

Оценка степени старения внутренней изоляции силовых трансформаторов по содержанию метанола в трансформаторном масле*

Л. А. Дарьян, д. т. н.¹, А. В. Максимченко¹, А. В. Астахов^{2,3}, М. В. Ржавин²

УДК 543.544.3; 543.2

Силовые трансформаторы – один из основных и дорогостоящих видов оборудования электрических станций и подстанций. Последние два десятилетия во всем мире наблюдается тенденция старения парка трансформаторного оборудования [1]. Поэтому для поддержания эксплуатационной надежности силовых трансформаторов (СТ) необходимо разрабатывать методы диагностики их состояния, которые позволят обнаружить развивающиеся повреждения на ранней стадии их развития. Кроме того, значительный интерес представляют показатели старения внутренней изоляции для оценки ее остаточного ресурса и срока службы СТ. Предложена методика определения метанола в трансформаторном масле как маркера старения бумажной изоляции в силовых трансформаторах.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, изоляционная бумага, трансформаторное масло, степень полимеризации, метанол, газовый хроматограф

Срок службы силовых трансформаторов главным образом определяется состоянием его внутренней изоляции, в первую очередь, целлюлозной. Степень старения можно оценить по показателю степени полимеризации (СП) [2] изоляционной бумаги, которую можно заменить только в результате дорогостоящего капитального ремонта трансформатора со сменой обмоток. В отличие от бумаги масло в трансформаторе можно либо заменить, либо регенерировать по мере необходимости.

Количественный показатель старения бумажной изоляции – степень полимеризации – в соответствии с действующими нормативными документами [3,4] определяется вискозиметрическим

методом. В основу его положено уравнение Марка – Куна – Хаувинка, связывающее характеристическую вязкость раствора целлюлозы (основного компонента изоляционной бумаги) и молекулярную массу полимера. Однако на практике этот метод не нашел широкого применения для оперативной оценки степени старения бумажной изоляции силовых трансформаторов. Для определения СП изоляционной бумаги вискозиметрическим методом требуется отбор проб из силовых трансформаторов, что возможно только при выводе СТ в ремонт и его вскрытии. Кроме того, для получения достоверных результатов отбор пробы изоляционной бумаги необходимо проводить из наиболее нагретой точки, например, верхней части обмотки низкого напряжения, с последующим восстановлением изоляции. Выполнение этой процедуры требует высокой квалификации персонала, в противном случае не гарантируется качественное восстановление изоляции.

* На правах рекламы.

¹ АО «Техническая инспекция ЕЭС».

² ООО «НПФ «Мета-хром».

³ astahov-av@meta-chrom.ru.

В основе оценки технического состояния и, в том числе, старения внутренней изоляции силовых трансформаторов, во всем мире принята идеология физико-химической диагностики. Она основана на определении характерных продуктов разложения изоляции – маркеров старения [5], важнейшей характеристикой которых является диагностическая ценность (информационность). Маркеры старения бумажной изоляции должны удовлетворять следующим требованиям: хорошая растворимость в трансформаторном масле, достаточная для практических целей химическая стабильность, хорошие адсорбционные свойства, которые позволяют измерять остаточные количества маркера после замены или регенерации масла. Важное значение имеют также методики их качественного и количественного определения.

В настоящее время различают маркеры старения трех поколений. К маркерам первого поколения относят воду, оксид и диоксид углерода, к маркерам второго – фурановые производные, а именно: фурфурол (2-FAL), 2-фурилметанол (2-FOL), 5-гидроксиметил-2-фурфурол (5-HMF), 5-метил-2-фурфурол (5-MEF) и 2-ацетилфуран (2-ACF). К маркерам третьего поколения относятся метиловый и этиловый спирты (метанол и этанол). Обзор исследований по маркерам старения бумажной изоляции СТ проведен в работе [6].

Известно, что на скорость образования маркеров старения всех трех поколений влияет множество факторов, например, температура изоляции, конструкция трансформатора, марка бумаги и ее влагосодержание, концентрация кислорода в масле и некоторые другие.

В соответствии с идеологией физико-химической диагностики оценка степени старения проводится по зависимостям, устанавливающим связь между СП бумажной изоляции и количеством образовавшихся и растворившихся в трансформаторном масле маркеров старения. Такие зависимости получают, как правило, экспериментальным путем. Однако для маркеров старения первого и второго поколений установить однозначную связь между их количеством и степенью полимеризации изоляционной бумаги в силовых трансформаторах, находящихся в эксплуатации, не удается. Так, например, увеличение содержания воды и диоксида углерода в силовых трансформаторах может происходить не только при старении бумажно-масляной изоляции, но и за счет проникновения этих компонентов из окружающего атмосферного воздуха. Кроме того, CO и CO₂ могут быть не только продуктами деструкции бумажной изоляции. Они образуются также в процессе старения трансформаторного масла, а в некоторых

случаях при химическом взаимодействии материалов, из которых изготовлен силовой трансформатор. Обратная картина наблюдается для маркеров старения второго поколения: в силовых трансформаторах, оснащенных адсорбционными или термосифонными фильтрами, фурановые производные могут разлагаться в присутствии силикагеля, что приводит к снижению их концентрации в трансформаторном масле. Таким образом, маркеры, как первого, так и второго поколения не обеспечивают достоверной оценки степени старения бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов.

За последнее десятилетие в зарубежной технической литературе появилось несколько десятков публикаций о маркере старения бумажной изоляции третьего поколения – метаноле. Анализ результатов исследований показал, что метанол отвечает основным требованиям, предъявляемым к маркерам старения бумажной изоляции, перечисленным выше.

Исследования маркеров третьего поколения активно проводятся и в Российской Федерации. В работе [7] приведены результаты исследований образования метанола при ускоренном старении бумажной изоляции в трансформаторном масле. При этом проводили исследования материалов, широко применяемых в отечественных силовых трансформаторах – кабельной бумаги марки К-120 и трансформаторного масла марки ГК.

Образец бумажной изоляции представлял собой свернутый из ленты кабельной бумаги К-120 размером 2000×62,5×0,12 мм (рис. 1а) рулон диаметром 20 мм (рис. 1б). Среднее значение массы такого образца (12,6±0,4) г. Образцы бумажной изоляции были увлажнены и разделены на три группы по влажности: 0,5; 1 и 2%.

При разработке испытательной ячейки (рис. 2), внутренний объем которой составлял 270 см³, были учтены следующие требования:

- герметичность;
- температурная компенсация изменения объема трансформаторного масла при нагреве без доступа воздуха из окружающей среды;
- химическая инертность материалов испытательной ячейки к исследуемым образцам;
- отсутствие газового пространства в испытательной ячейке после ее заполнения трансформаторным маслом и размещения в ней образца бумажной изоляции.

Подготовленные образцы бумажной изоляции помещали в испытательные ячейки, которые после этого заполняли трансформаторным маслом с влагосодержанием 12 г/т и содержанием кислорода 3%



Рис. 1. Кабельная бумага К-120 (а) и рулоны из этой бумаги (б)

объемных. Испытательные ячейки заполняли трансформаторным маслом для исключения внутреннего газового пространства после герметизации ячеек. Таким образом, предотвращалось распределение метанола между маслом и газовым пространством в испытательной ячейке. В этом случае исключаются «потери» метанола при вскрытии ячейки для отбора проб масла и бумажной изоляции.

В разработанной авторами [7] методике эксперименты по изучению старения бумажной изоляции выполняли в циркуляционном термостате одновременно в нескольких десятках испытательных ячеек



Рис. 2. Испытательная ячейка и приспособление для ее герметизации

(рис. 3). Одним из основных требований при проведении термического старения образцов изоляции было поддержание одинаковой температуры во всех испытательных ячейках. Известно, что скорость старения бумажной изоляции увеличивается примерно в два раза при повышении температуры на каждые 6 °C [2, 8]. Таким образом, если предположить, что температура ячеек в лабораторных исследованиях будет отличаться в пределах (1-2) °C, то скорость старения бумажной изоляции в них может различаться до 30%!

Следует отметить, что в условиях фактической продолжительности эксперимента (44 суток) снижение СП кабельной бумаги марки К-120 до предельно допустимого значения (250 ед.) наблюдалось только на образцах бумажной изоляции с влагосодержанием 2%, тогда как в образцах с влагосодержанием 0,5% в идентичных условиях эксперимента СП

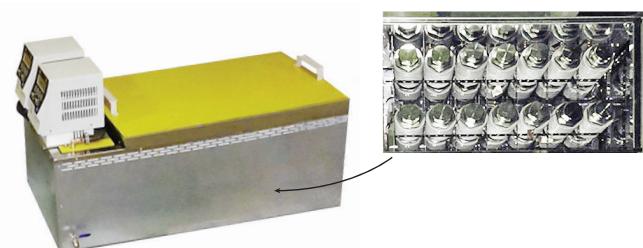


Рис. 3. Циркуляционный термостат с испытательными ячейками для термического старения бумажной изоляции

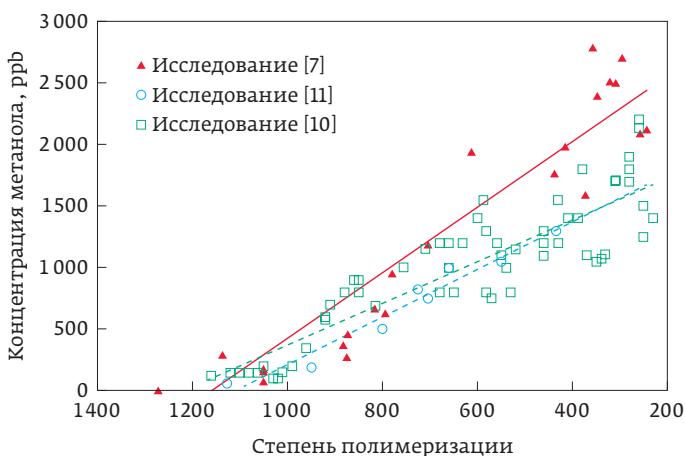


Рис. 4. Зависимости концентрации метанола в трансформаторном масле от СП бумажной изоляции в [7, 10, 11]

снизилась только до 780 ед., то есть менее, чем на 50% от исходного значения. Результаты экспериментов также показали, что влагосодержание бумажной изоляции существенно влияет на скорость ее старения [9].

Полученную зависимость концентрации метанола в трансформаторном масле марки ГК из испытательных ячеек от СП бумажной изоляции (кабельной бумаги марки К-120) сопоставили с результатами работ других исследователей [10, 11] (рис. 4).

На графике (рис. 4) аппроксимированные зависимости носят одинаковый характер – все они являются линейными. Отсюда следует, что различия марок масел и бумажной изоляции не влияют на характер зависимости концентрации метанола от СП. Разница в абсолютных значениях концентрации метанола, полученных в лабораторных экспериментах разными исследователями при одинаковых значениях СП бумажной изоляции, может быть объяснена следующими факторами:

- эксперименты по термическому старению образцов бумажной изоляции проведены в испытательных ячейках разных конструкций;
- исследованию подвергались разные марки бумажной изоляции и трансформаторного масла;
- соотношение массы бумажной изоляции к массе трансформаторного масла в испытательных ячейках отличается.

Для количественного определения метанола, одного из характерных химических соединений, содержащихся в трансформаторном масле, использовали газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М»

с двумя пламенно-ионизационными детекторами, двумя капиллярными колонками и устройством пробоподготовки (рис. 5).

Устройство пробоподготовки представляет собой специализированное автономное устройство для концентрирования равновесной паровой фазы веществ, находящихся над жидким образцом в терmostатируемом контейнере, температура которого может достигать 150 °C. Объем пробы трансформаторного масла, используемый в устройстве пробоподготовки, составляет 20 мл. При необходимости можно брать и другие объемы пробы трансформаторного масла, заменив контейнер в устройстве пробоподготовки в течение нескольких минут, благодаря его удобной конструкции. Перед вводом образца трансформаторного масла терmostатируемый контейнер продувается инертным газом для обеспечения однородности окружающей масла среды. При контролируемых параметрах пробоподготовка заключается в приведении образца масла в контакт с газовой фазой так, чтобы растворенные в масле легкокипящие вещества перешли в газовую fazу. Время, необходимое для выделения метанола в газовую fazу, зависит от объема применяемого терmostатируемого контейнера и может достигать нескольких десятков минут. Для сокращения продолжительности процедуры может применяться перемешивание трансформаторного масла, например, вибрацией в терmostатируемом контейнере. После окончания выделения метанола проводят его отбор с помощью терmostатируемого шприца, предварительно продутого газом-носителем. Затем газовую fazу вводят в инжектор газового хроматографа. Преимущество парофазной пробоподготовки при вводе пробы в хроматограф по сравнению с прямым впрыском анализируемого образца состоит в том, что загрязнение



Рис. 5. Хроматограф «Кристаллюкс-4000М» с устройством пробоподготовки

инжектора и капиллярных колонок газового хроматографа происходит в меньшей степени.

Газовый хроматограф состоит из аналитического блока, станции управления, контроля и обработки хроматографической информации, в качестве которой используется персональный компьютер, и программы NetChrom, работающей в среде Windows. Обмен информации между компьютером и аналитическим блоком хроматографа происходит по стандартным интерфейсам связи.

Аналитический блок имеет два независимых канала разделения и обработки информации и состоит из термостата колонок, сменного аналитического модуля, в котором установлены два одновременно работающих пламенно-ионизационных детектора (ПИД), капиллярный испаритель, обеспечивающий режим ввода пробы со сбросом (split) и остановкой сброса (split-splitless), и блок электронного управления температурами термостатов и потоками газов. В качестве газа-носителя используется гелий марки «А», либо аргон высокой чистоты. Газы дополнительно проходят очистку через фильтр каталитической очистки для предотвращения попадания кислорода в капиллярные колонки при работе хроматографа. Для работы детекторов хроматографа также требуются водород и воздух, потоки которых формируются генератором водорода и компрессором воздуха.

Принцип действия хроматографа основан на применении методов газожидкостной хроматографии с использованием разделительных капиллярных колонок в изотермическом режиме.

Для достижения аналитических характеристик, необходимых для определения низких концентраций метанола в трансформаторных изоляционных маслах была применена так называемая двумерная (многомерная) хроматография. Суть этого метода состоит в том, что разделение производится одновременно на двух хроматографических колонках с различной селективностью. Как правило, первичная колонка – неполярная, на ней происходит разделение компонентов смеси по возрастанию их температур кипения. К первичной колонке последовательно присоединяется вторичная колонка, имеющая полярную неподвижную фазу. Коммутация колонок и распределение потоков газа-носителя между ними осуществляется с помощью пневматических элементов Динса (Deans). Схема Динса позволяет управлять основными потоками подвижной фазы при помощи управляющих (или вспомогательных) потоков газа-носителя.

Поскольку метанол имеет достаточно низкую температуру кипения, для лучшего предварительного

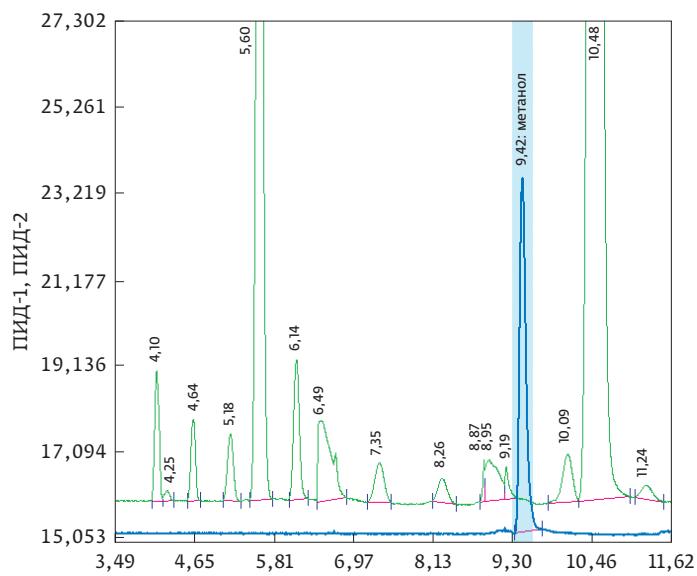


Рис. 6. Хроматограмма метанола

отделения метанола от легкокипящих углеводородов не только по температуре кипения, но и степени поляризации компонентов, была применена капиллярная колонка с неподвижной фазой средней полярности, в отличие от описанной в литературе по двумерной хроматографии колонки с неполярной фазой.

На рис. 6 представлен фрагмент типичной хроматограммы образца трансформаторного масла, содержащего метанол. На первом пламенно-ионизационном детекторе (ПИД-1) фиксируется только метанол, а все сопутствующие метанолу легкокипящие углеводороды регистрируются на втором пламенно-ионизационном детекторе (ПИД-2).

К описанной выше конфигурации оборудования предъявляются минимальные требования по подготовке самого образца трансформаторного масла и сводится к минимуму эффект памяти (загрязнение парами масла) всей системы, кроме того, она достаточно удобна для применения в составе мобильной лаборатории для проверки состояния трансформаторного масла на объектах энергетики.

Для выполнения измерений разработана и аттестована методика измерений объемной доли метанола в пробах трансформаторного масла методом газовой хроматографии [12]. Методика измерений обеспечивает получение результатов измерений с погрешностью, не превышающей значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон измерений, значения показателей повторяемости, воспроизводимости, правильности и точности

Диапазон измерений, ppb	10–20 800
Показатель повторяемости (относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости), %	3
Показатель воспроизводимости (относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости)	4
Показатель правильности (границы относительной систематической погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$)	13
Показатель точности (границы относительной погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$)	15

Полученные метрологические характеристики позволяют рекомендовать разработанный хроматографический комплекс, реализованный на базе хроматографа «Кристаллюкс-4000М», для применения при проведении обследований силовых трансформаторов.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты исследований маркеров старения бумажной изоляции отечественного производства в герметичных испытательных ячейках. Выявлена эмпирическая зависимость между степенью полимеризации бумажной изоляции и концентрацией метанола в трансформаторном масле.

Приведено краткое описание хроматографического комплекса для анализа метанола, растворенного в трансформаторном масле.

Разработанная методика определения метанола в трансформаторном масле обеспечивает метрологические характеристики, позволяющие надежно выявлять силовые трансформаторы с высокой степенью старения бумажной изоляции.

Литература

- Алексеев Б. А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии. М.: Энергопрогресс, 2010. 88 с. (Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 1 (133).
Alekseev B. A. Large power transformers: condition monitoring in operation and during revision. M.: Energoprogress, 2010. 88 p. (Library of electrical engineering, supplement to the Energetik magazine, Issue 1 (133).



Основные преимущества:

- * Лабораторные установки для нефтехимии
- * Полная автоматизация
- * Адаптация под любые задачи заказчика
- * Изучение и моделирование каталитических процессов



Автоматический многоканальный комплекс для испытаний катализаторов флюид-кatalитического крекинга (FCC) в псевдоожженном слое, включающий собственно катализическую установку и два хроматографа «Кристаллюкс-4000М»



Основные области применения:

- * Добыча нефти и газа
- * Химическая и нефтехимическая промышленность
- * Энергетика
- * Нефтепереработка

ООО «НПФ «Мета-хром»
424000, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Баумана, 100
Тел.: (8362) 42-49-97, 73-45-24, 42-22-66 | Факс: 42-49-97



Web: www.meta-chrom.ru
E-mail: m_chrom@mari-el.ru

2. CIGRE Task Force D1.01.10: Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, Brochure № 323, 2007.
3. Методические указания по оценке состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по степени полимеризации (утверждены ОАО РАО «ЕЭС России» 13.12.2007 г.). Guidelines for assessing the state of paper insulation of windings of power transformers and shunt reactors according to the degree of polymerization (approved by RAO UES of Russia on December 13, 2007).
4. МЭК 60450. Материалы электроизоляционные целлюлозные новые и созревшие. Измерение средней вискозиметрической степени полимеризации. IEC 60450. New and mature cellulose electrical insulating materials. Measuring the average viscometric degree of polymerization.
5. Аракелян В.Г., Дарьян Л.А. Идеологическая и приборно-аналитическая база физико-химического диагностического контроля высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Электротехника. 1997;12:2-12.
Arakelyan V.G., Daryan L.A. Ideological and instrumental-analytical base of physical and chemical diagnostic control of high-voltage oil-filled electrical equipment. *Electrical engineering*. 1997;12:2-12.
6. Дарьян, Л.А., Быкова А.М., Сазонов В.Н. Маркеры состояния бумажно-масляной изоляции. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016;4:45-51.
Daryan, L.A., Bykova A.M., Sazonov V.N. Markers of the state of paper-oil insulation. *Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*. 2016;4:45-51.
7. Darian L.A., Golubev P.V., Obraztsov R.M., Maksimchenko A.V. Methanol Formation and Distribution in Power Transformers. *Proceedings of the Eighty-Seventh International Conference of Doble Clients*, Boston, MA, 2020.
8. IEC 60076-7. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral oil-immersed power transformers (IEC Standard, 2005).
9. Darian L.A., A. V. Maksimchenko A. V., Le L. H. Research of methanol generation during accelerated tests of paper insulation in transformer oil. *Electricity. Transmission and distribution*. November-December 2016;6(39):126-131.
10. Laurichesse D., Bertrand Y., Tran-Duy C., Murin V. Ageing Diagnosis of MV/LV Distribution Transformers via Chemical Indicators in Oil. 2013 *Electrical Insulation Conference*, Ottawa, Ontario, Canada, 2 to 5 June 2013, pp. 464.
11. Wang Z.D., Liu Q., Tee S.J., Matharage S.Y., Jarman P., Wilson G., Hooton R., Dyer, P., Walker D., Krause Ch., Smith P.W.R., Mavrommatis P., Gyore A. Ageing Assessment of Transformers through Oil Test Database Analyses and Alternative Diagnostic Techniques. (CIGRE SC A2 colloquium, China, Sept. 20-25, 2015).
12. Методика измерений объемной доли метанола в пробах трансформаторного масла методом газовой хроматографии. Аттестована: ФГУП «УНИИМ». Свидетельство об аттестации методики измерений № 222.0011.RA.RU.311866/2018 от 15.02.2018// М., АО «Техническая инспекция ЕЭС», 2018. 19 с. Method for measuring the volume fraction of methanol in samples of transformer oil by gas chromatography. Certified by: FSUE UNIIM. Certificate of attestation of the measurement technique No. 222.0011.RA.RU.311866/2018 dated February 15, 2018// M., JSC Technical Inspection of the UES, 2018. 19 p.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023

Принята к публикации 10.08.2023

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ М. Отто

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2021. — 656 с.
ISBN 978-5-94836-615-9

Аналитическая химия, будучи наукой междисциплинарной, включает в себя множество разнообразных методов, использующих различные химические, физические, а в последнее время — и биологические явления.

В пятом издании известного учебника подробно рассмотрены современные методы математической обработки результатов химического анализа и наиболее актуальные проблемы аналитической химии — автоматизация анализа, анализ материалов, биологических объектов и объектов окружающей среды.

Автор учебника сумел изложить разнообразные методы анализа — от классических до самых современных — с единых позиций, основанных на представлении об аналитическом процессе как процедуре извлечения информации о веществе. Книга, безусловно, будет полезна студентам университетов, изучающим химию, и специалистам-химикам.

Цена 1600 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

23-25 ОКТЯБРЯ 2023

Х МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ • ДИАГНОСТИКА



МОСКВА | ЭКСПОЦЕНТР

Х ЮБИЛЕЙНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

Крупнейшая специализированная выставка средств и технологий неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга состояния и оценки ресурса на территории СНГ и Восточной Европы



15 +

КРУГЛЫХ СТОЛОВ
С УЧАСТИЕМ ЭКСПЕРТОВ



3 000 +

РУКОВОДИТЕЛЕЙ
И СПЕЦИАЛИСТОВ



50 +

КОМПАНИЙ-ЛИДЕРОВ
В ОБЛАСТИ НК И ТД



В РАМКАХ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ НЕДЕЛИ

32 000 +
ПОСЕТИТЕЛЕЙ

7 000 +
м² ВЫСТАВОЧНОЙ ПЛОЩАДИ

350 +
КОМПАНИЙ - УЧАСТИЦ



МЕРОПРИЯТИЯ ФОРУМА

- Всероссийский конкурс по НК «Дефектоскопист»
- Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ «Новая генерация»
- Национальная премия по НК и ТД
- Молодежная научно-техническая конференция
- Салон инноваций и стартапов

EXPO.RONKTD.RU
+7 (499) 245-56-56

vk.com/RONKTD
t.me/RSNTTD



РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ