

Министерство лесной промышленности СССР
Всесоюзное научно-производственное объединение
целлюлозно-бумажной промышленности (ВНПОбумпром)

На правах рукописи

БОРИСОВ Юрий Алексеевич

УДК 621.315.614.6

ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕЩЕННОГО ПРЕССОВАНИЯ И СУШКИ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО КАРТОНА
ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

05.21.03. - Технология и оборудование химической
переработки древесины;
химия древесины.

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Рябков А.В.

г. Ленинград 1991

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.....	8
I. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО КАРТОНА (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР).....	9
I.1. Требования, предъявляемые к качеству электроизоляционного картона, применяемого в трансформаторостроении для продоль- ной изоляции.....	9
I.2. Подготовка массы. Формование картона.....	11
I.3. Прессование и сушка картона в горячем прессе.....	16
I.4. Способы интенсификации массопереноса влаги в процессе сушки.....	20
I.5. Старение как метод оценки эксплуатационных свойств материалов.....	23
I.6. Выводы и основные задачи экспериментальной части.....	26
2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	
2.1. Методика исследования деформации сжатия картона по толщине.....	29
2.2. Выбор и характеристика целлюлозы, использованной для изготов- ления лабораторных образцов картона.....	30
2.3. Описание лабораторных установок для изготовления образцов картона и методика исследования различных способов сушки картона в горячем прессе.....	32
2.4. Методика микроскопических исследований структуры срезов картона по толщине.....	34
2.5. Методика определения давления набухания картона по толщине.....	34

	Стр.
2.6. Методика определения концентрации свободных радикалов методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)	35
2.7. Методика термогравиметрических исследований процесса десорбции влаги	35
2.8. Методика исследования старения электроизоляционного картона	36
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	
3.1. Исследования деформации сжатия картона по толщине	39
3.1.1. Исследование сжимаемости картона при различных температурах и длительном нагружении	39
3.1.2. Исследование уплотнения картона в горячем прессе	46
3.2. Определение основных технологических параметров подготовки массы, формования картона, его прессования и сушки	50
3.2.1. Исследование влияния степени помола массы и массы 1 м^2 элементарного слоя на показатели качества электрокартона	51
3.2.2. Определение приемлемого давления прессования при сушке картона в горячем прессе. Микроскопические исследования процесса прессования и сушки	55
3.3. Исследования различных способов сушки картона в горячем прессе	62
3.3.1. Исследование высокочастотной сушки картона в горячем прессе	62

	Стр.
3.3.2. Исследование контактной сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении	68
3.3.3. Исследование вакуумной сушки картона в горячем прессе	72
3.3.4. Связь давления набухания и усадочного напряжения с удельной теплотой смачивания целлюлозы. Обоснование снижения давления на последней стадии сушки картона в горячем прессе.....	75
3.3.5. Разработка ступенчатого режима прессования с учетом форм связи воды с волокнами целлюлозы при сушке картона в горячем прессе	80
3.3.6. Сравнение эффективности различных способов сушки картона в горячем прессе	92
3.3.7. Разработка способа изготовления картона повышенной плотности путём сушки в горячем прессе....	99
3.4. Исследование эксплуатационных свойств жёсткого электроизоляционного картона	101
3.4.1. Оценка срока службы картона методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) при термическом старении	102
3.4.2. Десорбция влаги и электрическая прочность пропитанного трансформаторным маслом картона	109
3.4.3. Исследование старения картона в трансформаторном масле при воздействии температуры и электрического поля	114
3.4.4. Исследование динамического старения картона с наложением электрического поля	120
3.5. Разработка технической документации на производство жёсткого картона. Режим совмещенного	

	Стр.
прессования и сушки картона в горячем прессе	124
3.5.1. Разработка исходных данных на проектирова- ние и технологического регламента. Режим сушки картона	125
3.5.2. Разработка технических условий на жёсткий картон. Уровень качества жёсткого картона.....	129
3.6. Общие выводы	132
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	134
5. ПРИЛОЖЕНИЯ:	146
1. Заявка 5-22 Минэлектротехпрома	147
2. Расчёт экономического эффекта	158
3. Акт внедрения	160

ВВЕДЕНИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития до 2000 года [1] предусмотрено:

"В области естественных наук расширять исследования... в создании ... новых видов продукции, развивать исследования в области ... преобразования и передачи электроэнергии.

В электротехнической промышленности организовать изготовление высокоэффективного оборудования для ЛЭП постоянного тока напряжением 1500 кВ. Продолжить формирование единой энергетической системы, осуществить строительство межсистемных ЛЭП напряжением 500, 750 и 1150 кВ переменного и 1500 кВ постоянного тока".

Для организации изготовления данного оборудования подотрасль электротехнической промышленности испытывала острую потребность в жёстком электроизоляционном картоне высокой плотности с высокими упругими свойствами и стабильной формой.

В нашей стране для высоковольтных трансформаторов с масляным заполнением освоено производство электроизоляционного картона с конвективной сушкой. Такой картон обладает высокой сжимаемостью под давлением и высокой остаточной деформацией, имеет повышенное коробление при хранении и эксплуатации. Поэтому предприятия электротехнической промышленности поставлены перед необходимостью уплотнять такой картон, пропуская его в виде полосок небольшой ширины между вальцами. Прессование волокон при вальцевании готового картона не является удовлетворительным, т.к. возможно их раздавливание, внешне проявляемое в виде пятен мраморности и свидетельствующее о разрушении целостности структуры и потери механической прочности. Возникающие же при вальцевании внутренние напряжения приводят к короблению картона во время его хранения или после переработки в детали - во время эксплуатации трансформаторов [2]. Деформация опорных реек и цилиндров, а также деталей цокольной

изоляции может привести к ухудшению циркуляции масла и повышению температуры эксплуатации изоляции в локальных областях.

Электроизоляционный картон, используемый в качестве продольной изоляции в силовых высоковольтных трансформаторах, в эксплуатационных условиях подвергается электрическим, температурным и механическим воздействиям. В режиме короткого замыкания и при коммутационных перегрузках трансформаторов эти воздействия особенно значительны, причем характер нагрузки синусоидальный с частотой вдвое большей промышленной частоты. При недостаточной упругости картона в результате многократных таких воздействий ослабляется первоначальная прессовка обмоток трансформатора, что может привести к чрезмерной деформации обмоток радиальными усилиями и выходу из строя трансформатора.

Проблема снижения деформации коробления деталей изоляции трансформаторов и повышения динамической устойчивости их обмоток решается применением жёсткого электроизоляционного картона. Производство такого картона может быть организовано только на специальном оборудовании по технологии совмещённого прессования и сушки в многошлочном горячем прессе.

В соответствии с приказом Минлеспрома СССР № 109 от 5 марта 1984 года строительство производства трансформаторного жёсткого картона выполнено на Малинской бумажной фабрике хозспособом в период 1984-1986 годах. Освоение производства - 1988 году. Марийский филиал ВНИИБ (в настоящее время - Волжский НИИ ЦБП) - разработчик технологии изготовления данного картона.

В соответствии с изложенным разработка технологии совмещённого прессования и сушки жёсткого электроизоляционного картона и освоение его производства на Малинской бумажной фабрике является актуальным и важным вопросом, имеющим большое народнохозяйственное значение.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

-ступенчатый режим прессования и сушки картона различной толщины в горячем прессе, зависимость его параметров от форм связи воды с волокнами целлюлозы;

-способ изготовления электроизоляционного картона повышенной плотности и пониженной сжимаемости путём его сушки в горячем прессе;

-эксплуатационные свойства жёсткого электроизоляционного картона на основе активационной модели процесса старения при воздействии температуры и электрического поля.

I. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО КАРТОНА (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

I.1. Требования, предъявляемые к качеству электроизоляционного картона, применяемого в трансформаторостроении для продольной изоляции

При существующей добыче минеральные и органические ископаемые будут полностью выработаны за 75–100 лет, поэтому будущее принадлежит материалам из восстанавливающихся сырьевых источников (древесина, целлюлоза). Благодаря специфике свойств целлюлозные материалы (бумага и картон) являются незаменимыми в высоковольтных трансформаторах и других аппаратах с масляным заполнением [3] и сохраняют своё применение в настоящее время [4], а также в будущем [5, 6] ввиду развития энергосистем. Номенклатура показателей и требования, предъявляемые к качеству трансформаторного картона, нормируются как международным [7], так и национальными стандартами ведущих стран мира, включая нашу страну (ГОСТ 4194–88).

Особенности условий эксплуатации продольной изоляции в высоковольтных трансформаторах с масляным заполнением [6, 9] обуславливают требования, предъявляемые к качеству используемого для продольной изоляции жёсткого электрокартона.

Одним из таких требований является высокая стойкость картона к электрическому напряжению. В сравнении с прогнозами некоторых западноевропейских стран, например, Англии, для которой в ближайшие 25 лет вполне достаточно напряжения ЛЭП 400 кВ при росте суммарной передаваемой мощности до 125–175 ГВт [10], в нашей стране, имеющей значительно более протяжённую территорию, взамен распространённого класса напряжения ЛЭП 750 кВ в ближайшее время потребуется напряжение 1500 кВ. Единичная мощность трансформаторов за последние 20–25 лет возросла в десять раз. Качественное улучшение

шло за счет новых видов изоляции. Масса исполинов-трансформаторов достигла 650-800 т. В результате роста передаваемых мощностей и снижения потерь в ЛЭП к началу будущего столетия напряжения ЛЭП возрастут до 2000-3000 кВ, что соответствует линиям с единичной пропускной способностью 15 ГВт и 35 ГВт. Наиболее предпочтительным считается напряжение 2300 кВ [11].

Другим важным требованием является высокая устойчивость картона к механическому напряжению и вибрации, т.к. в процессе эксплуатации трансформаторов происходит вибрация их частей [12], значительно усиливающаяся по амплитуде и механическому напряжению в режиме короткого замыкания и при коммутационных перегрузках. При отсутствии резонанса амплитуда колебаний не превышает 400 мкм и разрушения отсутствуют. Прессовка обмоток повышает собственную частоту радиальных колебаний обмоток с 65 Гц до 115-200 Гц [12] и их радиальную устойчивость, поэтому повышение жёсткости и плотности картона повышает его упругие свойства и обеспечивает высокую стойкость обмоток при осевых вибрациях [13]. Согласно экспериментальным данным, осевые усилия при перегрузках могут существенно (в несколько раз) превышать усилие первоначальной прессовки обмоток. В настоящее время не удалось разработать удовлетворительный теоретический расчёт устойчивости обмоток как при изготовлении, так и при эксплуатации трансформаторов. Трудности заключаются как в постановке исходной задачи в виде модели, так и в определении исходных данных, среди которых следует отметить отсутствие обоснованных предельных значений токов (мощностей) короткого замыкания для сетей различного напряжения [14]. Поэтому предполагалось выполнение крупномасштабного экспериментального моделирования. Такие исследования проводятся как у нас в стране, так и за рубежом [15]. Опыт эксплуатации трансформаторов, а также экспериментальные иссле-

дования показывают, что высокая виброустойчивость обмоток трансформаторов обеспечивается применением для продольной изоляции трансформаторов электроизоляционного картона высокой плотности, повышенной механической прочности, малой сжимаемости и минимальной остаточной деформации [2, 6, 7, 15].

Требованием, определяющим стойкость электроизоляционного картона к электрическому напряжению в пропитанном состоянии, является его маслостиваемость, косвенно характеризующая пористость картона, которая обеспечивает массоперенос влаги из глубоких слоёв к поверхности картона в процессе сушки, а также подобную диффузию продуктов разложения целлюлозы и трансформаторного масла в процессе старения [16] при эксплуатации трансформаторов.

Важным требованием, определяющим стабильность высоты обмоток трансформаторов при их монтаже, является снижение допустимого отклонения толщины картона от номинального значения [2, 6], а требованием, определяющим стабильность высоты обмоток в процессе их сушки, является способность картона сохранять толщину в процессе сушки, т.е. его низкая линейная деформация по толщине [2, 6].

1.2. Подготовка массы. Формование картона

Основные стадии производства электроизоляционного картона связаны с технологическими операциями обработки целлюлозы во влажном состоянии: роспуск волокнистой массы, её размол, а также формование, прессование и сушка картона. Поэтому гидрофильные свойства целлюлозы являются наиболее важными с теоретической и практической точки зрения при подготовке массы для производства электроизоляционного картона.

Гидрофильные свойства целлюлозы, согласно современным представлениям, обусловлены особенностями её молекулярного [17] и надмолекулярного [17, 18] строения. Наличие малоупорядоченных участ-

ков в структуре природной целлюлозы, её капиллярно-пористое строение и сильно развитая внутренняя поверхность, а главное – присутствие в каждом элементарном звене трёх гидроксильных групп определяет сорбцию воды целлюлозой. В процессе сорбции происходит изменение поверхностной энергии твёрдого остова целлюлозы и выделяется теплота смачивания [17, 19, 20]. Существуют две концепции, объясняющие явление сорбции: концепция поверхностной сорбции и концепция растворения, которые, как показали Уайт и Эйринг, для капиллярно-пористых коллоидных тел не имеют большого различия [20]. Количество влаги, адсорбированное целлюлозой, зависит от её предистории, влажности и температуры окружающего воздуха. Изотермы сорбции и десорбции имеют S-образную форму и образуют петлю гистерезиса. На первом, параболическом участке изотермы сорбции, обращенном выпуклостью к оси влагосодержаний целлюлозы, происходит мономолекулярная адсорбция, на остальной части – полимолекулярная адсорбция [19].

Согласно современным представлениям [20], основанным на существовании в целлюлозе высокоупорядоченных и малоупорядоченных участков, сорбция воды начинается в доступных для сорбции малоупорядоченных участках на свободных, не участвующих в водородных связях гидроксильных группах. В высокоупорядоченных областях сорбция не происходит, т.к. все гидроксильные группы связаны водородными связями. Сорбция даже небольших порций влаги приводит к набуханию волокон, которое обуславливает разрушение водородных связей между молекулами целлюлозы и приводит к увеличению центров сорбции, способных при поглощении влаги привести к дальнейшему набуханию целлюлозы и образованию новых сорбционных центров.

Для различных видов природной целлюлозы и даже для всех капиллярно-пористых коллоидных тел природа сорбции одинакова [19, 20]. Согласно термодинамической аналогии между набуханием и растворе-

нием, процесс набухания коллоидного тела следует рассматривать как процесс образования твёрдого раствора [19, 20], а теплоту, выделяющуюся при набухании, считать аналогичной теплоте растворения. Теплота смачивания, выделяющаяся при поглощении первых порций жидкости, достигает очень больших величин [20, 21, 22]. С возрастанием влажности целлюлозы теплота смачивания быстро снижается. Это обусловлено изменением энергии связи молекул воды в мультислоях по мере их удаления от целлюлозного остова. Целлюлоза, обладающая более рыхлой структурой и меньшей упорядоченностью (мерсеризованная и регенирированная), проявляют большую способность к набуханию при водопоглощении и имеет большую теплоту смачивания в сравнении с природной целлюлозой (хлопок, рами и др.), которая обладает более упорядоченной структурой.

В состоянии моно- и полимолекулярной адсорбции существенно изменяются свойства воды: значительно увеличивается её плотность [19, 23] снижается температура замерзания [19, 23], затормаживается молекулярная подвижность [24].

Размол приводит к увеличению сорбционной способности целлюлозы [25, 26], кипячение целлюлозы в воде, а также её сушка приводят к увеличению упорядоченности её структуры и снижению сорбционной способности, причем сушка приводит к необратимому уменьшению её сорбционных свойств [20]. В процессе сушки клеточные стенки волокон целлюлозы уплотняются, а объём, занимаемый порами заполненными водой, уменьшается, тогда как объём воздушных пор, например в картоне [27], по мере повышения его сухости увеличивается. Кинетика линейной деформации целлюлозы зависит от форм связи поглощенной влаги [28]. Для полного удаления воды из целлюлозы необходима температура 105°C , тогда как, согласно расчёту [29], минимальная температура, достаточная для осуществления дегидратации при атмосферном давлении, составляет 83°C .

Согласно современным представлениям [25, 30], влага, адсорбированная целлюлозными материалами (в частности, на основе сульфатной целлюлозы), разделяется на следующие виды: от 0 до 5-6% - влага мономолекулярной адсорбции; от 5-6% до 10-15% - влага полимолекулярной адсорбции; от 10-15% до 50-60% - влага капиллярной конденсации; более 50-60% - свободная влага (приведены значения влагосодержания). Характерные точки перехода влаги в различные формы сорбции не имеют существенной зависимости от способов удаления влаги (способов сушки).

Основной причиной возникновения усадочных напряжений и давлений набухания, согласно А.В.Лыкову [19], является действие сил поверхностного натяжения в капиллярах. Этому же мнению поддерживаются и другие исследователи [31-33]. Силы поверхностного натяжения в капиллярах обусловлены изменением поверхностной энергии мультислоёв воды [34]. Поэтому существует зависимость между поверхностной энергией и теплотой смачивания, что позволяет предположить о существовании связи удельной теплоты смачивания с усадочным напряжением и давлением набухания целлюлозы.

Качество бумаги и картона в значительной мере определяется свойствами используемых волокнистых полуфабрикатов и химических вспомогательных веществ [35, 36]. Наиболее высокими эксплуатационными свойствами обладает электроизоляционный картон, изготовленный из сульфатной хвойной небелёной целлюлозы [2]. На потребительские свойства целлюлозных диэлектриков в значительной мере влияет качество производственной воды [37]. Процесс размола является одной из существенных операций при подготовке массы для производства картона. Размол приводит к гидратации и набуханию волокон, придаёт им эластичность, вызывает их расщепление и укорочение. Исследованиями процесса размола показано влияние степени разработки волокон на электрическую прочность картона [38], его усадку при

сушке [39], механическую [40, 41] и межслоевую [42] прочность. Исследование влияния степени помола массы при изготовлении картона [43] показывает, что большое число показателей картона имеют экстремум в интервале 45–55 °ШР. В работе [44] некоторые показатели картона имеют тенденцию к повышению вплоть до степени помола 65 °ШР. Таким образом, источники информации дают неоправданно широкий, с точки зрения энергоёмкости, интервал по степени помола массы.

Степень разработки массы, её гидратация в процессе размола со своей стороны предопределяют процесс формирования элементарных слоёв на сетках формирующих цилиндров и соединение их на форматном валу картоноделательной машины [45, 46]. Исследованиями процесса формирования картона показано, влияние скорости сеточного цилиндра на механические свойства картона [40, 41], а также влажности элементарных слоёв на его межслоевую прочность [42]. В зависимости от массы 1 м^2 элементарного слоя, скорости машины, степени помола массы и вида используемого сырья концентрация массы при формировании колеблется в пределах 0,05–1 % [41]. Сухость слоя составляет: на сетке формирующего цилиндра 3–4 % [42]. По современным данным [47], как в процессе изготовления, так и в готовых целлюлозных материалах межволоконные и внутриволоконные связи обеспечиваются трехмерной сеткой, образованной молекулами воды.

Разработаны способы изготовления электроизоляционного картона путём применения добавок и размола волокнистой массы: стойкость картона к поверхностным разрядам повышают путём размола массы до 50–55 °ШР и прессования листов влажного картона в течение 1,5–2,0 мин при давлении 0,95–1,0 МПа [48], линейную деформацию картона по толщине снижают путём добавки в волокнистую массу до 18 % лавсановых волокон [49], диэлектрические свойства картона улучшают путём добавки в волокнистую массу 10–15 % полиметиленоксидных волокон [50].

а прочностные и диэлектрические свойства повышают путём добавки в волокнистую массу 1,5–2,0 % поливинилспиртовых или 30–35 % триацетатных [51] волокон, для повышения же масловпитываемости картона в качестве добавок в волокнистую массу используют до 20 % порошка окиси алюминия или 1–5 % полинозных волокон [52]. Однако указанные способы не обеспечивают повышение плотности картона, снижение его сжимаемости и остаточной деформации. Кроме того, применение дорогостоящих добавок в волокнистую массу приводит к существенному удорожанию картона.

1.3. Прессование и сушка картона в горячем прессе

Процесс прессования и сушки, выполняемый в горячем прессе одной операцией, является наиболее важным с точки зрения обеспечения максимальной производительности технологической линии и получения картона высокого качества. Основными параметрами процесса сушки картона в горячем прессе являются: температура плит пресса, давление прессования и продолжительность сушки, имеющие зависимость от толщины изготавливаемого картона.

Температура плит пресса в интервале 120–160 °С оказывает незначительное влияние на качество жёсткого картона [44]. Следует ожидать влияния температуры плит пресса только на скорость сушки [43], т.к. с повышением температуры плит пресса повышается температура влажного картона и возрастает подвижность молекул воды. Но выше 150–160 °С температуру плит пресса повышать нецелесообразно, т.к. поверхностные слои картона, в особенности больших толщин, при высокой температуре плит пресса и большой продолжительности сушки по причине термодеструкции начинают желтеть. Указанная температура и рекомендована научно-техническими источниками [43, 44].

Работами ряда авторов [53, 54] показано, что сушка электрокартона в прессе улучшает его механические и диэлектрические свой-

ства по сравнению с конвективной. Г.А.Тольский считает, что при сушке в прессе происходит образование более прочных связей между волокнами, а также между элементарными слоями, чем при конвективной сушке, благодаря чему возрастает межслоевая прочность и прочности в машинном и поперечном направлениях, уменьшается пластическая деформация, снижается показатель сжимаемости. Это объясняется переходом в текучее состояние части лигнина и гемицеллюлоз, содержащихся в волокнах, под действием давления и температуры. При охлаждении текучие компоненты затвердевают и образуются более прочные связи между волокнами. Фактором, определяющим изменение свойств картона, является давление прессования, которое обеспечивает увеличение связей между волокнами, снижение пористости картона и повышение вследствие этого таких показателей как плотность, механическая и электрическая прочность, а также снижение таких показателей как сжимаемость, остаточная деформация, удлинение при разрыве и маслостойкость [38, 43]. Эти положения отмечены также ещё в ряде работ [44, 56-58]. Получение листового материала большой жёсткости возможно путём каландрирования при высоком давлении от 10 МПа до 40 МПа [59]. Для повышения плотности, уменьшения линейной деформации и сжимаемости под давлением известны способы [54, 60, 61], предусматривающие использование многоступенчатого прессования и сушки картона в горячем прессе при максимальном давлении от 1,4 МПа до 9,0 МПа. В работе [43] установлено, что максимальное изменение свойств картона при его сушке в горячем прессе происходит при давлении от 0 до 5,0 МПа. Дальнейшее повышение давления до 20 МПа и выше мало влияет на изменение свойств картона. Рекомендовано прессование и сушку вести при давлении 5,0-10,0 МПа и температуре плит пресса до 150 °С. Выгрузку картона проводить после охлаждения плит пресса до 60-70 °С. Для изготовления картона использовать целлюлозу ЭК-1.

или ЭК-2.

Таким образом, источники информации дают неопределенный интервал по максимальному давлению прессования картона: от 1,4 МПа до 10 МПа, также отсутствуют данные о зависимости давления прессования картона различной толщины во времени, кроме того, известные способы прессования имеют высокую продолжительность цикла сушки картона в горячем прессе.

Относительно механизма протекающих процессов с точки зрения изменения формы волокон и их расположения под влиянием давления прессования значительный интерес представляют работы японских авторов [62-63], которые посвящены горячему прессованию при производстве волокнистых плит. Авторы указывают, что деформацию волокон в плите в процессе горячего прессования можно примерно разделить на следующие три фазы по мере увеличения давления: 1) до 3 МПа происходит уменьшение размеров больших пустот между волокнами; 2) в пределах от 3 до 6 МПа увеличивается главным образом деформация поперечного сжатия, расщипывания волокон; 3) при давлении от 6 до 8 МПа полости волокон окончательно сокращаются, в результате чего материал сильно уплотняется. У. Грен [64] также указывает, что основными процессами, обуславливающими сжимаемость волокнистого материала, являются: а) изгиб волокон, зависящий в свою очередь от длины волокон и их сечения; б) поперечное сжатие (сплющивание) волокон; в) скольжение волокон относительно друг друга. Измерениями, проведенными на единичных волокнах [65,66], установлено, что сила, требуемая для полного сжатия влажного волокна целлюлозы осенней древесины сосны, равна 1,6 Н/см. Эти данные, с учетом результатов по измерению размеров волокон, позволяют рассчитать величину давления прессования, необходимого для полного сплющивания влажных волокон в структуре картона, т.е. его максимального уплотнения. Это давление составляет 5-7 МПа. Для сухого расщипленного

волокна в поперечном направлении модуль Юнга составляет приблизительно 0,6 ГПа [66], он зависит от предистории волокон, тогда как в продольном направлении волокна он значительно выше и составляет приблизительно 20 ГПа [67]. Связанная вода вытесняется давлением при прессовании [68]. Воздействие очень высоких давлений может привести к деструкции целлюлозы на различных структурных уровнях: раздавливанию волокон, разрушению надмолекулярной структуры и распаду макромолекул. При исследовании сосновой древесины максимальная плотность 1,20-1,23 г/см³ была получена при давлении 1000 МПа и температуре 100-150 °С.

Целлюлоза-линейный, гетероцепной стереорегулярный полимер [17]. Поскольку за молекулярный порядок в линейных полимерах ответственны относительно слабые связи с энергией (9-25) кДж/моль, молекулярные структуры в малоупорядоченных полимерах должны быть непрочными и легко разрушаться под действием теплового движения и механического напряжения [69-71]. Степень молекулярного порядка в линейном полимере зависит от температуры. При низких температурах характерны упорядоченные молекулярные структуры, при высокой температуре (в состоянии вязкого течения) упорядоченные структуры становятся нестабильными и легко разрушаются. Наряду с этим непрерывно существуют процессы молекулярной ориентации, т.е. восстановления структуры. Влияние длительного механического напряжения заключается в уменьшении вероятности восстановления структуры [70]. Для описания упругих и пластических свойств целлюлозных материалов (древесины, бумаги, картона) при их механическом нагружении удобно использовать механические модели, представляющие различные комбинации пружин и амортизаторов [17]. Обнаружена подвижность кристаллитов целлюлозы при воздействии внешнего давления [72]. Температура стеклования абсолютно сухой целлюлозы составляет 220 °С; при повышении влажности целлюлозы до 15 % темпе-

ратура стеклования снижается до 30–40 °С [73]. Это обстоятельство оказывает положительное влияние на повышение плотности картона в процессе его совмещённого прессования и сушки в горячем прессе.

Впервые систематические опыты по исследованию длительного нагружения материалов проведены С.Н. Мурковым с сотрудниками. Им же принадлежит и развитие современных представлений о физической природе длительной прочности и текучести материалов [74,70]. Согласно этим представлениям, внешнее механическое напряжение энергетически ослабляет структуру материала, снижая активационный барьер разрушения химических связей.

Приведенный анализ показывает, что деформация сжатия электроизоляционного картона по толщине под действием давления и температуры во времени отвечает картине вязкого течения полимеров с учётом волокнистого строения картона обуславливается процессами, протекающими на различных структурных уровнях.

1.4. Способы интенсификации массопереноса влаги в процессе сушки

Одним из энергоёмких процессов целлюлозно-бумажного производства является процесс сушки. В настоящее время дальнейшее развитие получила теория сушки: технологическая термодинамика, тепло- и массообмен и его моделирование. Применяемые способы сушки определяют спецификацию используемого технологического оборудования и его производительность. Широко используемая ранее конвективная сушка [76] для дисперсных материалов трансформировалась в новый вид: сушку в виброкипящем слое [77]. Конвективная сушка листового электроизоляционного картона, как было рассмотрено в гл. 1.4, заменяется на более эффективную – контактную сушку в горячем прессе.

При производстве рулонного картона используют контактную сушку [78]. Сушка картона на цилиндрах картоноделательной машины (КДМ) является по сути комбинированной сушкой, т.е. контактной

в комбинации с конвективной. Контактная сушка интенсифицирует теплопередачу от нагретых поверхностей сушильных цилиндров к влажному полотну картона.

Способом интенсификации массопереноса является вакуумная сушка. Согласно известной формулы Дальтона скорость испарения жидкости (Q) со свободной поверхности прямо пропорциональна площади испарения (S_c), разности давления пара на поверхности (H) и в окружающем пространстве (h) и обратно пропорциональна барометрическому давлению (P_δ):

$$Q = \frac{k_c \cdot S_c \cdot (H - h)}{P_\delta} \quad (I.I),$$

где k_c — коэффициент пропорциональности.

Значительное повышение скорости процесса следует ожидать при использовании вакуумной сушки в комбинации с контактной при сушке листового картона в горячем прессе, т.к. в течение всего процесса сушки благодаря хорошему контакту греющих поверхностей плит пресса с поверхностями высушиваемого картона обеспечивается высокая скорость теплопередачи, в результате чего испарение влаги должно происходить при повышенной температуре с повышенной скоростью, чего в иных устройствах, реализующих принцип вакуумной сушки достигнуть невозможно.

В последнее время одним из прогрессивных способов сушки материалов считается высокочастотная (диэлектрическая) сушка. В целлюлозно-бумажной промышленности высокочастотную сушку используют для повышения производительности сушки и в целях выравнивания влажности полотна целлюлозного материала по его ширине и толщине [79]. Изменение напряженности электрического поля высокой частоты вызывает вращение диполей воды в высушиваемом материале с той же частотой. Это и обуславливает тепловой эффект в процессе высокочастотной сушки.

Уравнение А.В.Лыкова [79] для массопереноса в процессе сушки имеет вид:

$$j = -a_m \rho_0 \Delta \vartheta - a_m^t \rho_0 \Delta t - k_p \Delta P_3 - a_m^{\text{э}} \rho_0 \tilde{\pi} \Delta E - a_m^{\text{м}} \rho_0 \tilde{\pi}_m \Delta B \quad (\text{I.2}),$$

где j — плотность потока влаги,
 ρ_0 — плотность сухого остова тела,
 a_m — коэффициент диффузии влаги,
 $\Delta \vartheta$ — градиент влажности,
 Δt — градиент температуры,
 ΔP_3 — градиент давления,
 ΔE — градиент напряжённости электрического поля,
 ΔB — градиент индукции магнитного поля,
 a_m^t — коэффициент термодиффузии влаги,
 k_p — коэффициент диффузии влаги, обусловленный градиентом давления,
 $a_m^{\text{э}}$ — коэффициент электродиффузии влаги,
 $a_m^{\text{м}}$ — коэффициент магнитодиффузии влаги,
 $\tilde{\pi}_3$ — удельная электрическая поляризация,
 $\tilde{\pi}_m$ — удельная магнитная поляризация.

Полагают, что использование высокочастотной сушки картона обеспечивает его равномерный прогрев по всему объёму и тогда следует считать, что градиент температуры и влажности стремятся к нулю. При использовании плоских электродов и отсутствии неравномерности распределения влажности по толщине картона градиенты напряжённости электрического поля и магнитной индукции также стремятся к нулю. Общее уравнение А.В.Лыкова применительно к данному случаю значительно упростится:

$$j = -k_p \Delta P_3 \quad (\text{I.3}),$$

т.е. процесс массопереноса при высокочастотной сушке будет в основном обуславливаться только градиентом внутреннего давления.

На основании изложенного объясняется увеличение скорости сушки при использовании высокочастотного нагрева.

1.5. Старение как метод оценки эксплуатационных свойств материалов

Термическое разложение материалов протекает во времени в соответствии с законами химической кинетики. Результаты деструкции материалов можно оценить по снижению их физико-механических, химических и электроизоляционных свойств. Процесс деструкции материалов протекает по свободнорадикальному механизму [80]. Стабильные свободные радикалы, регистрируемые методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), могут быть использованы для оценки степени старения материалов, в частности целлюлозы [81, 82].

Для определения срока службы электроизоляционных материалов и изделий разработаны ускоренные методы испытаний на старение. Эти разработки выполнены за рубежом, у нас в стране и обобщены Международной электротехнической комиссией (МЭК) [83]. В основу этих методов положено старение при нескольких фиксированных температурах и представление результатов в виде закона Аррениуса. Периодическое нагревание и охлаждение, моделирующее эксплуатационные колебания температуры, не оказывает влияния на скорость старения материалов и может не учитываться при старении.

В методике МЭК [83] отмечается, что зависимость контролируемого показателя (ρ) от продолжительности старения (τ) в координатах ($\rho - \ln \tau$) будет выражаться почти прямой линией. Приведенный анализ показывает, что линейная зависимость ρ от $\ln \tau$ выполняется для большого числа контролируемых при старении параметров, таких как: предел прочности при растяжении и относительное удлинение, число разрывов макромолекулы полимера (анаморфоза степени полимеризации), число двойных перегибов, электрическая прочность,

Аналитический вид уравнения старения получим в предположении, что скорость изменения регистрируемого параметра $p'(\tau)$ обратно пропорциональна продолжительности старения (τ), т.е.:

$$p'(\tau) = \frac{dp}{d\tau} = -\frac{1}{k \cdot \tau} \quad (I.4),$$

где k - коэффициент пропорциональности.

Решением этого уравнения будет:

$$p = -\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_k} \quad (I.5),$$

где τ_k - константа, выражающая гипотетическое время старения, при котором достигается значение регистрируемого параметра, равное нулю.

Уравнение (I.5) в координатах $(p - \ln \tau)$ выражается прямой линией. Порядок реакции старения в этом случае не равен I, а является сложным и может быть вычислен из уравнений (I.4) и (I.5).

Разработанная Журковым С.Н. с сотрудниками модель долговечности материалов, являющаяся в настоящее время общепризнанной [74, 80], в отличие от модели Аррениуса, описывающей только температурное воздействие, учитывает также влияние механического напряжения и аналитически выражается уравнением Журкова:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{W - \alpha \sigma}{RT}} \quad (I.6),$$

где τ - продолжительность старения,

τ_0 - предэкспоненциальный множитель,

W - энергия активации термического разложения,

- α - коэффициент пропорциональности,
 \mathcal{E} - разрушающее механическое напряжение при длительном приложении в течение τ ,
 R - универсальная газовая постоянная,
 T - абсолютная температура.

Однако модель Журкова С.Н. не учитывает влияние электрического поля при старении. В ряде работ [84-86] предприняты попытки учёта такого влияния.

Некоторые из моделей предполагают наличие пороговых уровней воздействующих факторов: [84, 86] - порогового механического напряжения, [86] - порогового электрического напряжения, ниже которых долговечность материала неограниченно возрастает. Вероятно, обнаруженные пороговые уровни связаны с изменением энергии активации и механизма деструкции материалов. При этом возможно повышение энергии активации и возрастание угла наклона кривой жизни материала, но не превращение энергии активации в бесконечно большую и соответственно неограниченного возрастания долговечности, как это принято в указанных моделях.

В докладе [85] для описания комплексного старения использована модель, предполагающая влияние механического (\mathcal{E}) и электрического (U) напряжения подобно влиянию температуры (T):

$$\ln \bar{L} = A + B / (T - n \cdot \ln U - m \cdot \ln \mathcal{E}) \quad (1.7),$$

где \bar{L} - средний срок службы, A и B - постоянные,
 n и m - коэффициенты.

Вытекающее из уравнения (1.7) следствие о том, что факторы U и \mathcal{E} имеют подобный температуре механизм действия, приводящий к повышению скорости старения материалов, не соответствует общепринятым физическим представлениям.

В целом по проблеме комплексного старения следует отметить не-

достаточное знание фундаментальных процессов в диэлектрике, что препятствует созданию достаточно простой модели старения и нетрудоёмкой методики проведения комплексных испытаний [85], так необходимых для оценки эксплуатационных свойств электроизоляционных материалов при их комплексном старении, в частности жёсткого электрокартона.

1.6. Выводы и основные задачи экспериментальной части

Особенности условий эксплуатации жёсткого электроизоляционного картона обуславливают требования, предъявляемые к его качеству со стороны потребителей: жёсткий электроизоляционный картон наряду с высокой плотностью, высокой механической и электрической прочностью должен обладать малой сжимаемостью и малой остаточной деформацией при сжатии, а также минимальной линейной деформацией по толщине.

Достижение требуемого качества жёсткого картона обеспечивается свойствами используемой целлюлозы, процессами подготовки массы, формирования на картоноделательной машине и главным образом процессом совмещённого прессования и сушки картона в горячем прессе.

В технологических процессах производства картона важную роль играет гидрофильные свойства целлюлозы, которые определяют формы связи воды с ней, выделяющуюся при этом теплоту смачивания и возникающее давление набухания. Процесс сушки картона сопровождается возникновением усадочных напряжений, которые необходимо учитывать при установлении параметров сушки.

Такие параметры производства электроизоляционных видов картона как концентрация массы по потоку её подготовки, сухость элементарных слоёв на формирующих устройствах КДМ, сухость картона на форматном валу и температура плит горячего пресса определены источниками информации. Одновременно источники информации дают неоправдан-

но широкий с точки зрения энергоёмкости интервал по степени помола массы $35-65^\circ \text{ШР}$, что затрудняет выбор размалывающего оборудования. Также отсутствуют сведения о влиянии на качество картона массы 1 м^2 элементарного слоя более $40-50 \text{ г}$. Кроме того источники информации дают неоправданно широкий интервал по давлению прессования, создаваемому горячим прессом, $2,5-7,5 \text{ МПа}$, что затрудняет разработку требований к нему. Отсутствуют данные по режимам прессования и сушки картона различных толщин. Не раскрыты процессы, происходящие в картоне на различных структурных уровнях при его прессовании и сушке в горячем прессе, а также при эксплуатации в качестве деталей продольной изоляции.

К видам сушки с интенсивным тепло- и массопереносом относятся: контактная, вакуумная и высокочастотная. Однако источники информации не дают сведений об использовании вакуумной и высокочастотной сушки в комбинации с контактной при прессовании и сушке картона в горячем прессе, а также - сведений об исследовании контактной сушки с учётом её возможной интенсификации.

Для оценки эксплуатационных свойств материалов используются методы их ускоренного старения. Важным является применение методов многофакторного старения, полнее учитывающих условия эксплуатации материалов. Однако недостаточное знание фундаментальных процессов в диэлектрике при многофакторном старении препятствует созданию достаточно простой модели старения и нетрудоёмких методик проведения комплексных испытаний. С разработкой данных методик могут быть более полно раскрыты преимущества жёсткого электроизоляционного картона в сравнении с освоенными в СССР промышленностью марками.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящей диссертационной работы является разработка научно-обоснованной технологии совмещённого прессования и сушки в производстве электроизоляционного картона повышенной плотности типа жёсткий для трансформаторов и аппаратов с масляным заполнением.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

Раскрыть влияние давления на процесс прессования электроизоляционного картона при сжатии по толщине с обеспечением сомкнутости его структуры применительно к условиям производства.

На основе экспериментальных исследований разработать режим совмещённого прессования и сушки картона в горячем прессе. Решить вопрос повышения его плотности и снижения сжимаемости.

Выполнить оценку эксплуатационных свойств жёсткого электроизоляционного картона в сравнении с базовым картоном по сроку службы при термическом и многофакторном старении в среде трансформаторного масла.

Разработать техническую документацию на промышленное производство жёсткого электроизоляционного картона с внедрением полученных в диссертационной работе результатов.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Методика исследования деформации сжатия картона по толщине

Исследования сжатия картона по толщине в среде трансформаторного масла при воздействии давления и температуры проводили на специально разработанном стенде [87]. Испытывали электрокартон марки Б (по ГОСТ 4194-88) в виде шайб с наружным и внутренним диаметром 29 мм и 21 мм соответственно и толщиной 2 мм. Высушенные и пропитанные по ГОСТ 12268-89 образцы в виде набора шайб высотой около 30 мм помещали в ванночки испытательного стенда. В ванночках циркулировало трансформаторное масло, температуру которого поддерживали термостатом с погрешностью ± 5 °С. Сжимаемость определяли при давлениях 10, 20, 30, 40, 50, 60 МПа, под действие которых образцы картона выдерживали в течение 30 суток при температурах 20, 40, 80, 100 °С. При каждой ступени нагрузки для определения показателя сжимаемости одновременно проводили 5 опытов. Средняя относительная погрешность среднего арифметического сжимаемости при доверительной вероятности 95 % составила 3.4 %.

Часть исследований проводили с использованием метода математического планирования эксперимента [88]. Дисперсию коэффициента регрессии вычисляли по формуле:

$$S_b^2 = \sum_1^N \sum_1^n (\Delta C_i)^2 / N_n (n-1) \quad (2.1),$$

где ΔC_i - абсолютная погрешность в опыте, n - число параллельных опытов, N_n - число опытов в матрице, i - номер опыта.

Проверку однородности дисперсий выполняли по критерию Кохнера путём сравнения расчётного значения с табличным. Критерий Кохнера рассчитывали из отношения максимальной дисперсии в горизонтальной строке матрицы планирования к сумме дисперсий в каждой строке.

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_i^2} \quad (2.2).$$

Доверительный интервал вычисляли:

$$\Delta v_j = \pm t \cdot S(v_j) \quad (2.3),$$

где t - критерий Стьюдента при 95 % доверительной вероятности.

2.2. Выбор и характеристика целлюлозы, использованной для изготовления лабораторных образцов картона

В СССР специально для производства электроизоляционных видов картона разработан ряд марок целлюлозы. Показатели качества указанной целлюлозы, изготавливаемой по ГОСТ 12765-83, приведены в табл. 2.1. Для сравнения в указанной таблице приведены также показатели качества целлюлозы марок FF40E и PG, используемой западноевропейскими фирмами для производства электроизоляционного картона повышенной плотности.

Таблица 2.1.

Сравнение качества отечественной и зарубежной электроизоляционной целлюлозы, используемой для производства картона

Наименование показателя и единица измерения	Значение показателя электроизоляционной целлюлозы, используемой для производства картона,					
	отечественной по ГОСТ 12765-83, марки				Зарубежной, марки	
	ЭК-1	ЭК-2	ЭК-2 первая категория качества	ЭК-3 высшая категория качества	FF40E	PG
I	2	3	4	5	6	7
Жёсткость, ед. Каппа	20-23	22-27	22-27	27-33	22,5	25-30
Динамическая вязкость 0,8 %-ного медно-аммиачного раствора целлюлозы, мПа.с (МПа), не менее	50 (500)	55 (550)	50 (500)	60 (600)	42-50 (420-500)	42-50 (420-500)

продолжение таблицы 2.1.

	1	2	3	4	5	6	7
Разрывная длина, м, не менее							
-при размоле в мельнице ЦРА до 60° ШР	9000	9000	9000	9500	-	-	
-при размоле в мельнице Лампена до 45° ШР	-	-	-	-	9700	-	
Массовая доля зо- лы,%, не более	0,50	0,45	0,60	0,50	0,45	0,25-0,30	
Водородный пока- затель, рН, не более	8,5	8,5	8,5	8,5	7,0	6,3 -7,0	
Удельная элек- трическая про- водимость вод- ной вытяжки, мкСм/см, не более							
при модуле I:50	25	25	30	25	27	15-20	
при модуле I:20	50	50	60	50	-	-	
Сорность-число со- ринок на 1 м ²							
-площадью от 0,1 до 1,5 мм включи- тельно, не более	2000	2000	2000	2000	-	-	
-площадью свыше 1,5 мм		не допускается					
Влажность,%	20±5	20±5	20±5	20±5	-	-	

Из таблицы 2.1. видно, что как отечественная, так и зарубежная электроизоляционная целлюлоза имеют высокую чистоту, характеризуемую низкой удельной электрической проводимостью водной вытяжки и зольностью, а также высокую механическую прочность. Жесткость зарубежных марок целлюлозы находится в интервале 22,5 - 30 ед Каппа. Целлюлоза с меньшей жесткостью имеет пониженную механическую проч-

ность, а с более высокой — труднее поддается размолу, образует более рыхлую структуру с низкой прочностью и плотностью. Учитывая данные обстоятельства, при сопоставлении отечественной и зарубежной целлюлозы из имеющихся по ГОСТ 12765-83 была выбрана целлюлоза ЭК-2. Целлюлоза указанной марки была использована в экспериментальной части работы, а также рекомендована для промышленного производства жесткого картона.

2.3. Описание лабораторных установок для изготовления образцов картона и методика исследования различных способов сушки картона в горячем прессе

Для изготовления образцов жесткого картона использовали комплект лабораторного оборудования производства фирмы "Пама" (ГДР), включающий в себя: лабораторный ролл вместимостью 150 л с двигателем мощностью 5 кВА, машинный бассейн вместимостью 1,5 м³ с роторной мешалкой, а также плоскосеточную машину с обрезной шириной 250 мм и скоростью до 3 м/мин, оборудованную форматным валом диаметром 305 мм для изготовления многослойного картона. Сушку образцов картона проводили в гидравлическом прессе фирмы "Weverk" с электрическим обогревом плит и автоматической регулировкой и контролем их температуры в интервале 20 - 300°С. Максимальное усилие прессования, развиваемое прессом, 75 т, размеры плит 350 x 350 мм, просвет между плитами — 100 мм.

При исследовании процесса сушки картона для контроля и записи температуры по толщине использовали потенциометр КСП-4 и хромель-алюмелевые термопары, для контроля влажности — влагомер типа "Feutron" с диапазоном контроля влажности 2-25 %. Текущие значения толщины картона контролировали как расстояние между плитами пресса с помощью индикатора часового типа ИЧ-0,01.

Для исследования высокочастотной сушки картона в горячем прессе использовали высокочастотный генератор мощностью 1,2 кВт, час-

тотой 13,56 МГц. Высоковольтный электрод генератора выполнен в виде плоской пластины из нержавеющей стали с тефлоновой изоляцией. Для высокочастотной сушки в пресс одновременно загружали два образца картона размером около 230 x 230 мм, размещая их с обеих сторон от высоковольтного электрода. Вторым электродом служили заземлённые плиты прессы. Высокочастотный генератор включали в работу при влагосодержании картона около 50 %. Сушку картона в горячем прессе с использованием высокочастотного нагрева проводили при различных значениях температуры плит прессы и давлении прессы.

В части исследований высокочастотной сушки использовали метод математического планирования [88].

В процессе исследования тепло - и массопереноса при различных способах сушки картона в горячем прессе в качестве контролируемых параметров использовали влагосодержание (W) и для надёжности параметр V , также косвенно определяющий влагосодержание картона. Параметр V выражается формулой:

$$V = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 100\% \quad (2.4.),$$

где d - текущая толщина картона при сушке,
 d_0 - толщина абсолютно сухого картона.

Параметр V прямо пропорционален влагосодержанию картона:

$$W = \frac{m_B}{m_K} \cdot 100\% \quad (2.5),$$

где m_B - масса воды в картоне,
 m_K - масса абсолютно сухого картона.

Пропорциональность толщины картона и его влагосодержания для значений, относящихся к связанной влаге, используется в ГОСТ 4194-88 при определении линейной деформации (усадки) картона.

Стандартная относительная погрешность среднего арифметического при экспериментальном определении параметров W и V не пре-

вышла 5 %.

2.4. Методика микроскопических исследований структуры срезов картона по толщине

Для получения микрофотографий срезов картона были изготовлены образцы различной плотности. С этой целью картон сушили при температуре $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$ и давлении 1,0; 2,0; 4,0; 5,0 МПа. Полученный картон толщиной около 10 мм разрезали фрезерной пилой на образцы размером 10 x 30 мм. Затем один конец каждого образца обрабатывали на наждаке в форме конуса и в конической части с помощью микро-тома делали срез. Поверхность среза рассматривали под микроскопом МБИ-6 и использовали для получения микроснимков в отражённом свете. Увеличение 180 крат.

2.5. Методика определения давления набухания картона по толщине

При проведении опытов по определению давления набухания картона использовали комплект оборудования, предназначенный для определения сжимаемости по ГОСТ 12268-89. Дополнительно к этому оборудованию для создания температурных условий в опытах применяли термостат типа ТС-24, обеспечивающий циркуляцию глицерина между двойными стенками ванночки, в которую помещали образцы картона. В качестве силовой установки использовали пресс ПСУ-50, обеспечивающий приложение усилия (0-500) МН.

Применяли образцы картона толщиной 2,0 мм в виде набора шайб с наружным и внутренним диаметром соответственно 60 мм и 20 мм и высотой 25 мм. Образцы помещали в ванночку испытательного приспособления, чередуя их с такого же размера шайбами из бронзовой сетки № 16 при надевании на центрирующий стержень. Приспособление с образцами закладывали между плитами прессы, подавали исходное дав-

ление на образцы и устанавливали индикаторы высоты образцов на нуль. В ванночку заливали дистиллированную воду до полного погружения образцов. Далее регулятором давления пресса поддерживали нуль индикаторов высоты образцов в течение всего времени сорбции ими воды. Возникающее при этом давление регистрировалось как давление набухания.

2.6. Методика определения концентрации свободных радикалов методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)

Концентрацию стабильных свободных радикалов определяли согласно известным методикам [89] на образцах массой около 50 мг. Образцы нарезали, высушивали до постоянной массы при температуре $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$, взвешивали и помещали в стеклянные ампулы, которые запаивали. Сигнал ЭПР записывали на радиоспектретре РЭ-1301 производства Смоленского радиомеханического завода. Параметры регистрации сигнала ЭПР: длина волны - 3,2 см, напряженность магнитного поля - 1,019 МА/м, развёртка 16-32 кА/м. Измерения концентрации свободных радикалов осуществляли путём сравнения площадей сигналов ЭПР испытуемого и стандартного образцов при равных условиях записи. В качестве первичного стандарта использовали дифенилпикрилгидразил. В каждой точке отбора образцов после старения концентрацию свободных радикалов определяли на шести-восьми образцах. Расчёт доверительных интервалов по концентрации свободных радикалов выполняли при доверительной вероятности 90 %.

2.7. Методика термогравиметрических исследований процесса десорбции влаги

Термогравиметрические исследования проводили на образцах, имевших исходную массу приблизительно 0,2 г. Насыщение образцов различным количеством влаги проводили следующим образом: а) выдерживали в дистиллированной воде 18 часов и б) выдерживали над поверхностью воды в закрытом эксикаторе при комнатной температуре в те-

ние двух суток. Термогравиметрический анализ проводили на венгерском дериватографе фирмы "МОМ". Энергию активации процесса десорбции влаги рассчитывали по методике Горовича Г.Г. [90]. Расчет выполняли с использованием уравнения:

$$\ln m = A' - \frac{W}{RT} \quad (2.6),$$

где m – потеря массы образца по кривой ТГ,
 A' – коэффициент,
 R – универсальная газовая постоянная,
 T – абсолютная температура,
 W – эффективная энергия активации.

2.8. Методика исследования старения электроизоляционного картона

Термическое старение для получения кривых жизни картона проводили на высушенных и пропитанных по ГОСТ 12268-89 трансформаторным маслом образцах картона. При одной фиксированной температуре проводили старение 7-10 образцов в среде трансформаторного масла. Для старения использовали термощкафы типа ВШ-1,5, снабженных вентиляторами и обеспечивающих температурную погрешность не более ± 2 °С. Оценку степени старения образцов проводили по пределу прочности при растяжении образцов и по концентрации термически инициированных стабильных свободных радикалов, измеренных методом ЭПР.

Испытания на длительную электрическую прочность, а также подготовку образцов (сушку и пропитку) выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 12268-89. Согласно поставленной задаче испытания на длительную электрическую прочность проводили при различных температурах трансформаторного масла и различных эффективных значениях напряжения промышленной частоты до наступления пробоя. Исполь-

зовали два плоских электрода диаметром 25 мм и 50 мм, изготовленные согласно ГОСТ 6433.3-71, с радиусом закругления краёв 5 мм. Относительная погрешность измерения напряжения не более 1,5 %. Время до пробоя регистрировали секундомером СОСЦ-26.

При проведении изотермического и динамического комплексного старения испытывали лабораторные образцы жёсткого картона и промышленные образцы картона марки Б (ГОСТ 4194-88) производства Серпуховской бумажной фабрики. Отобранные образцы сушили и пропитывали высушенным трансформаторным маслом в соответствии с требованиями ГОСТ 12268-89. До проведения старения образцы хранили в герметично закрытом сосуде в трансформаторном масле. Комплексное старение проводили при воздействии температуры и электрического поля на образец в среде трансформаторного масла. Для старения использовали высоковольтную нагревательную установку с плоскими электродами по ГОСТ 6433.1-71 диаметром 125 мм с радиусом закругления краёв 5 мм. Давление прижима образца между электродами 0,5 МПа.

Изотермическое комплексное старение проводили при различных фиксированных напряжённостях электрического поля от 0 до 25 кВ/мм и различных температурах от 20 до 190 °С. В качестве контролируемого параметра использовали продолжительность старения картона до пробоя. За результат принимали среднее значение четырех измерений. Нижнюю границу доверительного интервала по сроку службы определяли при 95 %-й доверительной вероятности.

Динамическое комплексное старение проводили при фиксированной напряжённости электрического поля и равномерном подъёме температуры трансформаторного масла в испытательной камере со скоростью (60 ± 10) °С/час на первой ступени и $(7 \pm 1,5)$ °С/час - на второй. Переход первой на вторую ступень производили за 30-40 °С до предполагаемой температуры пробоя, т.е. при 160-170 °С. После пробоя образца измеряли температуру пробоя погружённым в трансформаторное

масло термометром с ценой деления не более $1,0^{\circ}\text{C}$. Испытывали поочередно образцы контрольного и опытного картона. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение из 4-5 измерений температуры пробоа контрольного (\bar{t}) и опытного (\bar{t}') картона. Работоспособность принимали более высокой того картона, у которого более высокая температура пробоа с учётом выполнения условия неравенства температур пробоа $|\Delta t| > 2 \cdot |S|$, где $|\Delta t| = |\bar{t}' - \bar{t}|$, 2 - коэффициент, $|S|$ - общее стандартное отклонение температуры пробоа, Если $|\Delta t| \leq 2 \cdot |S|$, то работоспособность сравниваемых картонов принимали одинаковой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Исследование деформации сжатия картона по толщине

В условиях эксплуатации электроизоляционный картон, используемый в качестве изоляции в силовых высоковольтных трансформаторах, подвергается воздействию разнообразных факторов. Поэтому исследования реологических свойств картона в среде трансформаторного масла при воздействии температуры и давления представляет несомненную ценность как для потребителей, так и для изготовителей картона [91, 92].

Для анализа развития межволоконных взаимодействий, происходящих в картоне под действием давления и температуры во времени, исходную информацию можно получить из исследований, относящихся к производству древесно-волоконистых плит [17]. Для них характерна меньшая степень разработки волокон и наличие гемицеллюлоз и лигнина. Однако основные закономерности, связанные с возникновением химических и межмолекулярных связей, взаимодиффузией групп и сегментов макромолекул, могут быть использованы при исследованиях электроизоляционного картона.

3.1.1. Исследование сжимаемости картона при различных температурах и длительном нагружении

Представленные на рис. 1, 2, 3 и 4 кривые 1, 2 и 3 описывают изменение показателя сжимаемости картона после выдержки образцов под давлением соответственно в течение 1 часа, 1 суток и 30 суток при различных температурах. Изменение положения и формы кривой сжимаемости при увеличении температуры и продолжительности выдержки образцов под давлением отражает определенные процессы, которые происходят, по-видимому, на различных структурных уровнях. На микроскопическом уровне происходит сближение волокон и их коллапсия (сплющивание), т.е. превращение их сечения из круглого в эллипсовидное, а также их деформация осевого изгиба, обусловленная происходящими процессами размягчения аморфных компонентов, распре-

деленных на поверхности волокон. Процессы сближения волокон, их коллапсация и деформация осевого изгиба происходят совместно. Однако при определенных давлениях и температурах возможно преобладание одного из указанных процессов уплотнения картона. Это предположение позволяет объяснить форму кривых сжимаемости следующим образом.

Как видно из рисунков 1 и 2, при низких температурах вклад от различных процессов уплотнения наиболее разграничен. При давлениях 0–10 МПа (участок 0–а на рисунках) происходит сближение волокон и их коллапсация [62, 63]. Участок а–в отражает деформацию сжатия волокон в поперечном направлении. Вычисленная по этому участку величина модуля Юнга волокон в поперечном направлении составляет $43 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, что на 30 % ниже полученного в работе [65] значения указанного модуля Юнга для расплюснутых волокон целлюлозы. Следовательно, в картоне ещё имеются межволоконные промежутки, заполненные маслом.

Поведение аморфных компонентов целлюлозы, а также примесей имеющих в технических целлюлозах, отражает участок в–с–d который вследствие размягчения аморфных компонентов целлюлозы при увеличении температуры смещается в область низких давлений и становится более широким. Участок в–с показывает деформацию изгиба волокон по их оси. При этом в местах контакта волокна скользят относительно друг друга и картон ещё более уплотняется. Это объясняется размягчением распределённых по поверхности волокон аморфных компонентов целлюлозы под действием давления.

Аморфные вещества–вязкие жидкости. Некоторая доля аморфных спутников небелёных видов целлюлозы покрывает поверхность волокон и поэтому служит причиной скольжения их относительно друг друга под действием внешних нагрузок. Молекулы жидкостей, как и молекулы твёрдых тел, совершают тепловые колебания около положений равнове-

сия, однако у твёрдых тел положения равновесия молекул закреплены на своих местах, а у жидкостей по истечении времени "оседлой жизни", называемого также временем релаксации, положения равновесия смещаются на расстояние $\sim 10^{-8}$ см. Это объясняет основное свойство жидкого, а также полимерного состояния вещества, — их текучесть [17]. При наличии внешней силы, действующей на текучее вещество, преимущественные перескоки частиц происходят в направлении внешней силы, если продолжительность её действия во много раз превышает время релаксации молекул. Если же продолжительность действия внешней силы во много раз меньше времени релаксации, то жидкость ведёт себя как упругое (твёрдое) тело.

Смещение участка $b-c-d$ на рисунках 1 — 4 в область низких давлений при увеличении температуры свидетельствует о том, что время релаксации аморфных спутников целлюлозы принимает значение, соответствующее текучести при более низких давлениях, следствием чего является скольжение волокон относительно друг друга и их деформация осевого изгиба. На рисунках 2 — 4 участок $b-c-d$ кривой 1 более плоский, чем кривой 3. Это также свидетельствует о том, что положение и форма участка $b-c-d$ отражает поведение аморфных компонентов целлюлозы при изменении температуры и продолжительности выдержки образцов под нагрузкой. Используя данные рисунков 1 — 4, можно дать оценку времён релаксации аморфных компонентов технической целлюлозы. Например, при давлении 10–30 МПа и температуре 80°C время релаксации сравнимо с 1 часом (на рис. 3 участок $b-c-d$ кривой 1 плоский), но меньше одних суток (появляется выпуклость участка $b-c-d$ на кривой 2) и значительно меньше 1 месяца (выпуклость кривой 3 участка $b-c-d$ увеличивается).

Следует отметить, что строгих количественных данных относительно движения молекул аморфных компонентов целлюлозы на основа-

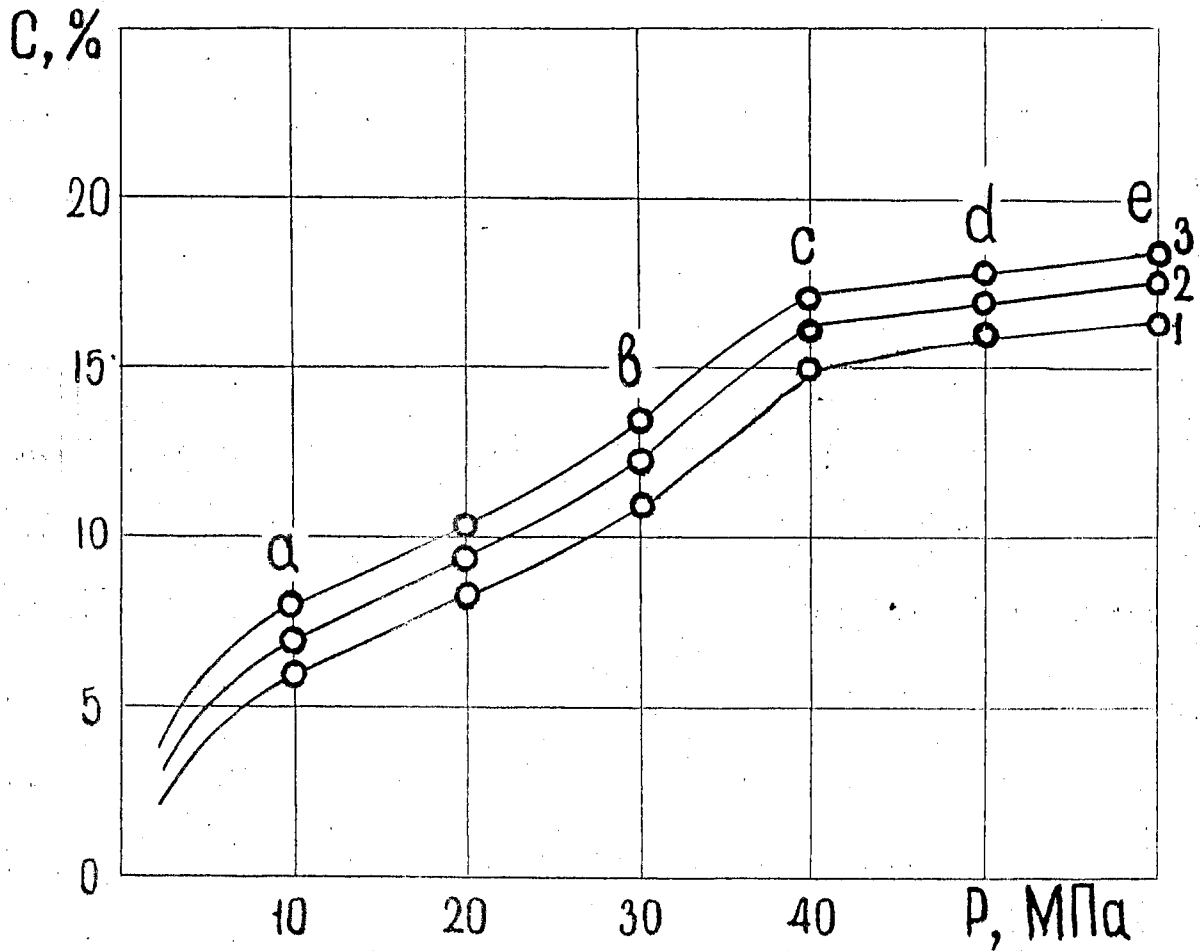


Рис. I. Зависимость сжимаемости электроизоляционного картона от давления при температуре 20°C . 1, 2, 3 - при продолжительностях выдержки образцов под давлением 1 час, 1 сут и 30 сут соответственно

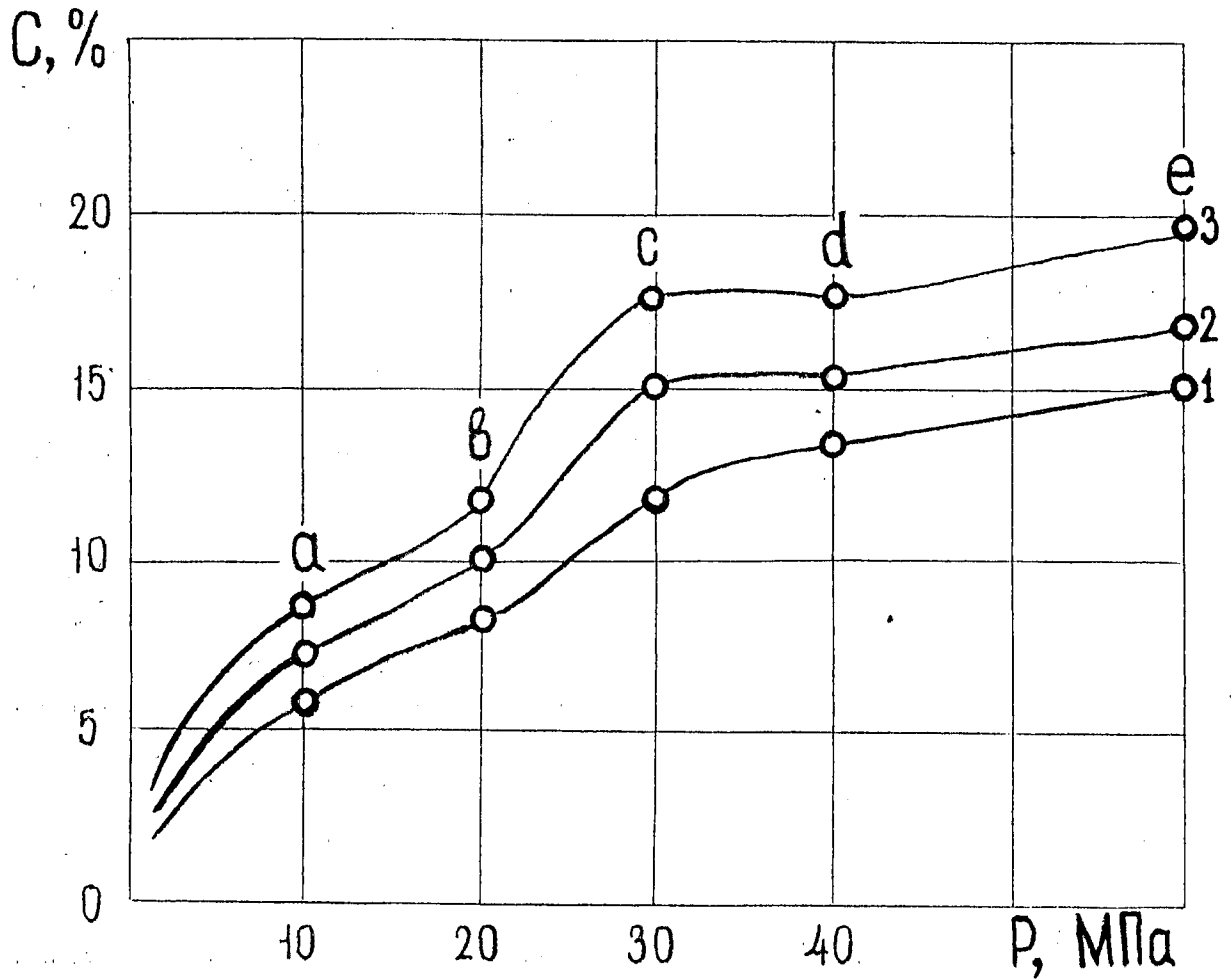


Рис.2. Зависимость сжимаемости электроизоляционного картона от давления при температуре 40°C . 1, 2, 3 - при продолжительностях выдержки образцов под давлением 1 час, 1 сут, 30 сут соответственно

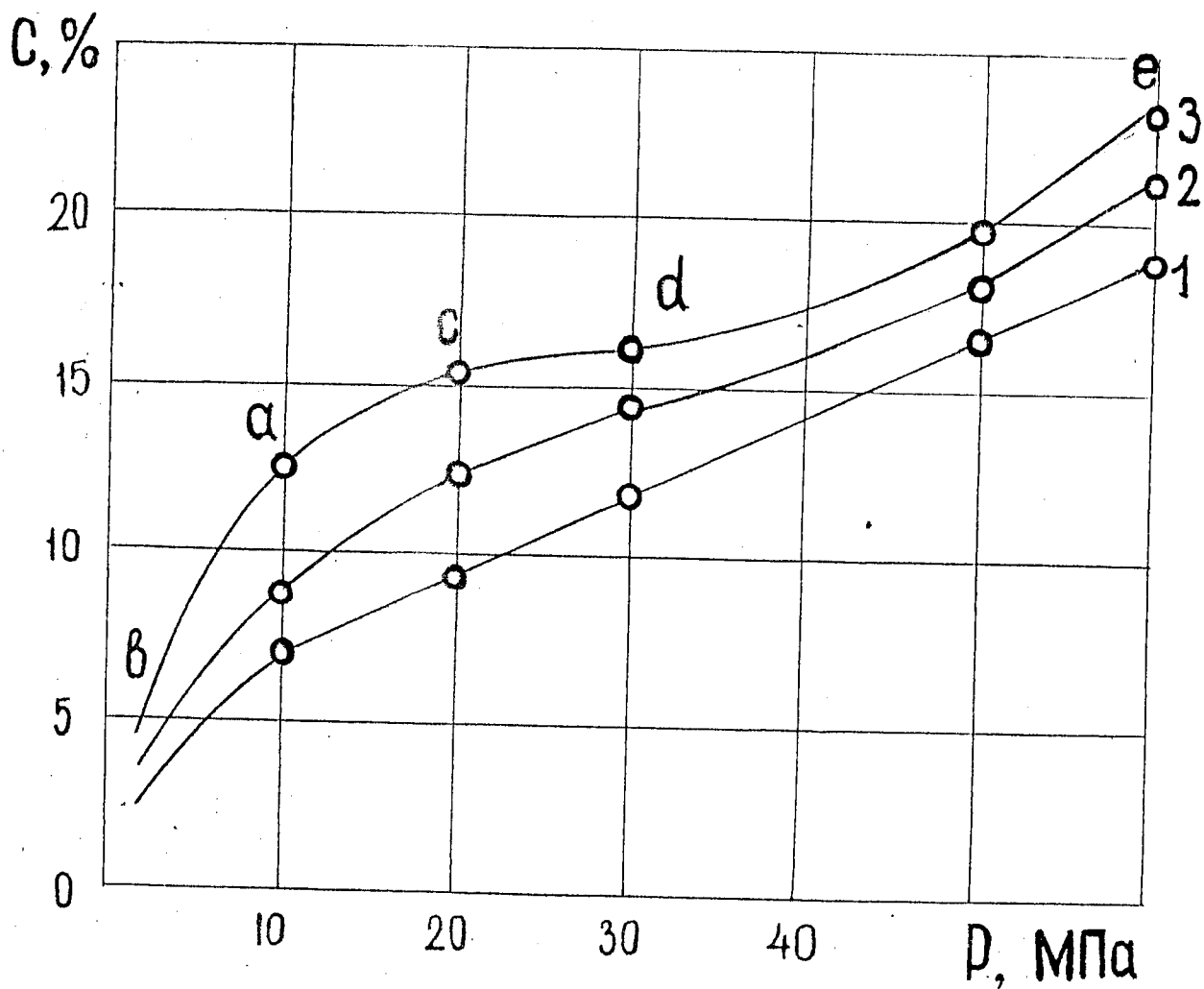


Рис. 3. Зависимость сжимаемости электроизоляционного картона от давления при температуре 80°C . 1, 2, 3 - при продолжительностях выдержки образцов под давлением 1 час, 1 сут и 30 сут соответственно

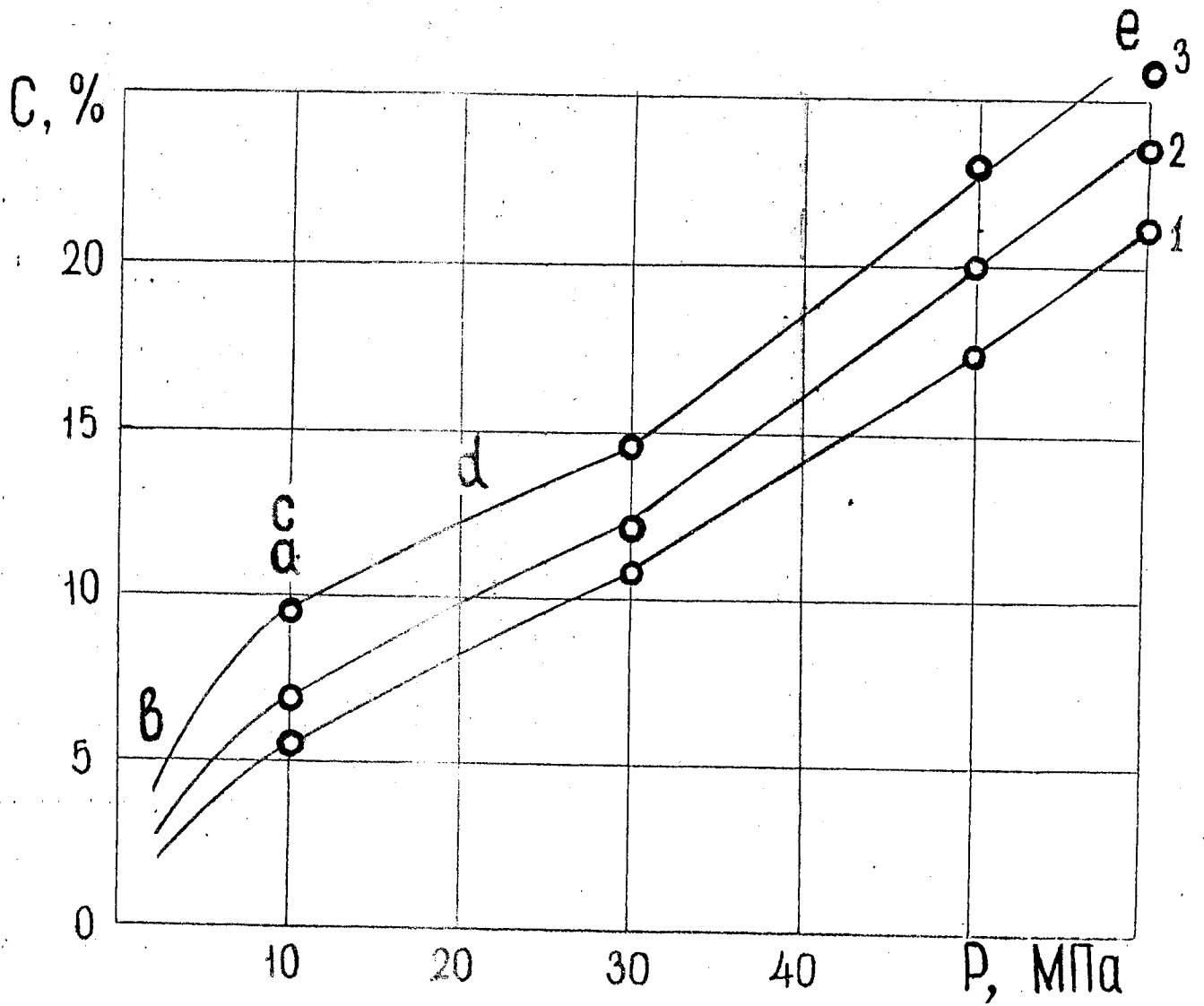


Рис.4. Зависимость сжимаемости электроизоляционного картона от давления при температуре 100°C . 1,2,3 - при продолжительностях выдержки образцов под давлением 1 час, 1 сут и 30 сут соответственно

нии приведённых на рис. 1-4 зависимостей получить нельзя, т.к. следует учитывать, что под действием внешнего давления в местах контакта волокон значения внутреннего напряжения превышают среднее напряжение в образце, а кривые сжимаемости являются откликом всей сложной системы, состоящей из целлюлозы, гемицеллюлоз с различной степенью полимеризации, лигнина, остаточной влаги и трансформаторного масла. Фильтрацией масла при выяснении механизма деформации сжатия электроизоляционного картона мы пренебрегли на основании того, что вид кривых сжимаемости по предварительным опытам в масле и без масла был одинаков.

ВЫВОДЫ 3.1.1

Деформация сжатия электроизоляционного картона по толщине при воздействии давления и температуры во времени отвечает картине вязкого течения полимеров и с учётом волокнистого строения картона обуславливается сближением волокон, их коллапсацией и деформацией осевого изгиба. С целью повышения плотности, а также упругих свойств картона рассмотренные процессы его уплотнения необходимо из условий эксплуатации перенести в условия производства.

Исходя из зависимости деформации сжатия картона по толщине от давления, температуры и продолжительности их воздействия, используя принцип суперпозиции Больцмана, следует подобрать условный оптимум указанных факторов при уплотнении картона в горячем прессе.

3.1.2. Исследование уплотнения картона в горячем прессе

В работе [55] авторы предложили уплотнять готовый картон в прессе. В своих опытах они использовали трансформаторный картон марки Б (ГОСТ 4194-73) с исходной плотностью $1,08 \text{ г/см}^3$. При давлении 40 МПа и температуре плит пресса 20°C они получили минимальное значение остаточной деформации 1,2 %, выдерживая образцы под нагрузкой в течение 1 часа. Однако авторы не дают рекомендаций относительно оптимального режима уплотнения, обеспечивающего достиже-

ние минимальных значений сжимаемости и остаточной деформации. Поэтому в настоящих исследованиях с использованием метода математического планирования [38] проведён поиск оптимальных условий уплотнения готового жёсткого картона [92]. В качестве параметра оптимизации выбрали сжимаемость электрокартона. На основании априорной информации и предварительных опытов было установлено, что величина сжимаемости электрокартона (C) при проведении уплотнения зависит от давления уплотнения (P), продолжительности уплотнения (τ), температуры плит пресса и влажности картона. Последние два фактора стабилизировали: температуру плит пресса – на уровне $(150 \pm 3)^\circ\text{C}$, влажность образцов – на уровне 2–3 % путём их сушки перед опытом в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 10 часов. Температура $(150 \pm 3)^\circ\text{C}$ выбрана на основании того, что согласно [93] она соответствует температуре стеклования целлюлозы.

На основании анализа предварительных опытов были выбраны интервалы варьирования, уровни факторов, составлена матрица планирования и проведены опыты по определению минимального значения сжимаемости при уплотнении картона в горячем прессе. Результаты опытов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Матрица планирования и результаты опытов

Количество параллельных опытов	Кодированное значение фактора		Натуральное значение фактора		$C, \%$	$S_0, \%$
	P	τ	$P, \text{МПа}$	$\tau, \text{мин}$		
4	+	+	100	16	2,45	0,089
4	-	+	20	16	3,10	
4	+	-	100	2	2,84	
4	-	-	20	2	3,88	

Таблица 3.2.

Расчёт и результаты опытов крутого восхождения

Характеристика плана и номер опыта	P	τ	C_p	C_{θ}	Состояние поверхности образцов	Данные микроскопических наблюдений
Центр плана	60	9,0	-	-	-	-
Интервал варьирования	40	7,0	-	-	-	-
Шаг движения	10	1,2	-	-	-	-
Крутое восхождение						
Опыт №: I	50	7,8	3,25	3,22	отсутствие „мраморности“	отсутствие мелких волокон
2	60	9,0	3,07	3,03	Отсутствие „мраморности“	отсутствие мелких волокон
3	70	10,2	2,89	2,90	„мраморность“	наличие мелких волокон
4	80	11,4	2,71	2,78	„мраморность“	наличие мелких волокон
5	90	12,6	2,54	2,61	интенсивная „мраморность“	наличие мелких волокон
6	100	13,8	2,36	2,50	интенсивная „мраморность“	повышенное количество мелких волокон

По результатам опытов (таблица 3.1) были вычислены коэффициенты уравнения регрессии, дисперсия коэффициента регрессии (S_b^2) и значение доверительного интервала $\Delta b = \pm t_c \cdot S_b$, где t_c - критерий Стьюдента при 95 % доверительной вероятности.

$$b = 3,07 - 0,42 \cdot P - 0,29 \tau$$

$$\Delta b = \pm 0,19$$

Результаты реализации крутого восхождения (таблица 3.2) показывают, что факторы уплотнения (P и τ) по мере их повышения при движении по градиенту приводят также к снижению показателя сжимаемости, однако в опытах 3-6 было замечено появление "мраморности" на образцах. Поэтому были предприняты микроскопические наблюдения поверхности картона, которые для опытов 3-6 показали наличие мелких волокон в местах "мраморности" и увеличение их количества при движении от опыта 3 к опыту 6. Было замечено, что волокна при их хаотичном расположении в плоскости элементарного слоя картона как бы разрезают друг друга. Это обстоятельство, т.е. разрушение структуры картона, является ограничивающим условием движения по градиенту. Таким образом, давление - 60 МПа и продолжительность - 9 мин являются значениями условного оптимума факторов уплотнения картона в горячем прессе.

Исследуемые свойства опытного картона до и после уплотнения при условно оптимальных значениях факторов в сравнении со свойствами картона марки Б приведены в таблице 3.3.

Согласно данным таблицы 3.3. сжимаемость после кондиционирования уплотнённого картона снизилась по сравнению со сжимаемостью исходного картона в 1,4 раза, а остаточная деформация - в 3 раза при незначительном увеличении плотности, что достигается за счёт сглаживания маркировки (отпечатка) на поверхности картона от подкладочных сеток. Для сравнения в таблице приведены также значения основных показателей жёсткого уплотнённого карто-

на после сушки в сушильном шкафу до постоянной массы. Как видно из таблицы, влажность картона значительно влияет на величины показателей сжимаемости и остаточной деформации: сжимаемость картона после сушки снижается почти в 1,4 раза, а остаточная деформация - в 4 раза в сравнении таковыми показателями картона после кондиционирования.

Таблица 3.3.

Исследуемые свойства картона до и после уплотнения при оптимальных условиях

Наименование показателя	Значение показателя			
	Картон марки Б толщиной 2,0 мм после кондиционирования	Опытный жёсткий картон толщиной 2,0 мм		
		до уплотнения	после уплотнения при оптимальных условиях	
		после кондиционир.	после сушки	после кондиционир.
Плотность, г/см ³	1,10	1,26	1,32	1,31
Сжимаемость на воздухе при 20 МПа, %	10,79	5,60	2,83	3,79
Остаточная деформация, %	5,53	2,50	0,20	0,81

ВЫВОД

При уплотнении картона в горячем прессе в выбранных условиях эксперимента достигнутые минимальные значения сжимаемости и остаточной деформации после сушки соответственно составляет: 2,83 % и 0,2 % при плотности картона 1,32 г/см³. Это достигается за счёт сглаживания маркировки на поверхности картона от подкладочных сеток.

3.2. Определение основных технологических параметров подготовки массы, формования картона, его прессования и сушки

Наиболее важными параметрами, определяющими качество готового жёсткого картона и производительность оборудования, являются: сте-

пень помола массы и масса 1 м^2 элементарного слоя при формировании картона, а также параметры режима прессования и сушки картона в горячем прессе. Определение их оптимальных значений является важным вопросом для выбора технологического оборудования и обеспечения высокого качества жёсткого картона.

3.2.1. Исследование влияния степени помола массы и массы 1 м^2 элементарного слоя на показатели качества электрокартона

Для проведения исследований были выбраны следующие уровни факторов: степень помола массы в напорном ящике машины, $^{\circ}\text{ШР}-15$ (неразмолотая), 25, 34, 45, 55, 65; масса 1 м^2 элементарного слоя, г, —40, 50, 60, 70. Сушку картона в гидравлическом горячем прессе проводили по режиму ступенчатого прессования (см.п. 3.3.5).

Результаты исследований влияния степени помола массы на показатели качества жёсткого картона приведены в табл. 3.4. Из табл. 3.4 видно, что по мере повышения степени помола массы наблюдается главным образом повышение предела прочности как в машинном, так и в поперечном направлениях. При степени помола менее 24–34 $^{\circ}\text{ШР}$ наблюдается снижение плотности и соответствующее повышение масло-впитываемости картона. От этого же уровня степени помола массы наблюдается тенденция к снижению электрической прочности картона.

Из представленных в табл. 3.4 данных следует, что для изготовления картона с высоким пределом прочности при растяжении необходимо использовать массу с возможно высокой степенью помола при формировании: 55–65 $^{\circ}\text{ШР}$. Степень помола, превышающая 65 $^{\circ}\text{ШР}$ вызывает затруднения при формировании элементарного слоя в связи с пониженной водоотдачей массы. Степени помола массы 55–65 $^{\circ}\text{ШР}$ при формировании (до разбавления её волоконсодержащей подсеточной водой) в машинном бассейне соответствует степень помола 45–50 $^{\circ}\text{ШР}$. Эту степень помола и должно обеспечивать размалывающее оборудование массоподготовительного отдела.

Таблица 3.4.

Физико-механические и электрические показатели качества картона,
изготовленного из массы с различной степенью помола

Наименование показателя	Значение показателя при массе 1 м^2 элементарного слоя, г										
	40 при степени помола массы, ° ШР						50 при степени помола массы, ° ШР				
	14	24	34	45	55	64	23	34	44	53	64
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина, мм	1,90	2,10	2,13	2,10	2,10	2,10	2,12	2,10	2,03	1,90	2,10
Плотность, г/см ³	1,06	1,08	1,09	1,13	1,16	1,18	1,09	1,15	1,15	1,16	1,14
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:											
машинном	74	124	134	130	122	139	132	126	122	130	144
поперечном	50	73	83	105	104	118	93	104	112	113	117
Впитываемость масла, %	21	20	19	17	19	19	20	18	17	16	17
Линейная деформация, %, в направлении:											
машинном	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
поперечном	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

	1	2	3	4	5
по толщине		5,3	6,0	5,8	4,8
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %		5,7	5,6	5,2	5,4
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %		2,3	1,6	1,5	1,3
Стойкость к поверхностному разряду, минут, средняя		24	15	11	17
Электрическая прочность, кВ/мм		32	35	39	46

продолжение таблицы 3.4.

! 6	! 7	! 8	! 9	! 10	! 11	! 12
6,0	5,6	4,9	4,6	4,7	4,7	4,7
5,8	5,2	5,1	4,7	5,2	5,1	5,1
1,7	1,7	1,8	1,8	1,7	1,5	1,6
13	21	17	13	16	22	16
44	44	33	38	41	45	41

Таблица 3.5.

Физико- механические и электрические показатели
картона, изготовленного с различной массой 1 м^2
элементарных слоёв

Наименование показателя	Значение показателя при массе 1 м^2 элементарного слоя картона, г			
	40	50	60	70
Толщина, мм	2,10	2,03	1,90	2,04
Плотность, г/см^3	1,13	1,15	1,16	1,17
Предел прочности при растяжении, МПа в направлении:				
машинном	130	122	144	146
поперечном	105	112	94	105
Впитываемость масла, %	17	17	18	18
Линейная деформация, % в направлении:				
машинном	0,4	0,4	0,4	0,3
поперечном	0,6	0,5	0,7	0,8
по толщине	4,8	4,7	3,9	4,6
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %	5,4	5,1	4,7	6,1
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %	1,3	1,7	1,2	1,7
Стойкость к поверхностному разряду, минут, средняя	17	16	13	13
Электрическая прочность, кВ/мм	46	41	44	44

Показатели жёсткого картона, изготовленного с различной массой 1 м^2 элементарных слоёв приведены в табл. 3.5. Данные получены при изготовлении картона из волокнистой массы со степенью помола 45 °ШР. Из таблицы 3.5 видно, что масса 1 м^2 элементарного слоя в исследованном интервале не оказывает заметного влияния на качество жёсткого картона, включая также показатель электрической прочности. Однако надо учитывать, что увеличение массы 1 м^2 слоя более 40 г (или более 80 г для сдвоенного слоя при использовании двухцилиндровой машины) приведёт к увеличению разнотолщинности картона вследствие увеличения доли массы, приходящейся на 1 оборот форматного вала. Поэтому рекомендовать повышение массы 1 м^2 элементарного слоя более 40–50 г не всегда целесообразно.

ВЫВОДЫ

Для изготовления жёсткого электроизоляционного картона следует использовать волокнистую массу со степенью помола в машинном бассейне 45–50 °ШР, или – в формующем устройстве после разбавления подсеточной водой 55–65 °ШР.

При формировании элементарного слоя его масса 1 м^2 должна быть возможно меньшей ~ 40 г, однако при необходимости она может быть повышена до 70 г без опасности снижения качества картона.

3.2.2. Определение приемлемого давления прессования при сушке картона в горячем прессе. Микроскопические исследования процесса прессования и сушки

Значение давления прессования, обеспечивающего получение картона максимальной плотности и минимальной сжимаемости в процессе совмещённого прессования и сушки, позволяют определить кривые прессования, представляющие собой зависимости толщины картона от значений давления и продолжительности прессования. Как видно из рис. 5–7 такие зависимости представляют собой вогнутые плоскости, которые по мере увеличения давления и продолжительности прессова-

ния выходят на плато. Для давления этот уровень соответствует величине $(4,5 \pm 0,5)$ МПа. Из рис. 5-7 видно, что указанный оптимум давления не меняется при переходе от малых к большим толщинам, т.е. не зависит от толщины картона.

С целью получения наглядных представлений о конфигурации волокон в листе картона после его сушки при различных давлениях были получены микроснимки поверхности срезов картона по толщине в отражённом свете на микроскопе МБИ-6 [94]. На микроснимках (рис. 8 и 9) хорошо просматриваются люмены волокон, которые сплющены в направлении по толщине картона. Стенки соседних волокон плотно соприкасаются друг с другом. Высокие давления по сравнению с низкими, как это видно из рис. 8 и 9, мало изменяют пористость картона и конфигурацию сечений волокон, однако количественные измерения (см. рис. 5-7) показывают, что такие изменения есть.

Согласно представленным данным микроскопических исследований полное сплющивание (коллапсация) волокон даже после сушки при максимальном давлении не наблюдается, т.е. в картоне имеются поры, необходимые для его пропитки трансформаторным маслом при эксплуатации. При плотности картона $1,20 \text{ г/см}^3$ масловпитываемость имеет значение 10-12 %. Большое значение для качества картона имеет создание условий, исключающих его микрораспрессовку, которая возможна под действием остаточных напряжений, возникающих в процессе горячего прессования картона.

ВЫВОД

Горячий пресс технологической линии производства жёсткого картона должен обеспечивать давление прессования $(4,5 \pm 0,5)$ МПа. Микроскопические снимки показывают наличие пор в структуре картона, необходимых для пропитки его трансформаторным маслом в процессе эксплуатации.

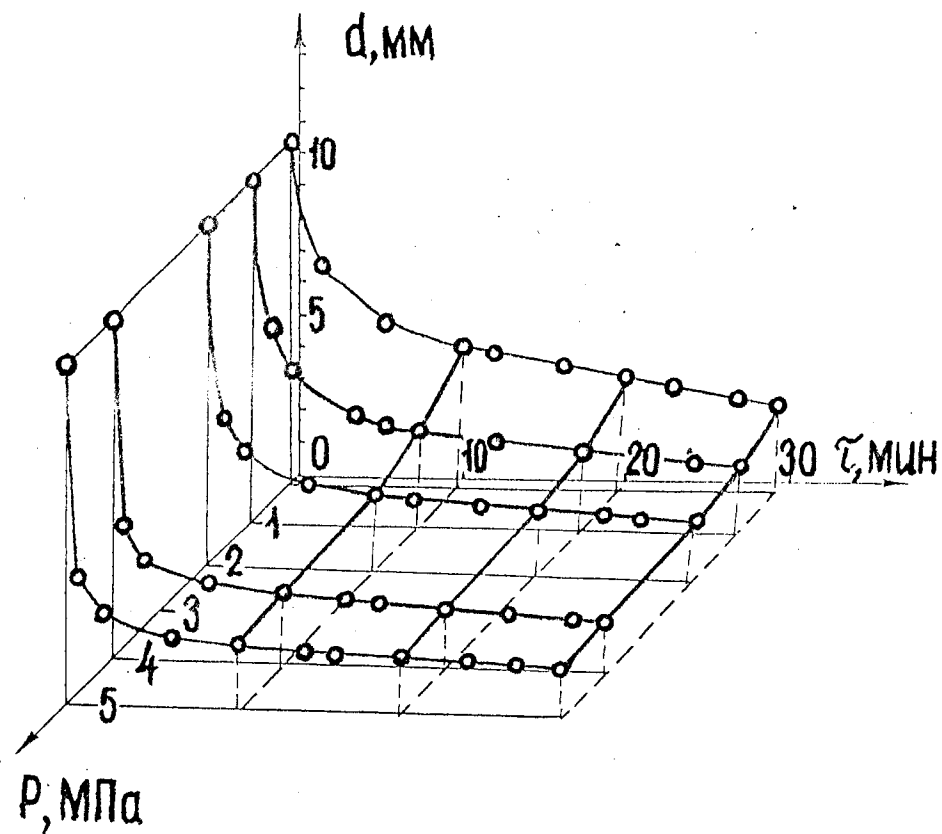


Рис.5. Зависимость толщины картона (d) от давления (P) и продолжительности прессования (τ). Толщина готового картона, высушенного при давлении 4, 5 МПа - 2 мм

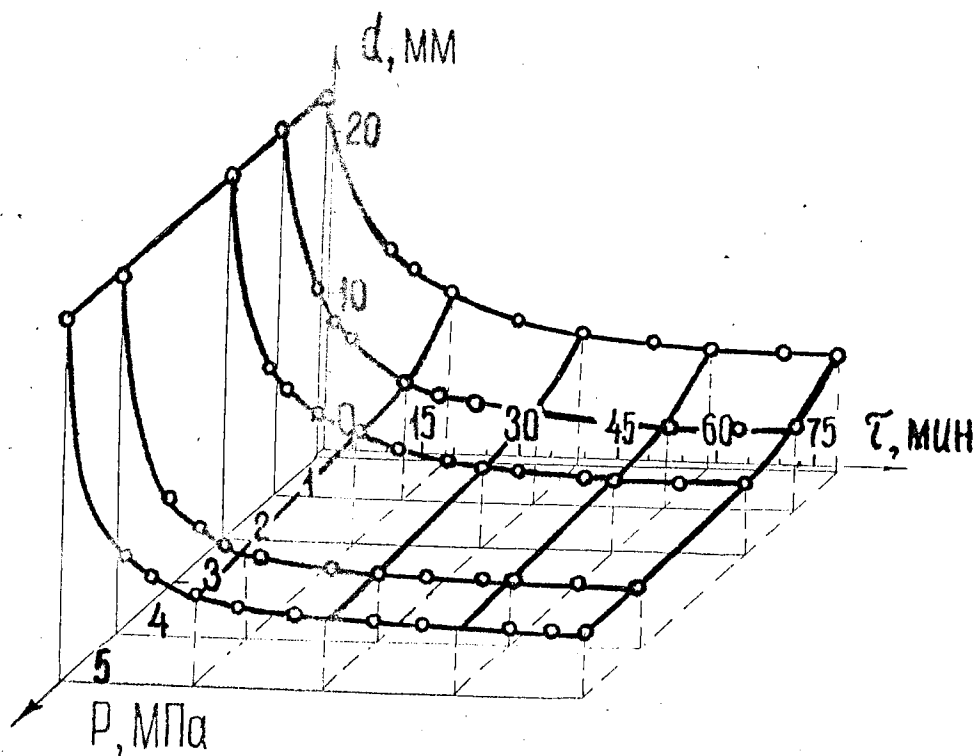


Рис.6. Зависимость толщины картона (d) от давления (P) и продолжительности прессования ($\tilde{\tau}$). Толщина готового картона, высушенного при давлении 4,5 МПа - 4 мм

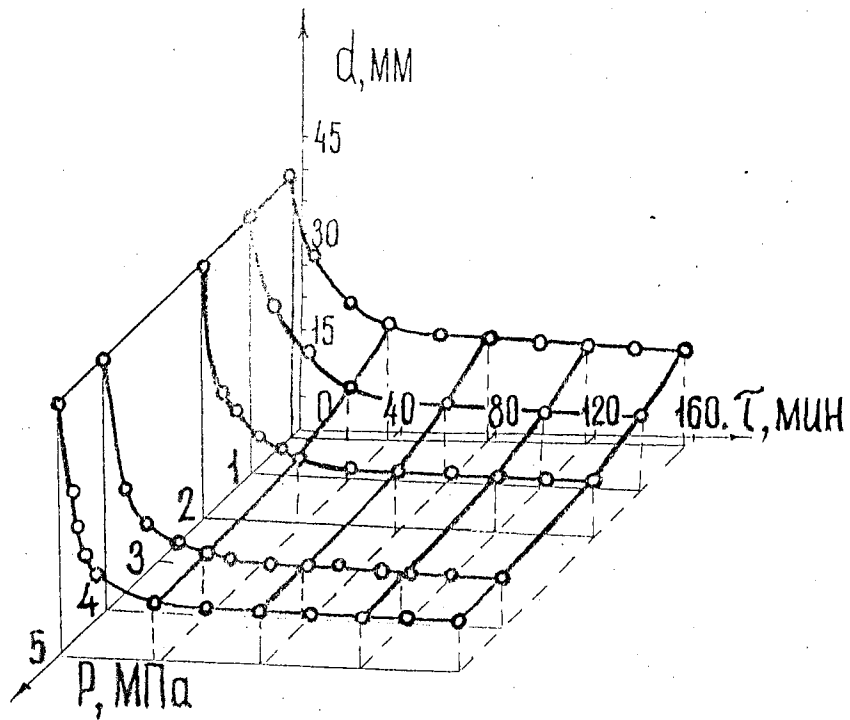


Рис.7. Зависимость толщины картона (d) от давления (P) и продолжительности прессования (τ). Толщина готового картона, высушенного при давлении 4,5 МПа - 8 мм

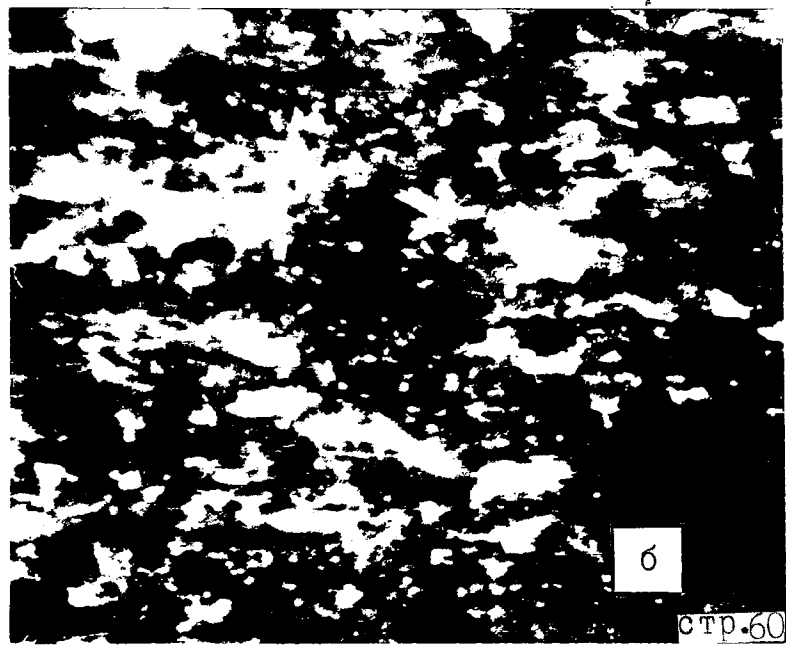
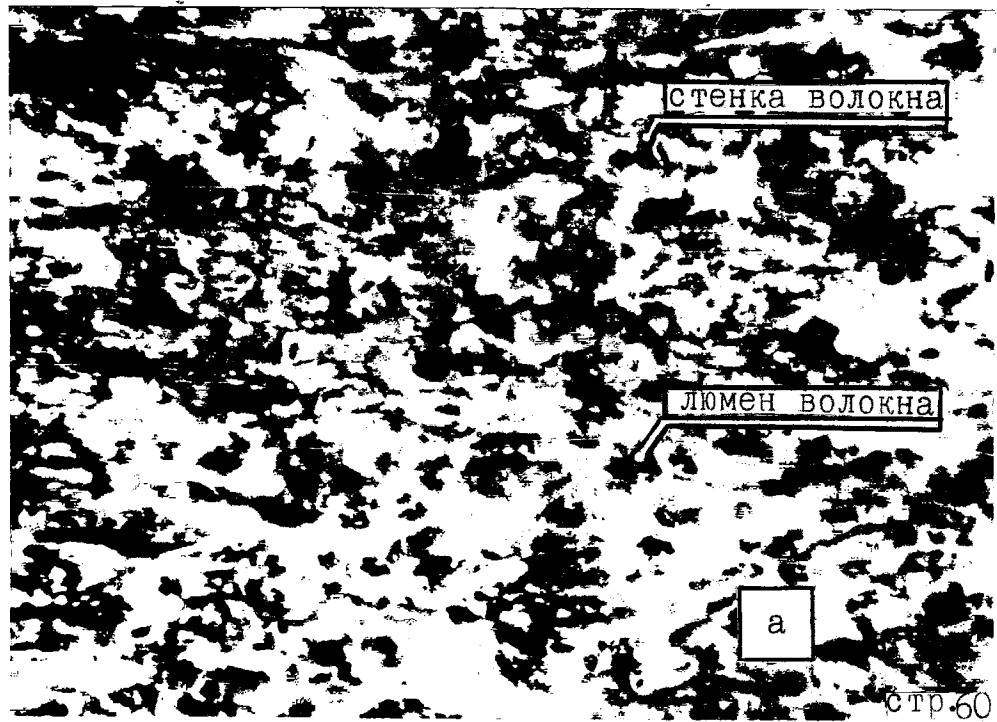


Рис.8. Микроснимки поверхности срезов картона по толщине. Давление при сушке: а-1,0 МПа, б-2,0 МПа. Увеличение 180 крат.

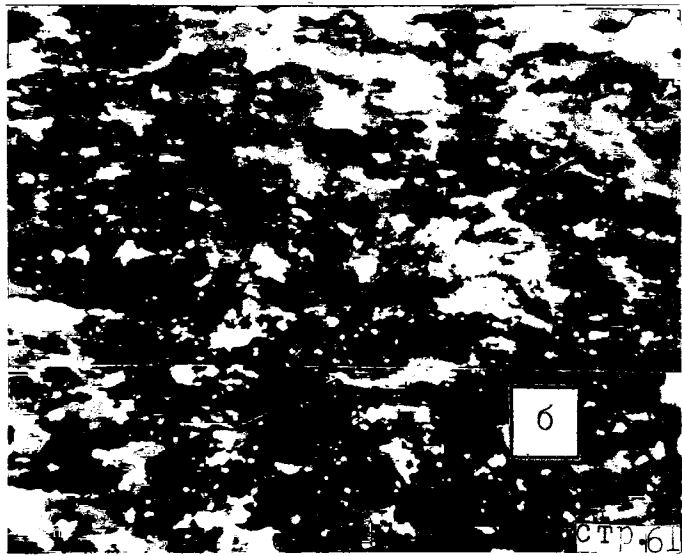
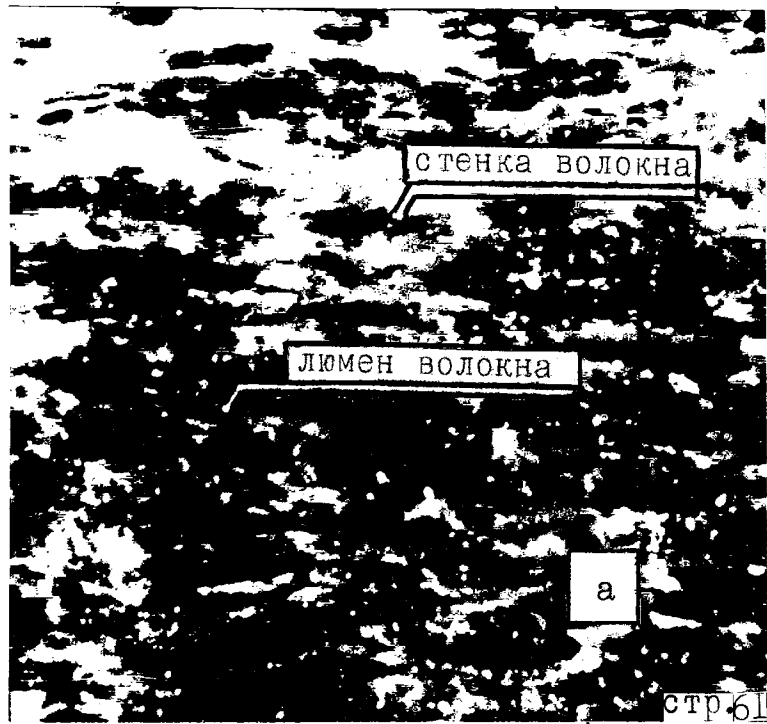


Рис.9. Микроснимки поверхности срезов картона по толщине. Давление при сушке: а-4,0 МПа, б-5,0 МПа. Увеличение 180 крат.

3.3. Исследования различных способов сушки картона в горячем прессе

Основным процессом, определяющим качество изготавливаемого картона, а также производительность технологической линии при изготовлении жёсткого картона является процесс совмещённого прессования и сушки в горячем прессе. В настоящих исследованиях применён ряд способов интенсификации процесса сушки картона в горячем прессе: 1) высокочастотная [95] 2) вакуумная [96] и 3) сушка при ступенчатом режиме прессования.

3.3.1. Исследование высокочастотной сушки картона в горячем прессе

Комбинированный способ сушки, включающий контактную сушку в горячем прессе и высокочастотную, применён как с целью оценки его эффективности для интенсификации контактной сушки, так и исследования его влияния на качество картона, главным образом плотность, сжимаемость и остаточную деформацию.

Комбинированную сушку проводили при условиях: уровни давления прессования: 5, 9, 14 МПа, уровни температуры плит пресса: 105, 125, 145 °С. Результаты испытаний образцов картона, высушенного по девяти указанным режимам, приведены в табл. 3.6. Её анализ показывает, что при повышении давления прессования от 5,0 до 14,0 МПа и варьировании температуры в интервале 105-145 °С показатели картона не испытывают заметных изменений. Исключением является показатель стойкости к испытательному напряжению. Образцы, высушенные при температурах выше 105 °С, не выдерживают испытательного напряжения. Указанная температура ограничивает применение высокочастотной сушки.

Дополнительно с целью оценки влияния высокочастотного диэлектрического нагрева, а также параметров прессования на основной по-

Таблица 3,6.

Физико-механические и электрические показатели жёсткого электрокартона
толщиной 2,0 мм, изготовленного с применением способа комбинированной сушки

Наименование показателя	Значение показателя картона, изготовленного при давлении:								
	5 МПа и температуре плит пресса			9 МПа и температуре плит пресса			14 МПа и температуре плит пресса		
	105°С	125°С	145°С	105°С	125°С	145°С	105°С	125°С	145°С
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность, г/см ³	1,27	1,27	1,26	1,25	1,25	1,27	1,26	1,25	1,27
Предел прочности при растяжении в попереч- ном направлении, МПа	129	144	141	133	143	116	138	142	139
Впитываемость масла, %	4	4	4	4	4	4	4	5	5
Линейная деформация, %, в направлении:									
машинном	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
поперечном	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
по толщине	3,3	4,7	4,3	3,8	3,8	4,2	4,3	3,9	3,9

продолжение таблицы 3.6.

5	6	7	8	9	10
5,3	5,8	5,4	5,4	5,7	5,5
1,6	2,0	1,8	1,9	2,1	1,8
-	-	-	-	-	29
-	-	-	-	-	23
	не выдерж.	не выдерж.	выдерж.	не выдерж.	не выдерж.
5,4	5,2	5,3	5,3	5,2	5,4
7,4	6,2	6,1	7,3	7,2	6,3

казатель жёсткого картона - плотность был проведён поиск оптимальных условий комбинированной сушки с использованием метода математического планирования. Проводили оценку влияния на плотность (ρ) картона следующих основных факторов горячего прессования: давления (P) и температуры плит пресса (t). Для установления влияния высокочастотного нагрева варьировали влажность картона (W), при которой включался в работу высокочастотный генератор.

В табл. 3.7 представлены интервалы варьирования и уровни факторов.

Таблица 3.7

Интервалы варьирования и уровни факторов

Наименования факторов, единицы их измерения и условные обозначения	Уровни факторов			Интервал варьирования факторов
	- I	0	+ I	
Давление, МПа, P	7	9	11	2
Температура, °C, t	110	125	140	15
Влажность, %, W	15	18	21	3

Матрица планирования и результаты полного факторного эксперимента представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8.

Матрица планирования с результатами реализации опытов

	P	t	σ	$\rho, \text{г/см}^3$	S_p
*)	+	+	+	1,282	
	-	+	-	1,276	
	+	-	-	1,266	
	-	-	+	1,262	0,0057
	-	-	-	1,237	
	+	-	+	1,262	
	-	+	+	1,272	
	+	+	-	1,263	

*) Количество параллельных опытов в каждой строке - 4

Следует отметить, что измерение плотности на этом этапе работы проводили более тщательно, чем это предусмотрено стандартом. Толщину измеряли в 42 точках, а линейные размеры - в 6.

Методом регрессивного анализа были вычислены коэффициенты уравнения регрессии и величина доверительного интервала по критерию Стьюдента с 95 % доверительной вероятностью:

$$\rho = 1,2650 + 0,0033 \cdot P + 0,0123t + 0,0045 \cdot W,$$

$$\Delta \rho = \pm 0,0118.$$

Единственно значимым коэффициентом в полученной модели является коэффициент при температуре. Незначимость коэффициента при (P) позволяет считать, что давление прессования от 7,0 МПа до 11,0 МПа не приводит к повышению плотности картона, что подтверждают приведённые в настоящем параграфе (табл.3.6), а также параграфе 3.2.2 данные.

Незначимость коэффициента при W показывает, что использование высокочастотного нагрева при сушке картона в горячем прессе не приводит к повышению плотности картона. Для определения оптимальной температуры плит пресса при движении по градиенту методом ЭПР измеряли концентрацию парамагнитных центров (N) в картоне после его сушки. С применением радиоспектрометра ЭПР записывали узкий синглет, характерный для небелёной сульфатной целлюлозы и процесса термодеструкции. Результаты приведены на рис. 10. Температура плит пресса 105 °С, обозначенная на рисунке стрелкой является температурным порогом термодеструкции, выше него в интервале температур 105-140 °С парамагнитные центры [97] лигно-целлюлозного комплекса рекомбинируют с возникающими в результате начавшейся термодеструкции свободными радикалами. При высокой температуре лигнин и гемицеллюлозы размягчаются, что при воздействии давления приводит к небольшому повышению плотности картона. Начиная с температуры 140 °С происходит интенсивный прирост свободных ста-

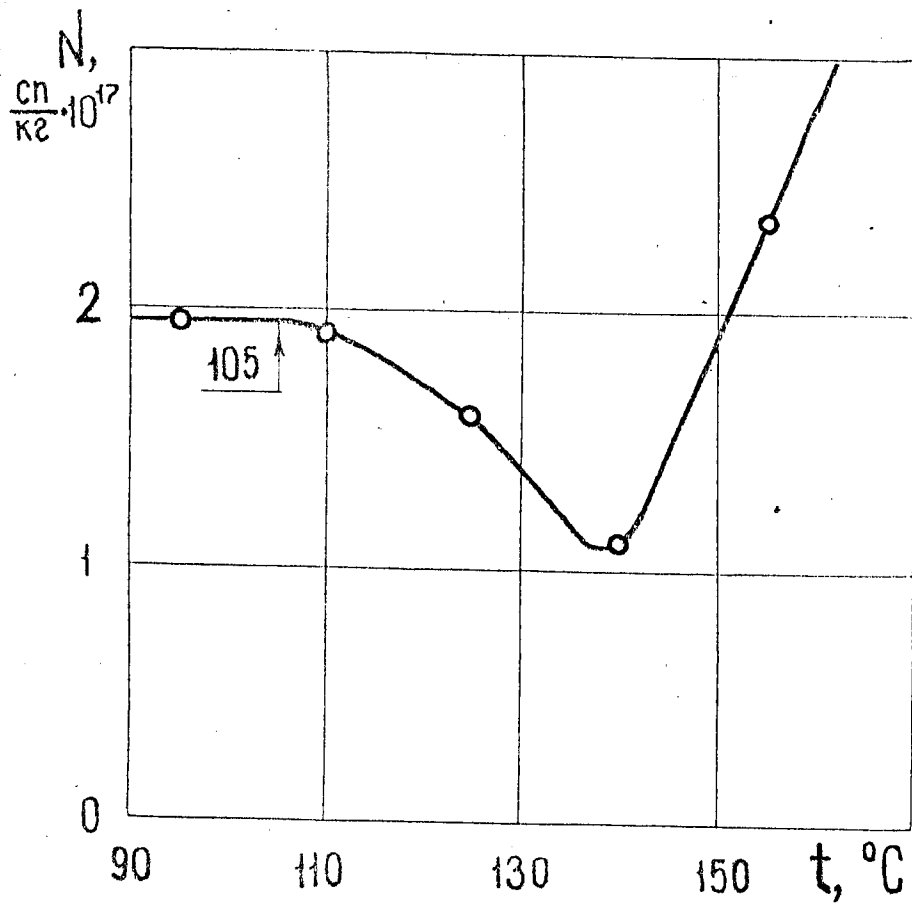


Рис.10. Зависимость концентрации парамагнитных центров от температуры плит пресса при высокочастотной сушке картона

стабильных радикалов. Начавшаяся карбонизация приводит даже к заметному на глаз потемнению центральных слоёв картона, обнаруживаемому на его сломах. Вероятно интенсивный прирост стабильных свободных радикалов и карбонизация картона происходят в результате повышения температуры внутри картона под действием высокочастотного нагрева.

ВЫВОДЫ

Как данные ЭПР, так и измерения стойкости картона к испытательному напряжению показывают необходимость снижения температуры плит пресса до 105°C при использовании высокочастотной сушки, тогда как без высокочастотного нагрева сушку в горячем прессе можно проводить при температуре плит 150°C . Вид сушки не влияет на показатели качества картона. Повышение давления прессования от $5,0$ МПа до $14,0$ МПа не приводит к повышению плотности и снижению сжимаемости и остаточной деформации жёсткого картона.

Энергетические потери на преобразование тепловой энергии на электростанции в электрическую, а затем в генераторах - в высокочастотную, сложность обеспечения технически безопасной работы обслуживающего персонала ограничивают применение высокочастотной сушки и не позволяют рекомендовать её в производство жёсткого картона.

3.3.2. Исследование контактной сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении

В отличие от высокочастотной при контактной сушке картона температура плит пресса может быть повышена до $150-160^{\circ}\text{C}$. При более высокой температуре плит пресса происходит подгорание поверхности картона. Поэтому исследование массопереноса в процессе контактной сушки картона при постоянном давлении (СПД) проводили при температуре плит пресса $(150 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Максимальное постоянное давление

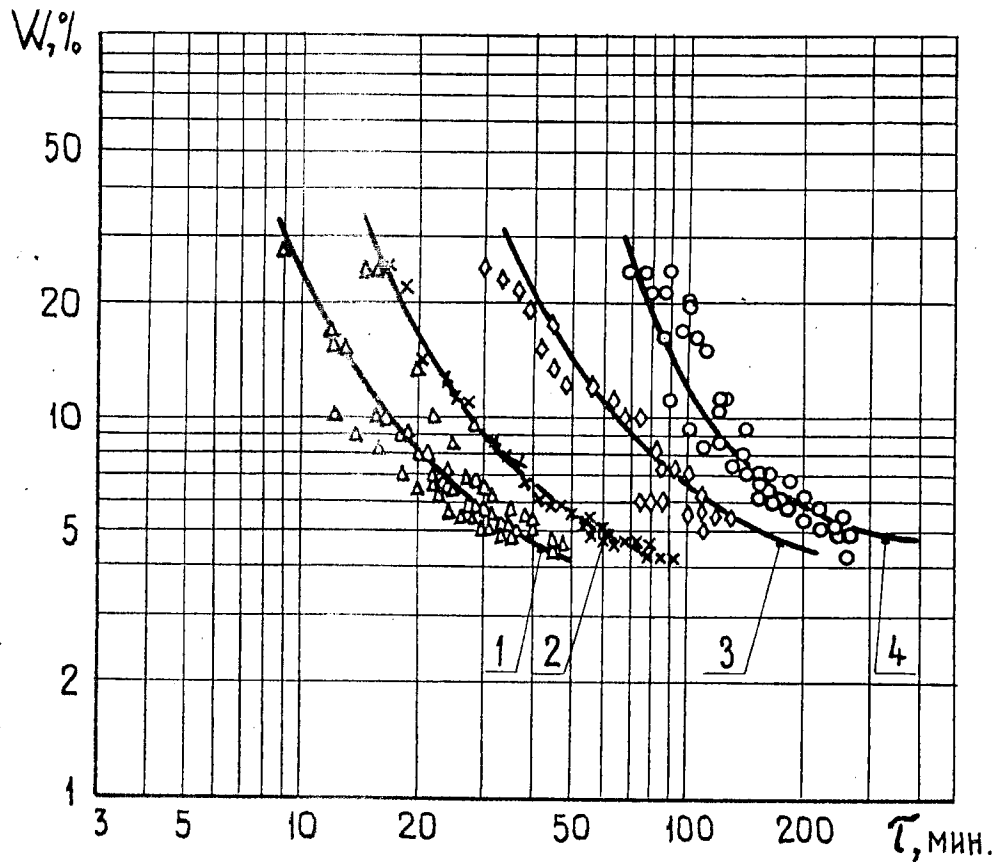


Рис. II. Зависимость влагосодержания от продолжительности сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении. 1, 2, 3, 4 - для картона толщиной 2, 27, 3, 43, 6, 50, 8, 49 мм соответственно

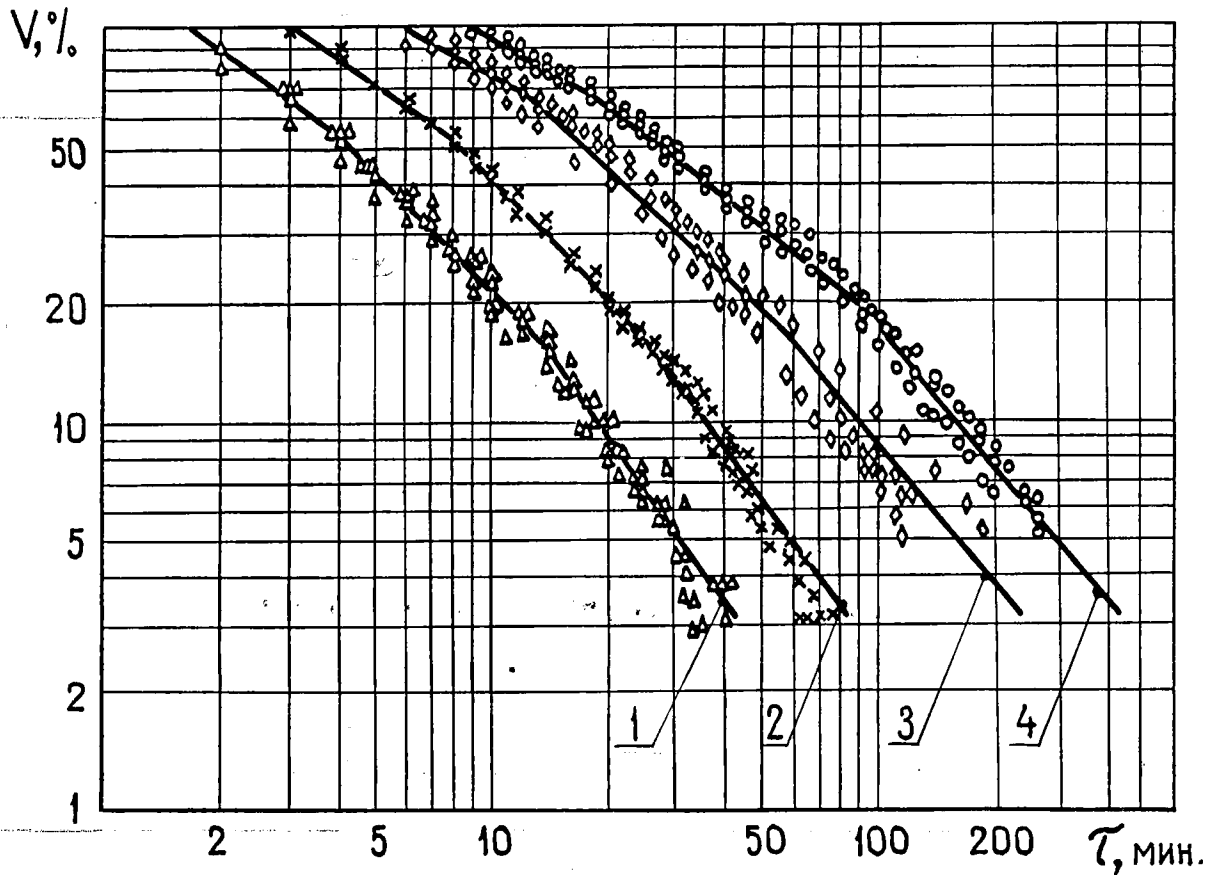


Рис.12. Зависимость параметра V от продолжительности сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении. 1,2,3,4 - для картона толщиной 2,27, 3,43, 6,50, 8,49 мм соответственно

прессования $(4,5 \pm 0,5)$ МПа.

На рис. II и I2 представлены зависимости влагосодержания (W) и параметра V при СПД картона различных толщин в горячем прессе. Из рис. II видно, что в логарифмических координатах зависимости $W = f(\tau)$ есть подобные кривые, смещающиеся в область повышенных продолжительностей при возрастании толщины картона. Из рис. II можно определить продолжительность сушки, соответствующую влагосодержанию $W = 5\%$. При данном влагосодержании возможна распрессовка и извлечение картона из пресса. Если распрессовку проводить при меньшей продолжительности сушки, соответствующей более высокому влагосодержанию картона, то возможно расслоение картона вследствие интенсивного парообразования в его центральных слоях. Определенные из рис. II продолжительности сушки (τ_k) картона для различных толщин (\bar{d}) составляют (соответственно, $\tau_{k, \text{мин}} - \bar{d}, \text{мм}$): 35-2,27; 57-3,43; 160-6,50; 330-8,49. Из рис. I2 видно, что также в логарифмических координатах зависимости есть ломаные с параллельными участками, смещающимися в область повышенных продолжительностей при возрастании толщины картона. Сингулярные точки соответствуют влагосодержаниям: приблизительно 50-60 % и 10-15 %. Указанные влагосодержания по мере сушки картона относятся к переходам: 50-60 % - от удаления свободной влаги к удалению влаги капиллярной конденсации, а 10-15 % - от удаления влаги капиллярной конденсации к удалению влаги полимолекулярной адсорбции. Зависимости $V = f(\tau)$ позволяют определить время подъема давления до 4,5 МПа (τ_n) и время окончания сушки (τ_k) в зависимости от толщины (\bar{d}) картона (соответственно, $\tau_{n, \text{мин}} - \tau_{k, \text{мин}} - \bar{d}, \text{мм}$): 3,3-32-2,27; 6,7-60-3,43; 14-160-6,50; 22-300-8,49.

Аналитически параметр V для последнего прямолинейного участка в зависимости от продолжительности сушки (τ) и толщины картона (\bar{d}) выражается уравнением:

$$V = 85,3 \tau^{-1,39} \cdot d^{2,29} \quad (3.1).$$

ВЫВОД

Для исследования процесса массопереноса при сушке картона кроме влагосодержания эффективно использовать параметр V , значения которого в логарифмических координатах размещаются на участках ломаной, сингулярные точки которой соответствуют (см. п. 1.2) переходам воды в различные формы связи с волокнами целлюлозы. По полученным кривым можно определить параметры сушки при ступенчатом режиме прессования картона различных толщин.

3.3.3. Исследование вакуумной сушки картона в горячем прессе

На рисунках 3.13 и 3.14 представлены результаты исследований процесса массопереноса при комбинированной сушке картона в горячем прессе с использованием вакуума как средства интенсификации сушки: зависимости влагосодержания и параметра V соответственно. В процессе вакуумной сушки при постоянном давлении ($4,5 \pm 0,5$) МПа (ВСЦ) кривые сушки (W) в выбранных логарифмических координатах представляются прямыми линиями, параллельными друг другу и смещающимися в область повышенных продолжительностей с увеличением толщины картона. Зависимости параметра V при ВСЦ подобно СЦ представляются ломаными линиями с параллельными участками, смещающимися в область повышенных продолжительностей при увеличении толщины картона. Для параметра V характерны сингулярные точки, соответствующие различным формам связи воды с волокнами целлюлозы (см. п. 1.2). Приведенные на рис. 13 и 14 зависимости для влагосодержаний менее 10-15 % аналитически выражаются уравнениями:

$$W = 758 \cdot \tau^{-2,27} \cdot d^{2,68} \quad (3.2),$$

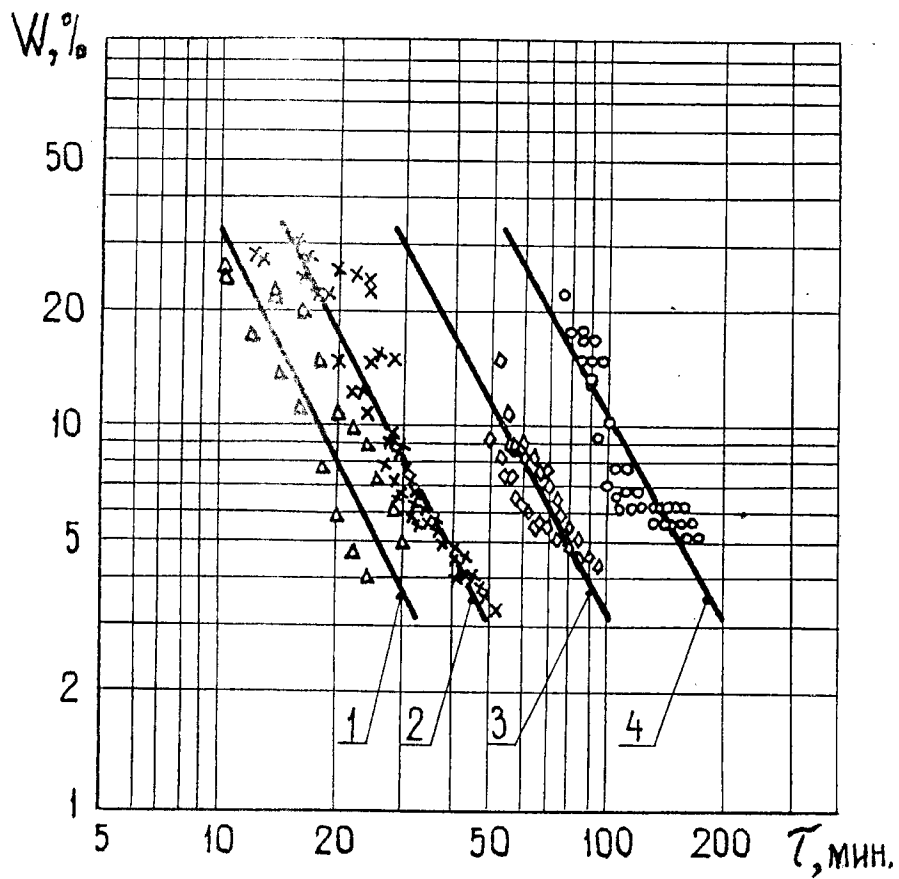


Рис.13. Зависимость влагосодержания от продолжительности вакуумной сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении. 1,2,3,4 - для картона толщиной 2,15, 3,73, 7,07, 8,64 мм соответственно

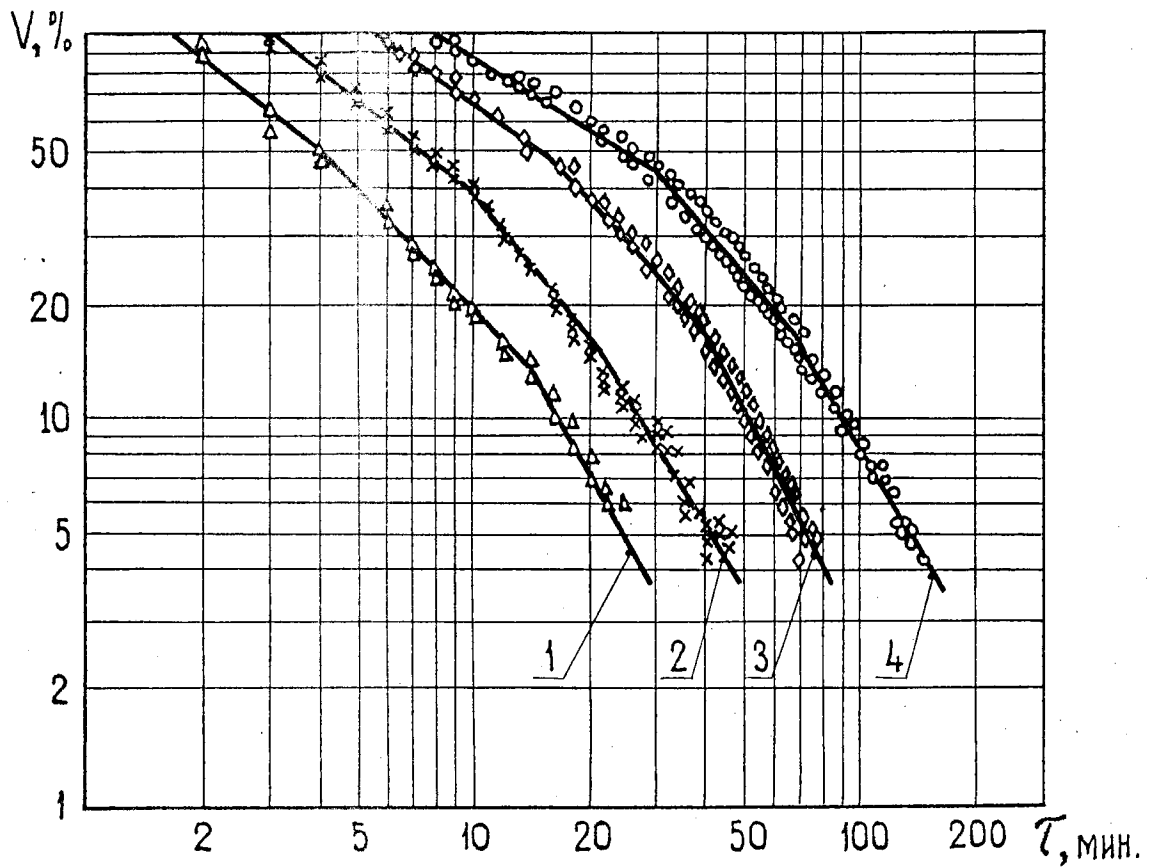


Рис.14. Зависимость параметра V от продолжительности вакуумной сушки картона в горячем прессе при постоянном давлении. 1,2,3,4 - для картона толщиной 2,15, 3,73, 7,07, 8,64 мм соответственно

$$V = 290 \cdot \tau^{-1,87} \cdot \bar{d}^{2,18} \quad (3.3).$$

По полученным зависимостям как графическим, так и аналитическим, можно определить продолжительность сушки, соответствующую определенному влагосодержанию для определенной толщины картона. Для влагосодержания 5 % продолжительности сушки (τ_k) картона различных толщин (\bar{d}) будут ($\tau_{k, \text{мин}} - \bar{d}, \text{мм}$): 26-2,15; 40-3,73; 80-7,07; 160-8,64. По данным рис. 14 и уравнения 3.3 параметры сушки τ_n, τ_k для определённых значений \bar{d} будут ($\tau_{n, \text{мин}} - \tau_{k, \text{мин}} - \bar{d}, \text{мм}$): 3,2-25-2,15; 6-40-3,73; 12-73-7,07; 20-130-8,64.

При сравнении ВСЦД (рис. 11, 12) с СЦД (рис. 13, 14) видно, что данные для ВСЦД смещены в область меньших продолжительностей, т.е. использование вакуума при сушке картона в горячем прессе повышает скорость сушки. Количественное сравнение способов сушки проведено в параграфе 3.3.6.

ВЫВОД

Результаты исследований массопереноса в процессе ВСЦД подобно СЦД для картона различных толщин в логарифмических координатах представляются прямыми (W) или ломаными (V) линиями. По полученным зависимостям можно определить параметры ВСЦД. Применение вакуума при сушке картона в горячем прессе повышает скорость сушки картона различной толщины.

3.3.4. Связь давления набухания и усадочного напряжения с удельной теплотой смачивания целлюлозы. Обоснование снижения давления на последней стадии сушки картона в горячем прессе

Для описания процессов сорбции и десорбции влаги целлюлозой удобна термодинамическая функция энтальпия (H), равная внутренней энергии (U) плюс произведение давления (p) на объём (V_H).

Рассмотрим систему, состоящую отдельно из целлюлозы и некоторого количества воды. При соединении компонентов системы в результате изменения её энтальпии (ΔH) выделится теплота смачивания (ΔQ), то есть

$$\Delta H = \Delta Q \quad (3.4).$$

Ограничение объёма набухания (V_H) целлюлозы приведёт к возникновению давления набухания (p) и изменение энтальпии системы будет происходить в соответствии с известным соотношением, эквивалентным первому началу термодинамики:

$$\Delta H = \Delta Q + V_H \cdot \Delta p \quad (3.5).$$

При переходе от условий свободного набухания, для которых справедливо уравнение (3.4), к условиям все большего ограничения объёма набухания, для которых справедливо уравнение (3.5), член $V_H \cdot \Delta p$ в уравнении (3.5) будет увеличиваться, так как Δp будет увеличиваться, а член ΔQ будет уменьшаться. В идеале при полном ограничении объёма набухания, член ΔQ будет равен нулю, тогда из уравнения (3.5) получим:

$$\Delta H = V_H \cdot \Delta p \quad (3.6).$$

Обобщая уравнения (3.4) и (3.6), получим:

$$V_H \cdot \Delta p = \Delta Q \quad (3.7).$$

Для реальных процессов с учётом полного превращения внутренней энергии в теплоту согласно уравнению (3.4) и неполного - в потенциальную энергию напряжённого состояния целлюлозы при ограничении её объёма набухания согласно уравнению (3.6), т.е. с учётом второго начала термодинамики в уравнение (3.7) следует ввести коэффициент пропорциональности (k), то есть

$$V_H \cdot \Delta p = k \cdot \Delta Q \quad (3.8).$$

Разделив обе части уравнения (3.8) на массу целлюлозы (m) и учитывая, что $m = \rho \cdot V_H$, $\Delta Q/m = q$, а $\Delta p = p - p_0$,

в результате несложных преобразований получим:

$$p = k \cdot \rho \cdot q + p_0 \quad (3.9),$$

где p – давление набухания,

p_0 – его постоянная часть,

ρ – плотность целлюлозы,

q – удельная теплота смачивания целлюлозы.

Можно показать, что уравнение (3.9) справедливо также и для обратного процесса – процесса десорбции влаги (сушки). Величина (p) в этом случае является усадочным напряжением.

На рис. 15 приведено экспериментальное подтверждение справедливости уравнения (3.9), то есть показано существование прямо пропорциональной зависимости между усадочным напряжением и удельной теплотой смачивания целлюлозы.

Приведённые теоретические и экспериментальные исследования позволяют считать, что усадочное напряжение и давление набухания связаны с удельной теплотой смачивания целлюлозы. Интересно отметить использование аналогичного термодинамического подхода в работе [98] для оценки давления набухания в системе газ-уголь.

На рис. 16 приведена зависимость давления набухания жёсткого картона от продолжительности его выдержки в воде.

Как видно из рис. 16, с увеличением продолжительности выдержки картона в воде давление набухания увеличивается и за время около 6 часов достигает максимума. При этом степень насыщения картона водой также достигает максимума – влагосодержание картона возрастает до 20 %. С увеличением прикладываемого к образцу начального давления кривая роста давления набухания смещается вверх – в сторону повышенных давлений. Это объясняется снижением количества поглощённой картоном воды с повышением начального давления.

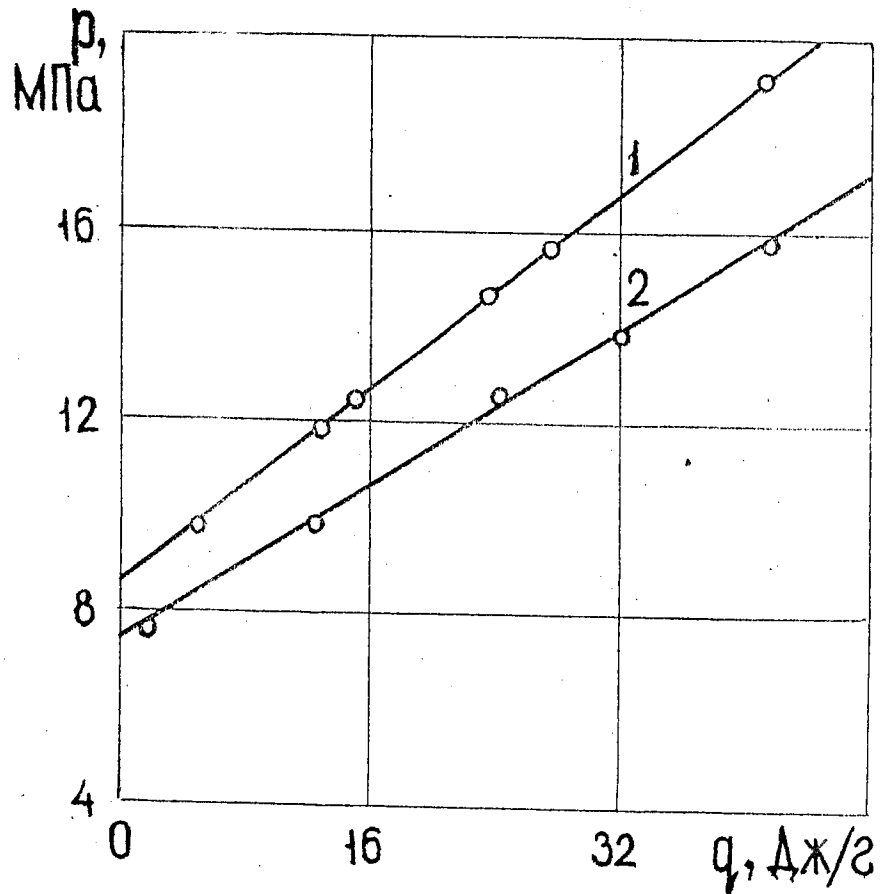


Рис.15. Связь усадочного напряжения (p) с удельной теплотой смачивания целлюлозы (q).
 Обозначения: \circ - точки сравнения p и q по данным [31] и [20 с.117]; 1,2 - соответственно поперечное и машинное направление в картоне

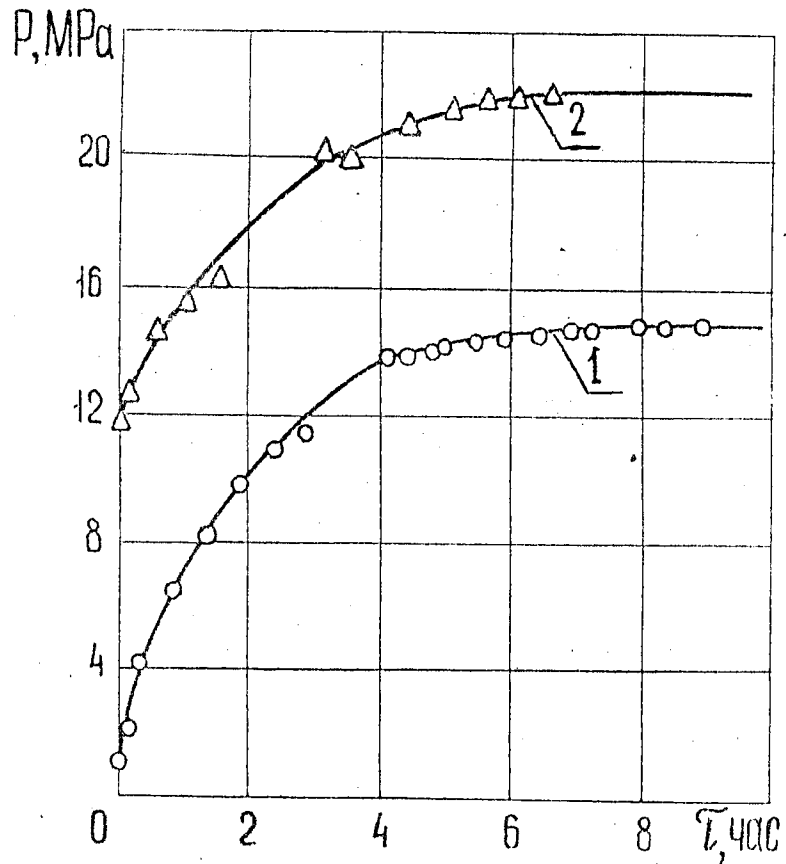


Рис. 16. Зависимость давления набухания жесткого картона от продолжительности выдержки в воде. 1 - температура воды 80°C , начальное давление 1 МПа, 2 - температура воды 35°C , начальное давление 12 МПа

Используя уравнение (3.9), можно дать оценку максимального значения усадочного напряжения или давления набухания (при влажности целлюлозы, близкой к нулю). Если в этом уравнении посчитать коэффициент k равным единице, то без учёта члена p_0 при влагосодержании, близком к нулю, после подстановки $q = 100 \text{ кДж/кг}$ [20,29] (взята величина максимального значения удельной теплоты смачивания для значительно аморфизованной целлюлозы), $\rho = 1,50 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ [25], получим $p = 150 \text{ МПа}$. При влагосодержании 20% усадочное напряжение будет составлять 20 МПа, что совпадает с данными, рассчитанными по поверхностному натяжению пленок воды между соседними волокнами.

Приведённые экспериментальные и расчётные данные по величине усадочного напряжения, возникающего между волокнами целлюлозы, позволяют считать, что связанная влага в картоне может обеспечить его "самопрессование" на последней стадии сушки в горячем прессе и при влажности 10–20% давление прессования может быть снижено с целью раскрытия пор в картоне и ускорения процесса массопереноса влаги.

ВЫВОД

Получено уравнение, связывающее давление набухания и усадочное напряжение с теплотой смачивания целлюлозы. Теоретически и экспериментально определены уровни усадочных напряжений и давлений набухания, возникающих в целлюлозных материалах при изменении их влажности. Теоретически обосновано снижение давления на последней стадии сушки картона в горячем прессе.

3.3.5. Разработка ступенчатого режима прессования с учётом форм связи воды с волокнами целлюлозы при сушке картона в горячем прессе

В процессе удаления влаги из целлюлозных материалов в них возникают усадочные напряжения, величины которых значительны и для электроизоляционного картона в процессе контактной сушки в горячем

прессе при определённых условиях возможно использование усадочных напряжений для "самопрессования" картона. Оптимальная величина давления прессования, определённая в параграфе 3.2.2, составляет 4,0-5,0 МПа. При таком давлении [62-64] происходит коллапсация волокон и снижается пористость картона, что приводит к затруднению процесса массопереноса и увеличению продолжительности сушки картона при постоянном давлении.

С целью интенсификации процесса сушки картона в горячем прессе мы провели исследования по разработке ступенчатого режима прессования картона со снижением давления на последней ступени сушки. Снижение давления прессования следует проводить в состоянии, при котором усадочное напряжение достигает значительных величин. Практически снижение давления следует проводить при влагосодержании картона, соответствующем завершению перехода влаги из состояния капиллярной конденсации в состояние полимолекулярной адсорбции (два мономолекулярных слоя), т.е. около 10%. На последней стадии сушки следует ограничиться давлением 0,1-1,0 МПа, при котором досушивать до влагосодержания 5%, соответствующего влаге в состоянии мономолекулярной адсорбции.

На рис. 17 приведены экспериментальные зависимости влагосодержания картона различной толщины от продолжительности его сушки в горячем прессе при ступенчатом режиме прессования (СРП), на рис.

18 - подобные зависимости параметра V . Время снижения давления (τ_c) предварительно определяли по данным СИД - рис. 11.

Как видно из рис. 17, в логарифмических координатах зависимости влагосодержания картона различной толщины при СИД подобно данным ВСИД представляются параллельными прямыми. Их аналитическое выражение:

$$W = 110 \cdot \tau^{-1,64} \cdot d^{2,42} \quad (3.10).$$

По данным рис. 17 время снижения давления (τ_c) и окончания

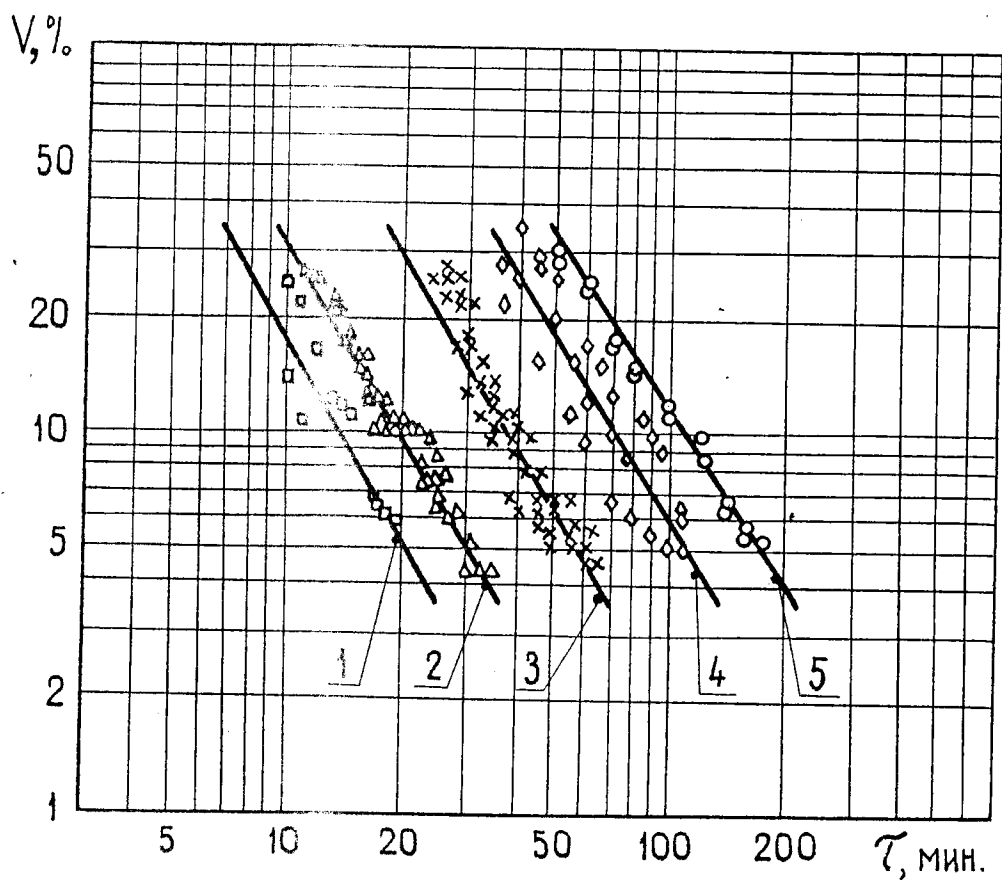


Рис.17. Зависимость влагосодержания картона от продолжительности сушки в горячем прессе при ступенчатом режиме прессования. 1,2,3,4,5- для картона толщиной 2,15, 2,72, 4,45, 6,62, 8,76 мм соответственно

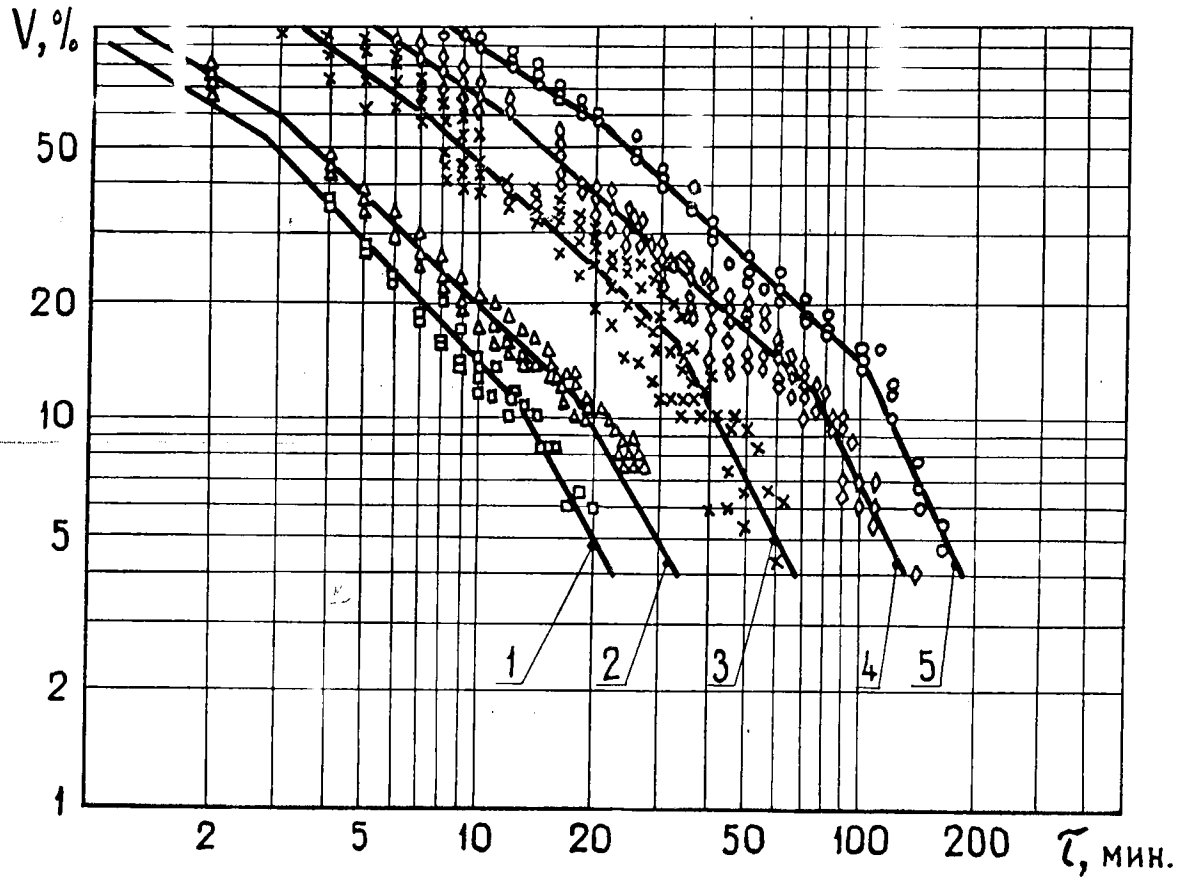


Рис.18. Зависимость параметра V от продолжительности сушки картона в горячем прессе при ступенчатом режиме прессования. 1,2,3,4,5- для картона толщиной 2,15, 2,72, 4,45, 6,62, 8,76 мм соответственно.

сушки ($\bar{\tau}_k$) в зависимости от толщины картона (\bar{d}) будут ($\bar{\tau}_c, \text{мин.}, -\bar{\tau}_k, \text{мин.}, -\bar{d}, \text{мм}$): 14-20-2,15; 20-30-2,72; 37-58-4,45; 70-110-6,62; 110-170-8,76.

Из рис. 18 видно, что зависимости параметра V при СРП подобно данным СЦД и ВСЦД в логарифмических координатах для картона различных толщин выражаются ломаными линиями. По данным рис.

18 время подъема давления ($\bar{\tau}_n$), его снижения ($\bar{\tau}_c$) и окончания сушки ($\bar{\tau}_k$) будут (соответственно $\bar{\tau}_n, \text{мин.}, -\bar{\tau}_c, \text{мин.}, -\bar{\tau}_k, \text{мин.}, -\bar{d}, \text{мм}$): 1,3-14-20-2,15; 2,0-20-29-2,72; 7,0-40-60-4,45; 12-80-120-6,62; 20-120-170-8,76. Для конечной стадии сушки (интервал $\bar{\tau}_c - \bar{\tau}_k$) зависимости, представленные на рис. 18, выражаются уравнением:

$$V = 145 \cdot \tau^{-1,85} \cdot \bar{d}^{2,87} \quad (3.11).$$

При сравнении данных СРП (рис. 17 и 18) с СЦД (рис. 11 и 12) видно, что при СРП скорость сушки на последней стадии при пониженном давлении более высокая. Количественное сравнение различных способов сушки проведено в параграфе 3.3.6.

Как видно из рис. 17 и 18, значения параметров прессования при СРП (величины давления на ступенях прессования и продолжительности $\bar{\tau}_n$, $\bar{\tau}_c$ и $\bar{\tau}_k$) определяются состоянием воды, адсорбированной волокнами целлюлозы, переход которой в различные формы сорбции графически отображается сингулярными точками. Первая сингулярная точка соответствует переходу влаги из свободного состояния в состояние капиллярной конденсации, вторая—переходу влаги из состояния капиллярной конденсации в состояние полимолекулярной адсорбции. Эти точки соответственно определяют продолжительности ($\bar{\tau}_n$) и ($\bar{\tau}_c$). Влага в состоянии мономолекулярной адсорбции определяет время окончания сушки ($\bar{\tau}_k$).

Для исследования процесса теплопереноса при ступенчатом режиме прессования и сушки картона в горячем прессе использовали температурные кривые, представляющие собой зависимости температуры в

различных точках по толщине картона от продолжительности его сушки. Указанные зависимости для температуры центральных (t_u) и поверхностных слоёв (t_n) картона, а также градиента температуры ($\Delta t = t_n - t_u$) приведены на рис. 19 - 22. Они получены для картона различной толщины путём непосредственной записи на самопишущем приборе КСП-4.

Как видно из рис. 19 - 22, кривая (t_n) быстро возрастает до 100°C ; затем на участке АВ, соответствующем периоду постоянной скорости сушки, (t_n) не меняется, оставаясь равной 100°C , при этом на поверхности плит пресса визуальнo наблюдается выпрессованная из картона влага в кипящем состоянии; в дальнейшем кривая (t_n) круто поднимается и постепенно переходит на плато. Отметим, что максимальная температура поверхностных слоёв картона (t_n) меньше температуры плит пресса - 150°C .

Кривая (t_u) как бы идёт вслед за кривой (t_n), повторяя её значения с некоторым запаздыванием во времени. Точка (A') кривой (t_u) соответствует завершению удаления свободной влаги - влагосодержание снижается до 50-60%. На кривой (t_u) также имеется участок постоянной скорости сушки ($A'B'$), после которого кривая круто поднимается и переходит на плато. Точка (C') на этой линии соответствует моменту (\bar{t}_c) снижения давления. Видно, что в результате снижения давления прессования наблюдается снижение t_u , что выражает потерю энергии центральными слоями картона и её унос водяным паром. В точке (D') кривая (t_u) сливается с (t_n), что свидетельствует о завершении процесса сушки.

Кривая градиента температуры по толщине картона ($\Delta t = t_n - t_u$) вследствие описанного поведения зависимостей (t_u) и (t_n) имеет три максимума в соответствующих интервалах (см. рис. 19 - 22) - (I), (II), (III). Указанные интервалы соответствуют удалению влаги различных форм сорбции: (I) - свободной влаги, (II) - влаги капиллярной кон-

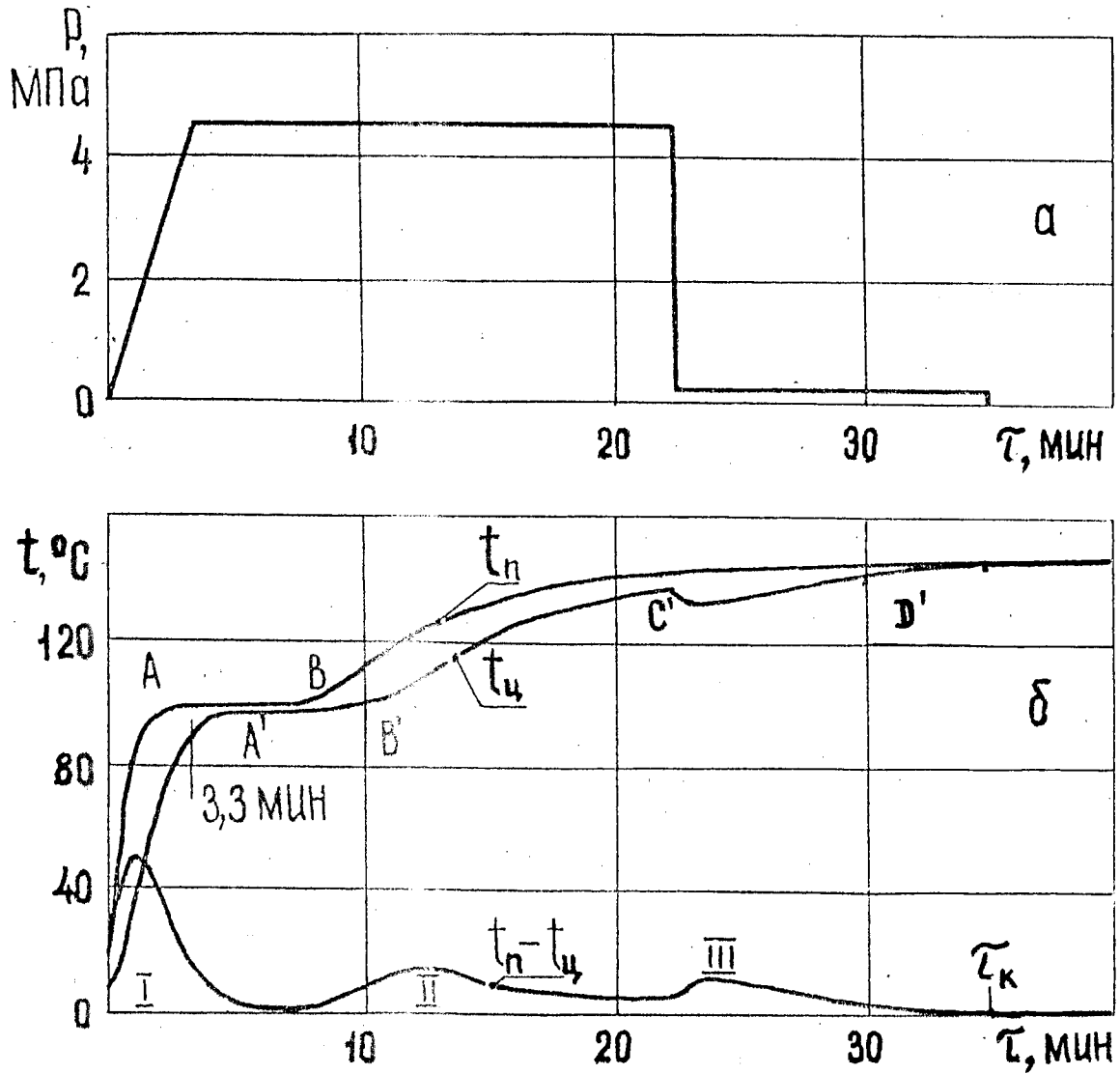


Рис.19. График прессования (а) и температурные кривые (δ) процесса сушки картона толщиной 3,1 мм. t_u - температура центральных слоев картона, t_n - температура его поверхности

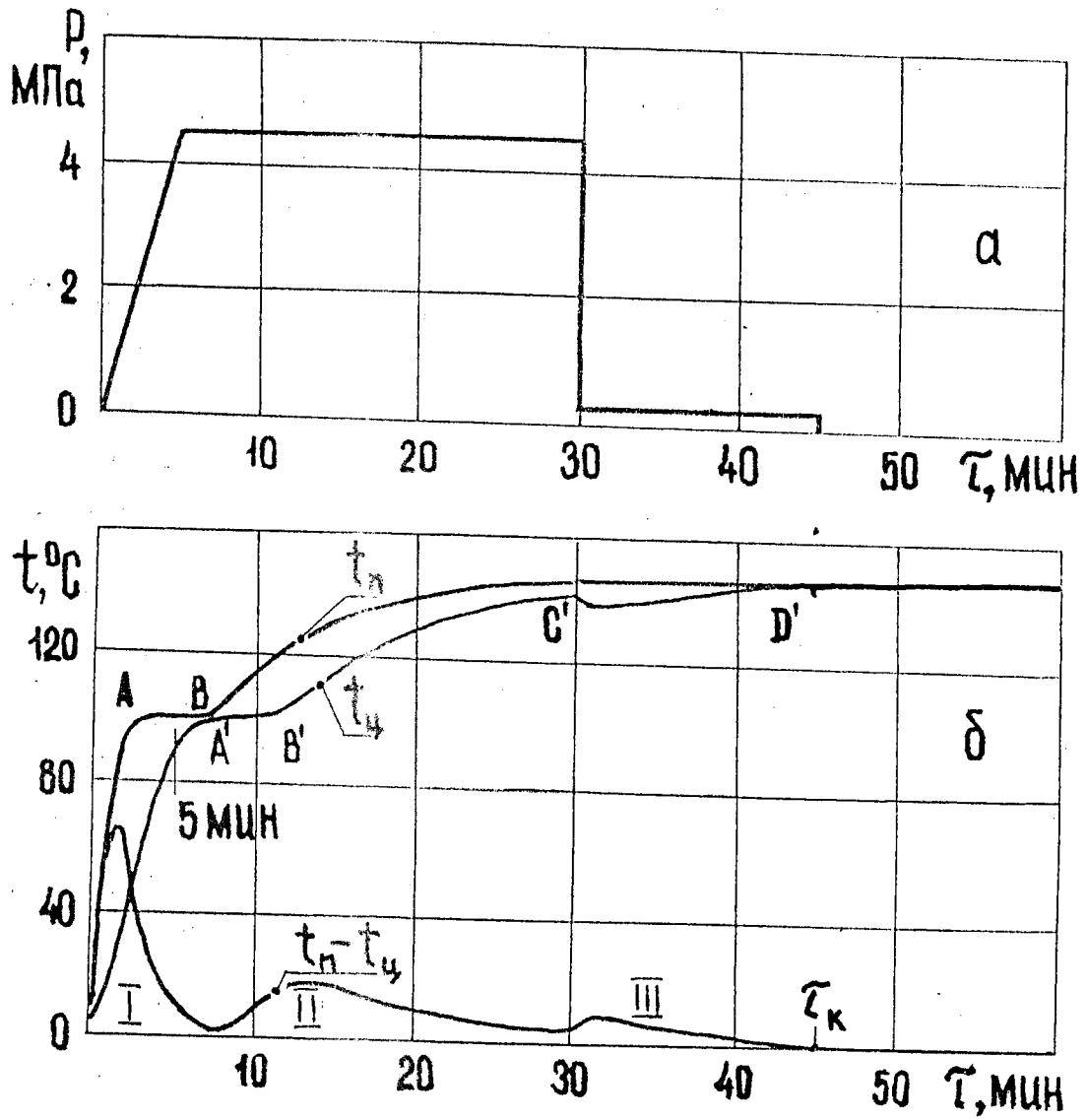


Рис.20. График прессования (а) и температурные кривые (б) процесса сушки картона толщиной 4,0 мм. t_u - температура центральных слоев картона, t_n - температура его поверхности

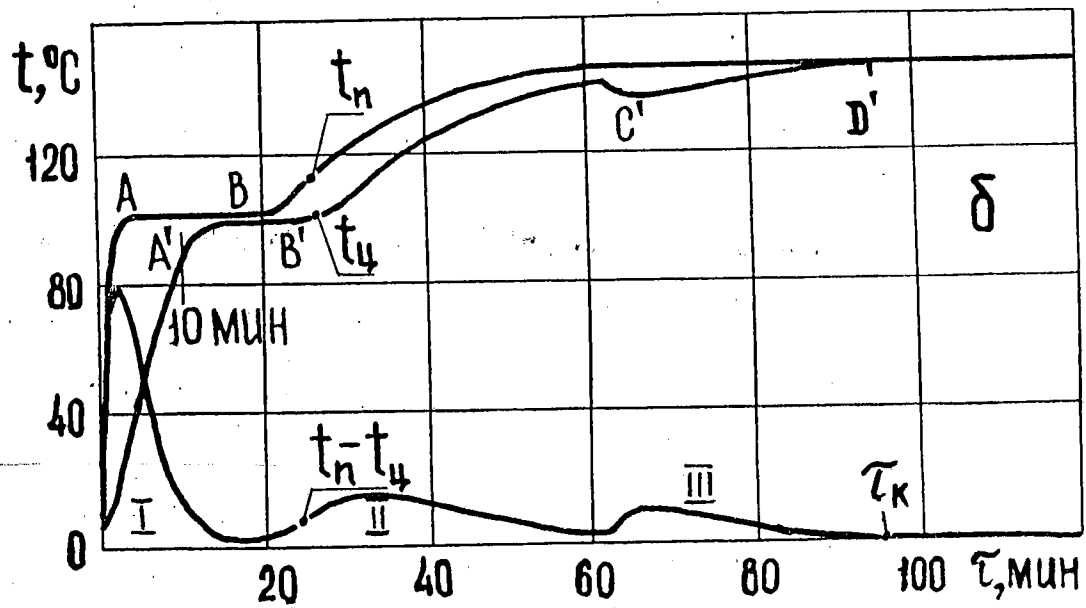
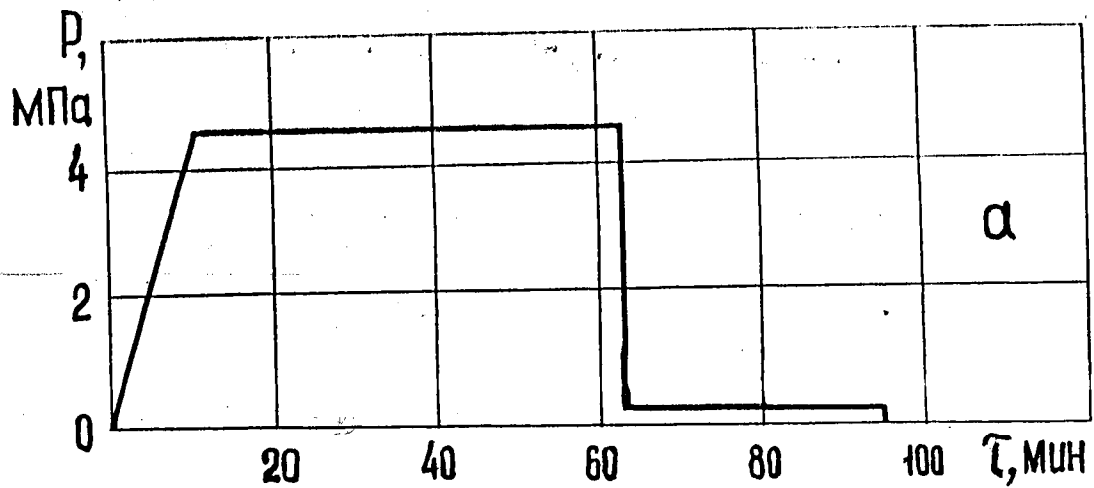


Рис.2Г. График прессования (а) и температурные кривые (δ) процесса сушки картона толщиной 6,0 мм. $t_{\text{ц}}$ - температура центральных слоев картона, t_n - температура его поверхности

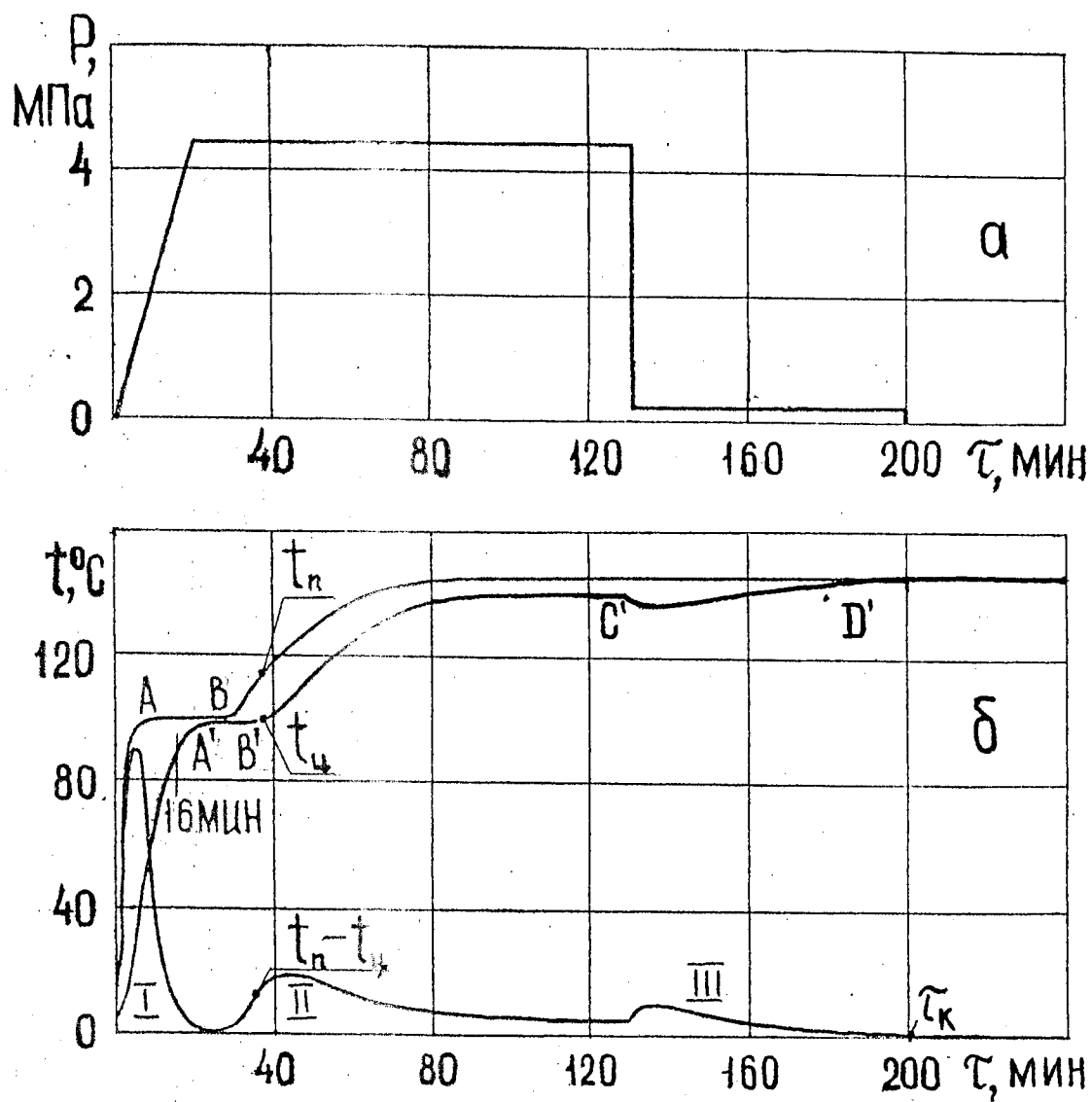


Рис.22. График прессования (а) и температурные кривые (delta) процесса сушки картона толщиной 8,1 мм. t_u - температура центральных слоев картона, t_n - температура его поверхности

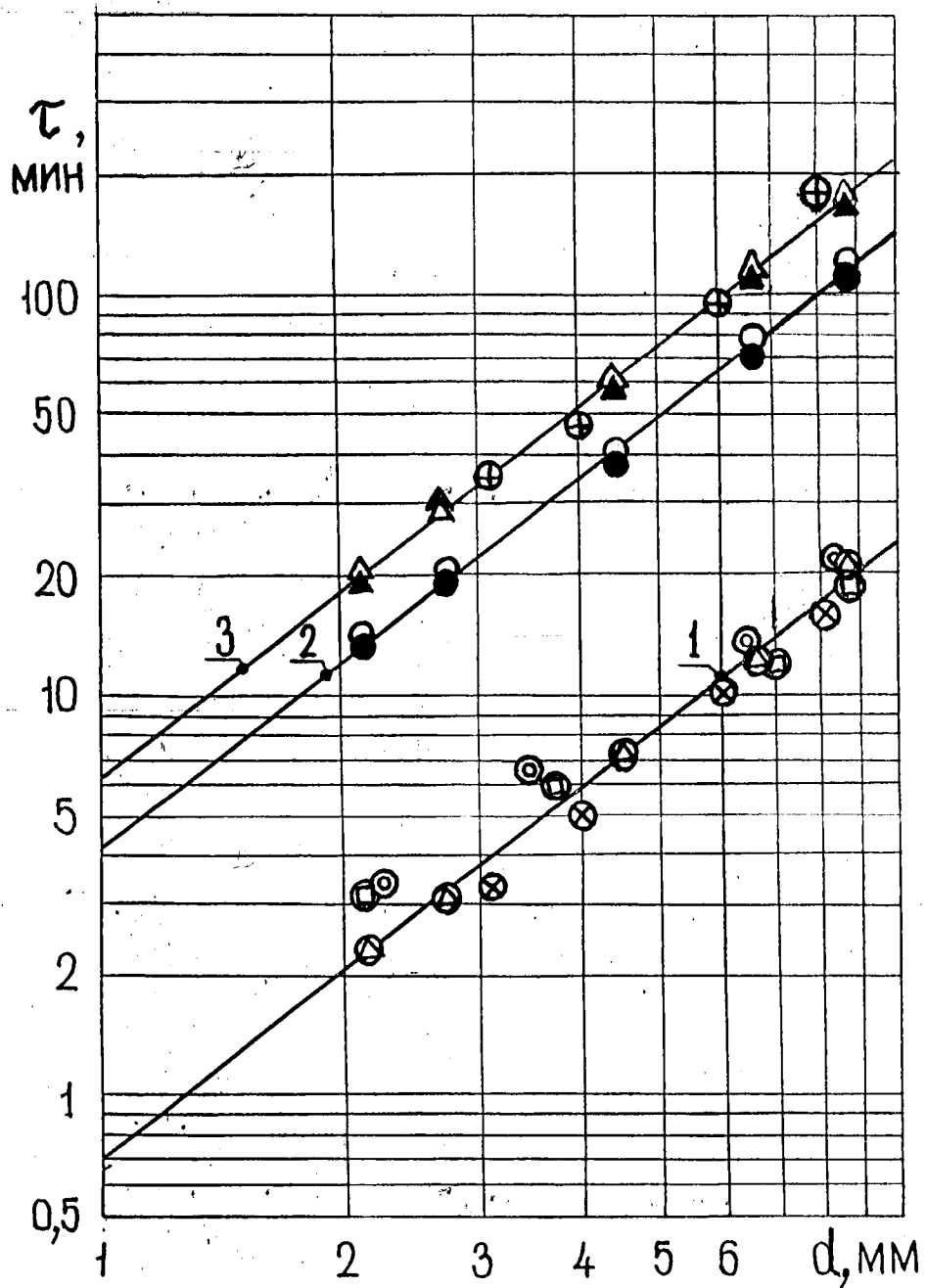


Рис.23. Зависимость времени подъема давления (1), его снижения (2) и окончательной сушки (3) от толщины картона при ступенчатом режиме прессования

денсации, (III) — влаги полимолекулярной адсорбции. Интервалы (I) и (II) обусловлены совместным действием давления и температуры. Интервал (III) получен в результате снижения давления на последней ступени сушки.

По температурным кривым можно определить параметры процесса СРП для картона различной толщины — (τ_n) и (τ_k). Параметр (τ_k) является наиболее важным с точки зрения сокращения продолжительности процесса сушки. Параметр (τ_n) определяли как продолжительность, соответствующую значению температуры 90 °С по кривой (t_u), параметр (τ_k) — как продолжительность, при которой кривые (t_n) и (t_u) сливаются, а ($\Delta t = 0$). Конкретно параметры СРП, определённые по температурным кривым, для картона различных толщин (\bar{d}) будут ($\tau_{n, \text{мин}} - \tau_{k, \text{мин}} - \bar{d}, \text{мм}$ соответственно): 3,3-35-3,1; 5,0-45-4,0; 10-90-6,0; 16-200-8,1.

Полученные экспериментальные данные по исследованию процесса тепло- и массопереноса (зависимости V, W, t_n, t_u и Δt от τ) позволяют определить параметры ступенчатого режима прессования картона различной толщины: продолжительность подъёма давления (τ_n), момент снижения давления (τ_c) и время окончания сушки (τ_k). Результаты указанных определений приведены на рис. 17 — 22. и в обобщённом виде представлены на рис. 23. Как видно из рис. 23, в логарифмических координатах зависимости представляют собой параллельные друг другу прямые линии, что свидетельствует о единстве полученных различными методами данных исследования процесса контактной сушки картона различной толщины в горячем прессе при СРП. По данным рис. 23 можно определить параметры СРП для требуемых толщин картона.

Продолжительности (τ_n, τ_c, τ_k и τ_0) в зависимости от толщины картона (\bar{d}) определяются согласно уравнений:

$$\tau_n = 0,7 \cdot \bar{d}^{1,55} \quad (3.12),$$

$$\tau_c = 4,2 \cdot \bar{d}^{1,55} \quad (3.13),$$

$$\tau_k = 6,2 \cdot \bar{d}^{1,55} \quad (3.14),$$

$$\tau_0 = 4,2 \cdot \bar{d}^{1,55} \quad (3.15).$$

ВЫВОД

Ступенчатый режим прессования (СРП) со снижением давления на последней стадии сушки разработан с учетом форм связи воды с волокнами целлюлозы на основе данных исследования процесса сушки картона различных толщин в горячем прессе. Получены аналитические выражения параметров сушки картона.

3.3.6. Сравнение эффективности различных способов сушки картона в горячем прессе

Согласно данным, приведённым в гл. 3.3.1, комбинированная сушка картона в горячем прессе с использованием высокочастотного нагрева не обеспечивает повышения качества картона и вызывает необходимость снижения температуры плит пресса до 105°C .

Обобщенные данные по исследованию различных способов сушки — СПД, ВСПД и СРП с целью сравнения их эффективности приведены на рис. 24. В качестве критерия сравнения использовали параметр (τ_k) — продолжительность сушки. Как видно из рис. 24, наибольшую продолжительность (τ_k) имеет СПД, меньшую — СРП и ещё меньшую для картона толщиной более 4,0 мм — ВСПД. В логарифмических координатах зависимости (τ_n) для всех способов сушки и (τ_k) для СПД и СРП являются линейными с близкими угловыми коэффициентами, тогда как (τ_k) ВСПД при толщине картона более 4,0 мм имеет изгиб в сторону сокращения продолжительности сушки. Картон основных потребительских толщин от 1,6 мм до 3,5 мм имеет одинаковые (τ_k) для ВСПД и СРП, т.е. указанные способы сушки одинаково эффективны. Учитывая, что при

сушке картона в горячем прессе для осуществления СРП не требуется разработки специального промышленного оборудования в отличие от СЦД, при выборе наиболее приемлемого способа сушки, с точки зрения обеспечения максимальной производительности линии предпочтение следует отдать сушке при ступенчатом режиме прессования (СРП). Отметим, что в числовом выражении, по данным рис. 24, для картона всех рассмотренных толщин сушка при СРП в 1,6 раза эффективнее СЦД, т.е.

$$\bar{\tau}_k \text{ СЦД} / \bar{\tau}_k \text{ СРП} = 1,6 \text{ при } \bar{d} = \text{const.}$$

Приведённые на рис. 24 продолжительности сушки картона различной толщины по данным фирм "Нукаро" (ФРГ) и "Чентрал Адамас" (Италия) ложатся на линию $\bar{\tau}_k \text{ СЦД}$. По видимому, указанные фирмы используют режим, подобный СЦД, и одновременно подтверждают, что полученные нами в лабораторных условиях данные по продолжительности сушки подобны используемым фирмами в промышленных условиях.

Ввиду того, что при СРП на последней стадии сушка проводится при малом давлении, возникает вопрос: не снижает ли сушка при СРП показатели картона, в частности, его плотность? Теоретическое обоснование СРП приведено в параграфе 3.3.4. Результаты испытаний картона, изготовленного при СРП в сравнении с СЦД на физико-механические и электрические показатели, приведены в табл. 3.9. Как видно из указанной таблицы, большинство показателей (включая также основные показатели жёсткого картона: плотность, сжимаемость и остаточную деформацию) при СРП с учётом экспериментальных погрешностей не изменяются в сравнении с СЦД. Из сравниваемых способов сушки СРП позволяет получать картон с более высокой впитываемостью масла. Вероятно, снижение давления прессования на последней стадии сушки способствует более полному раскрытию пор в картоне, что обеспечивает более глубокую пропитку картона трансформаторным маслом.

Сравнение качества картона, изготовленного с использованием

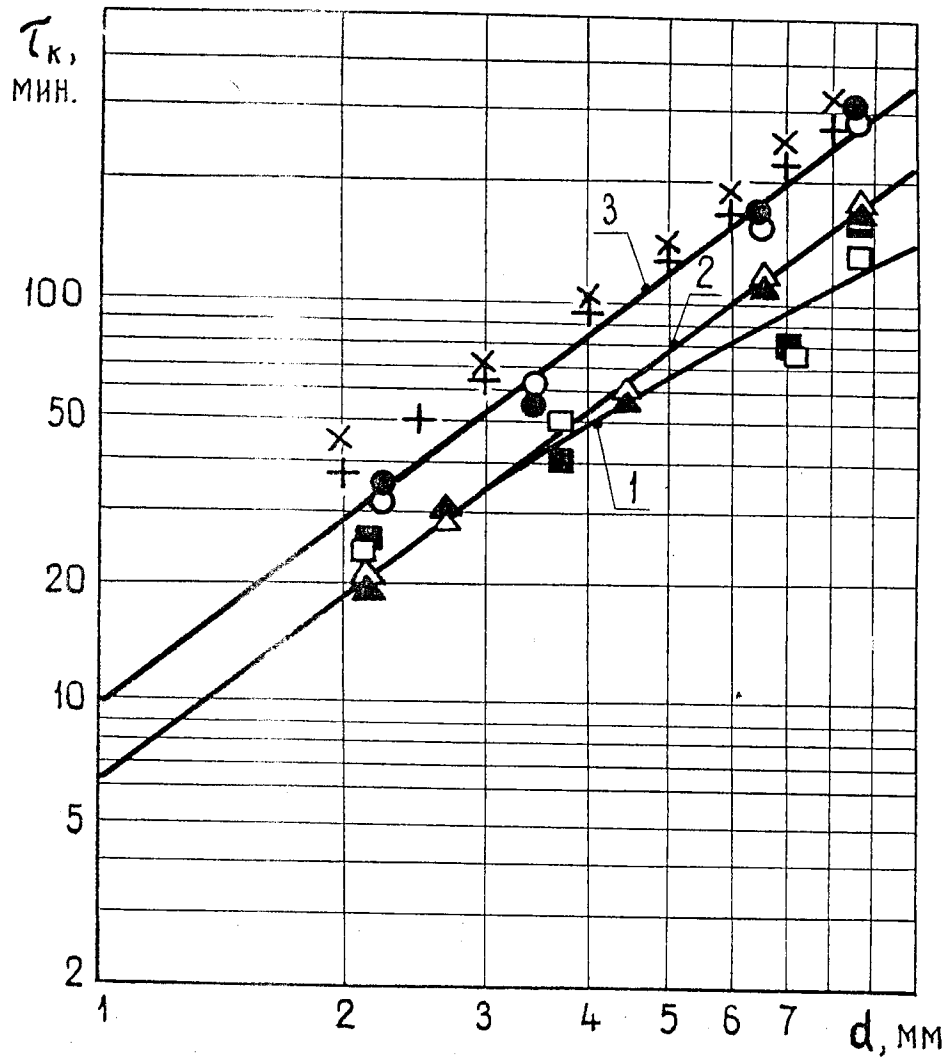


Рис.24. Сравнение продолжительностей сушки (τ_k) в горячем прессе картона толщиной d : 1 - вакуумной при постоянном давлении, 2 - при ступенчатом режиме прессования, 3 - при постоянном давлении. +, X - данные для фирм "Зимпелькамп" и "Чентрал Адамас" соответственно

Таблица 3.9

Физико-механические и электрические показатели качества картона, изготовленного с применением контактной сушки при ступенчатом режиме прессования (СРП) и при постоянном давлении (СПД)

Наименование показателя	Значение показателя при номинальной толщине картона и виде сушки			
	2 мм		4 мм	
	СПД	СРП	СПД	СРП
Толщина, мм	2,12	2,01	4,02	3,90
Плотность, г/см ³	1,13	1,13	1,14	1,14
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:				
машинном	132	115	138	130
поперечном	111	112	114	108
Впитываемость масла, %	10	15	13	18
Линейная деформация, %, в направлении:				
машинном	0,5	0,5	0,4	0,3
поперечном	0,7	0,6	0,4	0,5
по толщине	5,6	5,3	5,0	5,1
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %	5,1	5,1	6,0	6,3
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %	1,6	1,7	2,3	1,9
Выдерживаемое в течение 1 мин. испытательное напряжение перпендикулярно к поверхности, кВ	55	55	ж)	ж)
Стойкость к воздействию поверхностных разрядов, мин., средняя	21	19	31	26

продолжение таблицы 3.9

Наименование показателя	Значение показателя при номинальной толщине картона и виде сушки			
	6 мм		8 мм	
	СПЦ	СРП	СПЦ	СРП
Толщина, мм	6,23	6,2	8,2	8,1
Плотность, г/см ³	1,17	1,15	1,18	1,17
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:				
машинном	119	125	127	112
поперечном	104	115	114	107
Впитываемость масла, %	9	16	10	6
Линейная деформация, %, в направлении:				
машинном	0,3	0,3	0,4	0,4
поперечном	0,4	0,4	0,6	0,6
по толщине	5,0	5,2	4,6	5,0
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %	4,6	5,3	6,1	6,3
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %	1,2	1,5	2,0	2,0
Выдерживаемое в течение 1 мин. испытательное напряжение перпендикулярно к поверхности, кВ	ж)	ж)	ж)	ж)
Стойкость к воздействию поверхностных разрядов, мин., средняя	18	19	22	23

Примечание: Испытания, обозначенные ж), для электрокартона данной толщины не предусмотрены.

Таблица 3.10.

Физико-механические и электрические показатели качества картона, изготовленного с применением вакуумной (ВСЦ) и контактной (СЦ) сушки

Наименование показателя	Значение показателя при номинальной толщине картона и виде сушки:			
	2 мм		4 мм	
	ВСЦ	СЦ	ВСЦ	СЦ
Толщина, мм	2,02	1,81	3,84	3,92
Плотность, г/см ³	1,22	1,21	1,22	1,21
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:				
машинном	139	127	-	-
поперечном	118	97	-	-
Впитываемость масла, %	10	9	12	12
Линейная деформация, %, в направлении:				
машинном	0,3	0,4	0,5	0,5
поперечном	0,6	0,6	1,0	0,5
по толщине	4,2	6,0	5,3	5,9
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %	5,7	5,3	5,4	5,7
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %	1,9	1,8	2,1	2,0
Выдерживаемое в течение 1 мин. испытательное напряжение перпендикулярно к поверхности, кВ	55	55	ж)	ж)

продолжение таблицы 3.10.

Наименование показателя	Значение показателя при номинальной толщине картона и виде сушки:			
	6 мм		8 мм	
	ВСПД	СПД	ВСПД	СПД
Толщина, мм	6,13	5,97	8,16	8,20
Плотность, г/см ³	1,22	1,21	1,20	1,21
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:				
машинном	-	-	-	-
поперечном	-	-	-	-
Впитываемость масла, %	16	10	17	14
Линейная деформация, %, в направлении:				
машинном	0,4	0,4	0,5	0,5
поперечном	0,7	0,7	0,5	0,6
по толщине	4,2	4,4	4,2	4,8
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %	5,5	5,4	5,5	5,4
Остаточная деформация после снятия давления 20 МПа, %	2,1	1,8	1,1	0,9
Выдерживаемое в течение 1 мин. испытательное напряжение перпендикулярно к поверхности, кВ	ж)	ж)	ж)	ж)

Примечание: Испытания, обозначенные ж), для электрокартона данной толщины не предусмотрены.

вакуумной сушки (ВСЦ) и контактной сушки (СЦ), приведено в табл. 3.10. Из таблицы видно, что с учётом экспериментальных погрешностей вакуумная сушка не приводит к изменению свойств картона в сравнении с контактной.

ВЫВОД

Из сравниваемых различных способов сушки картона в горячем прессе (высокочастотной, СЦ, ВСЦ, СРП) наиболее эффективным с точки зрения сокращения продолжительности сушки и повышения производительности технологической линии при отсутствии дополнительных затрат на оборудование является СРП. Вид сушки не оказывает влияние на основные показатели качества жёсткого картона: плотность, сжимаемость и остаточную деформацию. СРП приводит к некоторому повышению масловпитываемости картона, что свидетельствует о его более глубокой пропитке.

3.3.7. Разработка способа изготовления картона повышенной плотности путём сушки в горячем прессе

В современном производстве электроизоляционного картона путём сушки в горячем прессе используют водоотводящие сетки № 16, имеющие в 1 см основы и утка 16 и 12 проволок соответственно. При этом не обеспечивается изготовление картона повышенной плотности, малой сжимаемости и пониженной остаточной деформации. Это обусловлено тем, что для прессования и сушки используются водоотводящие сетки с крупными ячейками, они создают лишь 96 точек прессования на 1 см² площади поверхности картона. При этом элементы поверхности картона, оказавшиеся между точками прессования, не подвержены воздействию давления прессования в процессе сушки, что не обеспечивает эффективного уплотнения картона. С целью повышения плотности, механической и электрической прочности, снижения сжимаемости и остаточ-

ной деформации картона были проведены исследования по применению водоотводящих сеток повышенных номеров для прессования и сушки картона в горячем прессе. Использовали сетки, имеющие в 1 см проволочек основы и утка соответственно: № 20 - 20 шт и 15 шт, № 28 - 28 шт и 16 шт, № 32 - 32 шт и 18 шт, № 40 - 40 шт и 26 шт. Результаты испытаний образцов картона приведены в табл. 3.II.

Таблица 3.II.

Влияние номера сеток на качество электроизоляционного картона

Наименование показателя и единица измерения	Значение показателя картона, изготовленного с применением сеток номер				
	16	20	28	32	40
Толщина, мм	2,10	1,98	1,88	2,25	2,31
Плотность, г/см ³	1,13	1,16	1,19	1,22	1,21
Предел прочности при растяжении, МПа в направлении:					
машинном	130	134	139	144	124
поперечном	105	108	107	125	116
Линейная деформация, % в направлении:					
машинном	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
поперечном	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
по толщине	4,8	4,8	4,9	5,0	4,8
Впитываемость масла, %	17	15	12	9	8
Сжимаемость на воздухе под давлением 20МПа, %	4,9	4,8	4,7	3,6	3,7
Остаточная деформация, %	1,8	1,3	0,9	0,6	0,6
Электрическая прочность, кВ/мм	31	34	36	42	39

Из таблицы видно, что применение сеток повышенных номеров 20-40 обеспечивает повышение плотности, механической и электрической прочности, снижение сжимаемости и остаточной деформации картона.

Существенным отличием процесса сушки при этом является повышение количества точек приложения давления прессования на единицу площади картона. Например, сетки № 32 создают 297 точек прессования на 1 см^2 площади картона. Разработанный способ защищен авторским свидетельством [99]. Использование в трансформаторостроении изготовленного по данному способу электроизоляционного картона обеспечивает повышение динамической прочности обмоток, приведёт к увеличению срока службы и надёжности трансформаторов.

ВЫВОД

Разработан способ изготовления картона повышенной плотности, повышенной механической и электрической прочности, малой сжимаемости и остаточной деформации путём прессования и сушки в горячем прессе, что обеспечивает повышение срока службы и надёжности трансформаторов.

3.4. Исследование эксплуатационных свойств жёсткого электроизоляционного картона

Важным эксплуатационным свойством электроизоляционного картона является его способность длительное время без разрушения противостоят воздействию факторам старения, или срок службы. Существующие стандартные методы позволяют провести оценку срока службы электроизоляционных материалов только при термическом старении [83].

С целью повышения надёжности и точности оценки срока службы жёсткого картона были проведены исследования старения при воздействии на картон комплекса факторов, включающих не только температуру, но и напряжённость электрического поля, что является важным как с теоретической, так и с практической точки зрения.

3.4.1. Оценка срока службы картона методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) при термическом старении

Исследования по определению срока службы образцов жёсткого картона в сравнении с картоном марки Б (ГОСТ 4194-88) при термическом старении в трансформаторном масле проводили в соответствии с рекомендациями МЭК [83]. В качестве контролируемых параметров при определении срока службы использовали: 1) предел прочности при разрыве и 2) параметр концентрации стабильных свободных радикалов, измеряемый методом ЭПР [100].

Данные измерений концентрации стабильных свободных радикалов в процессе старения жёсткого картона в среде трансформаторного масла при различных температурах приведены на рис. 25 и 26. Зависимости можно разбить на два участка — криволинейный, характерный для начала старения, и прямолинейный, характерный для последующего старения. Прямолинейные участки зависимостей отображают процесс термического инициирования свободных радикалов [82, 100]. В процессе термообработки целлюлозы наблюдается нарастающее с течением времени её потемнение, связанное с деструкцией и образованием двойных связей. Как отмечает Д. Инграм [101], свободные радикалы в продуктах низкотемпературной карбонизации (до 900 °C) возникают в системе конденсированных углеродных колец при разрывах связей в боковых ответвлениях; затем происходит их стабилизация за счёт большой резонансной энергии системы ароматических колец; неспаренный электрон сильно делокализован по системе сопряжённых π -связей. Стабильные свободные радикалы в целлюлозе при её термообработке до 300 °C обнаружены в работах [81, 82].

При старении целлюлозных материалов протекают процессы дегидратации, декарбоксилирования, декарбонилирования, окисления, гидролитической и флюктуационной деструкции в результате чего проис-

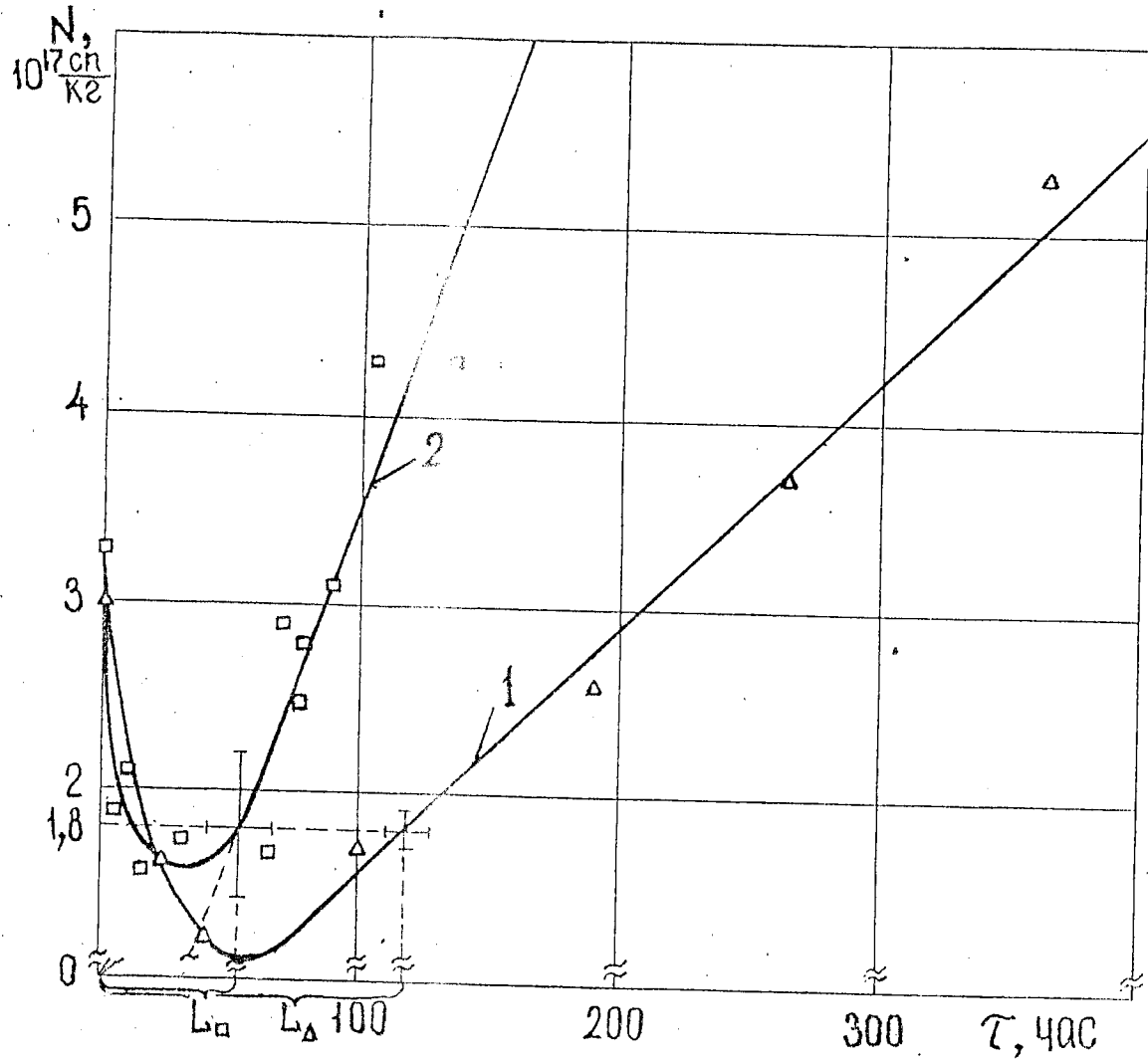


Рис.25. Зависимость концентрации парамагнитных центров от продолжительности старения "жесткого" картона. 1 - при 433 K (160°C), 2 - при 513 K (240°C)

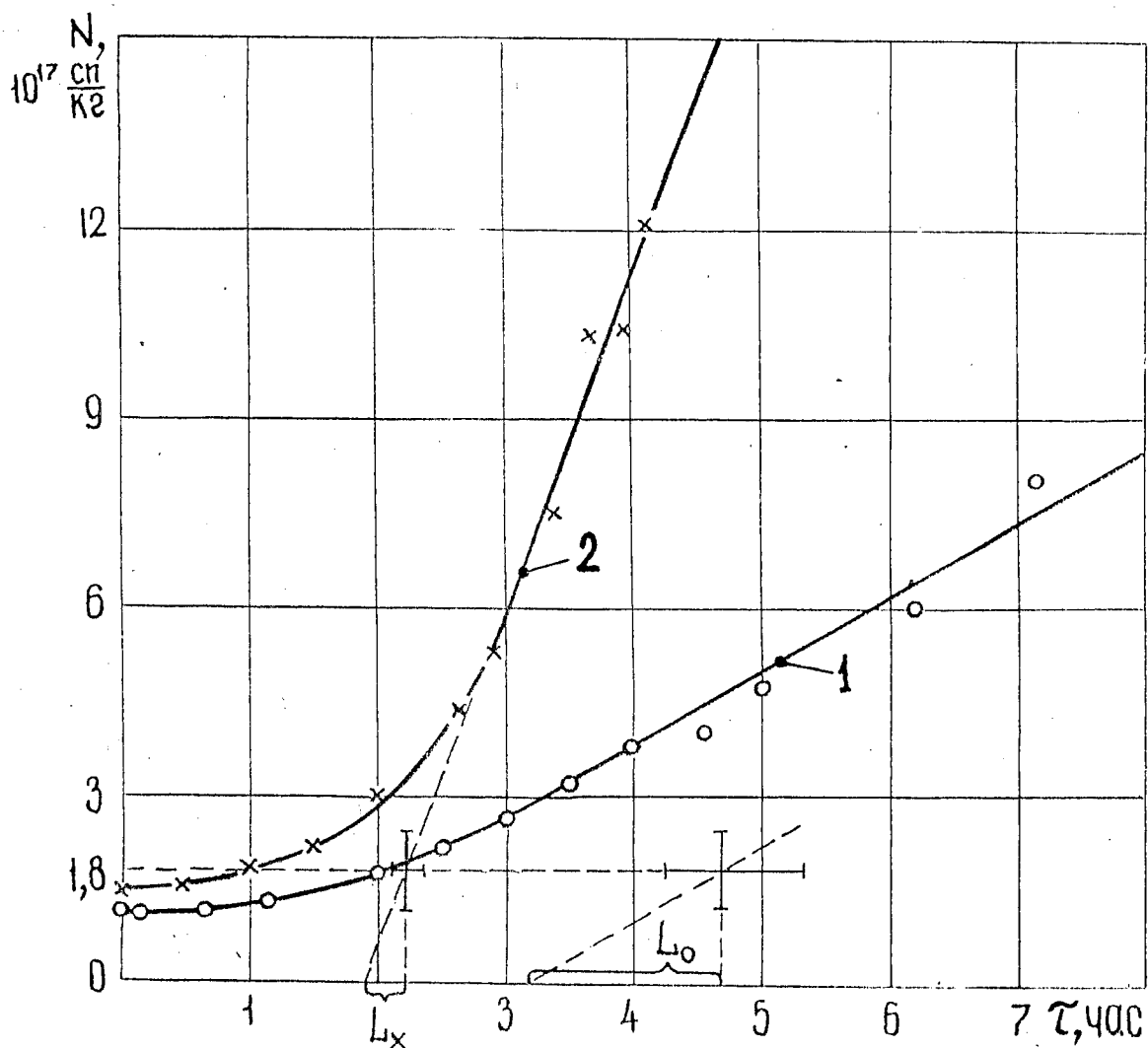


Рис. 26. Зависимость концентрации парамагнитных центров от продолжительности старения жесткого картона. 1 - при 493 К (220°C), 2 - при 513 К (240°C)

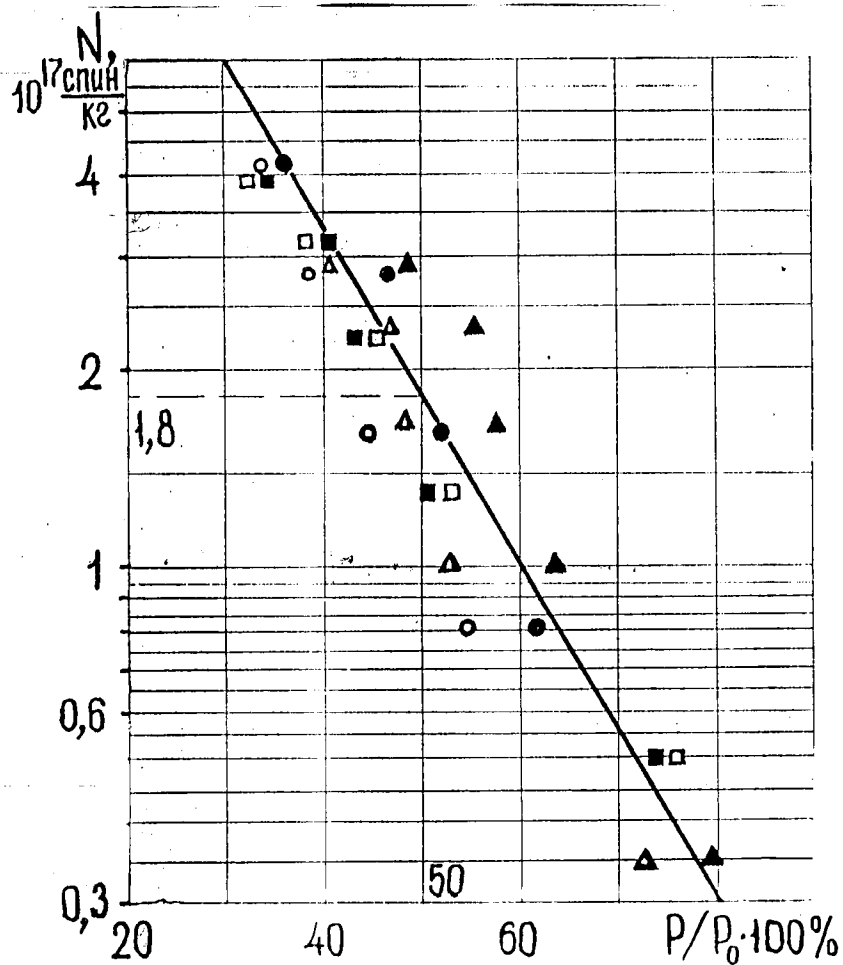


Рис.27. Связь между концентрацией (N) стабильных свободных радикалов и пределом прочности (P) при растяжении (в процентах к исходному значению P_0). ●, ○ - соответственно поперечное и машинное направление, картон марки АМ, старение на воздухе при 160°C; ■, □ - то же, картон марки Б, старение в масле при 190°C, ▲, △ - то же, картон марки АМ, старение в масле при 190°C

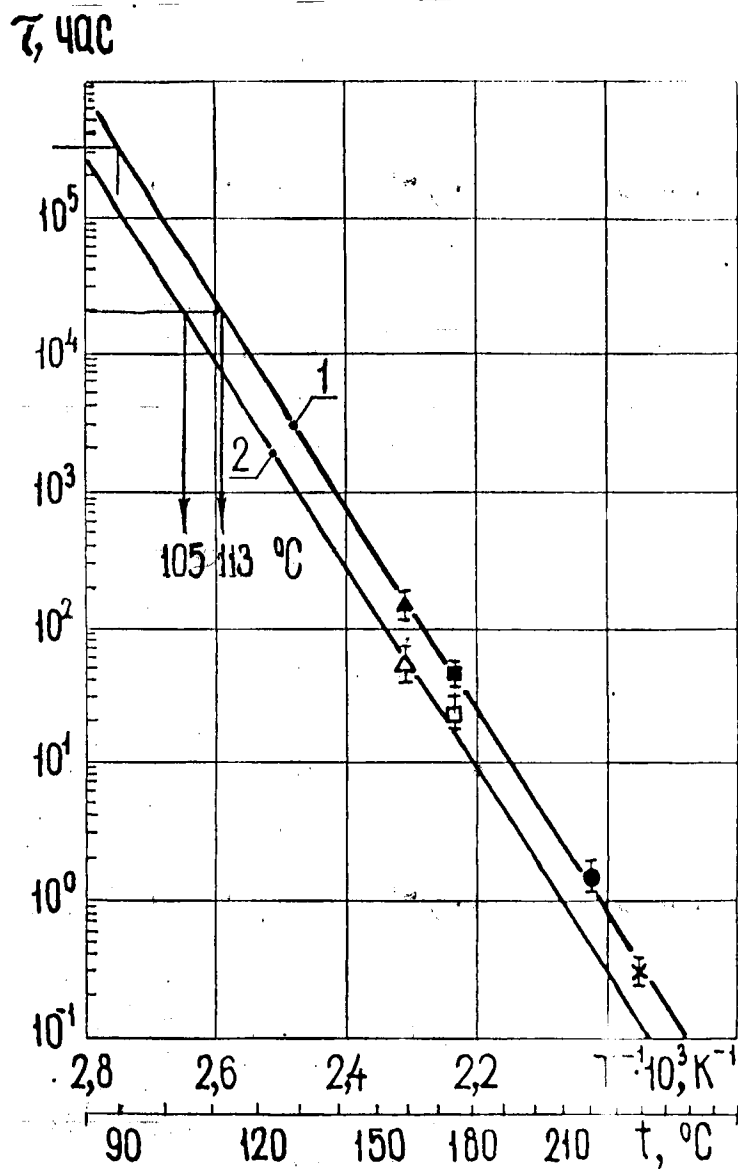


Рис.28 Зависимость срока службы электрокартона от обратной температуры.
Обозначения: 1 - жесткий картон, 2 - картон марки Б

ходит изменение регистрируемых характеристик. При условии правильности методик измерения между несколькими регистрируемыми характеристиками должна существовать количественная связь. Используя данные нескольких циклов старения, мы установили корреляцию между концентрацией свободных радикалов и пределом прочности при растяжении, выраженном в процентах от исходного значения. Результаты представлены на рис. 27. Как видно из рисунка, связь между логарифмом концентрации свободных радикалов и пределом прочности, выраженном в процентах, по отношению к исходному значению, независимо от того, в каких условиях происходит старение—на воздухе или в трансформаторном масле, независимо от марки картона и температуры старения, аппроксимируется линейной зависимостью. Обсчёт на ЭВМ "Мир" данных, приведённых на рис. 27, дал следующее уравнение: $\ln N = 3,1 - 5,3 P/P_0$. Коэффициент корреляции оказался высоким: 0,94. Полученный результат парной корреляции позволяет рекомендовать параметр концентрации стабильных свободных радикалов, измеренных методом ЭПР для оценки срока службы материалов на целлюлозной основе.

Весьма важным при определении срока службы электроизоляционного картона является выбор конечной точки. Конечная точка—это характеристика степени разрушения материала, при которой исследуемое свойство материала сохраняет практически допустимый уровень [83], [100]. Методика МЭК [83] рекомендует при использовании предела прочности для оценки степени разрушения материала конечную точку оценивать 50 %-ным снижением предела прочности материала от исходного значения. Используя концентрацию стабильных свободных радикалов в качестве регистрируемого параметра при старении электроизоляционного картона, на основании корреляции, приведённой на рис. 27, в качестве критерия конечной точки необходимо выбрать увеличение концентрации свободных радикалов, соответствующее 50 %-ной потере прочности, т.е. $1,8 \cdot 10^{17}$ спинов/кг (сп/кг). Таким образом, при

няв в качестве критерия оценки срока службы интервал времени, в течение которого концентрация стабильных свободных радикалов, инициированных процессом искусственного старения, увеличивается на $1,8 \cdot 10^{17}$ сп/кг, проведя старение исследуемых образцов при нескольких различных температурах, превышающих эксплуатационные, получив соответствующие этим температурам сроки службы, можно построить зависимость срока службы от температуры. Экстраполяция этой зависимости на длительные промежутки времени позволяет определить срок службы картона при эксплуатационных температурах или температурные индексы (t_i), соответствующие 20000 часов эксплуатации. Результаты теплового старения электроизоляционных материалов подчиняются закону Аррениуса [80,83,86], т.е. выполняется линейная зависимость между логарифмом срока службы и обратной температурой.

На рис. 28 приведена такая зависимость, полученная по данным рис. 25, 26 на основе концентрационных измерений для картона марки жёсткий в сравнении с картоном марки Б при их старении в трансформаторном масле. Из рис. 28 видно, что срок службы у жёсткого картона при различных температурах больше, чем у картона марки Б. Температурный индекс, соответствующий 20000 часов, у жёсткого картона - 113°C также выше, чем у картона марки Б - 105°C .

Полученные данные показывают более высокую нагревостойкость жёсткого картона в сравнении с маркой Б, что объясняется более высокой плотностью жёсткого картона. Эффективная энергия активации процесса термодеструкции, определенная по данным рис. 28, составляет 145 кДж/моль.

ВЫВОД

Проведены исследования термического старения жёсткого электрокартона и картона марки Б в трансформаторном масле. В качестве контролируемого параметра для получения кинетических зависимостей предложено использовать концентрацию стабильных свободных радикалов.

На основании полученных зависимостей показано, что срок службы и температурный индекс жёсткого картона более высокий в сравнении с картоном марки Б.

3.4.2. Десорбция влаги и электрическая прочность

пропитанного трансформаторным маслом картона

В процессе пробоя электроизоляционного картона при различных температурах как показали исследования, приведённые в настоящем параграфе и параграфе 3.4.4, важное значение имеет величина напряжённости электрического поля, в зависимости от которой меняется механизм пробоя. Для картона толщиной 2 мм при напряжённости электрического поля менее 17-20 кВ/мм процесс пробоя обусловлен старением картона, тогда как при большей напряжённости пробой связан с десорбцией влаги. Поэтому наряду с исследованиями длительной электрической прочности предприняты термогравиметрические измерения эффективной энергии активации процесса десорбции влаги, связанной с целлюлозными волокнами.

В табл. 3.12 представлены результаты термогравиметрических определений энергии активации процесса десорбции влаги различных форм сорбции исследуемых образцов жёсткого картона.

Таблица 3.12.

Параметры термического анализа образцов жёсткого картона (Среднее стандартное отклонение от энергии активации ± 6 кДж/моль)

Условия насыщения образцов влагой перед испытаниями	Интервал сушки при вычислении $W_T, \%$		Эффективная энергия активации процесса десорбции влаги (W_T), кДж/моль
	Начальная влажность	Конечная влажность	
Воздушно сухие	8,0	2,0	42
Выдержанные над поверхностью воды	16	8,0	50

Полученные значения энергии активации (табл.3.12) соответствуют известным из литературы [17] величинам энергии водородной связи 17-34 кДж/моль или для молекулы воды, включающей две такие связи, -34÷68 кДж/моль. Причём, энергия внутримолекулярных водородных связей для целлюлозы по Р.Г.Жбанкову [102] составляет 8-12 кДж/моль.

Данные по исследованию длительной электрической прочности образцов жёсткого картона при температурах 363К (90°C), 283К (20 °C) и 283К (10 °C) представлены на рис. 29. В полулогарифмических координатах. Определённые по данным рис. 29 средние стандартные отклонения составляют: абсолютное по напряжённости электрического поля $\Delta E = \pm 1,6$ кВ/мм и относительное по времени до пробоя $\Delta \ln \tau = \pm 30\%$. До точки излома А (при $E > E_0$ и $T = \text{const}$) зависимости времени до пробоя (τ) от напряжённости электрического поля (E) описываются экспоненциальным уравнением:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp[\mu \cdot (E_0 - E)] \quad (3.16),$$

где τ_0 - предэкспоненциальный множитель,
 μ - коэффициент пропорциональности, различный для различных температур,
 E_0 - среднее значение пороговой напряжённости электрического поля.

При напряжённости поля ниже пороговой ($E < E_0$) с учётом её доверительного интервала время до пробоя значительно возрастает после точки излома линия, общая для исследуемого интервала температур, параллельная оси времени. Излом зависимостей $\tau = f(E)$ в точке А свидетельствует об изменении механизма пробоя.

По данным рис. 29 В для текущих значений напряжённости электрического поля ($E = \text{const}$ для различных T) определены величины эффективной энергии активации процесса электрического пробоя (W_3). Данные времени до пробоя (τ) подчиняются уравнению:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{W}{RT} \quad (3.17).$$

В уравнении 3.17 W_3 выражается:

$$W_3 = W_{30} - \beta E \quad (3.18),$$

где W_{30} - величина энергии активации при $E=0$, т.е. при отсутствии электрического поля,

β - коэффициент пропорциональности.

Обобщая уравнения (3.16) и (3.18), выражающие соответственно влияние напряжения и температуры на время до пробоя, получим:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \left[\delta (E_0 - E) - \frac{W_{30} - \beta \cdot E}{RT} \right] \quad (3.19)$$

Коэффициенты уравнения (3.19), рассчитанные графо-аналитическим методом, для жёсткого картона имеют значения: $\tau_0 = 10$ мин, $\delta = 1,14$ мм/кВ, $E_0 = 17,0$ кВ/мм, $W_{30} = 41$ кДж/моль, $\beta = 2,4$ кДж · мм/моль · кВ.

Уравнение (3.19) с найденными значениями коэффициентов описывает экспериментальные данные, приведённые на рис. 29 В для жёсткого картона, в интервале напряжённостей электрического поля от ~ 17 до ~ 30 кВ/мм и времени до пробоя от $\sim 0,6$ до ~ 10 мин, т.е. наклонные к оси времени линии ($\text{прит} = \text{const}$), расходящиеся веером от точки А. По уравнению (3.19) можно найти температуру, при которой линия $\tau = f(E)$ будет параллельная оси E . Эта температура T_x равна 253 К (-20°C). Ниже её следует ожидать изменение механизма пробоя и отклонение экспериментальных данных от зависимости (3.19). Температура T_x связана с физическим состоянием воды в целлюлозе. При этой и более низкой температуре адсорбционная влага в целлюлозе замерзает.

Подобные данные по длительной электрической прочности при различных температурах для картона марки Б (по ГОСТ 4194-83) в качестве сравнительных приведены на рис. 29а. Коэффициенты уравнения, рассчитанные графо-аналитическим методом, для картона марки Б толщиной 2,0 мм, имеют значения: $\tau_0 = 15$ мин, $\delta = 0,736$ мм/кВ,

$E_0 = 18,5$ кВ/мм, $W_{90} = 27$ кДж/моль, $\beta = 1,459$ мм кДж/кВ моль, $T_x = 238$ К (-35 °С). Данные расчёта по уравнению (3.19) с указанными коэффициентами на рис. 29а приведены в виде пунктирных линий. Как видно из рис. 29, теоретическое уравнение даёт данные, близкие к экспериментальным (сплошные линии). По данным рис. 29а были дополнительно проведены подобные расчёты коэффициентов уравнения на ЭВМ "Мир". Получены следующие значения: $\tau_0 = 14$ мин, $\delta = 0,638$ мм/кВ, $E_0 = 18,3$ кВ/мм, $W_{90} = 22,3$ кДж/моль, $\beta = 1,22$ мм кДж/кВ моль. Коэффициент многофакторной корреляции (Т, Е и τ) оказался высоким: 94%. Результаты, полученные на ЭВМ, близки по данным, полученным с применением графо-аналитического метода.

Проведённый анализ показывает, что данные по длительной электрической прочности при напряжённости электрического поля более 17–18 кВ/мм для картона марки Б хорошо дополняют и подтверждают результаты, полученные для жёсткого картона.

Сопоставление найденного значения энергии активации электрического пробоя $W_{90} = 27-41$ кДж/моль с данными дериватографических измерений энергии активации для влажностей, соответствующих мономолекулярной адсорбции, приводит к выводу, что $W_{90} = W_T$. Обнаруженное позволяет видеть, что остаточная влага в картоне играет важную роль при его электрическом пробое, процесс которого может быть представлен следующим образом. Согласно данным, приведённым на рис.

29 и выраженным уравнением 3.19, для возникновения пробоя напряжённость электрического поля должна иметь значение, достаточное для преодоления активационного барьера 27–41 кДж/моль, соответствующего десорбции мономолекулярно связанной влаги. В результате поглощения электрической энергии во времени происходит отрыв молекул воды от целлюлозного остова. В картоне возникают частичные разряды и образуются газовые полости, которые растут с течением времени и вытесняют трансформаторное масло, о чём свидетельствует наблюдающееся

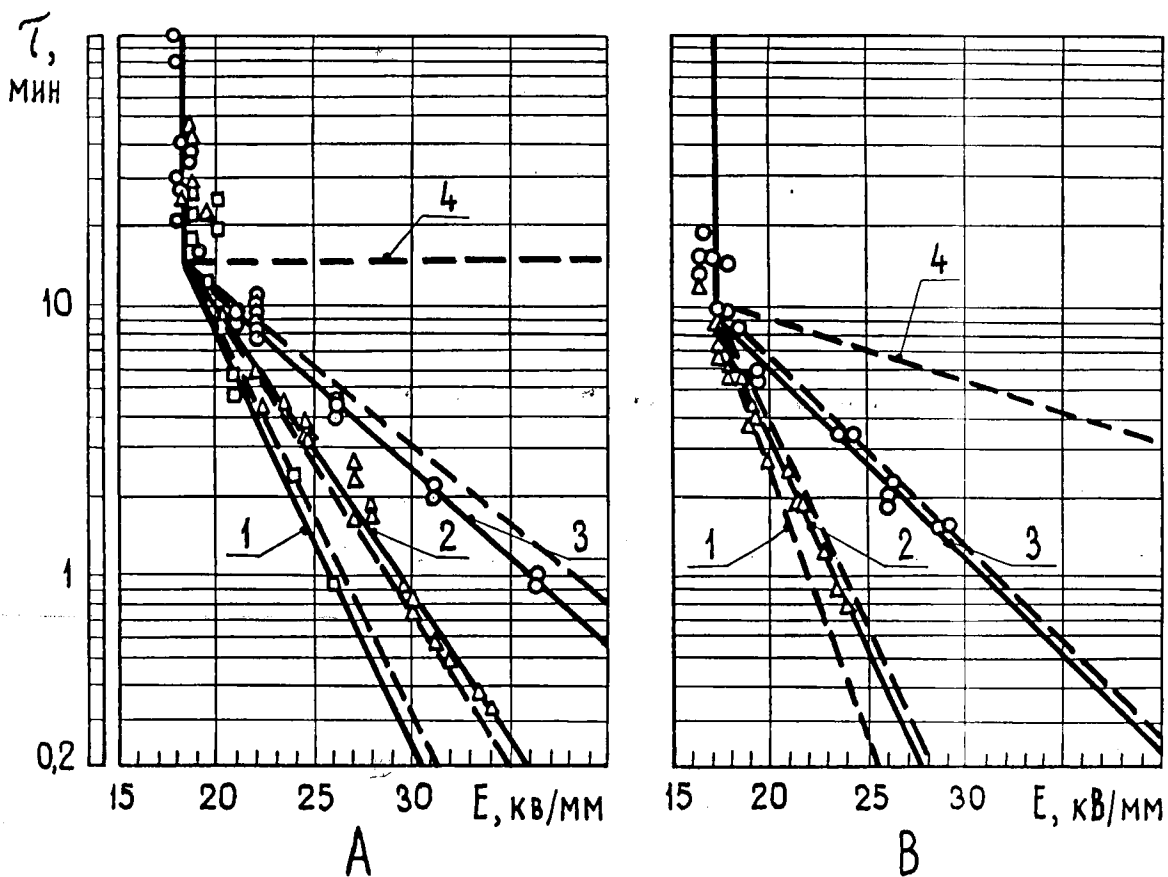


Рис.29. Зависимость времени до пробоя от напряжённости электрического поля электрокартона в пропитанном состоянии при различных температурах. А - картон марки Б, 1 - 433К(160°С), 2 - 373К(100°С), 3 - 293К(20°С), 4 - 238 (-35°С). Б - жесткий картон, 1 - 433К(160°С), 2 - 363К(90°С), 3 - 293К(20°С), 4 - 263К(-10°С). Сплошные линии - среднегеометрические значения, пунктиры - расчёт по уравнениям

осветление картона в межэлектродном промежутке в предпробойном состоянии (особенно по краям электродов, где напряжённость поля несколько выше). Рост газовой полости и является причиной, приводящей к электрическому пробоя [16] пропитанного трансформаторным маслом электроизоляционного картона. Влияние газовых полостей на электрический пробой пропитанного картона было также проверено в условиях пониженного до 0,5 ата атмосферного давления в испытательной камере. Опыты показали, что при снижении давления время до пробоя снижается, что свидетельствует о более быстром росте объёма газовых полостей.

ВЫВОД

В результате проведённых исследований определены уровни эффективной энергии активации процесса десорбции влаги, сорбционно связанной с волокнами картона, а также процесса электрического пробоя пропитанного трансформаторным маслом электроизоляционного картона. Получена аналитическая зависимость времени до пробоя от напряжённости электрического поля и температуры. Зависимость экспериментально подтверждена для различных марок картона. Входящая в данную зависимость величина активационного барьера электрического пробоя картона равна эффективной энергии активации процесса десорбции влаги, что свидетельствует о непосредственном влиянии остаточной влаги на развитие процесса электрического пробоя в пропитанном трансформаторным маслом электроизоляционном картоне. Рассмотренные процессы происходят при напряжённости электрического поля более 17–18 кВ/мм и не относятся к старению электрокартона.

3.4.3. Исследование старения картона в трансформаторном масле при воздействии температуры и электрического поля.

В параграфе 3.4.2 показано, что для исследования процесса ком-

плексного старения необходимо использовать напряжённости электрического поля менее 17-18 кВ/мм. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса комплексного старения жёсткого картона в сравнении с картоном марки Б в пропитанном состоянии при наложении температуры и электрического поля приведены на рис.

30. В качестве контролируемого параметра при исследовании процесса старения использовали время до пробоя (τ) при фиксированных значениях температуры (T) и напряжённости электрического поля (E). На основе проведённого в параграфе 1.5 анализа результаты исследования старения представлены в координатах $\ln \tau - E$. Как видно из рис. 30 экспериментальные данные подобно проанализированным в параграфе 1.5 представляются прямыми линиями. Также подобно данным, приведённым в параграфе 3.4.2, для корреляционного анализа процесса комплексного старения картона с наложением электрического поля может быть использовано уравнение:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{W_0 - \gamma \cdot E}{RT} \quad (3.20),$$

где τ - время до пробоя,

τ_0 - предэкспоненциальный множитель,

W_0 - энергия активации,

γ - коэффициент,

R - универсальная газовая постоянная,

T - абсолютная температура.

При корреляционном анализе данных согласно уравнению (3.20) получены следующие значения коэффициентов: для картона марки Б - $\tau_0 = 8,3 \cdot 10^{-19}$ мин, $\gamma = 3,36$ мм · кДж · кВ⁻¹ · моль⁻¹, $W_0 = 221$ кДж · моль⁻¹, для жёсткого картона - $\tau_0 = 3,26 \cdot 10^{-17}$ мин, $\gamma = 3,36$ мм · кДж · кВ⁻¹ · моль⁻¹, $W_0 = 221$ кДж · моль⁻¹. Из рис. 31 видно, что экспериментальные данные соответствуют рассмотренной аналитической модели до пороговой напряжённости E_0 , выше которой всту-

пает в действие уравнение (3.19). Уравнение (3.20) подобно уравнению Журкова (1.6) при замене в нем механического напряжения на электрическое. Это позволяет использовать аналогичный подход при анализе механизма воздействия электрического напряжения на материал. Лежащий в основе уравнения (3.20) общепризнанный закон Аррениуса, экспериментально подтвержденный для различных материалов в широком интервале температур, является прочной теоретической базой, обосновывающей уравнение (3.20) и раскрывающей физическую картину процессов, протекающих при старении электрокартона в условиях воздействия температуры и электрического поля. Уравнение (3.20) выражает наличие электрического старения электроизоляционного картона. Приложенное к образцу электрическое напряжение снижает энергию активации процесса деструкции целлюлозы (W_0) на величину (γE). т.е. приводит при той же температуре к более ускоренному старению. Это подтверждается даже визуальным наблюдением: картон после старения и пробоя по всей толщине под электродами более карбонизирован, чем вне электродов. Следует отметить, что в интервале напряжённости от 0 до $\sim (15-18)$ кВ/мм по данным, приведённым на рис. 30, энергия активации снижается от 221 кДж/моль до (150-170) кДж/моль, т.е. на значение энергии десорбции влаги, что соответствует данным, приведённым в п.3.4.2. Коэффициент γ , судя по его размерности, имеет смысл дипольного момента. Отметим также, что уравнение 3.20, полученное нами в отчёте 1985 г. [103] в последующем нашло подтверждение в работе [104].

Рассмотрим принципиальную возможность определения срока службы электроизоляционного жёсткого картона и картона марки Б толщиной 2,0 мм по результатам многофакторной корреляции параметров работоспособности (γ, T, E), приведённой на рис. 30. Критерием, характеризующим работоспособное состояние картона, является

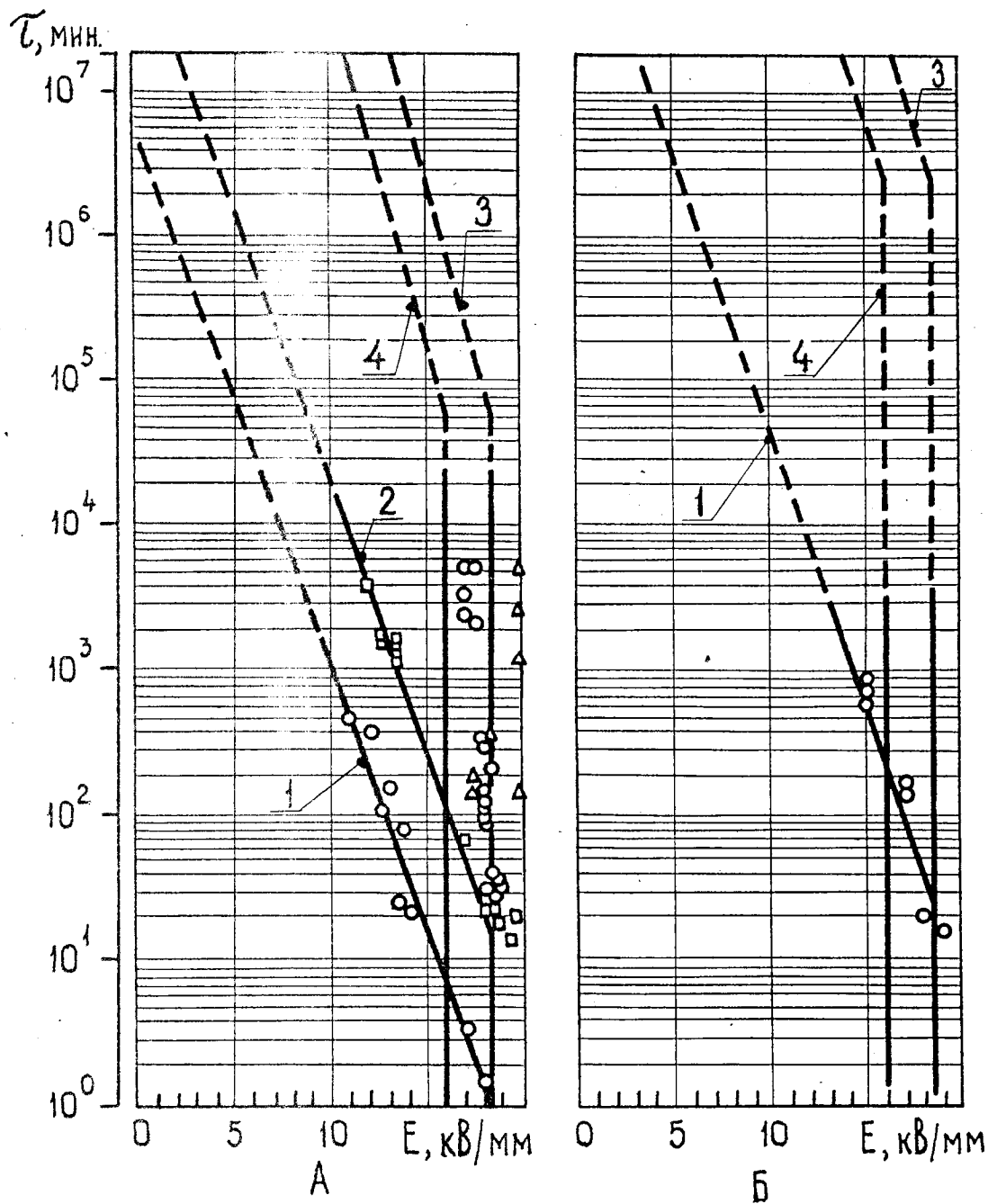


Рис.30. Зависимость срока службы (времени до пробоя) от электрической напряжённости для электроизоляционного картона марки Б(А) и жесткого (Б) толщиной 2,0 мм. I - 463 К (190°C), 2 - 433 К (160°C), 3 - 363 К (90°C). Сплошные линии - экспериментальные значения, пунктир - экстраполяция, 4 - гарантийный срок службы при 363 К (90°C)

сохранение им электроизоляционных свойств, т.е. отсутствие пробоя. Поэтому значения параметров работоспособности определяются нижней границей доверительного интервала. Уравнение для гарантийного срока службы при отсутствии пробоя будет:

$$\tau_p = \tau_0 \cdot \exp \frac{W_0 - \gamma(E + \Delta E)}{RT} \quad (3.21)$$

где ΔE — односторонний доверительный интервал по напряжённости электрического поля при определённой доверительной вероятности.

Расчёт значения ΔE

Уравнение расчёта:

Данные для расчёта, $(\bar{E} - E_i)$, кВ:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{E} - E_i)^2}{n-1}}$$

$$\Delta E = S \cdot t_c$$

0,36	0,18	1,78	1,78	0,18	$n = 35$
0,36	0,18	1,78	1,71	0,36	
0,36	0,36	1,78	1,43	0,18	
0,89	0,36	1,78	1,07	1,43	
0,54	0,18	1,78	0,89	1,43	
0,71	1,78	1,50	0,89	1,43	
0,36	2,14	1,43	1,43	1,43	

В результате расчёта получим: $S = 1,23$ кВ, t_c — критерий Стьюдента при 95 % доверительной вероятности и числе опытов $n = 35$ составляет 2,00, тогда $\Delta E = 1,23 \text{ кВ} \cdot 2,00 = 2,43 \text{ кВ}$.

На рис. 30 гарантийный срок службы при доверительной вероятности 95 % для картона (жёсткого и марки Б) толщиной 2,0 мм при температуре 90 °С (363 К) обозначен линией 4. При напряжённости электрического поля 14,5 кВ/мм гарантийный срок службы для картона Б составляет 0,6 лет, тогда как для жёсткого картона — 24,4 года, т.е. для жёсткого картона в сравнении с картоном марки Б в идентичных условиях он на порядок больше. Это обусловлено более высокой плотностью жёсткого картона и спецификой технологии его изготовления.

ВЫВОД

Процесс изотермического комплексного старения электроизоляционного картона при воздействии температуры и электрического поля описывается уравнением (3.20), которое включает напряжённость электрического как фактор старения. Полученное уравнение может быть использовано для ускоренного сравнения срока службы различных марок картона при их комплексном старении при различных температурах и экстраполяции данных, полученных при высоких температурах, в область эксплуатационных температур. Экспериментальные исследования комплексного старения показали, что срок службы жёсткого картона при идентичных условиях на порядок превышает срок службы картона марки Б.

3.4.4. Исследование динамического старения картона с наложением электрического поля

Динамическое комплексное старение проводили с целью оперативной оценки работоспособности опытных образцов с учётом необходимости быстрого опробования различных прорабатываемых вариантов изготовления образцов особенно при использовании химических вспомогательных веществ (ХВВ), которые могут отрицательно повлиять на эксплуатационные свойства, главным образом срок службы картона при комплексном старении.

Методика динамического старения предполагает сравнение работоспособностей опытного картона и контрольного путём определения их температур пробоя в условиях воздействия электрического поля и повышающейся температуры в среде трансформаторного масла.

Из приведённых в табл. 3.13 данных видно, что в первой группе опытов (столбцы 1.1, 1.2) работоспособность опытного картона выше работоспособности контрольного, во второй группе опытов (столбцы 2.1, 2.2) работоспособности сравниваемых картонов одинаковы, в третьей группе опытов (столбцы 3.1, 3.2) работоспособность опытного картона также выше работоспособности контрольного. Полученные данные показывают чувствительность методики динамического старения к изменению качества картона. Из полученных данных следует, что примененные добавки ХВВ для повышения прочности картона во влажном состоянии при больших толщинах картона (6,0 мм) не приводят к снижению работоспособности жёсткого картона, а при малых толщинах (2,0 мм) даже повышают её. Данные о том, что работоспособность жёсткого картона без добавок превышает работоспособность картона марки Б дополняют результаты изотермического старения, приведённые в параграфах 3.4.1 и 3.4.3, в которых также показано, что срок службы жёсткого картона выше, чем картона марки Б.

Таблица 3.13

Данные по динамическому старению образцов картона

Наименование величины	Значение величины в группах опытов					
	I		2		3	
	I.1	I.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Температура пробоа в еди- ничном опыте номер I	210,0	225,0	215,5	208,0	205,0	216,0
2	209,0	230,0	210,0	209,0	207,0	212,5
3	216,0	221,0	221,0	211,0	206,0	216,0
4	216,0	228,0	214,0	211,0	209,0	210,0
5	212,5	225,0	212,0	210,0	-	209,0
Среднее значение температуры пробоа, °C	$\bar{t}=212,7$	$\bar{t}'=225,8$	$\bar{t}=212,5$	$\bar{t}'=209,8$	$\bar{t}=206,8$	$\bar{t}'=212,7$
Удвоенное стандартное отклонение температуры пробоа, $2 \cdot S $, °C	6,2		3,4		5,0	
Температурная разность, $ \Delta t $, °C	13,1		2,7		5,9	
Заключение о выполнении условия неравенства сравниваемых средних	$ \Delta t > 2 \cdot S $ - выполняется		$ \Delta t < 2 \cdot S $ - не выпол- няется		$ \Delta t > 2 \cdot S $ - выполняется	

Обозначения к табл. 3.13 : Группа опытов I - жёсткий картон толщиной 2,0 мм, испытательное напряже-
ние 25 кВ; I.1-контрольный, 100% сульфатной целлюлозы; I.2 -опытный, с добавкой в массу 0,65%
Na КМЦ и 0,9% закрепителя У-2.

Группа опытов 2 - жёсткий картон толщиной 6,0 мм, испытательное напряже-
ние 36 кВ; 2.1-контрольный, 100% сульфатной целлюлозы; 2.2-опытный с добавкой в массу 0,65%
Na КМЦ и 0,9% закрепителя У-2.

Группа опытов 3 - картон толщиной 2,0 мм, испытательное напряжение 25 кВ;
3.1 -контрольный, марки Б по ГОСТ 4194-88; 3.2 -опытный жёсткий картон.

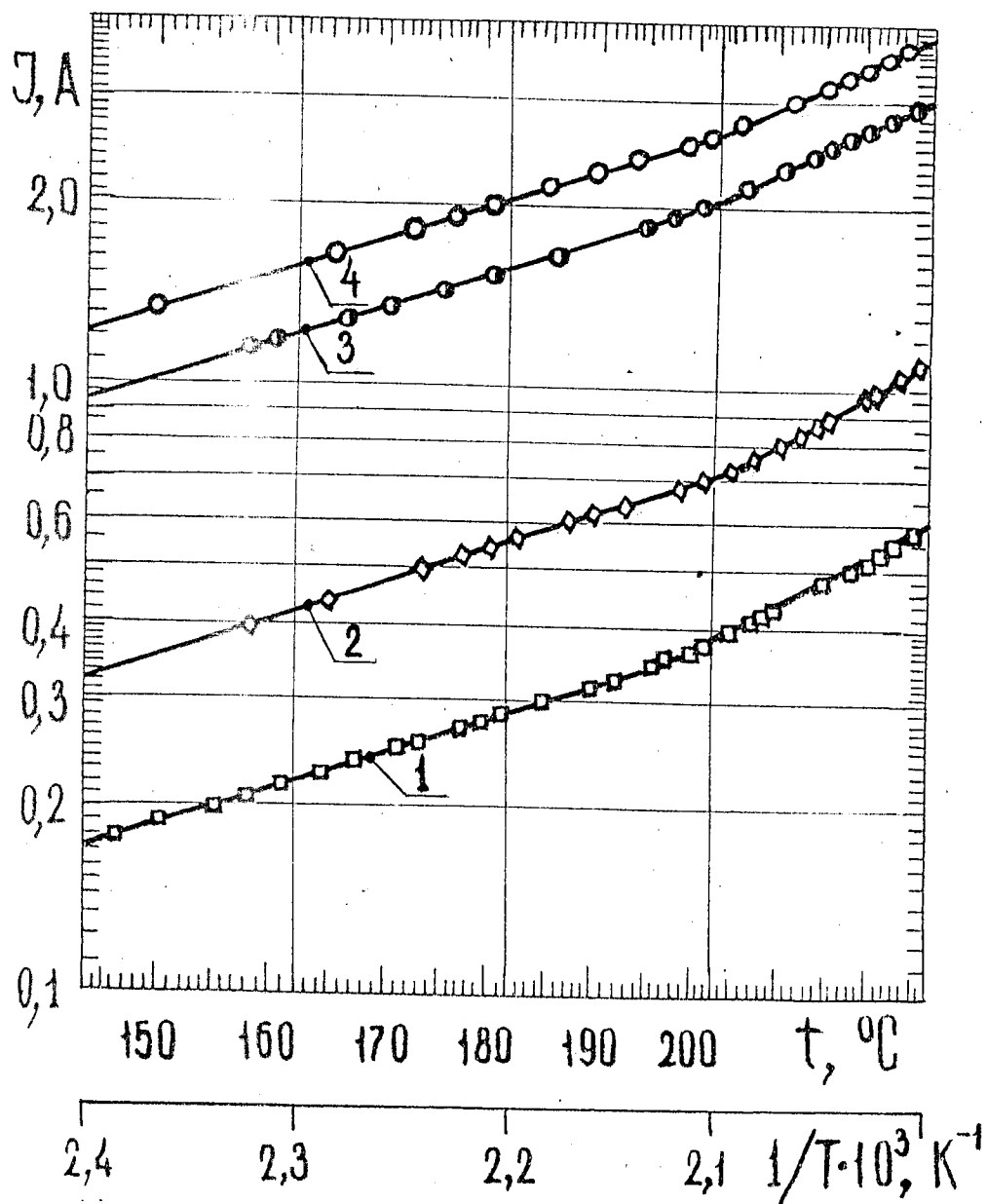


Рис. 3Г. Зависимость силы тока первичной обмотки трансформатора от температуры трансформаторного масла с испытательным образцом картона. 1, 2, 3, 4 — при испытательном напряжении 3, 6, 14, 20 кВ соответственно

При выполнении исследований с наложением электрического поля в глинах 3.4.2, 3.4.3, а также в настоящей главе 3.4.4, необходимо было определить насколько исследуемые процессы были термически равновесными, а с экспериментальной точки зрения следовало определить повышение температуры внутри картона под действием электрического поля. Это явилось определенной экспериментальной трудностью ввиду того что нельзя было использовать традиционные методы измерений, т.к. датчик должен находиться в электрическом поле и результаты измерений температуры будут искажены индукционным током. Провести оценку температуры внутри картона позволили выполнить измерения тока в первичной цепи высоковольтного испытательного трансформатора при различных напряженностях электрического поля и подъеме температуры. Результаты измерений приведены на рис. 31. Как видно из приведенных данных при повышении температуры возрастает ток первичной обмотки высоковольтного трансформатора. При этом повышение испытательного напряжения не приводит к увеличению наклона зависимости силы тока от температуры. Так как при испытаниях все прочие параметры высоковольтной установки оставались неизменными, рост электрического тока следует отнести только к повышению температуры картона. Следовательно, значения тока первичной обмотки высоковольтного испытательного трансформатора косвенно определяют температуру внутри картона. Если при фиксированной температуре на длительное время отключить высоковольтный испытательный трансформатор, а затем включить его, зарегистрировав ток сначала сразу же после включения напряжения, а затем после прекращения повышения тока, повышение тока будет свидетельствовать о повышении температуры внутри картона. Измерения показали, что повышение температуры внутри картона составило 2-3 °С. Это свидетельствует о том, что исследованные в гл. 3.4 процессы при воздействии комплекса факторов, одним из которых является электрическое поле, с учётом незначительности повышения

повышения температуры внутри картона, могут считаться термически равновесными.

ВЫВОД

Разработана методика ускоренной оценки работоспособности опытных образцов картона в сравнении с работоспособностью контрольных образцов путём определения их температур пробоя при динамическом старении с наложением электрического поля. Показано, что работоспособность образцов жёсткого картона с добавками ХВВ (в выбранных количествах) не ниже таковой для картона без добавок ХВВ не зависимо от толщины картона. Работоспособность жёсткого картона при комплексном старении выше, чем картона марки Б.

Исследованные в гл. 3.4 процессы при воздействии комплекса факторов, одним из которых является электрическое поле, следует считать термически равновесными.

3.5. Разработка технической документации на производство жёсткого картона. Режим совмещённого прессования и сушки картона в горячем прессе

Освоение производства жёсткого картона на Малинской бумажной фабрике [105] выполнено на основе постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 619 от 20.07.78 заявки 5-22 Минэлектротехпрома (приложение I), протокола № 33 от 15.10.81 и приказа № 109 от 5.03.84 Минлесбумпрома СССР.

На основании анализа априорной информации и проведённых экспериментальных исследований Марийским филиалом ВНИИ ВНИОбумпрома в 1982 году были разработаны исходные данные на проектирование производства жёсткого картона. На основе выданных Марийским филиалом исходных данных УкрГипробумом в 1982 г. разработан технический проект производства жёсткого картона на Малинской бумажной фабрике.

В 1984-1988 гг. Марийским филиалом ВНИИ разработаны технические условия и технологические регламенты на опытное и на серий-

ное производство. В мае 1988 года освоено производство жёсткого картона на Малинской бумажной фабрике.

3.5.1. Разработка исходных данных на проектирование и технологического регламента. Режим сушки картона

Согласованными исходными данными для проектирования производства жёсткого электроизоляционного картона предусмотрена целлюлоза на основе марки ЭК-2 по ГОСТ 12765-78 с повышенной разрывной длиной и химической чистотой с целью обеспечения высокой механической прочности и стойкости к испытательному напряжению. По сравнению с целлюлозой ЭК-2 в требованиях к целлюлозе для жёсткого картона предусматривается повышение разрывной длины на 500 м (с 9000 м до 9500 м) и уменьшение удельной электрической проводимости водной вытяжки при модуле 1:50 на 12 мкСм/см (с 37 мкСм/см до 25 мкСм/см). Величины остальных показателей качества целлюлозы соответствуют нормам, установленным для марки ЭК-2. В последующем ввиду повышения качества целлюлозы ЭК-2 при пересмотре ГОСТ 12765-78 в 1983 году при разработке технологического регламента на временное и серийное производство жёсткого картона предусмотрена целлюлоза марки ЭК-2 по ГОСТ 12765-83 производства завода "Питкяранта".

Предусмотренная технологическим регламентом технологическая схема производства включает в себя размольно-подготовительный отдел, картоноделательную машину, участок транспортировки и сушки картона в горячем прессе, а также участок резки на форматы, отбраковки и упаковки готового картона. Размольно-подготовительный отдел включает в себя потоки свежей массы и оборотного брака (сухого и мокрого) в виде обрезков кромок картона. В основном потоке целлюлозу последовательно подвергают роспуску, размолу, очистке и разбавлению в несколько ступеней. Формование картона осуществляют на двухцилиндровой картоноделательной машине с форматным валом. После фор-

Таблица 3.14

Температура перегретой воды на входе в плиты пресса

Температура обогрева плит пресса, °С, при изготовлении картона толщиной, мм:

1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0
130-135	130-135	135-140	135-140	145-150	145-150	145-150	145-150

Таблица 3.15

Режим прессования и сушки картона в горячем прессе *)

Толщина картона, мм	Продолжительность сушки картона, мин. сек, на ступени прессования номер												
	0	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,2		8	1,30	2	1,30	4	3						
1,6		11	1,40	2,50	1,40	5	5						
2,0		14	2	3	2	7	6						
2,5		16	3	4	3	10	9						
3,0		19	4	6	4	12	12						
4,0	6	26	6	7	6	7	6	7	18				
6,0	12	38	8	12	8	12	8	12	8	12	30		
8,0	17	83	10	19	10	19	10	19	10	19	10	19	40

*) Ступени 0 и I - подъём давления и начало сушки,

Давление на ступенях: 0 - 2,0 МПа; I, 3, 5, 7, 9, 11 - 4,0 МПа;

2, 4, 6, 8, 10, 12 - 0,4 МПа.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИ

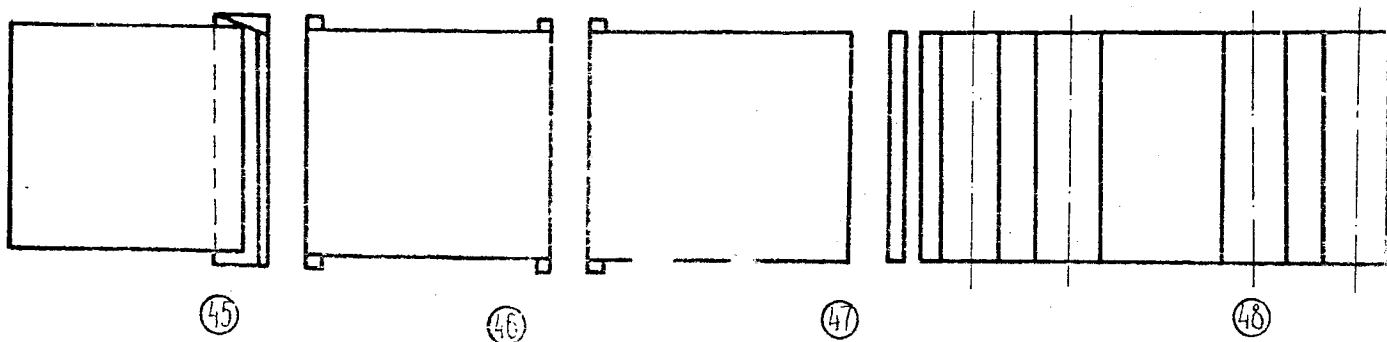
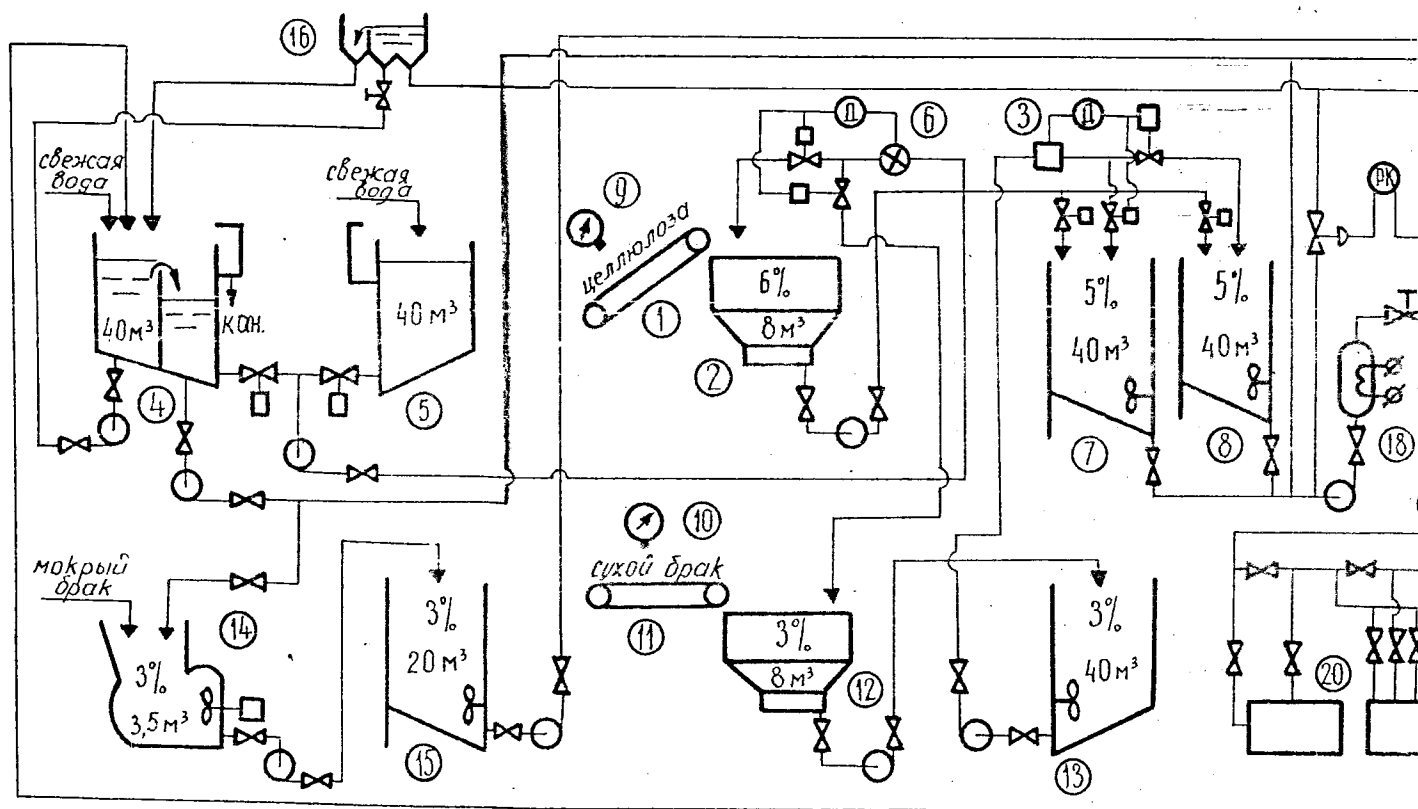
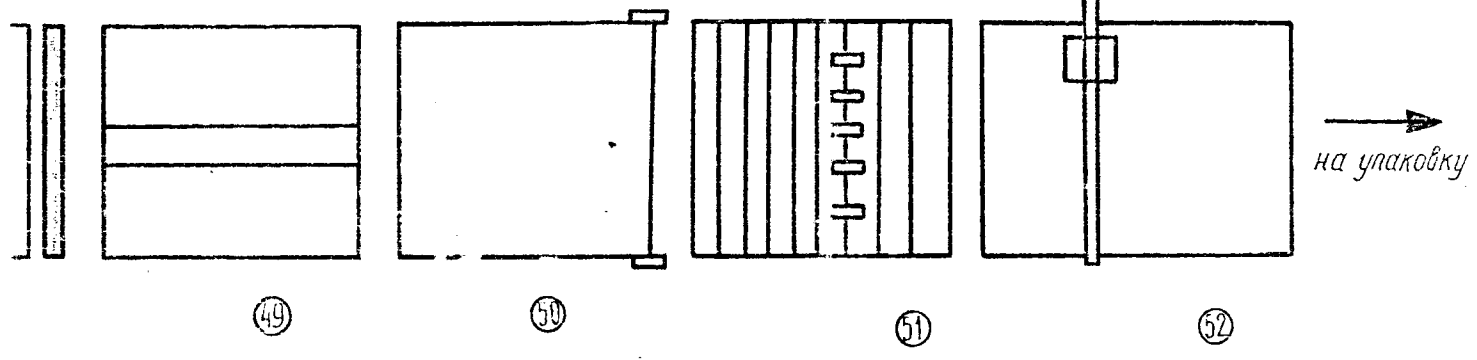
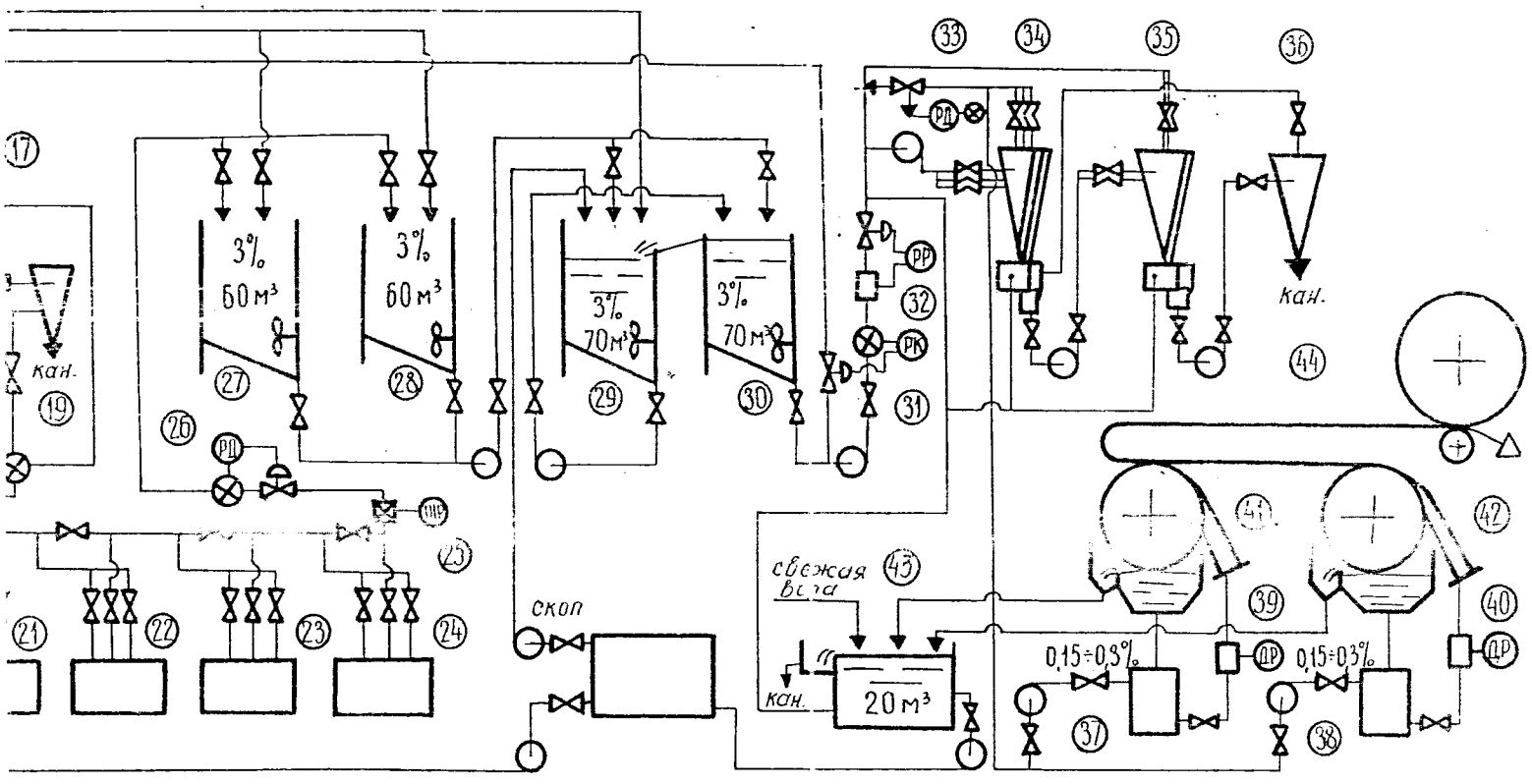


Рис.32. I, II - транспортеры; 9, 10 - весы; 2, 12, 14 - 3, 6, 39, 40 - дозаторы; 18 - магнитный сепаратор; 19 - регуляторы давления; 25 - прибор измерения степени п и расхода; 20 - энштиппер; 21-24 - двухдисковые раф 41, 42 - сеточные цилиндры; 44 - форматный вал; 45 - и разгрузочный лифты; 48 - горячий пресс; 49 - разгр устройство; 52 - форматно-делительная пила

ЗВОДСТВА ЖЕСТКОГО КАРТОНА



гидроразбиватели; 4,5,7,8,13,15,16,27,28,29,30,43 бассейны;
 вихревой очиститель; 17,31 - регуляторы концентрации; 26,33 -
 омола массы; 32 - регулятор расхода; 39,40 - регуляторы давления
 энергии; 34,35,36 - центрифуги; 37,38 - вертикальные сортировки;
 устройство обрезки кромок; 46 - транспортер; 47,50 - загрузочный
 узловая этажерка; 50 - разгрузочный лифт; 51 - толщиномерное

матного вала влажный картон подают в многополочный горячий пресс. Операция совмещённого прессования и сушки картона в горячем прессе является основной при производстве жёсткого картона. После прессования и сушки в горячем прессе картон охлаждают, отбраковывают при превышении допуска по толщине, режут на форматы и упаковывают. С целью защиты картона от осадков и атмосферной влаги при упаковке используют полиэтиленовую плёнку (см. рис. 32).

Основным процессом, определяющим качество готового жёсткого картона, является процесс совмещённого прессования и сушки в горячем прессе. Режим прессования и сушки, разработанный на основе экспериментальных исследований и включённый в технологический регламент на серийное производство, приведён в табл. 3.14–3.15. Как видно из таблицы, режимом предусмотрена ступень снижения давления прессования на последней стадии сушки, продолжительность которой увеличивается с увеличением толщины изготавливаемого картона. Это приводит к снижению продолжительности сушки или при той же продолжительности обеспечивает снижение температуры сушки. Для повышения эффективности режима сушки также предусмотрены ступени снижения давления прессования в середине цикла. Эта часть режима была разработана в развитие ступенчатого режима прессования при проведении промышленных опытов.

В процессе сушки картона в горячем прессе технологическим регламентом на серийное производство предусмотрено использование водоотводящих сеток № 24 и № 32, обеспечивающих изготовление картона повышенной плотности, повышенной механической и электрической прочности, а также малой сжимаемости и остаточной деформации.

ВЫВОД

В выданных проектной организации УкрГипробуму согласованных исходных данных на проектирование производства жёсткого картона, а также в утверждённом временном технологическом регламенте определены

требования к целлюлозе, производственной свежей и оборотной воде, а также основные параметры производства, включающие высокоэффективный режим ступенчатого прессования и сушки картона в горячем прессе.

3.5.2. Разработка технических условий на жёсткий картон.

Уровень качества жёсткого картона

Картон марки Д, соответствующий разработанным техническим условиям на серийное производство – ТУ 13-7308001-742-86, жёсткий с высокой плотностью, малой сжимаемостью и малой остаточной деформацией, высокой электрической и механической прочностью и высокой стойкостью к короблению. Картон предназначен для изготовления продольной, ярмовой и уравнивательной изоляции обмоток высоковольтных трансформаторов всех классов напряжений ЛЭП переменного и постоянного тока.

Таблица 3.16.

Объём производства картона различной толщины

Толщина картона, мм	Количество вырабатываемого картона, т/год		
	малого формата 3200 x 2100	Большого формата 3200 x 4200	Всего
1,2	156,7	313,3	470,0
1,6	366,7	733,3	1000,0
2,0	700,0	1400,0	2100,0
2,5	33,4	60,6	100,0
3,0	16,7	33,3	50,0
4,0	16,7	33,3	50,0
6,0	56,7	133,3	170,0
8,0	70,0	140,0	210,0
Итого:	1416,9	2833,1	4250,0

Таблица 3.17

Сравнение качества жёсткого картона по ТУ 13-7308001-74286 с зарубежными аналогами (по топовому представителю-картону толщиной 2,0 мм)

Наименование показателя и единица измерения	Значение показателя картона, изготовляемого по:				
	ТУ 13-7308001-742-86, марка Д, Малинская фабрика	NFC 26-130 тип Е, Франция	СТ МЭК 641-3, тип В.З.1 (проект)	DIN 7733 Psp 3052, ФРГ	BS 231-75 тип Д, Великобритания
Толщина, мм	2,00±0,10	2,00±0,10	2,00±0,10	2,00±0,10	2,00±0,10
Плотность, г/см ³	1,20-1,35	1,20-1,35	1,10-1,25	1,15-1,30	1,10-1,30
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее:					
-в машинном направлении	120	130	105	100	69
-в поперечном направлении	90	90	80	70	34,5
Впитываемость масла, %, не менее	8	8	9	-	15
Массовая доля золы, %, не более	0,7	0,8	1,0	2	2
Линейная деформация, %, не более, в направлении:					
-машинном	0,5	0,5	0,5	1,2	1,0
-поперечном	0,7	0,7	0,7	-	1,5
-по толщине	4,0	4,0	5,0	6,0	6,0
Сжимаемость на воздухе под давлением 20 МПа, %, не более	5,5	6,0	7,5	-	-
Испытательное напряжение, кВ, не менее	53	51	-	-	34
или электрическая прочность, кВ/мм, не менее	-	-	11	12	-
Влажность, %, не более	7,0	7,0	6,0	8,0	7,5

По согласованию с заказчиком картон вырабатывается в листах форматом, мм: 3200 x 6300, 3200 x 4200, 3200 x 2100, следующих толщин, мм: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0.

Согласованные с заказчиком количества вырабатываемого картона в зависимости от его толщины приведены в таблице 3.16.

Жёсткий картон, производство которого освоено на Малинской бумажной фабрике, по уровню качества (табл.3.17) соответствует лучшим мировым образцам: марке Psp 3052 по DIN 7733 (ФРГ), марке Д по BS 231-75 (Великобритания) марке Е по NFC26-130 (Франция). Картон аттестован на государственный знак качества.

ВЫВОД

Технические условия ТУ 13-7308001-742-86 на картон электроизоляционный марки Д (жёсткий) разработаны в соответствии с заявкой 5-22 Минэлектротехпрома. Качество разработанного вновь картона соответствует мировому уровню.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Раскрыто влияние давления на процесс прессования электроизоляционного картона при сжатии по толщине с обеспечением сомкнутости его структуры применительно к условиям производства.

2. На основании исследования различных способов интенсификации процесса совмещённого прессования и сушки картона в горячем прессе обоснован ступенчатый режим прессования и сушки. Получено математическое выражение для параметров влагосодержания (W) и продолжительности сушки (τ) картона различной толщины (d): $W = a \cdot \tau^b \cdot d^c$ где a, b, c - коэффициенты, зависящие от параметров режима изготовления картона.

3. Предложен способ сушки картона путём применения мелкоячеистых водоотводящих сеток, обеспечивающий повышение плотности картона толщиной 1,2 - 2,0 мм с 1,12 - 1,20 г/см³ до 1,18 - 1,25 г/см³.

4. Предложена методика определения срока службы картона и температурных индексов с применением метода электронного парамагнитного резонанса. Определен температурный индекс жёсткого картона, соответствующий 20 000 ч, который выше, чем температурный индекс базового картона (113 и 105 °С соответственно).

5. Получено экспериментальное подтверждение возможности использования уравнения, аналогичного уравнению Журкова, для описания процесса старения электроизоляционного картона при воздействии температуры и электрического поля. Расчетный срок службы жёсткого картона при старении с наложением электрического поля на порядок выше, чем срок службы базового картона.

6. Разработана промышленная технология совмещённого прессования и сушки для производства жёсткого электроизоляционного картона и нормативно-техническая документация на серийное производ-

ство картона толщиной 1,2 - 8,0 мм.

7. Технологией совмещённого прессования и сушки предусмотрен ступенчатый режим прессования со снижением давления на последней стадии. Для горячего пресса используются мелкоячеистые водоотводящие сетки № 24 - 32 при производстве картона толщиной 1,2 - 3,0 мм.

8. Выпуск картона проектной мощностью 4250 т в год по разработанной технологии освоен на Малинской бумажной фабрике. По уровню качества картон соответствует лучшим мировым аналогам.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 г.-М.: Политиздат, 1986,-95 с.
2. Мозер Х.П. Применение стабилизированного, полученного горячим прессованием, трансформерборда в мощных трансформаторах.-Всемирный электротехнический конгресс, М., 21-25 июня 1977,-79с.
3. Корицкий Ю.В. Основы физики диэлектриков.- М.: Энергия, 1979,-224с.
4. Корицкий Ю.В. и др. Целлюлозные материалы для трансформаторостроения.-электротехника, № 10, 1977,-с.20-23.
5. Жиляев Т.Б., Соколова Л.И. Современное состояние и требования трансформаторостроения к целлюлозным материалам. В кн.: Современные направления в развитии технологии производства и повышения качества электроизоляционных и фильтрующих материалов на целлюлозной основе: Мат-лы всесоюзн.научн.-технич.конф., Марийский филиал ВНИИВ ВНИОбумпрома, 1986,-с.83-84.
6. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т., Т.1 /Под ред. Корицкого Ю.В. и др., 3-е изд., перераб.-М. Энергоатомиздат, 1986,-368 с.
7. Публикация 64Г, чч. 1,2 и 3. Технические требования к электрокартону листовому и рулонному.-МЭК, 1979-1985.-57с.
8. ГОСТ 4194-83. Картон электроизоляционный для трансформаторов и аппаратов с масляным заполнением. Технические условия.-М.: Изд.стандартов, 1984,-7с.
9. Белецкий З.М. и др. Выбор продольной изоляции трансформаторов серии.-Электротехническая промышленность. Сер.Апп.выс. напр. трансф.сил.конд., 1977, вып.3 (71),-с.9-11.

10. Наибольшее напряжение электропередачи в Англии (Источник: Electrical Times, 1975, № 4, т.322 р.6/-Электротезнич. пром-сть. Сер.Апп.выс. напр., трансф.,сил.,конд., 1976, вып.2 (58),-с.28.

11. Ершевич В.В. О новой ступени напряжения электротехнических сетей переменного тока.- Электричество, 1985, № I,-с.1-6.

12.Сорока В.И. и др. Исследование вибрации силовых трансформаторов в условиях эксплуатации.-Электротех.пром-сть. Сер. Апп. выс. напр., трансф., сил.конд., 1977, вып.1 (69),-с.17-22.

13. Лазарев В.Н., Руцак В.Е. Радиальная устойчивость сжимаемых обмоток трансформаторов при динамическом нагружении.- Электротехника, 1981, № 9,-с.6-10.

14. Исследование эксплуатационных токов короткого замыкания силовых трансформаторов 110 кВ. Дискуссия.- Электротехника, 1977, № 4,-с. 39-42.

15. Линова Л.С. и др. Исследование реологических свойств электроизоляционного картона.-Электротехн. пром-сть. Сер.электротехн. мат-лы, 1981, вып. 10 (135),-с.22-25.

16. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло.-М.: Энергия, 1968,-352 с.

17. Леонович А.А., Оболенская А.В. Химия древесины и полимеров. Учебник для техникумов.-М.: Лесная пром-сть, 1988,-152 с.

18. Фляте Д.М., Грунин Ю.Б. Применение метода ядерной магнитной релаксации для определения удельной поверхности целлюлозы. Химия и технология бумаги, вып.2 (сб.межвуз.науч.трудов)- Л.: ЛТИ ЦВН. 1974,-с.9-12.

19. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968, -472с.
20. Кленкова Н.И. Структура и реакционная способность целлюлозы. - Л.: Наука, 1976, -367 с.
21. Папков С.П., Файнберг Э.З. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой. - М.: Химия, 1976- 232с.
22. Файнберг Э.З. и др. К термодинамике процесса гидратации целлюлозы. - Высокомолекулярные соединения, 1979, т.21, Б12, -с.898-901.
23. Сырников Ю.П. Взаимодействие воды с целлюлозой (молекулярные аспекты и проблемы), обзор. - Химия древесины. 1988, № 4, -с. 3-9.
24. Рябков А.В., Грунин Ю.Б. Изучение молекулярной подвижности системы целлюлоза-вода. - Химия древесины, 1975, № 6, -с.10-12.
25. Фляте Д.М. Свойства бумаги. - М.: Лесная пром-сть, 1976, -648с.
26. Иванов С.Н. Технология бумаги. - М.: Лесная пром-сть, 1970, - 696с.
27. Кириленко Т.М. Изменение структуры электроизоляционного картона в процессе сушки до абсолютно сухого состояния. - В сб. Химия и технология бумаги, вып. I, Ленинград.ун-т, 1973, -с.42-47.
28. Казанский М.Ф. и др. Влияние влаги разных форм связи в вискозных нитях на кинетику деформации их при сушке. - Инж.-физ. журн., 1976, т. XXXI, -с.646-650.
29. Файнберг Э.З., Прохоров А.В., Сергеева В.Н. К термодинамике процесса гидратации целлюлозы. - Высокомолекулярные соединения. Краткие сообщения. 1979, т. XXII, № 12, -с.898-901.
30. Грунин Ю.Б. Исследование взаимодействия связанной воды с волокнами целлюлозы. - Диссертация на соискание учёной степени канд.техн.наук. - Л.: ЛТА им. С.М.Кирова, 1974, -150с.

31. Рябков А.В. Усадочное напряжение высыхающего листового картона.-Химическая переработка древесины , 1966, № 7,-с.6-8.
32. Рябков А.В., Тольский Г.А. Усадка электроизоляционного картона при сушке.- бумажная пром-сть, 1972, № I,-с.12-13.
33. Карпов А.В., Бабурин С.В. К вопросу усадки бумажного полотна в процессе сушки.- В кн.: Исследования в области технологии бумаги, М.: Сборник трудов ЦНИИБ, 1980,-с.93-100.
34. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твёрдых тел и адсорбция.- М.: Наука, 1976,-400с.
35. Чижов Г.И. Влияние солей алюминия на прочностные свойства бумаги.- Диссертация на соискание учёной степени канд.техн. наук.-Л.: ЛТА им. С.М.Кирова, 1971,- 145с.
36. Пузырев С.С. Влияние природы волокнистого материала на проклейку бумаги.-Диссертация на соиск. уч.степени канд.техн. наук.-Л.: ЛТА им.С.М.Кирова, 1971, -133с.
37. Вайсман Л.М. Конденсаторная бумага.-М.: Лесная пром-сть, 1985,-135с.
38. Стрельцова А.П. Исследование факторов, влияющих на основные свойства нового вида электроизоляционного трансформаторного картона и разработка режимов его изготовления.- Диссертация на соиск. уч.степени канд.техн.наук.-Л.: ЛТА им.С.М.Кирова, 1974,-147с.
39. Кириленко Т.М. Исследование причин усадки картона и способов её устранения.-Автореф. диссертации на соиск.уч.степени канд. техн.наук.-Л.:ЛТА им.С.М. Кирова, 1970,-16 с.
40. Крафт Г.Э., Тольский Г.А. Механическая прочность многослойного картона.-Химическая переработка древесины, 1966, № II,-с. 4-5.

41. Богомол Г.М. Формование многослойного картона.—М.: Лесная пром-сть, 1982, —264с.
42. Крафт Г.Э., Тольский Г.А. От чего зависит прочность соединения элементарных слоёв многослойного картона.—Бумажная промышленность, 1966, № 10, —с.7-8.
43. Орехов Б.В. Разработка методов улучшения качества электроизоляционного картона и исследование его свойств. Диссертация на соиск. уч.степени канд. техн.наук.—Минск, БТИ им.С.М.Кирова, 1975,—с.164.
44. Жвирблите А.—Б.К. Исследование упругопластических свойств электроизоляционного картона в зависимости от условий сушки.—Диссертация на соиск. уч.степени канд.техн.наук.—Л.:—ЛТА им. С.М.Кирова.
45. Тольский Г.А. Теоретические основы процесса отлива картона на многоцилиндровой машине.— Автореф. диссертации на соиск.уч. степени доктора техн.наук, — Л.: ЛТА им.С.М.Кирова, 1972.
46. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона — М.: Лесная пром-сть, 1984,—120с.
47. Clark I.d'A. New thoughts on cellulose bonding. — TAPPI J. 1984, v.67, N 12,—p.82-83.
48. Малев О.А. и др. Способ изготовления электроизоляционного картона из сульфатной целлюлозы.— Авт.св. СССР, кл. 55b I/OI, 2IC, 2/20 (Д2IC, но1b), № 2I4304, заявл. 7.10.66., опубл.6.05.68.
49. Оржуховская Р.Е. и др. Способ изготовления картона.— Авт.св. СССР, кл. 55C, 3/10 (Д2IN), № 205547, заявл. 20.01,66., опубл. 8.01.68.
50. Горский Г.М. и др. Волокнистая масса для производства электроизоляционного картона для аппаратов с масляным заполнени-

ем.- Авт.св. СССР, кл. D21h 5/00, но1в 3/52, № 433264, заявл. 24.03.72, опубл. 15.II.74.

51. Юрченко Г.И., Оржуховская Р.Е. Волокнистая масса для электроизоляционного материала.- Авт. св. СССР, кл D21h 5/I2, № 40380I, заявл. 29.II.7I., опубл. 14.03.74.

52. Горский Г.М. и др. Волокнистая масса для изготовления электроизоляционного картона.- Авт.св. СССР, кл. D21h 5/I4, № 3343I7, заявл. 2I.I2.70., опубл. 27.04.72.

53. Стрельцова А.П., Тольский Г.А. Влияние условий прессования на свойства электроизоляционного картона.- Бумажная пром-сть, 1972, № 6,-с.7-9.

54. Стрельцова А.П. и др. Способ изготовления электроизоляционного картона.- Авт.св. СССР, кл. D21h 5/00, № 354047, заявл. 28.I2.70., опубл. 17.II.72.

55. Кириленко Т.М., Тольский Г.А. Снижение пластических деформации электроизоляционного картона при сжатии.- Целлюлоза, бумага и картон, 1975, № 33,-с.II.

56. Швирблите А.К. Изменение жёсткости картона при сушке в прессе.-Бумажная пром-сть, 1983, № 4,-с.I9-20.

57. Стрельцова А.П. и др. Электрическая прочность трансформаторного картона.- Электричество, 1970, № 3,-с.75-76.

58. Леонтьев Н.Л., Орехов Б.В., Горский Г.М. Влияние совмещения процессов прессования и сушки на свойства электроизоляционного картона.-Целлюлоза, бумага и картон, 1972, № I,-с.5-7.

59. Merke U. Verfahren zur Herstellung eines flächigen Faserliefes mit hoher Steifigkeit.
-Патент ГДР, кл. 55C, 3/10 (D21h 3/44), № 98326, заявл.II.07.72., опубл. 12.06.73.

60. Каресио Дж.С. Способ получения твёрдого картона.-Пат. США, кл. D21j, I/06, № 3793I39, заявл. 14.04.7I., опубл.19.02.74.

61. Фирма Беккер и ван Хюлен. Способ получения волокнистых плит по мокрому методу в горячем прессе.- Пат.ФРГ, кл. I/I6, № 2455818, заявл. 26.II.74., опубл. 12.08.76.

62. Матаки Ё. Фундаментальные исследования механизма горячего прессования целлюлозных листов при изготовлении волокнистых плит /Перевод с японского (ВЦП Ц № 6305).- Кюсю дайгану когакубу энсюрип хококу, 1971, № 44,-с.1-97.

63. Матаки Ё., Ота М. Изучение механизма превращения в плите в процессе горячего прессования. Влияние условий горячего прессования на структуру плиты /Перевод с японского.- Мокутзай гаккайси, 1967, № 8,-с.188-193.

64. Green U. Compressibility and permeability of cellulose fibres. - Svensk Papperstidning, 1972, v.75, N9, - p.785-793.

65. Hartler N., Nyren J. Transverse compressibility of pulp fibres. II. Influence of cooking, method, yield, beating and drying. - TAPPI, 1970, v.53, N5, - p.820-823.

66. Nyren J. The transverse compressibility of pulp fibers.- Pulp and Paper Mag.Can., 1971, v.72, N10, - p.81-83.

67. Andersson H., Waterlind B., Hollmark H. Elastic behaviour of low density paper described by network mechanics.- Fibre Sci. and Technol., 1983, v.19, N 2, - p.127-144.

68. Carlsson G., Lindström T., Söremark C. Expression of water from cellulosic fibres under compressive loading. Fibre - Water Interaction in Paper-Making, Symposium. - Oxford: 1977, Proceedings, - 389-402.

69. Исаева Л.М., Половинкин В.А. Исследование деформационных свойств листовых материалов на целлюлозной основе при сжатии.- В кн.: Исследования в области технологии бумаги (Сб. трудов ЦНИИБ), М.: ЦНИИБ, 1980,-с.75-81
70. Bartenev G.M. Viscous Flow and Structure of Linear Polymers. - Journ. Pol. Sci., 1970, v.8, N12,-p.3417-3427.
71. Фенгел Д., Вегнер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). Пер. с англ. под ред. д.т.н., проф. Леоновича А.А.-М.: Лесная пром-сть, 1988,-512 с.
72. Леонович А.А., Галкина Л.А., Шашилов А.А. О подвижности кристаллитов целлюлозы.- Химия древесины, 1986, № 5,-с.3-5.
73. Романов В.А., Ерохина О.А., Романова Т.И., Аким Э.Л. Температурно-влажностные границы релаксационных состояний бумагообразующих полимеров.- Химия древесины, 1990, № 4,-с.32-37
74. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел.- Известия АН СССР, 1967, т.3, № 10,-с.1767-1777.
75. Производство электроизоляционного и гофрированного картона за рубежом. Экспресс-информация по зарубежным источникам.-М.: ВНИИЭИлеспром, 1980,-с.1-20.
76. Рябков А.В., Тольский Г.А. Режим сушки и диэлектрические свойства электроизоляционного картона.-Бумажная пром-сть, 1972, № 3,-с.13-15.
77. Плановский А.Н. и др. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности.-М.: Химия, 1979,- 287с.
78. Бельский А.П. и др. Влияние температурного режима контактной сушки на качественные показатели картона.-Бумажная пром-сть, 1981, № 7,-25-30.

79. Минаковский В.М. Диэлектрический нагрев-способ интенсификации контактно-конвективной сушки картона и бумаги.-Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.- Киев, Киевский политехнический институт, 1975,-271с.

80. Эмануэль Н.М. Некоторые проблемы химической физики старения и стабилизации полимеров.- Успехи химии, 1979, вып.12,-с. 2113-2163.

81. Калугин Е.Н., Завьялов А.Н. Карбонизация древесной целлюлозы и свойства карбонизатов. III Исследование карбонизатов с помощью ЭПР.- Химия древесины, 1977, № 5,-с 24-29.

82. Arthur I., Hinojosa O. Oxidative resequencing of cellulose initiated by free radicals. - J.Pol.Sci., 1971, N36,p.53-71.

83. Стандарт МЭК. Публикация 216-2. Руководство по определению нагревостойкости электроизоляционных материалов. Части I и 2.-МЭК, Второе издание, 1974,-39с.

84. Simoni L. A General Approach to Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage. - IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, v.16, N4,-p.277-289.

85. Setbak I., Reed C.W., Hirabayski S. Multistress behaviour of insulating materials and insulations structures. Paper presented in name of Study Committee N 15(insulating materials).- Paris: CIGRE Int. Conf. Large High Voltage Elec. Syst.,1984,9p.

86. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Курс физики полимеров.-Л.: Химия, 1976,-288с.

87. Рахимов Р.З., Муртазин Н.З., Зарипов А.А. и др. Стенд для исследования ползучести жёстких пластмасс при сжатии в агрессивных средах.- Заводская лаборатория, 1974, т.40, № 8,-с.1026-1028.

88. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.-М.: Наука, 1976,-280с.
89. Пшежецкий С.Я. и др. ЭПР свободных радикалов в радиационной химии.-М.: Химия, 1972,-480 с.
90. Пилюян Г.О.,Новикова О.С. Термографический и термогравиметрический методы определения энергии активации процессов диссоциации.-Журн.неорг.химии, 1967, т.12, вып.3.-с.602-604.
91. Рябков А.В., Борисов Ю.А. и др. Некоторые закономерности деформации сжатия электроизоляционного картона.-Электротехническая пром-сть. Сер.Электротехнические материалы, 1978, вып. 9 (88),-с.8-9.
92. Рябков А.В., Борисов Ю.А. Снижение сжимаемости и остаточной деформации электроизоляционного картона.при его уплотнении в горячем прессе. В кн.: Современные направления в развитии технологии производства и повышения качества электроизоляционных и фильтровальных материалов на целлюлозной основе: Материалы все-союзн.научн.-техн.конф., Волжск, Марийский филиал ВНИИБ ВПОбумпрома, 1981,-с.69-72.
93. Леонович А.А. Теория и практика изготовления огнезащитных древесных плит.-Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1978,-176с.
94. Рябков А.В., Борисов Ю.А., Эйн Ю.Н., Адамович Н.Н. Микроскопические исследования процесса прессования и сушки картона в горячем прессе. В кн.: Состояние и перспективы развития технологии и оборудования целлюлозно-бумажной промышленности. Материалы всесоюзн.научно-техн. конф., Л.: ЛТИ ЦБП, 1982,-с.128-129.
95. Борисов Ю.А., Бутакова Л.Н. Изучение процесса совмещённого прессования и сушки электроизоляционного картона с использованием высокочастотного нагрева. В кн.: Современные направления в развитии технологии производства и повышения качества электро-

изоляционных и фильтрующих материалов на целлюлозной основе: Тез. докл. научно-техн. конф., Волжск, Марийский филиал ВНИИБ ВПОбумпрома, 1976, с.79.

96. Рябков А.В., Борисов Ю.А. Вакуумная сушка электроизоляционного картона. В кн.: Современные направления в развитии технологии производства и повышения качества электроизоляционных и фильтровальных материалов на целлюлозной основе: Материалы всесоюзной научно-технической конференции, Волжск, Марийский филиал ВНИИБ ВПОбумпрома, 1981, с.75-76.

97. Ильин Н.П., Иванов М.А. О природе парамагнитных центров в древесине и лигнине. - В кн.: Исследования в области химии и физики древесины и целлюлозы. (Сб. трудов ВНИИБ, вып.65). Л.: Лесная пром-сть, 1975, с. 23-27.

98. Эттингер Н.Л., Ковалева И.Б. Напряжение набухания и свободная энергия в системе газ-уголь. - Доклады Академии наук СССР, 1979, т. 244, № 3, с. 659-663.

99. Авторское свидетельство № 1444450, кл. Д21Н, 5/00. Способ изготовления электроизоляционного картона. Авторы: Борисов Ю.А., Рябков А.В., Приходько Ю.Н., Енько В.Н.

100. Рябков А.В., Борисов Ю.А., Богданов А.С. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для оценки срока службы целлюлозных материалов. - Электротехническая пром-сть, сер. Электротехнические материалы, 1981, вып.5 (130), с.1-3.

101. Инграм Д. Электронный парамагнитный резонанс в свободных радикалах. /Перевод с английского - М.: Издательство иностранной литературы, 1961, -345 с.

102. Жбанков Р.Г., Козлов П.В. Физика целлюлозы и её производных. - Минск: Наука и техника, 1983, -296с.

103. Борисов Ю.А. Исследовать изменение свойств электроизоляционного картона при совместном воздействии электрического поля и температуры. Отчёт № 0-1981 по теме 27-84, р. 15-4.2.М.-Волжск, 1985, -78с.

104. Керимов М.К. Электрический триинг и долговечность полимерных диэлектриков. Тезисы докл. УІ всесоюзной конф. по физике жиэлектриков, 23-25 ноября 1988г.- Томск, Томский политехнический институт, 1988, -с.24-25.

105. Рябков А.В., Борисов Ю.А., Разумов А.Н. Производство жёсткого электрокартона. Технология и свойства. Повышение нагревостойкости бумаги и картона для трансформаторов с целлюлозно-масляной изоляцией: Тезисы докл. УІІ всесоюзной научно-технической конференции по трансформаторостроению.-Запорожье, ВИТ, 1985, -с.8-9.

5. ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I.

Копия

Министерство электротехнической промышленности

Согласовано

Зам. начальника Технического
управления
Минэлектротехпрома

В. П. Кочетков

" " УШ 1980г.

Утверждаю

Начальник ВПО
"Союзтрансформатор"

А. Е. Сочилин

" " 1980г.

З А Я В К А 5-22 (уточненная)
на разработку и освоение продукции
Картон трансформаторный жёсткий

1. Наименование темы: Разработка жёсткого электрокартона для деталей продольной (дистанционные прокладки), ярмовой и уравнивательной изоляции.
 2. Цель и назначение работы: Жёсткий картон будет применяться в силовых трансформаторах для обеспечения их динамической прочности.
 3. Предполагаемый разработчик: Минбумпром, Марфилиал ВНИОбумпрома, Серпуховская бумажная фабрика.
 4. Ориентировочная потребность в заказываемой продукции с начала промышленного производства - 3500 т в год.
 5. Лимитная цена заказываемой продукции в руб. - не более 635 руб. за 1 т.
 6. Срок выполнения заявки (год, квартал): IV 1983 г.
- Источник финансирования - Минэлектротехпром.

Зам. директора ВПО О. В. Карпенко

Копия верна:

Учёный секретарь
марфилиала ВНИИБ, к. х. н. И. В. Баутина

ИСХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ЗАКАЗЧИКА К ЖЁСТКОМУ ЭЛЕКТРОКАРТОНУ

1. Назначение и область применения продукции

Электрокартон предназначен для изготовления продольной, ярмовой и уравнительной изоляции обмоток трансформаторов всех классов напряжения переменного и постоянного тока.

2. Техничко-экономическое обоснование целесообразности разработки новой продукции (аналогичные изделия, тип, форма, параметры и т.д.).

Применяемый в настоящее время для изготовления продольной, ярмовой и уравнительной изоляции обмоток электрокартон марки Б ГОСТ 4194-78 имеет плотность 1,0-1,1 г/см³, сжимаемость под давлением 200 кг/см² - 15-18 %, остаточные деформации после снятия давления - до 10 %.

Применение такого картона не обеспечивает необходимую электродинамическую прочность высоковольтных трансформаторов, поэтому при изготовлении трансформаторов вводится ряд дополнительных технологических операций, имеющих целью уплотнение электрокартона и получение стабильных размеров обмоток: циклическая опрессовка обмоток, двойная сушка обмоток и активных частей.

Эти операции существенно усложняют и удорожают процесс изготовления трансформаторов.

Кроме этого, этими операциями не достигается полная стабилизация электрокартона. В процессе эксплуатации происходит усадка электрокартона, вследствие чего снижается усилие запрессовки и электродинамическая устойчивость обмоток.

Обеспечение необходимой эксплуатационной надёжности трансформаторов может быть достигнуто применением для продольной изоляции обмоток жёсткого картона плотностью 1,25-1,3 г/см³, сжимаемостью

при удельном давлении 200 кг/см^2 - 5 %, имеющего малые остаточные деформации после снятия давления. Таким качеством обладает картон тип IV, выпускаемый фирмой "Вайцман" Швейцария, марка жёсткий фирмой "Уайтли" Англия.

Наряду с обеспечением требуемой электродинамической устойчивости трансформаторов, применение жёсткого картона позволит отменить на заводах-изготовителях вторичную сушку обмоток, операции по дополнительной обработке картона, применяемых для стабилизации обмоток.

Экономический эффект от применения 3000 т жёсткого картона составляет 489000 рублей.

3. Параметры и характеристики продукции:

а) требуется (письмо № I4/7-10 от 28.08.80 Минэлектротехпрома)

б) имеется марка Б
ГОСТ 4194-78

1. Формат листа, мм (второй размер соответствует машинному направлению)	3000 x 4000 3000 x 2000	3000 x 400 3000 x 2000
2. Толщина, мм	-1,2-1,6-2,0- -2,4-3,0 4,0- -5,0-6,0-7,0- -8,0	-1,5-2,0-2,5- -3,0-4,0-5,0- -6,0
3. Допуск по толщине, % среднее значение для всех толщин - 5 % в том числе: (1,0-1,2) = ± 10 % (1,6-2,0-2,4-3,0-4,0-5,0-6,0) = ± 7,5 % (7,0-8,0) = ± 5 %	мм	%
	1,0	± 10
	1,5	± 6,6
		- 10
	2,0	+ 10
	2,5	- 7,5
		± 8
	3,0	± 6,6
4. Плотность, г/см^3 для толщин		
от 1,0 до 1,6 вкл	1,00-1,20	1,0 1,5 0,95 - 1,10
от 2,0 до 8,0 вкл.	1,20-1,35	1,5 1,00 - 1,15
5. Предел прочности при растяжении, МПа (кгс/мм^2), не менее		

в продольном направлении				
для толщины	1,0 - 2,0 мм	110 (II)	-	
	2,0 - 8,0	120 (I2)	-	
в поперечном направлении				
для толщины	1,0 - 2,0	80 (8)	49,5	
	2,0 - 8,0	90 (9)		
6.	Впитываемость масла, % не менее	8	10	
7.	Массовая доля золы, % не более	0,7	0,7	
8.	Линейная деформация, % не более			не воз- ражаю снять
	средняя в продольном и поперечном направлениях	0,6	0,8	
	по толщине	4,0	1,1	формат 6000 x 4000 и
	(при пересчёте на 7 % влажность)		5,0	примеча- ние по этому вопросу (подпись нач.отд. тов.Рыко- ва Г.А. от 28.08. 80 г)
9.	Сжимаемость на воздухе под давлением 19,6 МПа (200 кгс/см ²) (при влажности 6 %) после 10 мин. давления, % не более			Изменение внесено 07.08.80 нач.отд. ТУ
	для толщины	1,0-2,0	6,0	
		2,0-8,0	5,0	18 - 10
10.	Стойкость к воздействию поверхностных разрядов, мин. минимум	8		10
11.	Стойкость к воздействию испытательного напря- жения перпендикулярно поверхности, кВ, не менее			
	Для толщины	1,0 мм	35	31
		1,2	40	-
		1,5	-	43
		1,6	45	-
		2,0	55	53

	2,0	62	60
	3,0	70	65
12. Влажность, % не более	7,0	7,0	10-8,5

х) Примечание. Формат 6000 x 4000 введён по предложению Марфилиала ВНИИБ ВНИОбумпрома.

4. Условия эксплуатации (применение продукции)

Жёсткий картон будет работать в качестве продольной изоляции и обеспечит надёжность работы трансформатора при коротких замыканиях в энергосистемах, повысит уровень электродинамической прочности.

5. Расчёт лимитной цены с указанием эффективности в сфере потребления на единицу продукции

Лимитная цена не должна превышать 635 руб. за одну тонну.

При условии увеличения стоимости картона на 105 руб. по сравнению с существующей ценой для марки Б - 530 руб. за одну тонну, годовой экономический эффект от применения жёсткого электрокартона составит 570000 рублей.

Годовая потребность жёсткого картона составляет:

1983г.	1985г.	1990г.
3500 т	5000 т	7500 т

Технические требования на жёсткий картон были рассмотрены с Марфилиалом ВНИИБ 30.07.80 и согласованы по всем пунктам кроме п.3 (допуск по толщине) и п.4 (плотность для толщины до 1,6 мм включительно) по которым имеются разногласия (см.таблицу).

наименование показателя	Величина показателя по заявке	Величина показателя по предложению Марфилиала	
1. Допуск по толщине, % для всех толщин	± 5	1,0 мм	± 10
		1,2	± 8
		1,6	$\pm 7,5$
		2,0	$\pm 7,5$
		2,4	$\pm 7,0$
		3,0	$\pm 7,0$
		4,0	$\pm 7,0$
		5,0	$\pm 7,0$
		6,0	$\pm 7,0$
		7,0	$\pm 6,0$
	8,0	$\pm 5,0$	
2. Плотность, г/см ³			
для толщины	1,0	1,0	
	1,2	1,2	1,00 - 1,20
	1,6	1,6	
	2,0-8,0	1,20-1,35	1,20 - 1,35

Величины допуска на толщину и плотность картона указаны в заявке с учётом того, что фактические значения этих величин, по результатам испытаний импортных картонов, проведённых ВИГ соответствуют указанным в заявке.

В информационных материалах ведущих зарубежных фирм и рекомендациях МЭК приведён допуск $\pm 5\%$ для всех толщин от 1,0 до 8,0 мм, плотность - 1,10-1,25 г/см³.

Результаты испытаний

Фирма, страна	Толщина, мм	Фактическое значение отклонения по толщине, %	Фактическое значение плотности, г/см ³
1	2	3	4
"Вайдман" Швейцария	1,0	4,0	1,04

	1	2	3	4
		1,2	5,8	1,06
		1,6	2,5	1,13
		2,0	3,0	1,20
		2,4	2,5	-
		2,5	2,0	-
		3,0	1,8	1,21
"Уайтли" АНГЛИЯ		1,0	10,0	1,06-1,12
		1,2	5,8	1,12-1,14
		1,6	5,0	1,12-1,18
		3,0	3,0	1,16-1,18
		2,4	5,0	1,22-1,25
		4,0	2,5	-
"Файгехолм Брук" ШВЕЦИЯ		1,0	10,0	1,13
		1,2	5,8	1,16
		1,6	5,0	1,20
		2,0	6,0	1,22
		2,5	6,0	1,22
		3,0	2,0	1,24

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОГО ЭЛЕКТРОКАРТОНА

Эффективность от применения жесткого электрокартона оценивается уменьшением ущерба в народном хозяйстве в связи с авариями трансформаторов по причине динамической неустойчивости, увеличением срока между ревизиями.

1. Затраты на ревизию одного трансформатора согласно прейскуранту 26-04-47 стр. 131 составляют:

$$2020 \text{ руб.} \times 0,5 = 1010 \text{ руб.},$$

где 0,5 - коэффициент, учитывающий затраты вызываемые нестабильностью размеров обмоток из-за качества применяемого в настоящее время электрокартона.

2. Применение жесткого электрокартона в конструкциях трансформаторов увеличит срок между ревизиями, составляющий сейчас по нормам Минэнерго СССР 6 лет, не менее, чем вдвое.

Среднегодовые затраты на ревизию одного трансформатора из-за качества картона:

а) существующие $\frac{1010}{6} = 170 \text{ руб.}$

б) планируемое $\frac{1010}{12} = 85 \text{ руб.}$

Изменение среднегодовых затрат на ревизию трансформаторов на 1 т картона: $\frac{170 - 85}{1,5} = 57 \text{ руб. в год,}$

где 1,5 - средний расход картона на 1 трансформатор (для расчета взят трансформатор ТДТН-40000/110).

3. Лимитная цена 1 т нового электрокартона подсчитывается по формуле:

$$\left(C_{\text{ос}} + \frac{\Delta U}{P_{\text{ом}} + E_{\text{н}}} \right) \times 0,8 = \left(530 + \frac{57}{0,2127} \right) \times 0,8 = 638 \text{ руб.}$$

РАСЧЕТ ЛИМИТНОЙ ЦЕНЫ
жесткого электрокартона

Эффективность от применения жесткого электрокартона оценивается уменьшением ущерба в народном хозяйстве в связи с авариями трансформаторов по причине динамической неустойчивости, увеличением срока между ревизиями.

1. Затраты на ревизию одного трансформатора согласно прецеденту 26-04-47 стр. 131 составляют:

$$2020 \text{ руб.} \times 0,5 = 1010 \text{ руб.}$$

где 0,5 - коэффициент, учитывающий затраты, вызываемые нестабильностью размеров обмоток, из-за качества применяемого в настоящее время электрокартона.

2. Применение жесткого электрокартона в конструкциях трансформаторов увеличит срок между ревизиями, составляющий сейчас по нормам Минэнерго СССР 6 лет, не менее, чем вдвое.

Среднегодовые затраты на ревизию одного трансформатора из-за качества электрокартона:

а) существующее $\frac{1010}{6} = 170 \text{ руб.}$

б) планируемое $\frac{1010}{12} = 85 \text{ руб.}$

Изменение среднегодовых затрат на ревизию трансформаторов на 1 т картона:

$$\frac{170 - 85}{1,5} = 57 \text{ руб. в год,}$$

где 1,5 - средний расход картона на 1 трансформатор (для расчёта взят трансформатор ТДТН-40000/110).

3. Лимитная цена 1 т нового электрокартона подсчитывается по формуле:

$$\left(C_{\text{ос}} + \frac{\Delta U}{P_{\text{ом}} + E_{\text{н}}} \right) \times 0,8 = \left(530 + \frac{57}{0,2127} \right) \times 0,8 = 638 \text{ руб.}$$

где C_{0c} — базисная цена применяемого в настоящее время электрокартона.

4. Экономический эффект от применения жёсткого электрокартона, исходя из принятия его цены в размере 635 руб. (635 руб. взяты исходя из того, что в настоящее время для изготовления деталей продольной, ярмовой и уравнильной изоляции применяют электрокартон марки Б ГОСТ 4194-78, уплотняя его на вальцах до объёмной массы 1,25-1,3 г/см³. При этом на специализированных предприятиях (по данным предприятия п/я М-5III) удорожание составляет 105 руб. на 1 т.

$$\mathcal{E}_T = (C_1 - C_2) + E_H (K_1 - K_2)$$

$$\mathcal{E}_T = (57 - 0,12 (635 - 530)) \times 3500 = 153000 \text{ руб. в год,}$$

где 3500 — потребность (в тоннах) в жёстком электрокартоне на 1983г.

$$\mathcal{E}_{\text{потр.}} = (530 - 635 + \frac{57}{0,2127}) \times 3500 = 570000 \text{ руб.}$$

$\mathcal{E}_{\text{потр.}}$ — эффект в энергетике в связи с применением трансформаторов с жёстким картоном.

Зам.директора ВИТ *И.В.Карпенко* И.В.Карпенко

Заведующий ОЦЭ *Л.Н.Поволоцкий* Л.Н.Поволоцкий

Заведующий ЦИИ *Т.В.Жилев* Т.В.Жилев

Учёный секретарь Марии Лиала
ВНИИБ, к.х.н.

И.В.Баутина И.В.Баутина



Копия

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВИТ

подпись А.Д.Воеводин

"23" IO 1986г.

РАСЧЁТ

экономического эффекта от отказа закупки
жесткого электрокартона по импорту

За последнее время трансформаторными заводами Министерства электротехнической промышленности освоен выпуск трансформаторов мощностью 1 млн кВА напряжением 330 кВ, освоен выпуск трансформаторов для ЛЭЩТ напряжением 1500 кВ.

В 1987 году намечаются к освоению супертрансформаторы.

В связи с ростом мощностей в единице резко повысились требования к увеличению технического уровня и эксплуатационной надёжности трансформаторов, в частности к их электродинамической устойчивости, которая решающим образом зависит от качества трансформаторного картона, применяемого для дистанцирующих прокладок ярмовой и уравнивательной изоляции, реек, цилиндров и других деталей трансформаторов.

В связи с ростом мощностей энергосистем требуется повышение электродинамической устойчивости и трансформаторов меньших мощностей.

Применяемый сейчас для изготовления продольной изоляции картон марки Б по ГОСТ 4194-83 не обеспечивает необходимого уровня стойкости обмоток трансформаторов при коротких замыканиях из-за больших остаточных деформаций.

После воздействия токов короткого замыкания из-за недостаточной стабильности толщины картона марки Б при давлении уменьшается высота обмотки, снижается усилие запрессовки, что приводит к распрессовке обмоток трансформаторов и потере их динамической устойчивости.

Для обеспечения необходимой электродинамической устойчивости трансформаторов необходимо, чтобы усилие, которым запрессовывается обмотка, сохранялось в течение заданного срока эксплуатации.

Обеспечение необходимой надёжности трансформаторов достигается применением для продольной, ярмовой и уравнивательной изоляции малоусадочного жесткого картона плотностью $1,25 \text{ г/см}^3$.

Наряду с обеспечением требуемой электродинамической устойчивос-

ти трансформаторов, применение жёсткого картона позволяет увеличить качество изготовления реек, цилиндров и других деталей трансформаторов и позволит отменить на заводах-изготовителях операции по дополнительной обработке картона, применяемые для стабилизации обмоток.

Применение жёсткого электрокартона в конструкциях трансформаторов позволит увеличить срок между ревизиями не менее, чем вдвое, т.е. 12 лет вместо 6 лет существующим нормам Минэнерго СССР.

В связи с отсутствием отечественного жёсткого электрокартона в настоящее время проводится закупка электрокартона у инофирм.

Стоимость 1 т импортного электрокартона в среднем составляет 1461 руб.

В настоящее время Укргипробум разработал проект организации производства отечественного электроизоляционного картона марки жёсткий на Малинской бумажной фабрике.

В случае организации производства жёсткого электрокартона на Малинской бумажной фабрике отпадает необходимость приобретения его по импорту для нужд электротехнической промышленности.

Экономический эффект от внедрения в трансформаторостроении жёсткого электрокартона отечественного производства взамен импортного рассчитан исходя из разницы в ценах.

1. Принятая оптовая цена 1 т отечественного жёсткого электрокартона 1354,5 руб.

2. Стоимость 1 т импортного электрокартона - 1461 руб.

3. Разница в стоимости составляет:
 $1461 - 1354,5 = 106,5$ руб. за 1 т.

4. Потребность в жёстком картоне на 1985 год составляет - 5000 т.

5. Экономический эффект от отказа закупки жёсткого электрокартона по импорту составляет: $1500 \cdot 106,5 = 159750$ руб., т.е. 159,8 т руб.,

где 1500 - количество жёсткого картона, закупаемого по импорту, т.

Заместитель директора ВИТ

подпись
15.02.85

И.Ю.Мелешко

Заместитель директора ВИТ

подпись
15.02.85

Ю.В.Карпенко

Зав. ОЦЭФ

подпись
14.02.85

Л.Н.Поволоцкий

Зав.ТОИП

подпись
14.02.85

Т.Б.Жилиев

Копия верна:

Ученый секретарь

И.В.Баутина.



Приложение 3

Копия

УТВЕРЖДАЮ

Директор Малинской бумажной
фабрики

Ю.Н.Приходько

"22" 12 1988г.

А К Т

о внедрении законченной научно-исследовательской
разработки

Мы, нижеподписавшиеся, со стороны исполнителя-Марийского филиала ВНИИБ ВПОбумпрома директор Е.А.Кузнецов, зав.лабораторией ЭИБК Н.П.Осипова, руководители темы А.В.Рябков и Ю.А.Борисов и со стороны заказчика-Малинской бумажной фабрики-главный технолог В.Г.Якимук, начальник цеха В.Н.Енько и технолог цеха Н.М.Чечулин составили настоящий акт в том, что в соответствии с договором № I/88-Ц от 29 января 1988г. с Малинской бумажной фабрикой и тематическим планом Марфилиала в IV кв. 1988г. в цехе № 6 Малинской бумажной фабрики внедрена в производство научно-исследовательская разработка по теме МI-87 р.02(6-82) "Разработать и внедрить технологию производства жёсткого электроизоляционного трансформаторного картона применительно к импортному оборудованию" в соответствии с требованиями 5-22 Минэлектротехпрома СССР. При внедрении использована заявка 4250489/29-12. Экономический эффект от внедрения технологии производства новой марки электроизоляционного картона будет рассчитан на основе фактически полученных расходных данных по первому году внедрения.

Год внедрения

1988 г.

Объём внедрения, тонн

2250

Планируемый объём внедрения

Год внедрения	1989г.	1990г.	1991г.
Объём внедрения, т	2800	4250	4250

От Марийского филиала
ВНИИБ ВНИОбумпрома

От Малинской бумажной
фабрики

Директор, к.т.н.

Е.А.Кузнецов

Главный технолог

В.Т.Якимук

Зав.лабораторией,

Начальник цеха

к.т.н.

Н.П.Осипова

В.Н.Енько

Руководитель темы

Технолог цеха

к.т.н.

А.В.Рябов

Н.М.Чечулин

Соруководитель темы

Ю.А.Борисов



Ученый

секретарь

И.В.Баутина