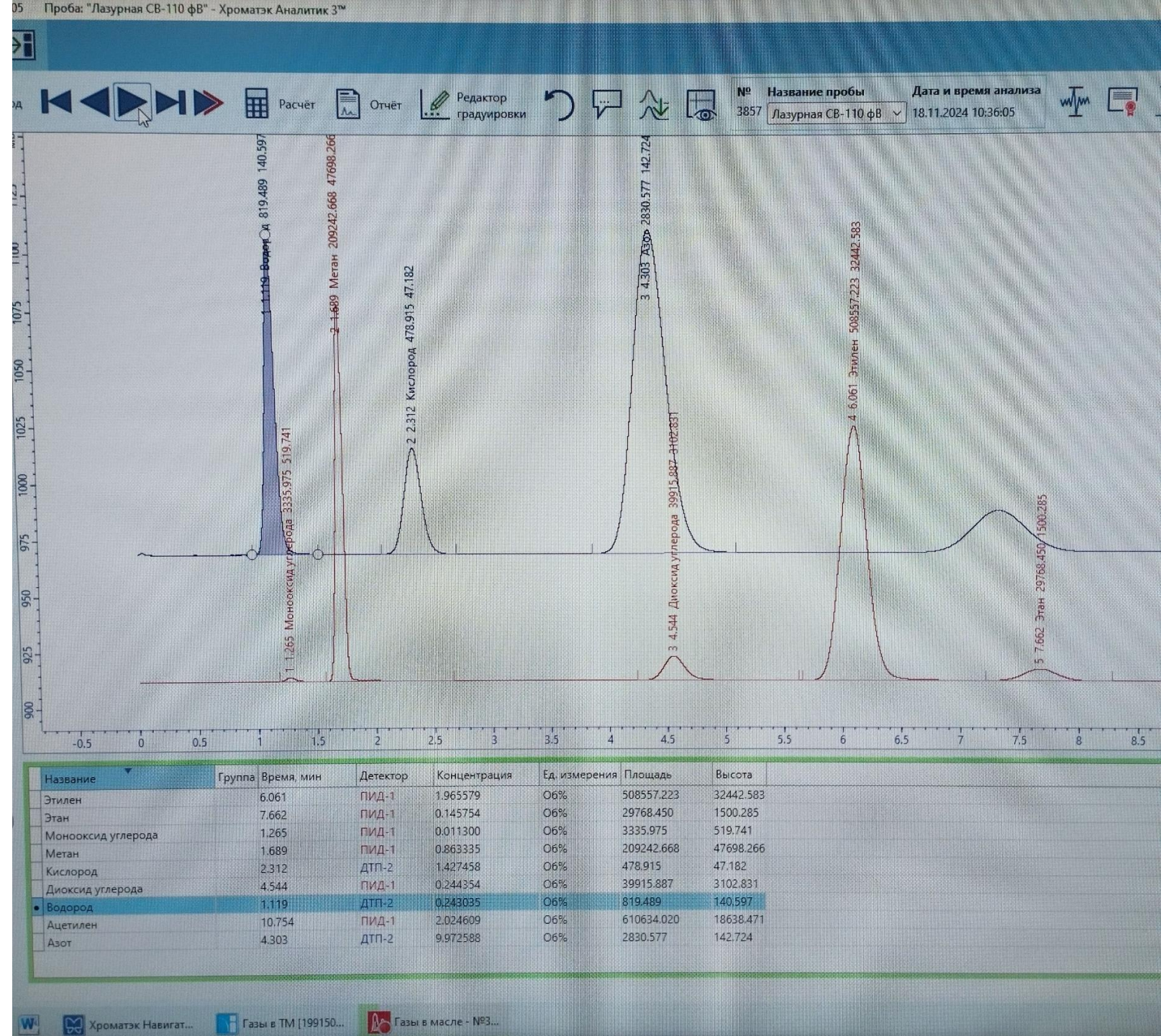
Наименование Параметра по НД*	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO2	CO
	водород	метан	ацетилен	этилен	этан	диоксид углерода	оксид углерода
Значение параметра по НД*, % об.	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,8	0,06
Фактическое значение параметра ф.«А»**, % об.	0,44823	1,33610	1,88078	2,29507	0,18058	0,3011	0,0161
Фактическое значение параметра ф.«В»**, % об.	0,24303	0,86333	2,02460	1,96557	0,14575	0,2443	0,0113
Фактическое значение параметра ф.«С»**, % об.	0,20944	0,72821	2,12553	1,76504	0,11456	0,2314	0,0134

* – РД 153-34.0-46.302-00

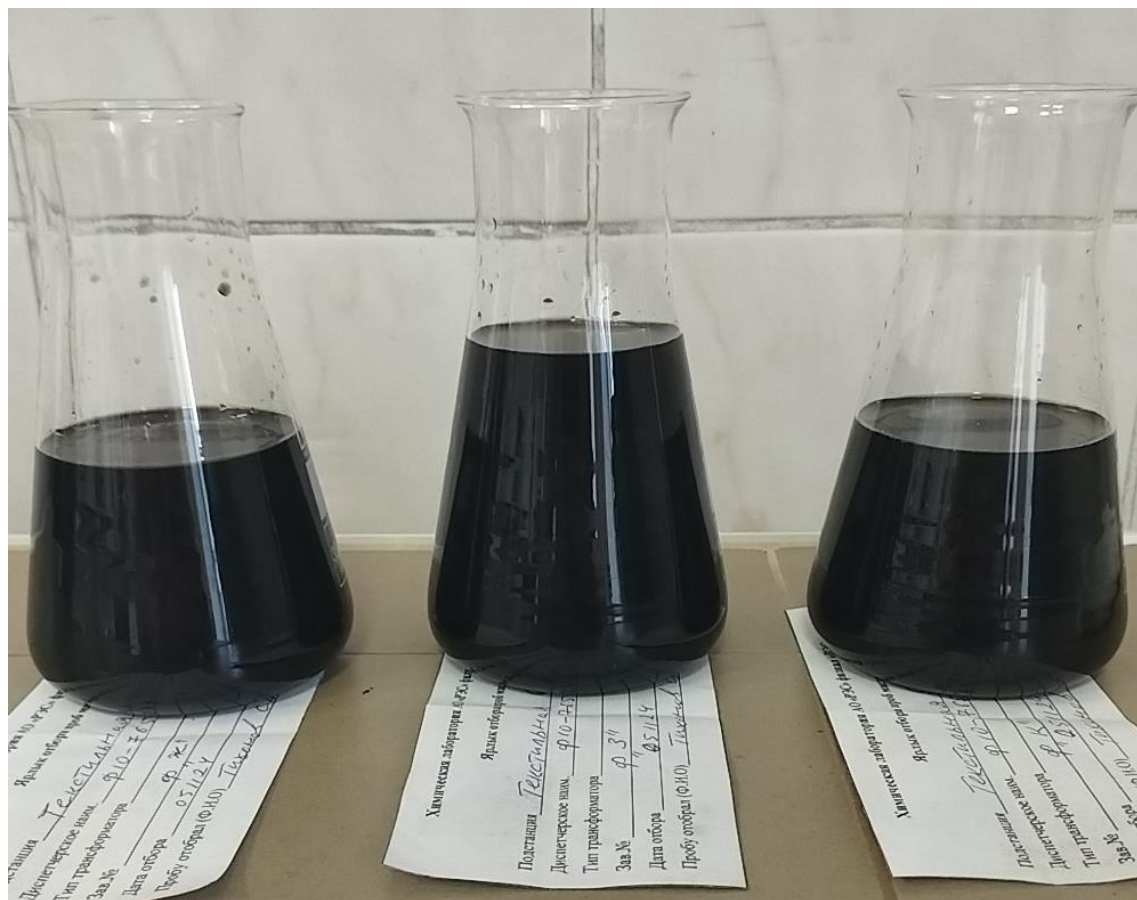
** – фактическое значение параметра рассчитано на основании двух параллельных испытаний



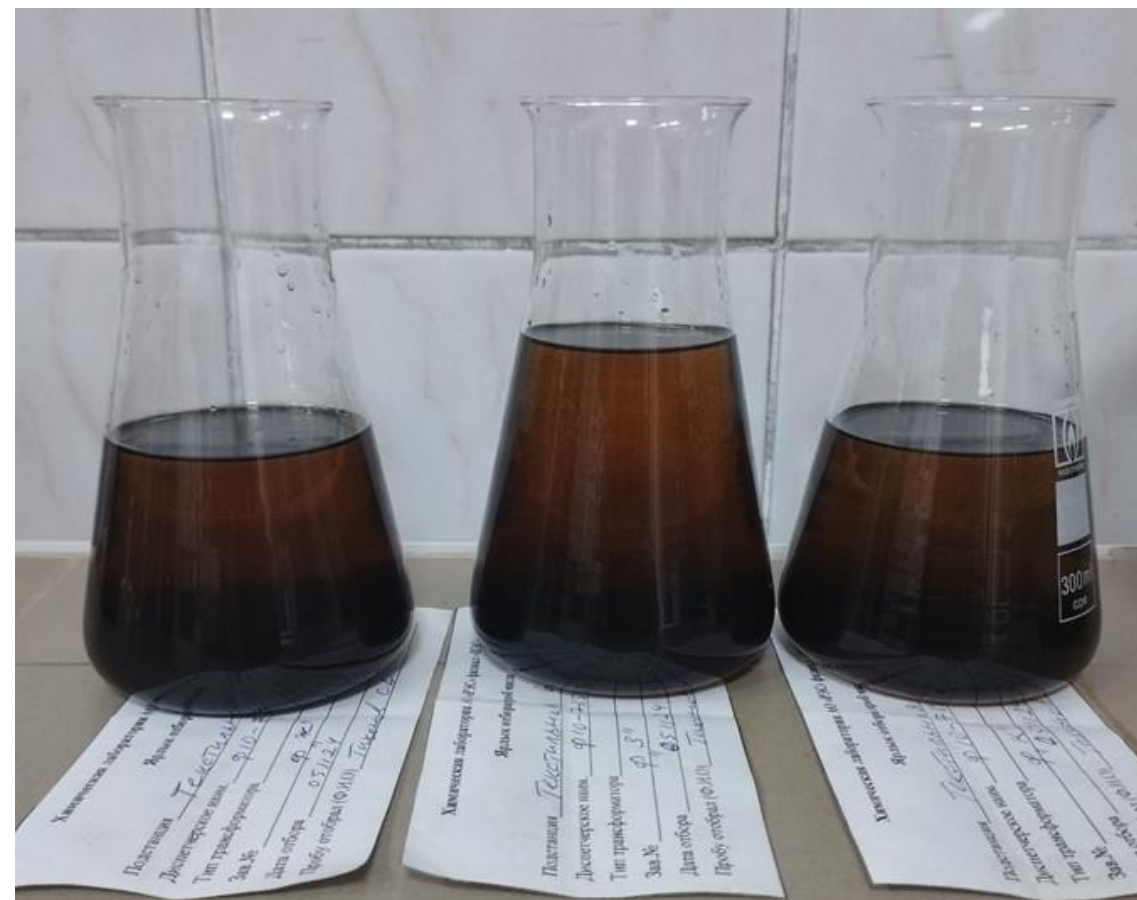
ХАРГ ЛАЗУРНАЯ СВ-110, ФАЗА В



До отстаивания от 14.11.2024



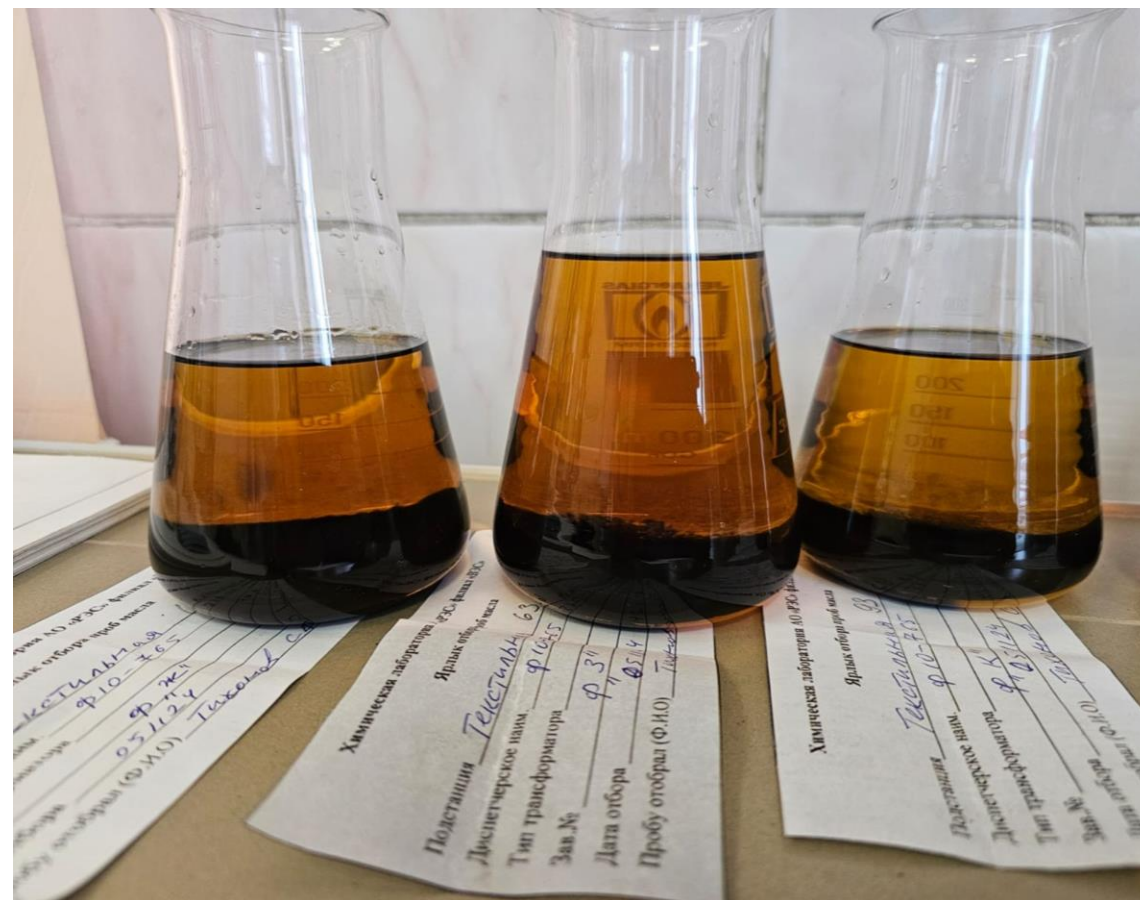
После отстаивания через неделю



После отстаивания через 1,5 месяца



После отстаивания через 2 месяца



ПРОБЫ МАСЛА
ПС ТЕКСТИЛЬНАЯ В-10



ПРЯМЫЕ ФИНАНСОВЫЕ ПОТЕРИ

Затраты на ремонт и замену оборудования	
Стоимость нового элегазового (SF ₆) выключателя 110 кВ	4 160 000 – 12 500 000 ₽
Стоимость масляного выключателя (ВМТ, МКП)	2 500 000 – 8 300 000 ₽
Затраты на восстановление в зависимости от повреждений	850 000 – 4 160 000 ₽
Затраты на масло и техническое обслуживание	
Замена трансформаторного масла	420 000 – 1 670 000 ₽
Фильтрация, дегазация, диагностика	от 170 000 ₽
Выход из строя смежного оборудования	
При аварии возможны повреждения трансформаторов, шин, разъединителей	
Стоимость ремонта трансформатора 110 кВ	8 300 000 – 12 500 000 ₽

КОСВЕННЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Отключение потребителей	
При отказе выключателя могут остановиться предприятия, больницы, транспорт	
Убытки промышленности (в зависимости от нагрузки)	830 000 – 83 000 000 ₽ в час
Штрафы за нарушение надежности энергоснабжения	
Повышенные затраты на аварийное восстановление	
Привлечение ремонтных бригад	420 000 – 4 200 000 ₽
Срочные поставки нового оборудования по ускоренной схеме	
Экологический ущерб (при утечке масла или SF ₆)	
Утечка SF ₆ в атмосферу приводит к штрафам за выбросы парниковых газов	
Разлив масла требует очистки почвы, что может стоить (в зависимости от объема загрязнения)	850 000 – 41 600 000 ₽