

# ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ: ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В настоящее время российская энергетика, как и вся страна, достойно принимает современные вызовы ускоренного темпа импортозамещения. Помимо текущей нагрузки, появилась необходимость приспосабливаться к ограничению традиционных рыночных отношений, доступности готовых технологических решений, возможности получать доходы от продажи ресурсов с низкой добавленной стоимостью. В этих условиях чрезвычайно важна организация совместной работы отраслей науки и производства для укрепления технологического суверенитета отечественной энергетике и машиностроения. Требуются более эффективные подходы к организации наукоемкого производства, для разработки новых направлений и материалов с целью обеспечения высокотехнологичных производств.

Возможности нашей страны в развитии технологий по переработке древесины — уникальны. Традиционный способ переработки целлюлозы может быть развит. Это обеспечит производство материалов нового поколения — микро- и нано- фибриллированной целлюлозы, основы для модификации изоляционных материалов с уникальными свойствами. Эта технология призвана соединять разные материалы с отличными свойствами в один гибрид, который воплотит полезные свойства обеих составляющих. Например, обычная целлюлоза может получить свойства гидрофобности, которые невозможно представить в традиционной форме продукта переработки древесины.

АВТОР:

Суханов А.Ю.,  
ООО «Эйч Энерджи»

Ключевые слова:

#твердая изоляция;  
#целлюлоза;  
#фибриллы древесины;  
#модификация материалов; #водная дисперсия целлюлозы;  
#материал с большой удельной поверхностью.



Природа миллионами лет создавала уникальный по своим свойствам продукт синтеза углевода (глюкозы) в растительных и живых клетках, который в современности является самым распространенным природным биополимером — целлюлозой [1]. Несмотря на развитие синтетических и арамидных современных материалов, потенциал применения целлюлозы — самой дешевой основы для производства высококачественных современных изоляционных материалов — отнюдь не исчерпан. Исчерпаны возможности традиционных методов производства изоляционных материалов на основе целлюлозы.

В настоящее время складываются возможности для развития передовых отечественных технологий и создания революционных изоляционных материалов в Российской Федерации. Сможем ли мы этим воспользоваться? В России, как ни в одной другой стране мира, сконцентрированы огромные запасы полезных ископаемых, древесины, минеральных и водных ресурсов — материальной базы для развития технологий переработки этих ресурсов с целью получения качественных изоляционных материалов. Однако необходимо признать и осознать, что с 1990-х годов отечественная перерабатывающая отрасль промышленности, которая призвана обеспечить основу высокотехнологичного производства, до сих пор оказывается мало ликвидной. Российская целлюлозно-бумажная промышленность производит в основном стандартную тарную продукцию с низкой добавленной стоимостью, не обеспечивая достаточный сортамент и качество отечественных изоляционных материалов на рынке внутри страны. Нет условий и стимула для развития высокотехнологичной переработки целлюлозы. Уникальные материалы по исследованиям целлюлозы отечественной наукой, разработки со-

ветских и российских лабораторий по обработке целлюлозы оказываются невостребованными и остаются внутри стен лабораторий и научных учреждений. Зачастую высокотехнологичную изоляционную продукцию, востребованную в нашей стране, производят из наших ресурсов зарубежные предприятия. Традиционные материалы отечественного производства: крафт-бумага большого раскрытия, высококачественный картон разной плотности, прессшпан часто не выдерживают конкуренции по качеству, сортаменту и срокам поставки с готовой импортной продукцией. В таких условиях дальнейшее развитие отечественной промышленности энергетического машиностроения в части производства изоляционных систем не будет суверенным, обречено зависеть от импортного сортамента и ценообразования. Необходимы условия, когда собственная ресурсная база будет системно перерабатываться в материалы с высокой добавленной стоимостью и ликвидностью. В настоящее время в России стимула к наукоемкой переработке целлюлозы в промышленных масштабах явно недостаточно.

Мы потеряли культуру ведения лесного хозяйства. При этом наша страна имеет возможность производить весь спектр качественных изоляционных материалов: электротехническую бумагу и картон широкого ассортимента и раскрытия, прессшпан, химические компоненты и т.д., но мы не делаем этого по причине тотальной дезорганизации и отсутствия стимула узкоспециализированных производств. Ограниченные по объему рынка специальные изоляционные материалы и компоненты в современных условиях проще заместить импортной готовой продукцией без модернизации отечественного производства.

В настоящее время активно строятся и развиваются производства си-

ловых трансформаторов в странах СНГ. В данный момент эти страны обеспечены как европейскими, так и азиатскими изоляционными материалами. Подобные материалы есть и у нас, однако их стоимость завышена и отнюдь не производителями этих материалов. Смогут ли отечественные заводы конкурировать на равных с производствами силовых трансформаторов в странах СНГ без искусственных рычагов рыночного регулирования? Когда мы начнем производить доступные изоляционные материалы в Российской Федерации и наладим полный цикл их производства из собственного сырья с уровнем качества и ассортимента импортных?

Целлюлоза — это дешевая и доступная основа для производства изоляционных изделий. Уникальные качества твердой изоляции во многом обусловлены химической идентичностью целлюлозы и минерального масла [2]. Доля отказов маслонаполненных трансформаторов по причине изменения свойств материалов в эксплуатации (старение) составляет более 20% [3]. Улучшение диэлектрических свойств погружной изоляции с целью увеличения ее надежности и в настоящее время актуально.

В отечественных профильных лабораториях уже получены изоляционные материалы на основе целлюлозы с уникальными изоляционными свойствами. Импортные производители таких материалов после научных изысканий и организации локального производства уже перешли к стадии оптимизации этого производства в промышленных масштабах. Стоимость изоляционных материалов нового поколения на основе целлюлозы пока соизмерима с современными арамидными синтетическими аналогами. Однако рост потребления и спрос на продукцию глубокой переработки целлюлозы в других отраслях промышленности снизят эту стоимость до оптимального значения.

## ПРОИЗВОДСТВО ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, БУМАГИ И КАРТОНА В РОССИИ В 2021–2022 ГГ., ТЫС. Т

Таблица 1

	2021	2022	Прирост
Целлюлоза древесная	8825047	8769491	0,99
Бумага и картон	10372725	10047538	0,97
Бумага газетная	1298756	1079591	0,83
Картон тарный (крафт-лайнер)	1982935	1796103	0,91
Бумага для гофрирования из полуцеллюлозы	386487	392292	1,02
Бумага для гофрирования регенерированная	2061267	2192177	1,06
Тест-лайнер (для гофрирования картона)	985377	965681	0,98
Бумага и картон мелованные	116614	119806	1,03
Картон гофрированный	3505560	3415378	0,97

На основе данных ФСГС (Росстат)

## СТЕПЕНЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЧИСТОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ С РАЗНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ [5]

Таблица 2

Целлюлоза	Степень полимеризации
Чистая целлюлоза	3500–12000
В твердой изоляции нового трансформатора	1100–1500
В твердой изоляции трансформатора после длительной эксплуатации	400–500
По окончании ресурса трансформатора	150–200

Образцы модифицированных изоляционных материалов на основе целлюлозы обладают лучшими диэлектрическими свойствами, по сравнению с традиционными аналогами. Современные возможности науки и техники позволяют синтезировать в одну устойчивую молекулярную структуру молекулы и атомы традиционных материалов с разными физическими свойствами. По примеру углепластика, где органические полимеры закреплены на каркас из кристаллической решетки углерода, подобным же образом на молекулу целлюлозы возможно присоединить полимер или органическое соединение. Таким образом, новый материал будет обладать полезными диэлектрическими свойствами

как целлюлозы, так и полимера. Новые изоляционные материалы будут иметь увеличенный срок эксплуатации и преимущества, по сравнению с традиционными: высокую гидрофобность, высокую стабильность в условиях электромагнитных полей и поляризации, большую степень полимеризации [4] до 3500 (табл. 2), увеличение уровня пробивного напряжения, стойкость к развитию ЧР.

Стоит отметить, что изоляционный материал, такой как бумага, — это устойчивая система из разных взаимосвязанных и устойчивых компонентов, каждый из которых определяет физические свойства, которые трудно изменить независимо друг от друга [6]. Улучшение одних свойств без ухуд-

шения других представляет серьезную научную задачу с увеличением сложности и стоимости производства. Например, в традиционной электротехнической бумаге лигнин (смесь ароматических полимеров) обеспечивает прочность, но его содержание в бумаге — основная причина старения погружной в масло изоляционной системы при длительной эксплуатации. Это особенно хорошо видно на примерах эксплуатации высоковольтных вводов с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) после длительной эксплуатации. Применение в импортном производстве вводов с БМИ-изоляцией бумаги с низким содержанием лигнина [7] (число Каппа 25, или 3%) вместе с химически нейтральными материалами в производстве — алюминий, фарфор — обеспечило их надежность и относительно низкую стоимость производства. Такие вводы до сих пор востребованы в региональных и муниципальных сетях отечественной энергетики, прежде всего по причине их низкой стоимости и достаточного опыта эксплуатации вводов с БМИ-изоляцией. Минимизация лигнина в электротехнической бумаге желательна, однако это приводит к потере прочности и увеличению стоимости производства электротехнической бумаги. Поэтому задача модификации любого изоляционного материала — сохранение полезных изоляционных свойств при одновременном уменьшении негативных с учетом стоимости такой оптимизации.

В настоящее время в связи с выработанным сроком эксплуатации вводов с БМИ-изоляцией наблюдается увеличение их повреждаемости. Пробой БМИ-изоляции ввода часто сопряжен с потерей основного оборудования, что значительно увеличивает убытки от последствий таких аварий в энергосистемах. В настоящее время наблюдается тенденция массовой замены вводов с бумажно-масляной изоляцией на вводы с современными сухими типами изоляции RIP и RIN. Однако надежность вводов

с любым типом изоляции будет определяться прежде всего качеством ее производства.

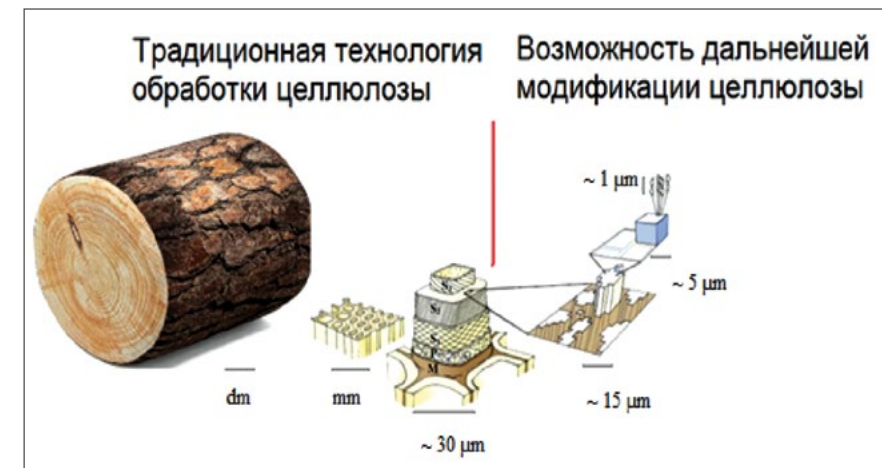
В обычной древесине сосны: 40–45% целлюлозы, около 35% гемицеллюлозы — смеси полисахаридов, главным образом пентозы и гексозы, 25% лигнина. Целлюлоза — это стержневая часть древесных волокон (фибрилл), которую окружает каркас из смеси полисахаридов и лигнина [8]. Традиционная обработка древесины включает в себя технологические процессы сульфатации (варки) при температуре до +160 °С и отсутствии кислорода. При этом происходит растворение и неполное удаление части полисахаридов в жидком растворе, а также уменьшение содержания лигнина до уровня 6–8%. Затем следуют процессы дегидратации с последующей технологической сушкой, формовкой и раскроем производимой массы в бумагу [9]. Традиционный процесс производства бумаги — это неполное отделение целлюлозы от остальных компонентов химическим способом. При этом бумага содержит не только компоненты переработанной древесины, но и продукты производства.

С увеличением чистоты и процентного содержания отделяемой целлюлозы стоимость производственного процесса возрастает. Поэтому традиционный способ получения целлюлозы в настоящее время оптимизирован с учетом как качества конечного продукта, так и его стоимости.

Вместе с тем чистая целлюлоза в древесине имеет вид волокон (фибрилл) длиной до 30  $\mu\text{m}$  в отдельных пучках. Выделенная в чистом виде целлюлоза получила название «микрофибриллированная», а процесс ее получения и механического отделения от остальной массы древесины — «микрофибрилляция». Для выделения фибрилл используют свойство целлюлозы набухать в водном растворе (дисперсия), при этом молекулы целлюлозы не растворяются и не по-

## СОСТАВ И СТРУКТУРА ДРЕВСИНЫ. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Рис. 1



вреждаются. С использованием гомогенизаторов высокого давления, микрофлюидизаторов с высоким напряжением сдвига, шлифовальных машин и рафинеров, ультразвуковых дезинтеграторов в лабораторных условиях происходит размельчение волокон целлюлозы с образованием микро- и нанофибриллированной целлюлозы. Эти процессы возможно оптимизировать с помощью органических растворителей и химических реагентов. Разработаны новые методы получения целлюлозы, включающие стадии каталитической пероксидной делигнификации древесины с последующим сернокислотным гидролизом, ультразвуковой обработкой и лиофильной сушкой [10]. За рубежом уже освоены технологии производства микрофибрилляции в масштабах промышленности.

Измельченная масса фибрилл целлюлозы размером менее 15–30  $\mu\text{m}$  представляет собой мелкодисперсную целлюлозу и минимальным содержанием лигнина и смеси полисахаридов. Фибриллы в своей структуре состоят из беспорядочно переплетенных более мелких устойчивых волокон, которые в свою очередь состоят из длинных молекул целлюлозы.

Свойства целлюлозы после микрофибрилляции определяются не только строением ее отдельных цепных молекул, но и их взаимным расположением, т.е. надмолекулярной и морфологической структурой волокна [11]. Добавление к фибриллированной массе воды не повреждает молекулы и не растворяет целлюлозу [12]. При этом вода, находясь между длинными молекулами целлюлозы, позволяет отдалить их взаимное расположение друг от друга, образуя поверхность с хаотично расположенными длинными молекулами целлюлозы в виде дисперсии (гелеобразной массы) с ключевым свойством — необычайно высокой удельной поверхностью со свободными карбоксильными группами [6]. Форма дисперсии сохраняет молекулы целлюлозы, однако высокая удельная поверхность позволяет «наращивать» на молекулу целлюлозы органические и полимерные молекулы в достаточном количестве и на молекулярном уровне соединять молекулы целлюлозы и других материалов с разными физическими свойствами.

Дисперсия целлюлозы и есть продукт микрофибрилляции — основы для синтеза изоляции нового поколения. Такая основа найдет широкое

## ФИБРИЛЛЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ДРЕВЕСИНЕ

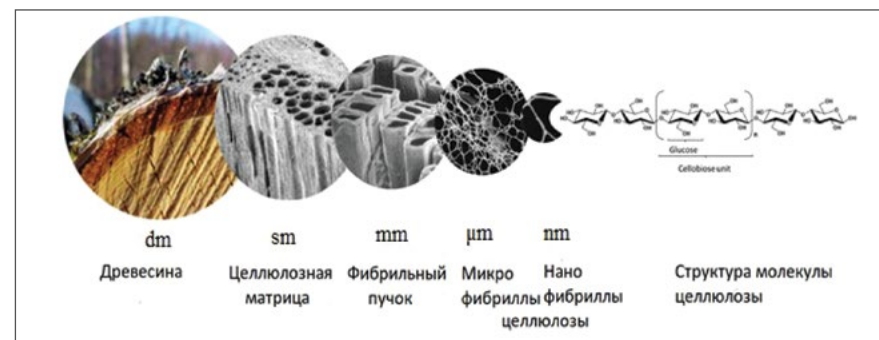


Рис. 2

применение также в медицине, строительстве, химии, парфюмерии и т. д.

Материалы с высокой удельной поверхностью (с большим отношением площади поверхности к массе материала) с успехом создавались в СССР. Простейший пример — активированный уголь — материал с большой удельной поверхностью за счет пористой структуры и, как следствие, большой абсорбционной способностью. Полезные свойства подобных материалов активно исследовались в конце 70-х — начале 80-х годов в СССР, и теоретические основы впервые позволили синтезировать гидрогель метилкремниевой кислоты. Это удалось д. х. н. Ирине Борисовне Слиняковой и к. х. н. Ирине Михайловне Самодумовой в Институте физической химии им. Л.В. Писаржевского АН Украинской ССР (г. Киев). Молекулярная структура геля с большой удельной поверхностью активного вещества способна захватывать токсичные продукты желудочно-кишечного тракта организма человека вкратно большем количестве, чем при традиционной структуре геля или активированного угля. Это уникальное свойство геля позволяет выводить также продукты радиоактивного распада из желудочно-кишечного тракта человека, что было подтверждено применением этого материала при ликвидации последствий аварии на Черно-

быльской АЭС. В настоящее время гель носит название «Энтеросгель» и является современным аналогом активированного угля, применяется в медицинских целях.

Гелеобразная масса целлюлозы и воды — химически устойчивая суспензия удаленных друг от друга молекул целлюлозы со свободными карбоксильными группами.

Возможность замещения водорода в гидроксильной составляющей ОН карбоксильной группы присоединением молекул химических веществ с целью придания альтернативных физических и химических свойств материалу — и есть основа модификации [12]. Таким образом, к молекуле целлюлозы можно присоединить или вытеснить из состава воду в определенных условиях и получить готовый изоляционный материал, в том числе с гидрофобными свойствами. В результате получается композит на основе целлюлозы — совокупность нескольких составляющих, не способных на химическое взаимодействие в обычных условиях, в одном материале. Если изоляционный материал работает в паре с минеральным маслом, то добавки должны быть химически нейтральны к маслу. Таким образом, полученный материал сохраняет положительные свой-

ства целлюлозы и приобретает новые свойства без ухудшения традиционных. Уже получены изоляционные бумаги с большой гидрофобностью, уникальной прочностью и одновременно эластичностью, стабильностью, в том числе в условиях работы в электрических полях.

Изменение давления при синтезе гелеобразной фибриллярной основы и добавки в виде химического компонента позволит регулировать не только плотность изоляционного материала (от мягкой, сплошной или пористой структуры до твердого материала — прессшпана), но и диэлектрическую проницаемость твердой изоляции. Такие свойства изоляционных материалов невозможно получить при традиционном способе переработки целлюлозы. Почему это важно?

Идеальный диэлектрик не имеет свободных носителей заряда. Реальный диэлектрик — твердая изоляция на основе целлюлозы, погруженная в минеральное масло, всегда содержит свободные носители заряда, основные из которых — группы ОН, ориентация и перемещение которых, в условиях внешнего электрического поля, обуславливает процессы поляризации в диэлектрике. Эти процессы обуславливают скопление и развитие потоков зарядов, рассеивание энергии в зоне границы твердого и жидкого диэлектриков — материалов с разной диэлектрической проницаемостью. Таким образом, зона с разными значениями диэлектрической проницаемости — это потенциальная естественная область накопления заряда, возникновения и развития частичных разрядов, и чем выше напряженность внешнего поля, тем интенсивнее накапливается заряд. С увеличением диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика относительно жидкого напряженность поля на границе таких сред будет увеличиваться, что создает условия для развития частичных

разрядов на поверхности твердого диэлектрика.

Стойкость к развитию разрядной активности в условиях внешнего электрического поля наряду с другими факторами, такими как присутствие осадочных коллоидных частиц, полярных соединений в твердом и жидком диэлектриках, будет определять надежность системы изоляции. Имея возможность оптимизировать плотность при производстве целлюлозной изоляции, можно получать твердую составляющую изоляции с оптимальной однородной плотностью и диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика [7]. Тем самым рассеивание энергии в условиях внешнего поля будет происходить не на поверхности твердого диэлектрика, а будет смещено в объем жидкого диэлектрика, с возможностью восстановления изоляционного промежутка при перемешивании масла и с увеличением надежности изоляционной бумажно-масляной системы в целом.

В настоящее время разработаны технологии модификации материалов на основе целлюлозы путем химического способа с помощью окислительной реакции TEMPO.

Получение фибрилл в виде основы с относительно высоким содержанием целлюлозы открывает возможности и для оптимизации способов производства систем высоковольтной изоляции.

Во-первых, модификация структуры самого целлюлозного материала позволит увеличить степень полимеризации, регулировать плотность изоляционного продукта от мягкой электротехнической бумаги до прессшпана, повысить стабильность и стойкость к возникновению частичных разрядов, улучшить стабильность и диэлектрические свойства изоляционного материала.

## ФИБРИЛЛЫ В ВИДЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ МАССЫ. СТРУКТУРА ФИБРИЛЛ ИЗ ВОЛОКОН ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПОД МИКРОСКОПОМ



Рис. 3

## СТРУКТУРА МОЛЕКУЛ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ С ОБРАЗОВАНИЕМ БОЛЬШОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПРИНЦИП МОДИФИКАЦИИ МОЛЕКУЛЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Рис. 4



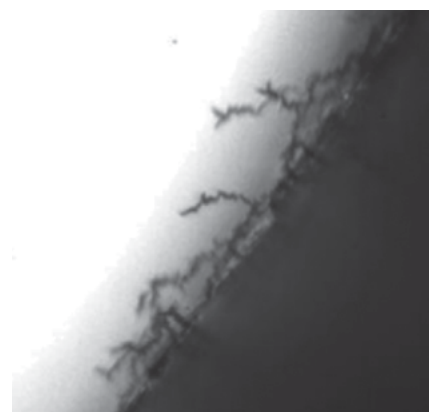
Во-вторых, нанесение изоляционного материала на основе фибрилл целлюлозы непосредственно на проводник позволит наносить (напылять) изоляцию с нужной плотностью, с равномерным нанесением без газовых включений. Позволит также изготавливать многослойные изоляционные материалы из слоев обычной и модифицированной бумаги с повышенными изоляционными характеристиками. Возможно получение сеток с гидрофобными свойствами на основе целлюлозы с плотностью, близкой к плотности

смолы, для оптимизации системы изоляции высоковольтных вводов.

В-третьих, использование 3D-принтера в формировании любых конфигураций изоляционных изделий разных плотностей позволит оптимизировать организацию производства. Фибриллы, изготовленные на предприятии в регионах, могут быть упакованы и доставлены непосредственно изготовителю системы изоляции. Завод-изготовитель при этом, имея 3D-принтер, может получить изоляционную деталь любой плотности и конфигурации непосредственно

### РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА, ПОГРУЖЕННОГО В ЖИДКИЙ ДИЭЛЕКТРИК. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА БОЛЬШЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОГО

Рис. 5



на производстве, что исключит его зависимость от ограниченности сортамента и сроков поставки изоляционных комплексуемых.

В-четвертых, добавление органических и полиамидных синтетических материалов может улучшить стойкость к механическим нагрузкам путем увеличения эластичности, стойкости к растяжению и увеличить изоляционные свойства, в частности уровень напряжения пробоя. Уменьшить абсорбцию к воде и практически до 0 снизить ее. Увеличить температурную стойкость изоляционного материала.

В-пятых, путем ввода в фибриллы материалов с полярными молекулами, например оксида цинка или диоксида кремния, действительно удается увеличить поверхностную стойкость к образованию и развитию частичных разрядов на поверхности твердого диэлектрика.

Российская энергетика имеет все возможности для развития технологий, подобных микро- и нано-

фибрилляции, однако для этого нужна системная организация.

Развитие методов восстановления систем изоляции, находящихся в эксплуатации, также представляет научную задачу и требует системного подхода: сначала теоретических и прикладных (экспериментальных) основ в научных учреждениях, затем практических стадий изучения. Многие из этих методов изучались советской наукой, но в последующий исторический период не получили своего развития и оказались невостребованными или были замещены.

Одним из таких интересных направлений являются процессы очистки изоляционных жидкостей от полярных продуктов старения целлюлозы и минерального масла методом его прогонки через электрическое поле с применением электрофильтров [13]. Эти методы получили название «электродинамические». Экспериментальные основы для этих методов разрабатывались и изучались советскими и российскими учеными, в частности в Институте прикладной физики Академии наук Молдовы, однако после 1990-х годов развития данные методы не получили.

Суть этих методов состоит в пропуске изоляционной жидкости через электрофильтр с заданной полярностью и напряженностью. Полярные частицы под действием постоянного поля группируются и «отлаиваются» электрофильтром. Основная проблема при этом связана с относительно большой плотностью изоляционной жидкости, и при очистке возникает интенсивное электроконвективное перемешивание среды, препятствующее разделению масла и раствора полярных частиц. Эффективность очистки зависит как от оптимальной конструкции электрофильтра, так и от условий фильтрации (разности потенциалов и силы тока), а также параметров и условий жидкого диэлектрика: плотности, вязкости, температу-

ры, расхода через электрофильтр и т.д. Организация такого процесса непосредственно в баке трансформатора, когда активная часть и бак представляют собой два изолированных друг от друга электрода, вполне может быть предметом научных и практических исследований для реализации метода.

Еще одним «забытым», но интересным методом уменьшения твердых коллоидных соединений на конструктивных частях силового трансформатора является метод диспергирования. Это намеренное добавление не растворимой в масле жидкости, которая абсорбирует и связывает растворимые в масле частицы, в том числе растворяет твердые коллоидные соединения, не растворимые в масле бака трансформатора. Далее следует последующее отделение фракций очищенного масла от раствора с вредными соединениями.

Упрощение методов диагностики — также один из путей практической оптимизации с одновременным расширением диагностических данных. Например, широкое применение диэлектрической спектроскопии для диагностики высоковольтных вводов современными комплексами импортного производства ограничивается их доступностью на объектах эксплуатации.

Однако в нашей стране с 60-х годов прошлого века применялся метод измерения емкости систем изоляции силовых трансформаторов и высоковольтных вводов на разных частотах испытательного напряжения. Уже тогда было известно, что ухудшение параметров изоляции, в том числе вследствие ее увлажнения, наиболее чувствительно в области низких частот испытательного напряжения. Тогда были выработаны критерии оценки состояния твердой изоляции трансформаторов и выпускались приборы, которые измеряли емкость на фиксированных частотах 50, 2 и 0,25 Гц [14].

Однако выпуск этих приборов прекращен с середины 90-х годов [15]. Измерение параметров изоляции не на сплошном спектре частот, а на определенных их значениях позволит не только упростить, но и расширить диагностические данные на низких частотах. Возможно повысить уровень тестирующего напряжения и упростить конструкцию измерительной установки.

Оптимизация процессов сушки твердой изоляции как силового трансформатора, так и твердой сухой RIP-изоляции высоковольтных вводов в последнее время становится все более востребованной. Нередко встречаются случаи необходимости оперативной сушки и восстановления параметров изоляции в условиях эксплуатации. Эффективность экстракции влаги из слоев изоляции зависит от теплопроводности внешних слоев изоляции и в меньшей степени — от глубины вакуума (в баке) или высокой температуры (в баке или сушильном помещении). При глубоком вакууме или чрезмерно высокой температуре при сушке влага из поверхностных слоев изоляции будет интенсивно выходить и испаряться, уменьшая теплопроводность внешних слоев изоляции, и тем самым ухудшать поступление влаги из внутренних слоев к внешним внутри изоляции. Это означает, что для эффективного удаления влаги из диэлектрика гораздо важнее поддерживать оптимальный мягкий режим сушки в условиях средних температур и вакуума для постепенного выхода влаги из изоляции по всей глубине диэлектрика. Чрезмерный нагрев, например RIP-изоляции более 80 °С, может повредить структуру изоляционного материала, быть причиной образования газовых включений по причине интенсивного парообразования. Следует выбирать оптимальные режимы сушки, исходя из степени увлажнения изоляции, с целью равномерного содержания влаги в толщине диэлектрика непосредственно после сушки.

### Краткие выводы:

- Возможности изоляционных материалов на основе целлюлозы ограничены традиционными методами ее производства.
- Микро- и нанофибриллированная целлюлоза является основой для производства изоляционных материалов нового поколения с увеличенным сроком службы твердой изоляции.
- Возможно качественно улучшить диэлектрические свойства изоляционных материалов на основе целлюлозы, в том числе увеличить гидрофобность, а также расширить ассортимент выпускаемой изоляционной продукции.
- Приведены способы восстановления свойств твердой изоляции силовых трансформаторов на основе целлюлозы и высоковольтных вводов с RIP-изоляцией.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Фляте Д.М. Технология бумаги: учебник для вузов. Москва, 1988.
2. Журавлева Н.М., Кизеветтер Д.В., Резник А.С., Смирнова Е.Г. О повышении ресурса бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов // Электротехника. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 4 (231). 2015.
3. Бузаев В.В., Сапожников Ю.М., Деметьев Ю.А., Дарьян Л.А., Смекалов В.В., Чичинский М.И. О необходимости единой системы физико-химической диагностики изоляции оборудования трансформаторных подстанций // Энергетик. 2004. 2004. № 11.
4. СТО ПАО «Россети» 34.01–23–003–2017. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле.
5. Е Чо Куанг. Восстановление высоковольтной изоляции. Университет Саутгемптон. Великобритания, 2004.
6. Хренников А.Ю. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие для магистров / А.Ю. Хренников, В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, Н.М. Александров. Москва: Директ-Медиа, 2022.
7. Холертц Р. Изоляция высокого напряжения на основе целлюлозы. Швеция, 2017.
8. Болотова К.С., Чужин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Лесн. журн. 2016. № 6. С. 153–165. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.153.
9. Лобанок А.Г., Бабицкая В.Г., Богдановская Ж.Н. Микробный синтез на основе целлюлозы: белок и другие ценные продукты // Наука и техника. 1988. 261 с. ISBN 5-343-00283-8.
10. Яценкова О.В., Скрипников А.М., Карачаров А.А., Мазурова Е.В., Воробьев С.А., Кузнецов Б.Н. Новый метод получения микрофибриллированной целлюлозы из древесины ели // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 303–314. DOI: 10.14258/jcprtm.2020016105.
11. Анпилова А.Ю., Масталыгина Е.Е., Храмева Н.П., Попов А.А. Способы модификации целлюлозы при разработке полимерных композитных композиционных материалов // Химическая физика. 2020. № 1. С. 66–74. DOI: 10.31857/S0207401X20010021.
12. Чжэньчжэнь Ли, Вэнься Лю, Фейсян Гуань, Годонг Ли, Чжаопин Сон, Дахай Ю, Хуэйли Ван, Хонг Лю. Изготовление прозрачной бумаги методом микрофибрилляции. Государственная ключевая лаборатория материалов на биологической основе и производства экологически чистой бумаги. Технологический университет Цилу, Шаньдунская академия наук. Цзинань, Шаньдун, Китай. Elsevier, Carbohydrate Polymers. Vol. 214. 2019. pp. 26–33.
13. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Исследование процесса очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в электрическом поле. Институт прикладной физики АН РМ. Кишинев, Республика Молдова.
14. Кулаковский В.Б. Контроль влажности изоляции по методу «емкость — частота» // Электричество. 1951. № 2.
15. Алексеев Б.А. Контроль влажности в изоляции силовых трансформаторов. Использование поляризационных явлений. ВНИИЭ.

Для цитирования: Суханов А.Ю. Импортозамещение: возможные направления улучшения и восстановления свойств твердой изоляции силовых трансформаторов на основе целлюлозы // Энергия единой сети. 2023. № 5–6 (71). С. 64–71.