

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

С. Ю. ОСИПОВ

Ю. Р. ОСИПОВ

С. А. ШЛЫКОВ

**Технологические режимы
при восстановлении гуммировочных
покрытий с учетом технико-
экономических критериев**

Монография

ВОЛОГДА
2016

УДК 66.047.66.021.4

ББК 31.3

О-74

Печатается по решению редакционно-издательского
совета ВоГУ

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры математического
и программного обеспечения ЭВМ Череповецкого государственного
университета В. В. Мухин,

канд. экон. наук, доцент кафедры управления экономической деятельностью в
УИС Вологодского института права и экономики ФСИН России А. А. Кольев

Осипов, Ю. Р.

О-74 Технологические режимы при восстановлении гуммировочных по-
крытий с учетом технико-экономических критериев : монография /
Ю. Р. Осипов, С. Ю. Осипов, С. А. Шлыков ; М-во образ. и науки РФ,
Вологод. гос. ун-т. – Вологда : ВоГУ, 2016. – 163 с. : ил.

ISBN 978-5-87851-635-8

Рассматриваются вопросы анализа решений в области теплопереноса и ремонте гуммировочных покрытий, моделируются процессы теплопереноса и предлагается энергосберегающая технология теплообмена при местном ремонте покрытий. Учитываются случайные возмущения, оказывающие значительное влияние на тепловой процесс вулканизации. Разработана структура математической модели теплового процесса индукционного нагрева гуммировочных покрытий с учетом факторов неопределенности. Предложена математическая модель процесса теплообмена, характеризующаяся высокой точностью получаемых результатов. Решены задачи интенсификации теплообмена при вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий в условиях неопределенности.

Монография рассчитана на научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области тепломассопереноса и теплофизики. Может быть полезна аспирантам и студентам теплофизических специальностей.

УДК 66.047.66.021.4

ББК 31.3

ISBN 978-5-87851-635-8

© ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет», 2016
© Осипов Ю. Р., Осипов С. Ю.,
Шлыков С. А., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЗАЩИТНЫХ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ	6
1.1. Общая характеристика гуммированных объектов.....	6
1.2. Способы крепления обкладок к металлам	7
1.3. Виды и причины повреждений покрытий гуммированных объектов	9
1.4. Контроль качества покрытий гуммированных объектов	10
1.4.1. Электроискровой метод определения сплошности	11
1.4.2. Электролитический метод определения сплошности.....	12
1.4.3. Электрический метод определения сплошности	13
1.4.4. Индикаторный метод определения сплошности.....	14
1.5. Материалы, применяемые для ремонта гуммированной химической аппа- ратуры.....	15
1.5.1. Резины с ускорителями вулканизации	15
1.5.2. Замазки холодного отверждения	16
1.6. Практика проведения ремонта, существующие способы и методы исправ- ления дефектов покрытий гуммировочных объектов	17
1.6.1. Подготовка поверхностей перед проведением ремонтных работ	17
1.6.2. Ремонт защитных покрытий.....	22
1.6.3. Разгуммирование химического оборудования	29
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ	32
2.1. Описание процесса вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий, влияние факторов неопределенности и способы их формали- зации	32
2.2. Состояние вопроса математического моделирования теплопереноса при местном ремонте гуммировочных покрытий	40
Глава 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕП- ЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ПОКРЫТИЙ ГУММИРОВАН- НЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТ- НОГО ХАРАКТЕРА	47
3.1. Алгоритмы моделирования тепловыми технологическими процессами вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий.....	47
3.2. Математическая модель теплового процесса вулканизации гуммировоч- ных покрытий с учетом факторов неопределенности при местном ре- монте химических аппаратов и оборудования	50
3.3. Результаты имитационных исследований процесса теплообмена при ме- стном ремонте гуммировочных покрытий	60
3.4. Расчет полей температур и степени вулканизации в покрытиях методом модельной прямоугольной области.....	64
Глава 4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРО- ЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ГУММИРОВОЧ- НЫХ ПОКРЫТИЙ	68
4.1. Идентификация и оценка адекватности математической модели процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочных покрытий.....	68
4.2. Решение задач интенсификации теплообмена при вулканизации при ме- стном ремонте гуммировочных покрытий в условиях неопределенности	78

4.3. Экспериментальное исследование ремонта покрытий гуммированных объектов.....	88
4.4. Влияние условий теплообмена при термообработке на качественные показатели готовых отремонтированных гуммировочных покрытий	91
4.4.1. Основные закономерности и методы оценки степени вулканизации резин в отремонтированных гуммированных объектах. Кинетика неизотермической вулканизации	91
4.4.2. Исследование влияния условий теплообмена при повторной вулканизации гуммировочных покрытий.....	94
4.4.3. Исследование влияния условий теплопередачи на температуру и степень довулканизации отремонтированных гуммировочных покрытий в период их послевулканизационного охлаждения.....	97
4.4.4. Экспериментальное исследование температурного поля теплообмена при ремонте гуммировочных покрытий.....	100
4.4.5. Основные факторы теплопереноса, влияющие на скорость и степень вулканизации при местном ремонте покрытий.....	103
4.4.6. Исследование химической стойкости отремонтированного покрытия ...	104
4.4.7. Прочность связи многослойных отремонтированных резинометаллических систем.....	108
4.4.8. Влияние давления прессования на прочность связи в отремонтированных гуммировочных покрытиях	113
Глава 5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В ХИМИЧЕСКУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ.....	116
5.1. Инженерная методика расчета индукционного нагрева ремонтируемых покрытий гуммированных объектов.....	116
5.1.1. Тепловой расчет нагревательных плит для ремонта покрытий гуммированных объектов	118
5.1.2. Методы электромагнитного расчета индукционных нагревателей для ремонта гуммировочных покрытий.....	121
5.2. Экономическая характеристика состояния вопроса и направления исследования	127
5.3. Оценка экономического ущерба от износа и основные направления научно-технического прогресса в области ремонта покрытий гуммированных объектов.....	130
5.4. Комплексная оценка экономического эффекта от осуществления мероприятий, направленных на восстановление покрытий гуммированных объектов.....	131
ВЫВОДЫ	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	161

ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности и других производствах, использующих гуммированные объекты, важную роль занимает процесс сохранения рабочих фондов, первоочередной задачей которого является максимальное продление срока службы оборудования. Анализ состояния аварийности оборудования показывает, что интенсивность потока отказов имеет тенденцию к увеличению. Увеличение отказов при достижении определенных сроков службы характерно для любой механической системы и связано с ухудшением ее состояния под влиянием процессов износа, накопления коррозионных и усталостных повреждений в предшествующий период эксплуатации. Даже небольшие по размерам повреждения в покрытиях могут привести к выходу из строя дорогостоящих аппаратов и оборудования. Для ремонта покрытий гуммированных объектов, имеющих значительные по размерам дефекты, применяют повторную термическую обработку в вулканизационных котлах всего изделия, что приводит к перевулканизации, ухудшению качества основного защитного покрытия и уменьшению срока его службы.

Местный ремонт (как наиболее дешевый и эффективный вид ремонта) получает в настоящее время приоритетное значение вместо широкомасштабной сплошной замены металлоёмкого оборудования и заключается в том, что ремонту подвергаются только дефектные участки. Учитывая тенденцию ухудшения состояния оборудования химических и других производств по мере увеличения продолжительности эксплуатации под влиянием процессов развития коррозионных повреждений, актуальной является разработка нового метода ремонта оборудования на участках местных повреждений защитных покрытий.

Повышение технического уровня ремонта защитных покрытий позволит продлить сроки эксплуатации и эффективность использования промышленного оборудования, что имеет первостепенное значение в условиях рыночной экономики.

Необходимость проведения исследований с целью разработки математических моделей тепломассопереноса в процессе термической обработки участков гуммировочных покрытий и создание на их основе инженерных методов расчета определяют содержание этой книги.

Г л а в а 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЗАЩИТНЫХ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Общая характеристика гуммированных объектов

Современное развитие химической промышленности и высокотемпературной техники, возникновение новых технологических процессов, протекающих в весьма жестких условиях, интенсификация устаревших производств предъявляют к конструкционным материалам очень серьезные требования.

Срок эксплуатации объектов во многом определяется свойствами используемых конструкционных материалов, среди которых металлы и их сплавы занимают лидирующие позиции. Для защиты металлических сооружений от воздействия внешних факторов на их поверхности наносят специальные защитные покрытия. Особая роль среди современных способов защиты химического оборудования от коррозионно-эрозионного воздействия внешней среды отводится гуммировочным покрытиям. При их использовании достигается высокая долговечность, стойкость к воздействию различного рода агрессивных сред, высокая стойкость к эрозионному износу, неподверженность к воздействию микроорганизмов. Недостатком этих покрытий является повреждаемость под действием различных экстремальных факторов как воздействие агрессивных сред, механические дефекты, резкие колебания температуры и др.

На предприятиях, использующих гуммированное оборудование, обычно отсутствует техническая возможность проводить полную реставрацию покрытий. Чаще всего для исправления дефектов используют различные замазки и покрытия на полимерной основе. Эти материалы не обладают «сродством» к металлу из-за существенного различия по химическому составу и структуре как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровнях. Поэтому особое значение имеют обеспечение адгезии наносимых материалов к металлу и сохранность ее в течение длительного времени.

Многолетним опытом применения покрытий гуммированных объектов наработано достаточно приемов и способов исправления повреждений в покрытиях, однако большинство из них малоэффективны, так как при их назначении не учитываются все действующие факторы.

Изучению долговечности эксплуатации полимерных материалов и покрытий посвящены фундаментальные работы Ребиндера П.А., Журкова С.Н., Бартенева Г.М., Бокшицкого М.Н., Гуля В.Е., Зueva Ю.С., Манина В.Н., Громова А.Н., Моисеева Ю.В., Заикова Г.Е., Тынного А.Н., Осипова Ю.Р., Сошко А.И., Шевченко А.А., Яковлева А.Д., а также учебные и производственно-практические издания Лабутина А.Л., Богаткова Л.Г., Рейбмана А.И., Абдуллина И.Г., Сафрончик В.И. и других авторов. Однако к настоящему времени многие вопросы как теоретических, так и прикладных направлений еще не решены.

1.2. Способы крепления обкладок к металлам

Применяемые в настоящее время способы крепления резины к металлам можно разделить на две группы:

- метод «горячего крепления», когда сырая резиновая или эбонитовая обкладка прикрепляется к металлу в процессе ее вулканизации;
- метод «холодного крепления», не связанного с вулканизацией обкладки.

В этом случае уже вулканизованная обкладка прикрепляется к металлу при помощи соответствующих адгезивов-клеев.

Метод горячего крепления обкладок к металлам получил наиболее широкое применение в промышленности. При этом методе обкладку прикрепляют к металлу либо непосредственно, либо через промежуточные слои. В первом случае в состав прикрепляемых к металлу обкладок (резины или эбонита) входят различные соединения меди, железа и др. Во втором в качестве промежуточных слоев при креплении к металлам обкладок применяют эбонит, латунь, хлорированные каучуки, термопеновые, изоцианатные и другие клеи.

Вопросу крепления обкладок к металлам посвящено много специальных работ [19, 23, 41, 154]. С исчерпывающей полнотой рассмотрены все теоретические проблемы аутогезии и адгезии высокополимеров, подробно рассмотрены вопросы, связанные с непосредственным креплением обкладок к металлам.

Крепления обкладок к металлам производят при помощи промежуточных прослоек – адгезивов, прочно соединяющихся как с поверхностью металла, так и с поверхностью обкладки. В качестве таких прослоек применяют эбонитовый, термопеновый, латексно-альбуминовый клеи, хлорированный каучук, различные пасты, содержащие соединения меди, окислы железа, клей на основе изоцианатов, различные синтетические смолы типа эпоксидной. Крепление обкладок осуществляют также с применением электролитического латунирования поверхности металла, однако этот способ крепления находит применение лишь для обрезинивания сравнительно небольших деталей.

При использовании метода холодного крепления и склеивания с успехом применяют клей следующего состава (в вес. ч.): термопен сухой – 25, стирол (мономер) – 74,5, перекись бензоила – 0,5. Имеется способ крепления обкладок к металлам при помощи специальных резиновых клеев с добавкой к ним медных или алюминиевых солей галоидоводородных кислот. Прочность крепления при этом методе зависит также от способа подготовки поверхности металла, от состава клея, рецепта обкладки и метода вулканизации.

Хорошие результаты дает крепление обкладок как к латунированной поверхности металла, так и с применением специальных клеев. Так, например, крепление обкладок к стали, алюминию, дюралю, цинку и другим поверхностям можно производить с помощью клеевых прослоек, получаемых на основе хлорированных и гидрохлорированных каучуков, изоцианатов или сочетаний их между собой.

Установлено, что при обкладке эбонитом наличие окиси железа в клеевых прослойках повышает прочность крепления эбонита к металлу. Соли меди, кобальта, цинка, алюминия, вызывая деструкцию синтетического каучука, создают более благоприятные условия для повышения адгезии обкладок на его основе.

Для повышения прочности крепления обкладок к металлам рекомендуется, чтобы слой резины, прилегающий к металлу, содержал повышенное количество серы: мягкий – не менее 4%, эбонитовый – не менее 45% (от веса каучука). Применение обкладок с ультраускорителями без серы резко понижает прочность крепления обкладок к металлу.

Прочность крепления обкладок к металлам определяется испытанием на отрыв (ГОСТ 209-75), на отслаивание (ГОСТ 411-77) и на сдвиг (ГОСТ 25717-83). Определение прочности связи резины с металлом методом отрыва заключается в приложении усилия, необходимого для разрушения связи между склеенными поверхностями резины и металла. Для этого растягивают цилиндрический образец резины, основания которого приклеены к металлическим дискам. Усилие, вызывающее отрыв, должно действовать перпендикулярно поверхности отрыва. Испытание резины на отслаивание от металла состоит в определении средней величины нагрузки, вызывающей отслаивание резиновой полоски определенных размеров от металлической поверхности. Для исключения влияния удлинения полоски на результаты испытаний внешнюю ее сторону склеивают с прочной тканью. Полученные результаты испытаний выражают кН/м.

Испытание резины на отрыв от металла при сдвиге заключается в параллельном смещении одной металлической пластинки относительно другой, между которыми находится привулканизованный к ним образец резины.

Прочность крепления обкладок зависит также от способа их вулканизации. Так, например, адгезия обкладок из наирита к металлу при открытой вулканизации составляет 0,8 МПа, а при закрытой острым паром (давление 3 ат) – 2–2,3 МПа; адгезия резины марки 2566 при открытой вулканизации составляет 0,5 МПа, а при закрытой вулканизации острым паром (давление 3 ат) – 0,7–0,8 МПа.

Следует отметить, что если к обкладкам предъявляются требования, ограниченные только стойкостью их к агрессивным средам, то в этом случае эксплуатация химической аппаратуры обусловлена не столько хорошим креплением обкладки к металлу, сколько высокой ее химической стойкостью.

Высокая прочность крепления обкладки к металлу необходима лишь в тех случаях, когда обкладка работает под вакуумом либо подвергается сильным гидродинамическим ударам (например в солянокислотных железнодо-рожных цистернах) и прочим воздействиям.

1.3. Виды и причины повреждений покрытий гуммированных объектов

Основными причинами возникновения дефектов гуммировочных покрытий при их производстве являются дефекты и брак в обкладках. В большинстве случаев они могут быть обнаружены лишь после вулканизации. На практике чаще всего приходится иметь дело с дефектами, брак же, как правило, встречается редко.

К дефектам относятся разнообразные местные изменения вулканизованных обкладок, как, например, образование на поверхности или внутри них пузырей, вздутий, отслоений от металла и пр. Брак характеризуется перевулканизацией обкладок, массовым отслоением последних от металла или поражением более чем 2/3 всей поверхности обкладки одним из указанных выше дефектов. В этом случае обкладка ремонту не поддается, и весь объект подлежит новому гуммированию. Причиной дефекта или брака в обкладках является нарушение основных правил процесса гуммирования. В частности, они могут быть вследствие применения плохого качества резиновых или эбонитовых смесей, плохой подготовки поверхности металла, неудовлетворительной прикатки обкладок к металлу, недосушивания клея на металле или на заготовках обкладок, нарушения режима вулканизации и т.п.

При гуммировании металла с неровной раковистой поверхностью весьма вероятно, что под слоем обкладки будут оставаться воздушные пузыри или растворитель, вследствие чего при вулканизации на резине образуются вздутия, которые часто разрываются в вершине.

Пористость в обкладках может образоваться как при открытой, так и при закрытой вулканизации. В большинстве случаев образование пор зависит от рецептуры обкладок, качества исходного каучука, влажности ингредиентов и главным образом от режима вулканизации. Если обкладки на основе синтетического бутадиенового каучука (СКБ) или наирита вулканизовать в среде горячего воздуха, начиная процесс сразу с высоких температур – порядка, например, 353-363К, то вулканизаты окажутся пористыми.

Получение плотных беспористых обкладок требует предварительной подвулканизации их при строгом выполнении установленного теплового режима, после чего уже допускается интенсивное повышение температуры среды. Отслоение обкладок от металла наблюдается при наличии различных загрязнений на поверхности металла.

К факторам, влияющим на разрушение гуммировочных покрытий в процессе эксплуатации, можно отнести следующие перечисленные ниже причины. Применение некачественных либо несоответствующих материалов. Изменение показателей качества материалов, происходящее в результате неправильных: транспортировки (деформация), хранения (засорения защитных покрытий, обводнения при хранении под открытым небом), приготовления (нарушения дозировки компонентов). Неправильная эксплуатация покрытий (резкий перепад температур, эксплуатация с температурой выше проектной и т.д.). Воздействие агрессивной среды на покрытия может проявляться в изме-

нении ее структуры и свойств или сопровождаться разрушением ее, чаще всего в виде растрескивания. Воздействие активных сред на прочностные свойства, определяющие сопротивляемость разрушению, может быть поверхностным (адсорбция, поверхностная диффузия) и объемным (набухание). Сущность адсорбционного воздействия среды при разрушении сводится к двум факторам – энергетическому и механическому. Уменьшение в результате адсорбции поверхностной энергии на границе покрытия – среда облегчает процесс зарождения и развития трещин разрушения, что приводит к уменьшению прочности.

Основными повреждениями, происходящими в процессе эксплуатации защитных покрытий, являются:

- местные повреждения: разрывы, проколы, раковины, порезы и трещины, рваные места (вырывы) в защитном покрытии;
- выкрашивание слоя, инородные включения; набухание, пористость, распадение на чешуйчатые и пластинчатые частицы;
- пузыри, расслоения, местные отслоения гуммировочного слоя от металла;
- отслоение по месту стыка, потеря адгезии обкладки к поверхности подложки и др.

1.4. Контроль качества покрытий гуммированных объектов

Качество гуммированных покрытий проверяют с целью определения сплошности и отслаивания гуммировочного слоя от металла. Контроль проводят в сухом помещении при температуре воздуха не ниже 288К.

Качество покрытий контролируют до вулканизации (в этом случае при устранении дефектов качество покрытия не снижается); после вулканизации и после механической обработки покрытия и монтажа оборудования, если в процессе его сборки детали испытывали динамические нагрузки и значительные деформации. Контроль качества покрытий производят:

- путем наружного осмотра – проверяют состояние всего покрытия и выявляют видимые дефекты (раковины, царапины, трещины и т.д.);
- простукиванием – гуммировочное покрытие простукивают деревянным или металлическим молотком для обнаружения отслаивания покрытия от металлической поверхности;
- электроискровым, электролитическим, электрическим или индикаторным методами – покрытие испытывают на сплошность;
- на наличие незаметных для глаза сквозных проколов, микропор, трещин или иных дефектов.

1.4.1. Электроискровой метод определения сплошности

Сущность метода заключается в приложении тока высокого напряжения к гуммировочному материалу или покрытию, являющемуся диэлектриком, и обнаружению в нем сквозных проколов, микропор, трещин и других дефектов по возникновению искрового разряда в месте нарушения сплошности между металлическим основанием гуммировочного покрытия и щупом-электродом дефектоскопа.

Контроль сплошности проводят электроискровыми дефектоскопами марок ДИ-64, ДИ-IV, ЭИД-1, обеспечивающими контрольное напряжение на щупе до 30-50 кВ. Качество покрытия проверяют дефектоскопом перед вулканизацией гуммированного изделия и после неё. При этом покрытие должно быть сухим, температура его не должна превышать 303 К.

Напряжение для испытания подбирают в зависимости от толщины покрытия и материала, из которого оно изготовлено (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Напряжение для испытания гуммировочных покрытий на сплошность

Гуммировочный материал	Контрольное напряжение, кВ	
	невулканизованное покрытие	вулканизованное покрытие
Полуэбонит 1751 или 1752 толщ. 3,0/4,5/6,0 мм	16 / 20 / 26	14 / 19 / 25
Резина 1976-М толщ. 3 мм по подслою полуэбонита 1751 толщ. 1,5 мм	15	15
Резина 2566 толщиной, 4,0 / 6,0 мм	16 / 20	16 / 20
Эбонит ИРП-1213 толщ. 3 мм по подслою полуэбонита ИРП-1395 толщ. 1,5 мм	19	20
Резина-ИРП-1257 толщиной 3,0 мм	11	11

Дефектоскоп подключают к сети переменного тока напряжением 12 В и частотой 50 Гц, с помощью регулятора устанавливают на щупе выбранную величину контрольного напряжения и производят контроль сплошности, плотно прижимая щуп-электрод дефектоскопа к контролируемому гуммировочному покрытию и равномерно перемещая его по поверхности со скоростью не более 100 мм/с. При испытании следует неоднократно обследовать всю поверхность обкладки.

При обнаружении дефекта в покрытии снимают высокое напряжение со щупа-электрода и отмечают место дефекта мелом. После этого подают высокое напряжение на щуп-электрод и продолжают проводить испытание. После исправления дефекта покрытие снова проверяют дефектоскопом на сплошность до и после вулканизации.

Электроискровой метод является основным, универсальным, самым надежным и производительным методом определения сплошности гуммировочных покрытий.

1.4.2. Электролитический метод определения сплошности

Сплошность гуммировочных покрытий из саженаяполненных смесей (резин, замазок) для аппаратов небольших габаритов контролируют с помощью электролитического метода.

Сущность метода заключается в приложении тока напряжением 12 В через увлажненный электролитом щуп к гуммировочному покрытию и определении сквозных дефектов по отклонению стрелки показывающего прибора от нулевого положения.

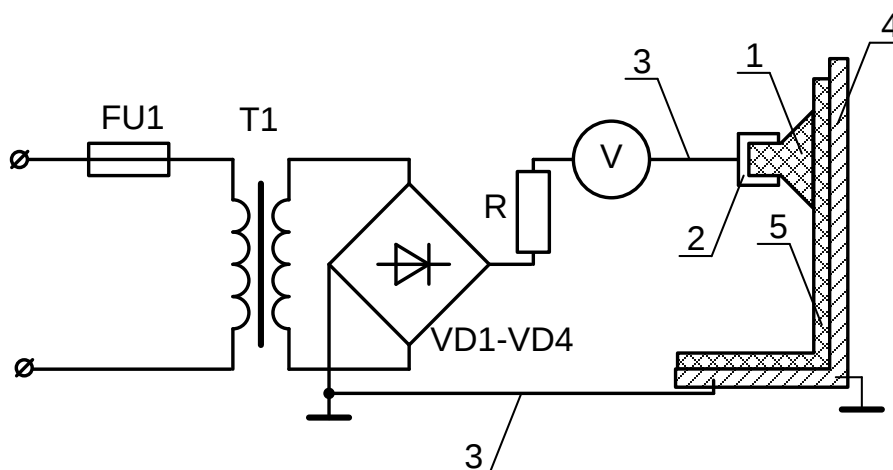


Рис. 1.1. Принципиальная схема электролитического дефектоскопа:

1 – порошковая вставка; 2 – щуп; 3 – электрод;
4 – корпус аппарата; 5 – защитное покрытие

В качестве электролита применяют 3–5% раствор серной кислоты, 20% раствор поваренной соли или 10% раствор сернокислой меди, подкисленный серной кислотой (из расчета 10 г на 1 л раствора). Принципиальная схема электролитического дефектоскопа показана на рис. 1.1. Контроль осуществляют следующим образом. В приготовленный раствор электролита погружают порошковую вставку 1 щупа 2, затем помещают смоченную электролитом вставку внутрь щупа дефектоскопа и присоединяют электрод 3 к металлической поверхности корпуса 4 контролируемого гуммированного аппарата. Подключают дефектоскоп к сети переменного тока напряжением 12 В и частотой 50 Гц и, плотно приложив щуп к контролируемому защитному покрытию 5, равномерно перемещают его по поверхности со скоростью не более 30 мм/с.

В процессе испытания вставку щупа периодически опускают в раствор электролита, не допуская ее высыхания.

Отклонение стрелки регистрирующего прибора от нулевого положения указывает на наличие дефекта в месте нахождения в данный момент щупа электролитического дефектоскопа. Осушив дефектное место фильтровальной бумагой и подав напряжение на щуп, продолжают проверку сплошности всей поверхности покрытия.

1.4.3. Электрический метод определения сплошности

Электрический метод определения сплошности гуммировочных покрытий применяют для контроля гуммировочных изделий небольшого размера в процессе изготовления их и при эксплуатации. Сущность метода заключается в определении удельного объемного электрического сопротивления гуммировочного покрытия, контактирующего с раствором электролита. В качестве электролита для контроля сплошности гуммировочного покрытия аппаратов в процессе изготовления применяют 20% раствор поваренной соли, а в процессе эксплуатации – их рабочие среды: растворы минеральных кислот, солей и т.д.

Принципиальная схема контроля сплошности гуммировочных покрытий электрическим методом показана на рис. 1.2. В корпус 4 аппарата, заполненный электролитом 3, вводят вспомогательный электрод 1 измерительного устройства 6; другой электрод 5 подключают к корпусу аппарата. Корпус перед испытанием надежно заземляют.

Измерительное устройство подсоединяют к сети переменного тока напряжением 220 В и подают на электроды через выпрямитель постоянный ток напряжением 110–120 В, фиксируют по вольтметру и миллиамперметру подаваемое напряжение и силу тока, затем через 10 мин производят повторное определение напряжения и силы тока и выключают измерительное устройство. После выдержки аппарата в течение 24 ч вновь включают измерительное устройство и определяют по вольтметру и миллиамперметру напряжение и силу тока.

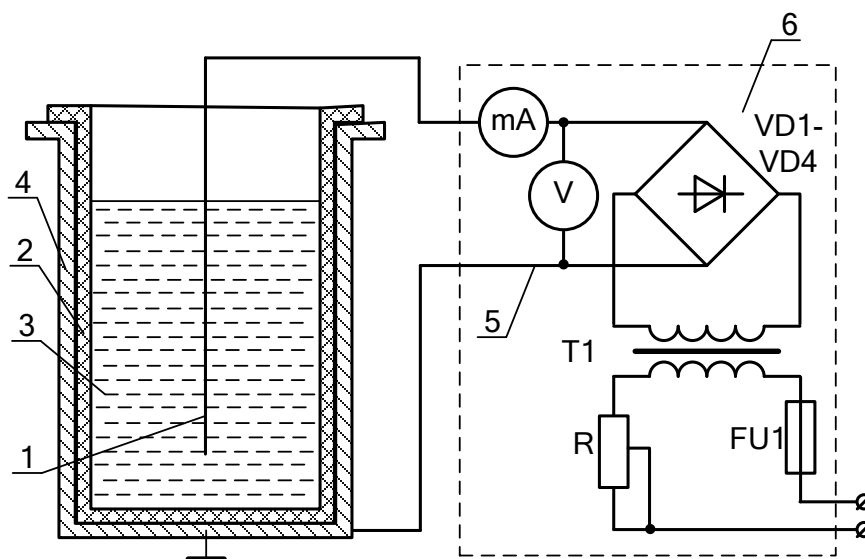


Рис. 1.2. Принципиальная схема контроля сплошности гуммировочных покрытий электрическим методом:

1 – вспомогательный электрод; 2 – покрытие; 3 – электролит;
4 – корпус аппарата; 5 – электрод; 6 – измерительное устройство.

Данные трех измерений заносят в журнал и производят расчет электрического сопротивления гуммировочного покрытия для каждого замера по формуле:

$$R = \frac{U}{I} \cdot 10^3, \quad (1.1)$$

где U – напряжение на электродах, В; I – сила тока, мА; R – электрическое сопротивление, Ом.

Затем определяют удельное объемное электрическое сопротивление гуммировочного покрытия для первого, второго и третьего замеров по (1.2):

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{\delta}, \quad (1.2)$$

где ρ_v – удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м; R – электрическое сопротивление, Ом; S – площадь гуммировочного покрытия, соприкасающаяся с электролитом, м²; δ – толщина гуммировочного покрытия, м.

Если значения удельного объемного электрического сопротивления по трем замерам практически не отличаются друг от друга, покрытие считают качественным. Этот метод имеет существенный недостаток: он хотя и дает возможность оценить качество всего покрытия, но не позволяет определить местонахождение дефекта, и поэтому его применяют редко.

1.4.4. Индикаторный метод определения сплошности

Метод применяют для контроля качества гуммирования малогабаритных изделий сложной конфигурации с покрытиями, обладающими низкими диэлектрическими свойствами, в том числе токопроводящими. Наиболее часто его применяют для контроля сплошности наиритовых покрытий на изделиях, гуммированных со всех сторон. Сущность метода заключается в появлении в местах нарушения сплошности вкраплений металлической меди при воздействии на гуммировочное покрытие в течение определенного времени индикаторного 10% раствора сернокислой меди.

Для приготовления индикаторного раствора берут на 100 масс. ч. воды 11 масс. ч. сернокислой меди. Полученный раствор подкисляют серной кислотой из расчета 10 г кислоты на 1 л раствора сернокислой меди.

Сплошность определяют при комнатной температуре в течение 48 ч путем полного погружения в индикаторный раствор изделия, загуммированного полностью; со всех сторон или путем залива раствора, если изделие представляет собой гуммированный сосуд или емкость.

По истечении 48 ч прекращают воздействие раствора сернокислой меди на изделие и производят осмотр поверхности покрытия. Наличие вкраплений металлической меди указывает на нарушение сплошности в данных местах покрытия.

1.5. Материалы, применяемые для ремонта гуммированной химической аппаратуры

1.5.1. Резины с ускорителями вулканизации

Как было отмечено, в процессе изготовления и эксплуатации гуммированного оборудования на поверхности гуммировочного покрытия могут образоваться вздутия и трещины, а также возможны отслоение покрытия от оборудования и другие дефекты.

Для ремонта гуммировочных покрытий из мягких резин обычно используют резину марки 829.

Для улучшения качества ремонта гуммировочных покрытий в последнее время разработаны и применяются в промышленности листовые резиновые смеси 1390-П, 1391-1П, 1751-П, 1752-П и 1976-П, в состав которых для увеличения скорости вулканизации введены ультраускорители.

Резиновые смеси 1390-П, 1751-П, 1976-П, 1752-П, 1391-1П и клей 2572-П разработаны на основе серийных резин и полуэбонитов марок ИРП-1390, 1976-М, ИРП-1391, 1751, 1752 и клея 2572, они обладают всеми их эксплуатационными и технологическими свойствами.

Увеличение скорости вулканизации резиновых смесей и полуэбонитов достигается введением в них комбинации ускорителей вулканизации.

Контроль качества резин с ускорителями вулканизации ведется по следующим показателям, значения которых приводятся в табл. 1.2.

Данные о прочности крепления (кН/м) полуэбонитов к металлу клеем 2572-П при различных режимах вулканизации приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Показатели качества резин

Характеристика	1976-П	1390-П	1391-1П	1751-П	1752-П
Плотность, кг/м ³	1100-1180	1190-1250	1300-1380	1420-1520	1390-1450
Пластичность по Карреру	0,25-0,5	0,3-0,5	0,3-0,45	0,3-0,5	0,25-0,45
Груз, Н (кгс)	20(2)	20(2)	20(2)	20(2)	20(2)
Кольцевой модуль	3-6	2-4,5	2,5-4,5	2,25-5,75	1,5-3,25
Режим вулканизации температура, К	420	420	420	420	420
Продолжительность, мин.	15	15	15	15	15

Таблица 1.3

**Показатели прочности крепления полубонитов к металлу
клеем 2572-П**

Прочность крепления (кН/м)	Режим вулканизации		
	60 мин при 416 К	30 мин при 416 К	4 ч при 416 К
Клей 2572 резиновая смесь 1751-П	7,67; 7,92; 8,4; 9,06	3,06; 2,61; 2,8; 2,93	-
Клей 2572 резиновая смесь 1751	-	-	4,5; 4,1; 4,2; 4,3

1.5.2. Замазки холодного отверждения

Для устранения незначительных по размерам дефектов гуммировочного покрытия широко используют разработанные в химическом машиностроении замазки холодного отверждения марок К-98, К-102 и № 14. Замазки готовят на основе эпоксидных смол ЭД-5 (ЭД-20) и ЭД-6 (ЭД-16) с добавлением наполнителей. Отверждение замазок производится полиэтиленполиамином, который вводится непосредственно перед употреблением замазки.

Все замазки обладают высокой адгезией к металлу, эбонитам и резине, имеют хорошие показатели по прочности, а также по сопротивлению износу в различных средах. В табл. 1.4. приводятся характеристики замазок различных марок.

Таблица 1.4

Характеристики замазок различных марок

Характеристика	К-98	К-102	№ 14
Плотность, кг/м ³	1000-1100	1000-1100	1000-1100
Теплостойкость, К	343	343	353
Сопротивление разрыву, МПа	12,7	13,5	7
истиранию при скольж., 10 ⁻⁶ м ³ /кВт·ч	1720	1680	800-1000
Твердость по Шору (отвержд. замазки)	94-98	94-98	96-98
Жизнедеятельность, ч.	1	1	1
Полное отверждение, ч.	8	10	24

Замазки удобны в работе, хорошо противостоят действию серной и соляной кислот, растворов щелочей и неорганических солей, спиртов, хлорированных углеводородов и других агрессивных сред и могут с успехом использоваться на предприятиях, эксплуатирующих гуммированное оборудование.

Наиболее широкое распространение получила замазка № 14. Замазку готовят путем перемешивания всех компонентов в определенной последовательности вручную или в лопастном смесителе. Компоненты, приме-

няемые для изготовления замазок, следует хранить в условиях, исключающих попадание влаги.

Перед смешением смолу ЭД-20 и ЭД-16 и каучук СКН-26-1А разогревают до 323–333 К, остальные компоненты при необходимости подсушивают при температуре 383–393 К.

Замазка представляет собой высоковязкую пасту черного цвета с равномерным распределением компонентов без каких-либо комков и включений. Она обладает тиксотропностью, которую определяют путем нанесения слоя замазки толщиной 5–6 мм на вертикальную металлическую поверхность. Если нанесенный слой удерживается на вертикальной поверхности в течение 1 ч и более, то это означает, что данная замазка является пригодной для ремонта гуммировочных покрытий.

1.6. Практика проведения ремонта, существующие способы и методы исправления дефектов покрытий гуммировочных объектов

1.6.1. Подготовка поверхностей перед проведением ремонтных работ

Основные способы очистки поверхностей

Участки поверхности аппаратуры и оборудования, подлежащие ремонту с использованием антикоррозионных композиций и покрытий, для обеспечения хорошей адгезии подготавливают должным образом.

Подготовка поверхности состоит в следующих операциях:

- тщательное удаление с поверхности ремонтируемого участка и вокруг него разного рода отложений продуктов, удаление отслоившейся от металла части покрытия, промывка поверхности водой или соответствующим растворителем;
- очистка от кусков старого покрытия, продуктов коррозии и создание шероховатости.

Очистку от смолистых наслоений, осадков, коррозионных продуктов проводят металлическими шпателями, щетками, скребками, промывая водой или соответствующими растворителями. Выбор растворителя определяется химической природой продуктов.

В промышленной практике для удаления ржавчины, окалина и других загрязнений с поверхности оборудования и конструкций существует довольно много способов очистки. Применение того или иного способа зависит от размера очищаемой поверхности, вида конструкционного материала, характера загрязнений, ограничений требованиями правил безопасности и др.

При проведении ремонтов химического оборудования нашли распространение следующие способы обработки поверхностей:

- механические (пневматическая абразивоструйная, механизированным инструментом, ручная);

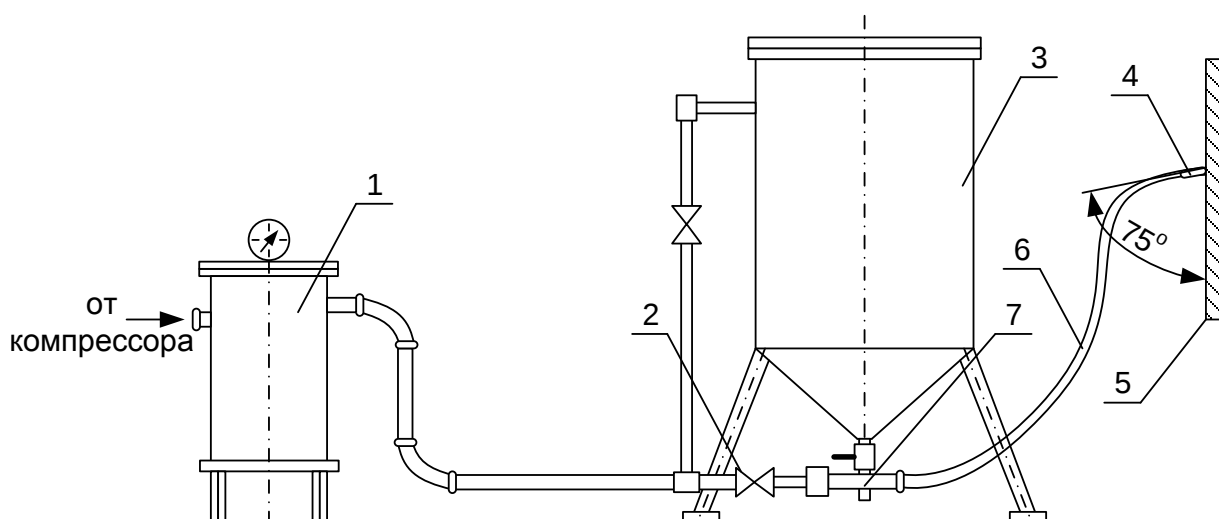
– химические (модификаторами ржавчины, химическими растворами и травильными пастами).

Механохимический и термический способы очистки имеют в сфере ремонта весьма ограниченное применение.

Наилучший эффект с целью получения благоприятной шероховатости поверхности и хорошей адгезии наносимых материалов дает пневматическая пескоструйная обработка. Обработка химическими препаратами не позволяет получить высокую шероховатость, что приводит к недостаточно высокой адгезионной прочности соединения с наносимыми материалами и, следовательно, к сокращению межремонтного пробега оборудования.

Пневматическая абразивоструйная очистка поверхностей

Сущность пневматической абразивоструйной обработки заключается в том, что струя песка или дроби направляется с большой скоростью через специальное сопло на обрабатываемую поверхность (рис. 1.3.).



*Рис. 1.3. Схема установки дробепескоструйного аппарата:
1 – корпус аппарата; 2 – вентиль подачи сжатого воздуха;
3 – камера смешения; 4 – сопло; 5 – очищаемая поверхность;
6 – резиновый шланг для подачи песка в сопло;
7 – масловодоотделитель*

В зависимости от вида абразива различают дробеструйную и пескоструйную обработку. Применение дробеструйной обработки для очистки от продуктов коррозии и других твердых отложений нецелесообразно по следующим причинам:

- производительность ниже, чем при пескоструйной обработке;
- не удастся достичь высокой шероховатости обрабатываемой поверхности из-за круглой формы абразива.

Пескоструйная очистка в этом плане более эффективна, что объясняется наличием острых граней у песка. В качестве абразива при этом используют

металлический или кварцевый песок. Кварцевый песок допускается к применению только на открытых площадках; внутри аппаратов, цистерн, резервуаров его применение запрещено в связи с опасностью для здоровья работающих. Горный или овражный песок эффективнее, чем речной, имеющий окатанную поверхность.

Ориентировочный расход песка в кг на 1 м² поверхности:

- металлический (стальной, чугунный) – 5...6 (с учетом оборачиваемости);
- кварцевый – 40 (при одноразовом использовании).

Виды абразивных материалов для пескоструйной обработки: дробь стальная колотая ДСК (стальной песок), дробь чугунная колотая ДЧК (чугунный песок), кварцевый песок горный или речной, электрокорунд; для дробеструйной обработки: дробь стальная литая ДСЛ, дробь чугунная литая ДЧЛ, дробь стальная рубленая ДСР (рубленая стальная проволока).

Размер зерен песка подбирается в зависимости от давления воздуха и толщины стенки обрабатываемого изделия, конструкции. Песок нужной фракции получают просеиванием через два сита: верхнее для задерживания крупных частиц, нижнее – для отсеивания мелких частиц. Используемый песок должен быть сухим (влажность <6%), не содержать глинистых и пылевидных включений; не допускается загрязнение абразива маслом и лакокрасочными материалами. Металлический песок должен использоваться многократно (обычно 4...5 раз). Его собирают, просушивают и просеивают. В источниках [140, 141] содержатся данные об эффективности применения для пескоструйной обработки стальных поверхностей чугунного песка МП – Старооскольского завода с размером зерен 0,4..0,12 мм.

Сжатый воздух должен соответствовать ГОСТ 9.010-80, быть сухим и чистым, не содержать масла. Контроль осуществляют направляя струю воздуха в течение 3 минут с расстояния 50...100 мм на поверхность зеркала или в течение 10...15 мин на поверхность фильтровальной бумаги. После обдува на зеркале не должно быть матовых пятен, на бумаге пятен масла и воды. Качество песка определяется пробной очисткой поверхности опытного образца. Зерна песка при ударе о поверхность не должны превращаться в пыль.

После очистки поверхность обдувают сжатым воздухом и обезжиривают при помощи мягкой волосяной щетки, смоченной уайт-спиритом или бензином. Прикасаться руками к окончательно подготовленной поверхности не разрешается.

Поверхность считается подготовленной, если на ней нет ржавчины, окалины, набрызгов от сварки, заусенцев и острых кромок, жировых и других загрязнений; подготовленная поверхность должна быть достаточно шероховатой. Контроль состояния поверхности проводят сразу после ее очистки и дополнительно непосредственно перед нанесением грунтовочного слоя при перерыве до начала нанесения покрытия не более 6 часов.

Большое влияние на эффективность пескоструйных работ оказывает форма применяемого сопла. Сопла используются минералокерамические (ПМ-332), металлокерамические (ВК2, ВК5, ВК8), фарфоровые, чугунные (из

отбеленного чугуна), победитовые из инструментальных сталей типа У8, из углеродистых чугуна и стали. Срок службы сопла определяется износом рабочего отверстия от начального диаметра 6...8 мм до 15...16 мм и зависит от твердости материала, из которого оно изготовлено. Минерало- и металлокерамические сопла работают до 200...250 часов, чугунные и стальные – 2...5 часов.

Очистка поверхности ручным механизированным инструментом

Во многих случаях ремонтируемые участки имеют небольшие размеры для их очистки от старого покрытия и продуктов коррозии, используют в основном механические и химические способы воздействия. Следует отметить, что химическую обработку поверхности металла целесообразно дополнять механической для создания шероховатости.

Для механической очистки применяют сбивание, крацевание и зачистку наждачным полотном. Ручное или механическое сбивание (зубилом, стамеской, игольчатым сбивателем) применяют для удаления наплывов, наслоений, неровностей с последующей очисткой щетками. Игольчатый сбиватель снабжен большим числом тонких стальных игл, вставленных в насадку пневматического молотка. Крацевание – очистка поверхности с помощью вращающихся дисковых проволочных щеток. Щетки для крацевания используют из тонкой стальной проволоки диаметром 0,2...0,3 мм. Во время обработки детали смачивают мыльным раствором, раствором кальцинированной соды или венской извести.

Очистку проводят в два этапа: предварительная (щеткой с толстой проволокой) и окончательная (щеткой с тонкой проволокой). Диаметр и толщину вращающихся щеток подбирают так, чтобы линейная скорость составляла примерно 14 м/с. При более высоких скоростях проволоки щетки изгибаются, что может привести к нежелательному в данном случае полированию поверхности.

Грубые следы механической обработки, царапины, выбоины, продукты коррозии удаляют наждачным полотном зернистостью от 30 до 200.

Для высококачественной очистки металла применяют проволочные вращающиеся цилиндрические щетки с повышенной плотностью ворса рабочей поверхности (не менее 120 шт./см² при диаметре проволоки 0,4...0,6 мм). Обработку проводят при рациональных условиях прижима щетки к обрабатываемой поверхности в пределах 0,8...1,2 МПа (8...12 кг/см²), обеспечивающих минимальные энергозатраты и оптимальную шероховатость (8...15 мкм). Окружная скорость составляет при этом 2...4 м/с.

Химические средства для обработки поверхностей

Для химической очистки от продуктов коррозии металлических поверхностей используют ингибированные кислоты и травильные пасты (табл. 1.5), после использования этих препаратов поверхность промывают водой, тщательно протирают тампоном, высушивают и обезжиривают.

Таблица 1.5

**Растворы для удаления продуктов коррозии
с металлической поверхности**

Химические средства	Количество, г/л	Режим обработки	
		Температура, К	Продолжительность, мин
Стальные и чугунные изделия			
Кислота соляная	150...200	303...313	10...30
Катапин или ингибитор ПБ-5	1...3	-	-
Кислота серная	200...250	343...353	10...30
Кислота ортофосфорная	200...300	288...353	20...60
Алюминиевые изделия			
Едкий натр	40...60	323...333	20...40
Медные изделия			
Кислота серная (ρ= 1,8 г/см ³)	80...120	323...333	20...40
Бисульфат натрия	100	-	-

Продолжительность обработки пастами, в зависимости от толщины ржавчины, составляет при обычной температуре от 15 мин до 6 ч.

Принцип действия при обработке металлической поверхности модификаторами ржавчины (МР) заключается во взаимодействии их с продуктами коррозии и преобразовании их в грунтовочный слой, на который затем наносят лакокрасочные материалы.

В качестве модификаторов ржавчины применяют вещества, образующие нерастворимые комплексы с продуктами коррозии. Необходимым условием для применения модификаторов ржавчины является отсутствие окалины, пластовой и рыхлой ржавчины, жировых загрязнений и пыли. Толщина слоя ржавчины должна быть не более 70...100 мкм (в зависимости от типа МР).

Преимущества от использования МР заключаются в простоте, технологичности выполнения работ и дешевизне. Смывать или удалять МР с поверхности после использования не требуется.

Для удаления жировых загрязнений и повышения адгезии наносимых материалов к металлической поверхности последняя должна быть обезжирена. С этой целью используют органические растворители (бензин, уайт-спирит, трихлорэтилен), щелочные растворы (КМ-1, МС-6) и эмульсионные составы (МЛ-40, Лабомид-101, Лабомид-102, Лабомид-103).

Серьезный недостаток органических растворителей – их токсичность, а во многих случаях и горючесть. После обезжиривания в щелочных растворах поверхность изделий тщательно очищают от оставшейся на ней щелочи (промывкой и нейтрализацией в 2% растворе ортофосфорной кислоты), так как неполное удаление щелочи уменьшает срок службы наносимых покрытий.

1.6.2. Ремонт защитных покрытий

В зависимости от разрушающего фактора, конфигурации аппаратов и качества покрытия дефекты при эксплуатации гуммированной аппаратуры могут быть различными по виду и размерам. Виды дефектов по участкам аппаратов химических производств и их значимость в отказах приведена в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Основные участки аппаратов, подвергающиеся износу

Участок поверхности аппарата	Доля отказов, %
Днище	10...20
Стенки	35...55
Закругления в местах перехода с соприкасающимися поверхностями	15...25
Зеркала фланцев	5...10
Штуцеры	5...10

К настоящему времени накоплен некоторый опыт ремонта или реставрации покрытий гуммированных объектов. Выбор того или иного способа ремонта осуществляется исходя из химической стойкости используемых для ремонта материалов в данных условиях эксплуатации, размеров дефектного участка и технологической оснащенности предприятия.

Для исправления дефектов площадью не более 0,8 см² используется установка конструкций различных типов ввертных устройств (рис. 1.4).

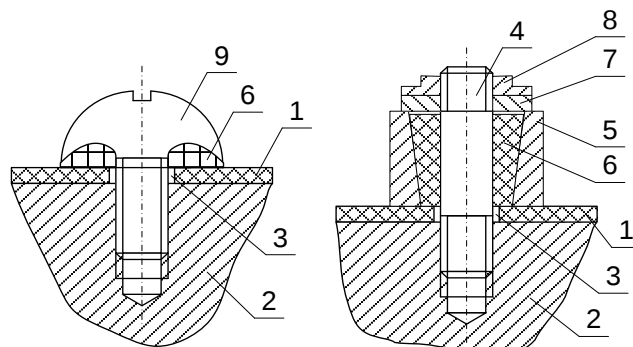


Рис. 1.4. Схемы ввертных устройств для перекрытия дефектов в защитных покрытиях:

1 – покрытие; 2 – корпус аппарата; 3 – химически стойкая композиция;

4 – ввертная часть; 5 – обойма ограничительная;

6 – прокладка уплотнительная; 7 – шайба прижимная;

8 – гайка; 9 – танталовый винт

Детали 4, 5, 7, 8, 9 ввертных устройств выполняются из коррозионно-стойких металлов (тантала, титана и др.), устойчивых к действию широкого ассортимента химически активных сред, прокладки 6 изготовляют из химически стойких резин, пластмасс, коррозионно-стойких компаундов.

В конструкциях накладных элементов 3 с покрытием и прокладками из химически стойкого материала 4 (рис. 1.5) предусматривается возможность болтового и резьбового креплений к стенке аппарата.

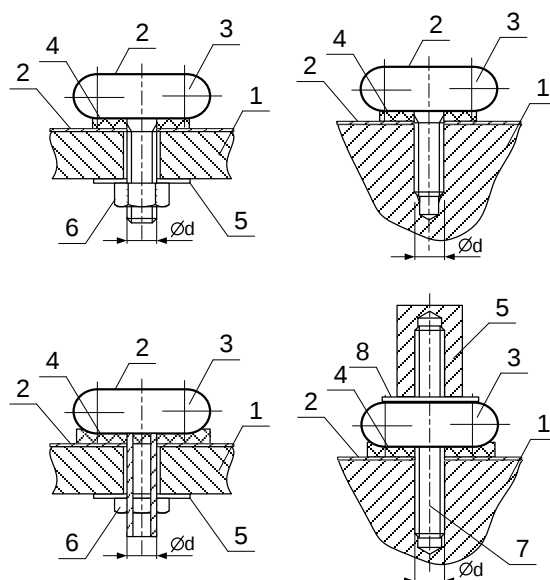


Рис. 1.5. Накладные элементы:

1 – корпус аппарата; 2 – покрытие; 3 – элемент уплотнительный;
4 – прокладка уплотнительная; 5 – шайба; 6 – гайка;
7 – шпилька; 8 – прокладка

Известны аналогичные способы ремонта, используемые ведущими иностранными фирмами, специализирующимися на выпуске аппаратуры для химических предприятий (рис. 1.6). Все перечисленные способы требуют использования дорогостоящих металлов, не обладающих к тому же универсальной химической стойкостью.

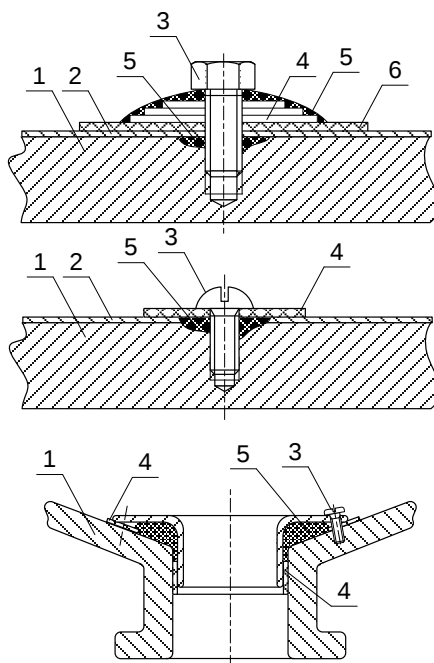


Рис. 1.6. Способы ремонта, рекомендуемые фирмой SHINKO-PFAUDLER:

1 – стенка аппарата; 2 – защитное покрытие; 3 – винт или болт из тантала;
4 – прокладка из фторопласта-4; 5 – химически стойкая замазка;
6 – втулка из тантала; 7 – набор шайб из фторопласта

В случаях, когда использование ввертных устройств и накладных элементов затруднено (например на искривленных поверхностях) или невозможно (на дефектных участках с большой площадью), нашли применение химически стойкие замазки и покрытия, наносимые различными методами.

Дефекты в виде раковин и углублений устраняют путем их заливки расплавленным термопленочным клеем до уровня, превышающего уровень основной обкладки. Залитую массу в течение 30...40 мин сушат до полного застывания, затем зачищают наждачной шкуркой заподлицо с основной обкладкой.

Дефекты гуммировочного покрытия до 5 см² наиболее часто исправляют с помощью кислотоустойчивых замазок холодного отверждения. Для проведения ремонта с поврежденного участка удаляют до металла отслоившийся или рыхлый слой резины или эбонита, при этом края основного покрытия срезают на конус и зачищают. Замазку наносят на подготовленную поверхность с помощью шпателя или лопатки. Для того чтобы поверхность стала ровной и гладкой, на замазку насыпают тальк и выравнивают чистым шпателем или лопаткой.

Качество ремонта, произведенного с помощью замазок, проверяется визуально на отсутствие раковин, пузырей, отслоений от основного покрытия.

При ремонте покрытий из мягкой резины марок 829, 2566, 4476, 1976 после удаления поврежденного покрытия и соответствующей подготовки металлической поверхности ее промазывают термопленочным клеем (концентрация 1:8...1:12) и выдерживают до полного высыхания (15...30 мин), затем промазывают клеем 4508 (концентрация 1:10...1:15) и сушат в течение 15...20 мин.

Если покрытие состоит из подслоя эбонита и мягкой резины, полуэбонита и эбонита марок ИРП-1212+ИРП-1213, ИРП-1395+ИРП-1394, подготовленный участок поверхности промазывают 3 раза клеем 2572 концентрацией 1:4...1:6 с промежуточными и окончательной выдержками до полного высыхания.

Резиновую или резиноэбонитовую заготовку, подготовленную таким же образом, как и при гуммировании всего аппарата, накладывают на промазанный клеем участок и тщательно прикатывают. Кромки заготовки должны перекрывать дефектное место на 10...20 мм.

После наклеивания заплат проводят общую вулканизацию всего изделия острым паром в вулканизационном котле или местную вулканизацию дефектного участка струей острого пара, направленной на прорезиненную ткань или металлическую пластину, наложенные на дефектный участок.

Ремонт покрытия изделий, гуммированных раствором резиновой смеси ИРП-1257, производят следующим образом. Покрытие в поврежденном месте вырубает, на поверхность пескоструйного и обезжиренного металла наносят два слоя хлорнаиритового грунта с промежуточной сушкой в течение 20–30 мин, а затем кистью – несколько слоев раствора резиновой смеси до получения слоя нужной толщины. Вулканизацию проводят в котле.

Помимо обычных сортов резин и эбонитов, промышленностью выпускаются специальные починочные резиновые смеси 1751-П и 1752-П для ремонта покрытий из полуэбонита, 1390-П и 1976-П – для ремонта покрытий из мягкой резины. Для крепления эбонитовых смесей к металлу и между собой применяют быстровулканизирующийся клей марки 2572-П, для дублирования мягких резин – клей 4508.

Ремонт производят следующим образом. Покрытие в дефектном месте вырубает до металла, удаляют с него резину, отставшую от металлической поверхности, затем края обкладки срезают на конус. Поверхность металла зачищают до блеска, обезжиривают с бензином и после высыхания 2 раза промазывают клеем 2572-П концентрацией 1:10. Продолжительность сушки до отлипа каждого слоя клея – не менее 30 мин.

Одновременно с подготовкой металлической поверхности к ремонту из починочной резиновой смеси вырезают заготовки нужного размера. Заготовки обезжиривают бензином БР-2, просушивают в течение 15 мин, промазывают клеем 2572-П и с помощью ролика дублируют. Края дублированной заготовки срезают на фаску. Прилегающую к металлу сторону заплата промазывают клеем 2572-П, высушивают до отлипа и прикатывают к металлу роликом. Необходимо, чтобы заплата на 1 мм возвышалась над уровнем основного покрытия. Поверхность заплата посыпают тальком, а на окружающую поверхность основного покрытия накладывают асбестовую бумагу, в которой делают отверстие того же размера, что и заплата. Местную вулканизацию покрытия в дефектном месте производят с помощью электровулканизаторов при температуре 413-433 К в течение 1 ч и давлении нагревательной плиты вулканизатора на ремонтируемую поверхность не менее 0,2 МПа.

Электровулканизаторы (рис. 1.7а) позволяют производить ремонт на плоских (рис. 1.7б), изогнутых (рис. 1.7в), угловых (рис. 1.7г) и других поверхностях гуммированных аппаратов. Они состоят из электромагнита постоянного тока с прижимным устройством 2 и сменного электронагревателя 3. При проведении ремонта электромагнит устанавливают на жестко закрепленную металлическую плиту 7 и включают его в сеть постоянного тока. Магнит с большой силой притягивается к металлической плите, он служит опорой для прижимного устройства. С помощью винта 6 прижимного устройства 2 электронагреватель с необходимым усилием давит на дефектное место 5 гуммировочного покрытия 4 изделия. Регулирование температуры электронагревателя осуществляется клеммным переключателем.

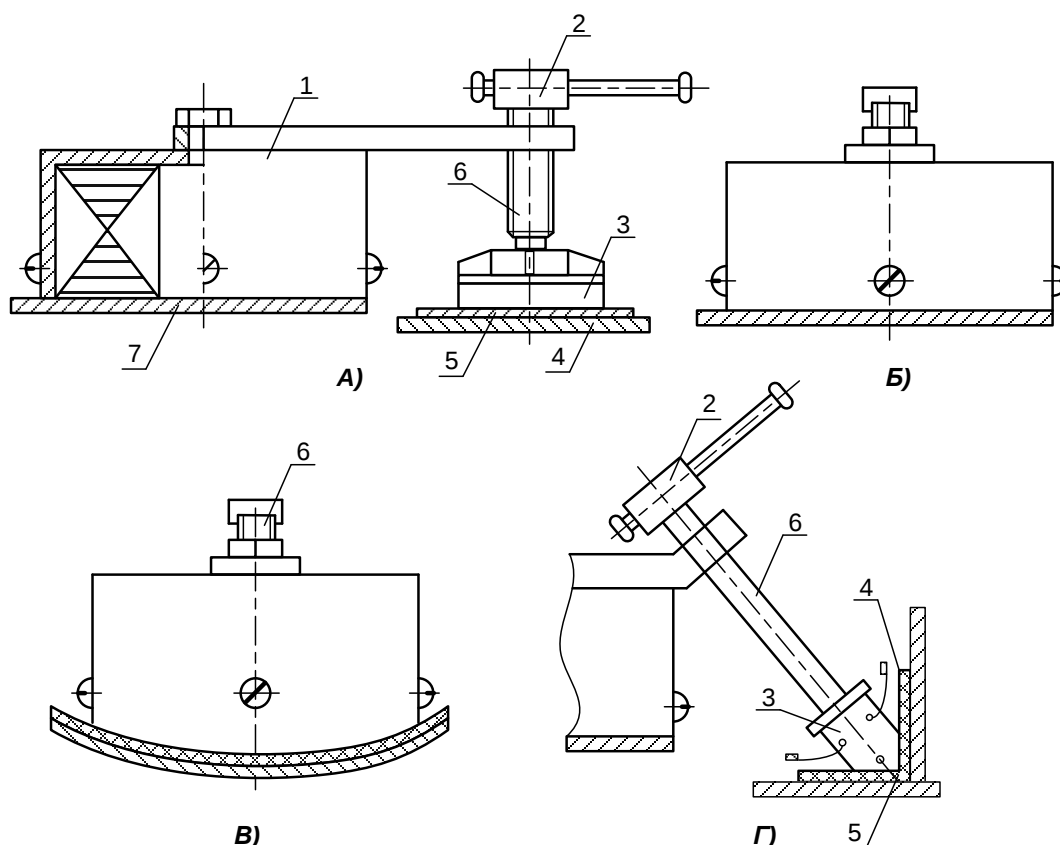


Рис. 1.7. Электровулканизатор для ремонта дефектов гуммировочного покрытия (а) на плоских (б), вогнутых (в) и угловых (г) поверхностях:

- 1 – электромагнит постоянного тока; 2 – прижимное устройство;
3 – сменный электронагреватель; 4 – гуммировочное покрытие;
5 – поврежденная поверхность; 6 – винт; 7 – металлическая плита

Для устранения дефектов гуммировочных покрытий тел вращения (барабанов и т. д.) используют электровулканизаторы без электромагнитных опор (рис. 1.9а). В них электронагреватель 1 прижимается к дефектному месту гуммировочного покрытия барабана 3 с помощью домкрата 2.

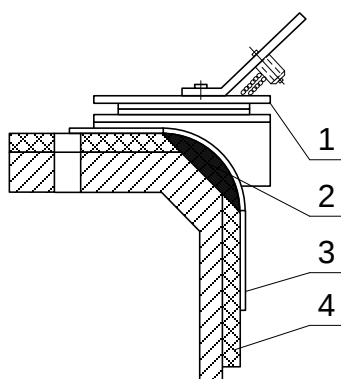


Рис. 1.8. Ремонт изогнутых участков покрытия:
1 – прижимное устройство; 2 – поврежденный участок;
3 – электронагреватель; 4 – гуммированное покрытие

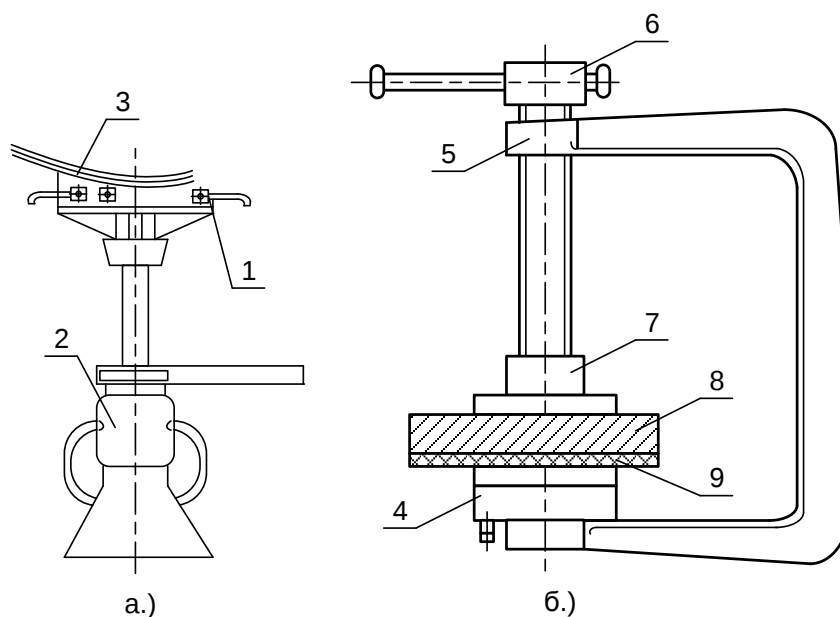


Рис. 1.9. Электровулканизатор для ремонта гуммировочных покрытий тел вращения (а) и гуммированных ребер (б):

- 1, 4 – электронагреватель; 2 – домкрат; 3 – тело вращения (барaban);
4, 9 – дефектная поверхность; 5 – трубуцина; 6 – винт;
7 – прижимная пята; 8 – гуммированное ребро изделия

Для ремонта изделий, имеющих гуммированные ребра, используют электровулканизатор (рис. 1.9б). При проведении местной вулканизации электронагреватель своей рабочей поверхностью с помощью винта плотно прижимается к дефектному участку гуммированного ребра 8.

При ремонте гуммированного оборудования часто приходится проводить сварочные и газорезательные работы. Для предотвращения загорания гуммировочное покрытие в зоне сварного шва или зоне реза удаляют и затем производят его ремонт с использованием местных электровулканизаторов. Технология ремонта гуммировочного покрытия после проведения газорезательных работ показана на примере замены люков и подпятников гуммированных аппаратов вакуум кристаллизационной установки производства двуокиси титана. Аппараты загуммированы резиной 1976 толщиной 4,5 мм по подслою полуэбонита 1751 толщиной 1,5 мм. В процессе эксплуатации появилась необходимость установить подпятник новой конструкции и увеличить диаметр люков с 400 до 600 мм.

Сначала вырубают гуммированное покрытие на расстоянии 80–100 мм от предполагаемой линии реза металла газом.

Для локализации перегрева при вырезке и выполнении сварочных и газорезательных работ в целях сохранения основного гуммировочного покрытия аппарата зону реза охлаждают водой (аналогичное охлаждение применяют и при вваривании фланца подпятника и обечайки люка).

После проведения газорезательных (или сварочных) работ освобожденные от гуммировочного покрытия участки зачищают до чистого металла, дробеструят и обезжиривают бензином; для увеличения адгезии на поверхности аппаратов из нержавеющей стали наносятся насечки глубиной 0,1–0,15 мм в виде сетки с ячейками размером 3–5 мм. Края основного гуммиро-

вочного покрытия на стыке с дефектным местом срезают на фаску под углом 0,14-0,17 рад к поверхности металла, в результате образуется кромка, равная восьми-десяти толщинам гуммировочного покрытия.

Для ремонта используют полуэбонит 1751-13 с ускорителями вулканизации и быстровулканизирующийся клей 2572-П. Заготовки раскраивают по шаблонам, конфигурация и размеры которых соответствуют конфигурации и размерам дефектного места в аппарате с учетом припусков на обработку. Обкладку днища, стенок и обечайки люка проводят в два приема при толщине заготовок 3 мм с последующей тщательной прикаткой роликом каждой заготовки. Затем гуммировочное покрытие в поврежденном месте вулканизируют электровулканизатором со специально спрофилированными поверхностями, обеспечивающими плотное прилегание их к вулканизируемому покрытию, а также необходимые режим и давление.

Электровулканизатор для ремонта подпятника (рис. 1.10) состоит из сварного стального корпуса 1 с нагревательными нихромовыми элементами 2 диаметром 0,8 мм, изолированными от корпуса листовым асбестом 3. Для создания необходимого усилия на ремонтируемый участок покрытия 4 электровулканизатор снабжают шпильками 5 и фланцем 6, установленным под подпятник 7 аппарата.

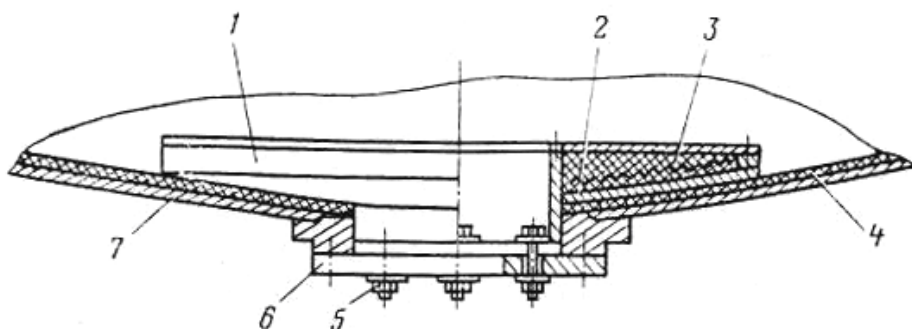


Рис. 1.10. Электровулканизатор для ремонта подпятника:
1 – корпус; 2 – нагревательный элемент; 3 – листовой асбест;
4 – ремонтируемое покрытие; 5 – шпилька; 6 – фланец;
7 – подпятник аппарата

Напряжение и силу тока контролируют вольтметром и амперметром. Данные о режимах нагревания для проведения вулканизации подпятника приведены для режима (разогревания/нагревания): продолжительность нагревания (30/30) мин; напряжение (220/180) В; сила тока (3,5/3,2) А; температура 413 К; температура рабочих поверхностей 423 К.

Контроль температуры осуществляется с помощью термопары ХК и милливольтамперметром в соответствии с таблицей для указанной термопары, прилагаемой к прибору.

Ремонт гуммировочных покрытий с использованием быстровулканизирующихся смесей с ускорителями вулканизации и электровулканизаторов является надежным и экономичным. Исправление мелких дефектов гуммировочного покрытия химических аппаратов с помощью кислотоустойчивых

замазок холодного отверждения на основе эпоксидных смол К-98, К-102 и № 14 является наиболее удобным и эффективным.

Для проведения ремонта гуммированной поверхности аппарата с поврежденного участка удаляют до металла отслоившийся или рыхлый слой резины или эбонита, после чего поверхность участка обрабатывают металлическим песком и обезжиривают бензином БР-2. Края основного покрытия срезают на конус и зачищают.

Непосредственно перед нанесением замазки (замазка состоит из пасты и отвердителя, поставляемых отдельно) в пасту вводят отвердитель – полиэтиленполиамин (ПЭПА) из расчета 10 масс.ч. полиэтиленполиамин на 100 масс. ч. эпоксидной смолы для замазок К-102, К-98 и соответственно 9,2 масс. ч. на 100 масс. ч. для замазки № 14 и тщательно перемешивают. Полученную замазку необходимо быстро использовать, так как ее жизнеспособность составляет всего 1 ч. Окончательно замазка отверждается в течение суток при температуре 291–293 К. Толщина наносимого слоя зависит от толщины ремонтируемой обкладки. Качество ремонта, произведенного с помощью замазок, проверяется визуально на отсутствие внешних раковин, пузырей, отслоений от края покрытия и электролитическим методом для проверки сплошности покрытия.

1.6.3. Разгуммирование химического оборудования

Большая часть гуммированных химических аппаратов и установок работает в сильноагрессивных средах, часто при повышенных температурах. Действие этих факторов вызывает разрушение защитных покрытий основных деталей и узлов оборудования. В настоящее время на действующих химических комбинатах проводят в основном только текущие ремонты гуммированного оборудования. Осуществлять капитальный ремонт крупного оборудования предприятия невозможно из-за отсутствия способов полного разгуммирования в производственных условиях. Существующий в практике способ разгуммирования обжигом можно применять только для деталей и узлов химического оборудования конструктивно жестких, не деформирующихся в процессе нагревания при высоких температурах, относительно небольших по размерам и массе. Для разгуммирования химической аппаратуры применяют механический и химический способы.

Механический способ используют в основном для разгуммирования небольшого числа крупных деталей и узлов. По этому способу резину срезают с деталей и производят их обжиг.

Химический способ применяют для разгуммирования стальных деталей, за исключением алюминиевых и медных деталей или деталей из сплавов, содержащих медь, цинк и алюминий. При проведении разгуммирования по этому способу детали погружают в раствор цианистого аммония или в аммиачный раствор персульфата аммония и выдерживают в нем до тех пор, пока резина не будет легко отслаиваться от металлической поверхности.

Способ разгуммирования путем набухания в растворителях. При разгуммировании детали погружают в растворитель (бензин, толуол, дихлорэтан и т.п.)

и выдерживают до набухания резины, когда ее можно будет легко отделить от металла. Этот способ применяют только в лабораториях при проведении научно-исследовательских работ, так как для его проведения необходимо использовать токсичные и огнеопасные растворители, кроме того, он трудоемок.

Способ разгуммирования нагреванием. При нагревании резинометаллических изделий до температуры 503 К и выше происходит отслаивание резины от металла. Это вызвано деполимеризацией резины при указанной температуре. Нагревание необходимо проводить как можно быстрее во избежание загорания резины. При нагревании резина становится очень липкой, и после ее отделения поверхность металла необходимо промывать растворителем.

Способ Холмса – Андре. По этому способу гуммированные детали загружают в металлический контейнер, подогревают до 673–723 К и выдерживают при такой температуре без доступа воздуха в течение нескольких часов. Резина разрушается, выделяющиеся газы и жидкие продукты собираются и используются в качестве топлива. На металлических деталях остается одна сажа.

Продолжительность обработки каждой разгрузки 7 ч. Детали после обработки в контейнере легко очищаются от сажи металлическими щетками или в барабане.

Способ разгуммирования с помощью индукционного нагрева деталей токами высокой частоты. При индукционном нагревании гуммированных деталей токами высокой частоты (ТВЧ) за короткое время достигается высокотемпературное нагревание поверхности металла, и гуммировочный слой сравнительно легко отделяется.

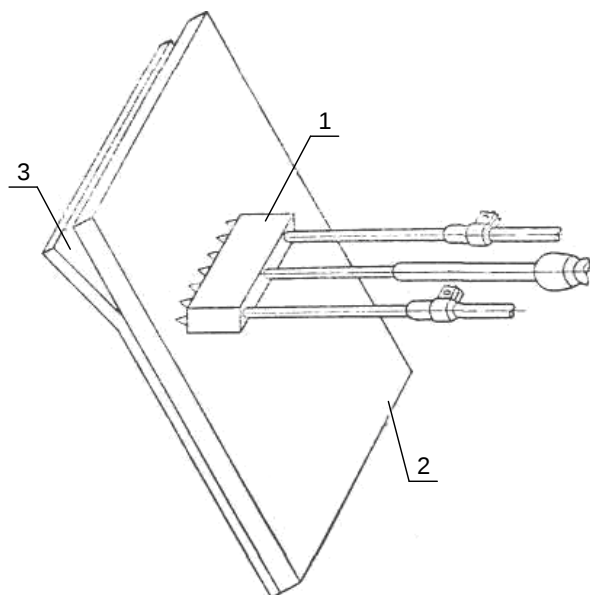
Установка для разгуммирования индукционным нагревом ТВЧ состоит из типовой закалочной установки ТВЧ мощностью 100 кВт со сменными индукторами на трансформаторе, перемещающемся на подвижном столе. Детали, подлежащие обработке, крепятся на стойках тележки, движущейся по рельсовому пути от канатного барабанного привода. Время окончания нагревания очередного участка гуммированного слоя определяется по загоранию защитного покрытия, поэтому для удаления дыма над местом расположения индукторов закрепляют зонт с системой воздуховодов вытяжной вентиляции.

Данным способом в основном производится разгуммирование плоских поверхностей крышек и бортов ртутных электролизеров.

Для разгуммирования химической аппаратуры наиболее целесообразно применять *газопламенный способ разгуммирования* путем нагревания аппарата или детали со стороны металлической поверхности или путем нагревания в печи без доступа воздуха.

При разгуммировании газопламенным нагревом (рис. 1.11) нагревание деталей с односторонним гуммировочным покрытием со стороны металлической поверхности осуществляется линейными газовыми горелками типа Г33-2-61 или Г33-1-61 со сменными наконечниками шириной 45 и 85 мм до деполимеризации клеевого слоя, после чего происходит отделение отработавшего гуммировочного покрытия. Горелки типа Г33-2-61 работают на смеси природного газа (метана) и кислорода, а типа Г33-1-61 – на смеси пропана и кислорода. Питание стационарного поста для подключения линейных газовых горелок осуществляется главным образом от общих трубопроводов природ-

ного газа и кислорода, а также от общего трубопровода природного газа и перепускной ramпы с кислородными баллонами или от перепускных ramп с пропановыми и кислородными баллонами.



*Рис. 1.11. Разгуммирование деталей газопламенным нагревом:
1 – линейная газовая горелка; 2 – разгуммированная деталь;
3 – гуммировочное покрытие*

Отделение гуммировочного покрытия производится специальными скребками, при этом гуммировка легко и полностью отстает от металла.

Способ разгуммирования нагревом в печи без доступа воздуха применяется для узлов химической аппаратуры сложной конструкции с односторонним и двухсторонним гуммированием.

Разгуммирование производят в установке, состоящей из термической камерной тупиковой печи с выдвижным подом типа ТДО размером 5×5×14 м, контейнера для разгуммирования и устройства для отвода и сжигания газообразных продуктов, образующихся при деструкции гуммировочного покрытия.

При разгуммировании узлы химической аппаратуры устанавливают в корпус контейнера и закрывают крышкой, для герметизации стенки привалочных поверхностей крышки и корпуса контейнера обмазывают огнеупорной глиной. После ввода контейнера в печь его выходную трубу для газов соединяют с устройством для отвода и сжигания газообразных продуктов деструкции гуммировочного покрытия.

Нагревание контейнера с гуммированным изделием производится до температуры 773–823 К, и контейнер выдерживают при этой температуре не менее 2 ч. Затем производится медленное остывание контейнера до температуры 573–623 К, после чего его выкатывают из печи. После остывания до 303 К контейнер разбирают и из него извлекают разгуммированный узел, который направляют на обработку в дробеструйную камеру, где внутренние и наружные поверхности узла очищают до металлического блеска от оставшейся после термической обработки сажи.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Результаты исследований [8, 16, 17, 39, 73, 111, 129, 135] позволили выявить связь физико-химических характеристик, которые в значительной мере определяют срок службы отремонтированного участка покрытия, т.е. искомого показателя качества, и температурных режимов процесса вулканизации. Поэтому в большинстве известных источников [46, 89, 100, 113, 129, 135], посвященных интенсификации работы вулканизаторов, в качестве критерия эффективности используются температурные профили, а основным условием проведения технологического процесса вулканизации является строгое выполнение его температурного режима наиболее эффективными средствами. Колебания температур при вулканизации покрытий приводят к значительным изменениям в степенях вулканизации (в % от 6 до 60).

Выравнивание температурных полей в вулканизируемом изделии и вулканизационных элементах является одним из средств интенсификации процесса. Выравнивание температурных полей в значительной мере связано как с обеспечением равномерности задаваемых условий нагрева одного и того же изделия на одном и том же оборудовании, так и с созданием одинаковых условий вулканизации изделий одного вида и размера в рядах вулканизаторов.

2.1. Описание процесса вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий, влияние факторов неопределенности и способы их формализации

Вулканизация является основной операцией технологического процесса восстановления гуммировочных покрытий. Основное назначение вулканизации – придать наложенным ремонтным материалам необходимые свойства, прежде всего эластичность, химическую стойкость и прочность и др., а также обеспечить достаточную прочность связи между конструктивными элементами системы «эластомер – металл» и вновь наложенными материалами. Это достигается нагреванием покрытия на специальном вулканизационном оборудовании при температуре 413–453 К.

Вулканизация является самой энергоемкой стадией восстановительного производства покрытий. В общем балансе энергозатрат при восстановлении покрытия среднего размера затраты на вулканизацию составляют около 85%. При этом основная доля падает на расход теплоты.

При вулканизации происходит изменение ряда свойств материала: исчезает способность к самопроизвольному растворению в растворителях, появляется способность к ограниченному набуханию, повышаются условные напряжения при заданных удлинениях, прочность при растяжении, эластичность, твердость, теплостойкость, износостойкость покрытия.

Эти изменения являются следствием физико-химических процессов, протекающих в резиновой смеси, основной из которых – соединение макромолекул каучука редкими химическими связями различной энергии и природы в единую пространственную вулканизационную сетку. Образующиеся сшивки ограничивают необратимое перемещение цепных молекул, т.е. понижают текучесть, а достаточно большая длина макромолекул между связями позволяют сохранить способность к изменению конформаций под действием внешней нагрузки.

Процесс протекает в неизотермических нестационарных условиях, температура вулканизируемых наложенных деталей зависит от времени и координат. Накопление, передача, распределение теплоты в системе вулканизат – нагревательные плиты определяются не только внешними условиями, но в равной степени теплофизическими характеристиками.

При вулканизации серой реакция сшивания протекает благодаря наличию двойных связей в углеводородной цепи полимера либо у соседних с ними метиленовых групп. Реакция происходит с выделением теплоты, пропорционально количеству присоединенной серы. Скорость химической реакции вулканизации зависит от температуры. Помимо серы к вулканизирующим агентам относятся тиурам-сульфиды, перекиси, окиси металлов, полифункциональные амины, производные бензола, хлорсодержащие соединения и др.

Прочность связи между слоями в резиновых изделиях, имеющих многослойную структуру, определяется наличием межмолекулярных и химических связей, число которых зависит от количества активных центров в макромолекулах адгезива и субстрата и вероятности их встречи, а также от макрорельефа поверхности субстрата. На прочность связи в системе вулканизат – резиновая смесь влияют давление и время действия дублирующего усилия. Увеличение этих параметров ведет к усилению прочности связи, которая с течением времени стремится к определенному пределу.

Образование химических валентных связей между макромолекулами резиновой смеси и вулканизата затрудняет достижение молекулярного контакта из-за ухудшения поверхностного смачивания и усложнений условий конформационного совмещения активных центров. С увеличением степени вулканизации объекта уменьшается вероятность возникновения химических связей в зоне контакта между макромолекулами каучуков, что приводит к уменьшению прочности связи [21, 23, 138]. При увеличении температуры прочность связи в системе вулканизат – резиновая смесь изменяется по кривой с экстремумом. Этому способствует то, что с увеличением температуры происходит усиление контакта резиновой смеси с вулканизируемым объектом и диффузии сегментов макромолекул каучука в граничный слой вулканизата. В то же время ускоряется процесс структурирования полимера, что препятствует развитию указанных процессов. В результате анализа приведенных выше факторов, влияющих на процесс вулканизации, можно сделать вывод, что параметром, характеристика которого зависит от конструктивных особенностей оборудования, является температура вулканизации.

Определение температурных полей вулканизируемых гуммировочных покрытий является одной из сложнейших задач теории теплопроводности. Для выбора оптимального режима вулканизации важно получить, как показано выше, определенную степень вулканизации покрытия, обуславливающую формирование комплекса высоких эксплуатационных и товарных качеств [4, 161]. Таким образом, в разработку режима вулканизации входят определение поля температур изделия и оценка степени вулканизации и качества покрытия.

Конструкция вулканизационного оборудования должна обеспечивать поддержание заданного температурного режима и равномерный обогрев вулканизируемого участка покрытия. Однако в современных вулканизаторах наблюдается значительный разброс температур на поверхности нагревательных плит, составляющий более 5 К, а также существенный недостаток температурных профилей. Следует отметить большую энергоемкость и металлоемкость вулканизаторов.

Таким образом, поддержание температуры на поверхности нагревающего элемента с заданной степенью точности может достигаться только в случае использования новых эффективных алгоритмов управления рассматриваемым процессом. Одним из путей интенсификации процесса вулканизации является оптимизация параметров теплоносителей и их расположения в нагревательных плитах. В промышленности при вулканизации резиновых технических изделий (РТИ) распространено применение таких теплоносителей, как горячий воздух, водяной насыщенный пар, перегретая вода. Для вулканизации при высоких температурах целесообразно использовать электрообогрев. Техническая реализация нагрева и охлаждения такова, что на греющих плитах и по контуру изделия наблюдается неравномерное распределение температур. Обогрев центральной части плит является более интенсивным, чем по краям, вследствие отвода теплоты в окружающую среду (теплопотерь). Резиновые изделия могут быть неоднородными по структуре и иметь сложную конфигурацию. Для выравнивания температурных полей используют ряд приемов: рациональное расположение нагревательных элементов, распределение нагревателей по мощности, дополнительный обогрев для компенсации боковых утечек теплоты, а также выбор малоинерционных нагревателей [113, 135]. Однако даже при оптимальном выборе параметров теплоносителей наблюдается неравномерность температурных полей в изделии вследствие ряда особенностей, обусловленных сложностью процесса вулканизации.

Анализ источников и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что процесс вулканизации при местном ремонте покрытий протекает в условиях постоянно действующих возмущений, которые условно разделим на внутренние и внешние. К внутренним возмущениям относятся вариации теплофизических характеристик вулканизата, неравномерное распределение внутренних источников теплоты, обусловленные неоднородностью состава и процентным содержанием серы в вулканизате; к внешним возмущениям относятся колебания температуры окружающей среды.

Все возмущения являются источниками или факторами неопределенности и существенно влияют на протекание технологического процесса вулканизации. При этом проведенные экспериментальные исследования подтвердили данные источников о стохастической природе возмущений.

Неоднородность состава покрытий объясняется рядом следующих причин. Для их изготовления применяют такие материалы, как резиновые смеси, латексы, и латексные смеси; смазки и вспомогательные материалы; пропиточные составы; растворители и клеи, армирующие материалы [32, 33]. В производстве используется большое количество различных смесей. Следует обратить внимание и на невысокую точность взвешивания компонентов [113].

В связи с микро- и макронеоднородностью резин, полуфабрикатов и готовых изделий их физические, механические, теплофизические характеристики изменяются от одного объекта к другому.

К основным теплофизическим характеристикам относятся: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности. Коэффициент теплопроводности является основным параметром для расчета тепловых потоков в материале и может различаться для отдельных материалов в сотни и даже тысячи раз: для металлов $\lambda=150\div300$ Вт/м·К, а для резин $\lambda=0.17\div0.4$ Вт/м·К. Для наполненных резиновых смесей теплопроводность – аддитивная величина, из теплопроводностей компонентов и линейно зависящая от их объемного содержания.

Коэффициент температуропроводности определяется как отношение теплопроводности к объемной теплоемкости и физически представляет собой коэффициент пропорциональности между скоростью изменения температуры в данной точке и скоростью изменения в ней температурного градиента [113, 135].

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод, что теплофизические характеристики вулканизируемых покрытий в условиях местного ремонта неодинаковы по объему изделия и являются неизвестными заранее величинами. Нахождение же их связано с определенными трудностями. При всем множестве принципов определения теплофизических характеристик и большом числе вариантов их реализации существенными их особенностями являются их большая трудоемкость и относительно низкая точность. Для теплофизических измерений не созданы серийно выпускаемые установки. В табл. 2.1–2.2 приведены тепловые характеристики ненаполненных вулканизатов при температурах 293–393 К и тепловые характеристики резиновых смесей.

Процесс определения теплофизических характеристик вулканизируемого покрытия осложняется тем, что резины являются гетерогенными системами, содержащими замкнутые включения отдельных компонентов, взаимопроникающие компоненты, что делает невозможным точное определение теплофизических характеристик [113, 135].

Рассмотрим данные о внутреннем тепловыделении, связанном с экзотермической реакцией, имеющей место при проведении процесса вулканизации. Выделение теплоты в ходе химической реакции вулканизации приводит к то-

му, что во время вулканизации изделия в центре нагревается выше температуры теплоносителя. Тепловой эффект сильнее проявляется по мере увеличения расстояния от поверхности покрытия. При сравнении с нагревом контрольных образцов, не содержащих вулканизирующих агентов, также отмечается разность температур. Понижение температуры образцов в начале вулканизации (по сравнению с контрольным образцом) объясняется поглощением теплоты на плавление серы. Повышение температуры тем выше, чем больше содержится в резине связанной серы (рис. 2.1–2.2).

В основу исследования оптимума вулканизации термографическим методом положены следующие характерные параметры термограммы процесса как интенсивность тепловыделений, рассчитываемая по формуле:

$$q_{\text{сумм}} = \frac{2\lambda}{\delta^2} \times \Delta T_{\text{max}}, \quad (2.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; ΔT_{max} – максимальная разность температур между внутренней и наружной поверхностями образца; δ – толщина пластины.

Таблица 2.1

**Тепловые характеристики ненаполненных вулканизатов
при T= 293-393K**

Тепловые характеристики	Температура, К					
	293	313	333	353	373	393
НК						
λ , Вт/(м·К)	0,155	0,155	0,159	0,159	0,159	0,159
$c_p \cdot 10^{-2}$, кДж/(м ³ ·К)	18,0	18,4	19,2	19,6	20,0	20,8
$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	0,861	0,834	0,801	0,781	0,761	0,734
СКБ						
λ , Вт/(м·К)	0,189	0,189	0,193	0,193	0,193	0,193
$c_p \cdot 10^{-2}$, кДж/(м ³ ·К)	19,2	20,0	20,4	20,8	21,2	21,6
$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	0,970	0,962	0,939	0,920	0,901	0,881

Таблица 2.2

Тепловые характеристики резиновых смесей

Марка	Дозировка ламповой сажи вес. ч.	Тепловые характеристики		
		λ	c_p	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с
		Вт/ (м·К)	кДж/ (м ³ ·К)	
1796	60	0,316	19,2	1,64
2566	25	0,219	18,4	1,19
1814	30	0,196	19,2	1,02
1752	-	0,176	18,8	0,934
2572	-	0,155	18,0	0,861

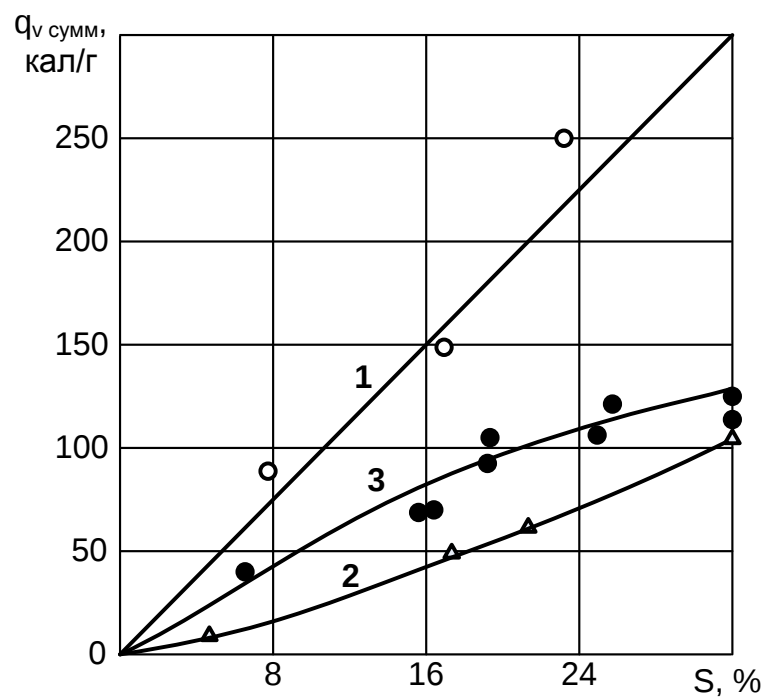


Рис. 2.1. Тепловой эффект реакции вулканизации $q_{v \text{ сумм}}$ натурального каучука и СКБ в зависимости от содержания связанной серы:
1 – для НК, 2 – для НК+СКБ, 3 – для SKII-3

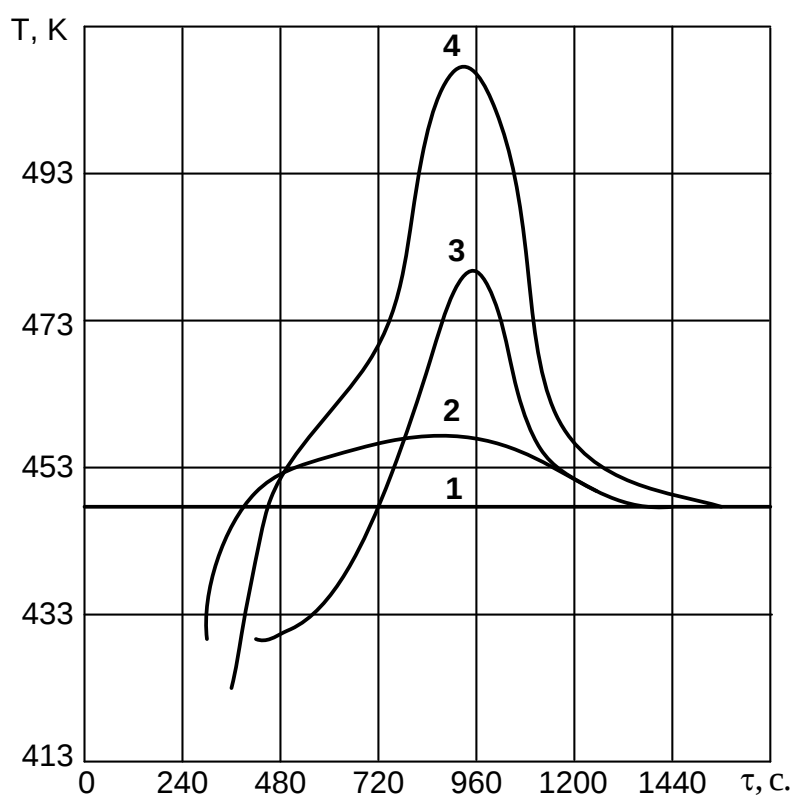


Рис. 2.2. Изменение температуры в процессе вулканизации образцов с различным содержанием серы (в %):
1 – без серы; 2 – 6; 3 – 10; 4 – 14

На скорость тепловыделений и величину теплового эффекта существенное влияние оказывают ускорители.

Исследования резиновых смесей на основе каучуков СКИ-3 и европрен-цис в интервале температур вулканизации 423–443 К при изменении дозировки ускорителя от 0,4 до 1,2 вес. ч. на 100 вес.ч. каучука. Состав смесей следующий (вес. ч. на 100 вес. ч. каучука) показали термограммы вулканизации резиновых смесей и получены данные для расчета зависимого времени $\tau_{\max}$, условного термографического плато $\Delta\tau_{\text{пл}}$ и максимальной интенсивности тепловыделений $q_{\text{всумм}}$ от температуры вулканизации и количества ускорителя. Рис. 2.3 иллюстрирует зависимость времени $\tau_{\max}$, соответствующего максимальной разности температур на термограмме, от количества ускорителя и температуры вулканизата. Наивыгоднейшим условием процесса является наименьшая продолжительность вулканизации, которая сокращается с повышением температуры и увеличением дозировки ускорителя. Наибольшее термографическое плато $\Delta\tau_{\text{пл}}$ обеспечивается при снижении температуры вулканизации и уменьшении дозировки ускорителя (рис. 2.4). Рост интенсивности тепловыделений наблюдается при понижении температуры и увеличении дозировки ускорителя (рис. 2.5).

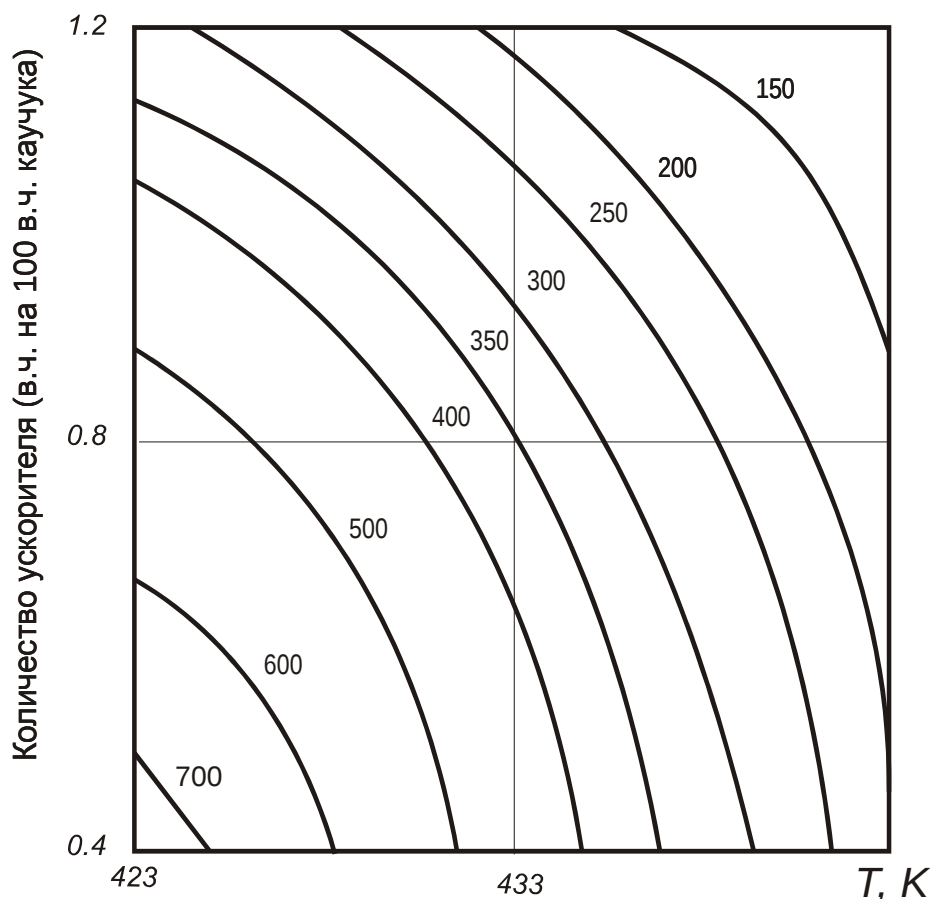


Рис. 2.3. Зависимость времени $\tau_{\max}$, соответствующего максимальной разности температур $\Delta T_{\max}$ на термограмме, от температуры и количества ускорителя воздействий со стороны внешней среды

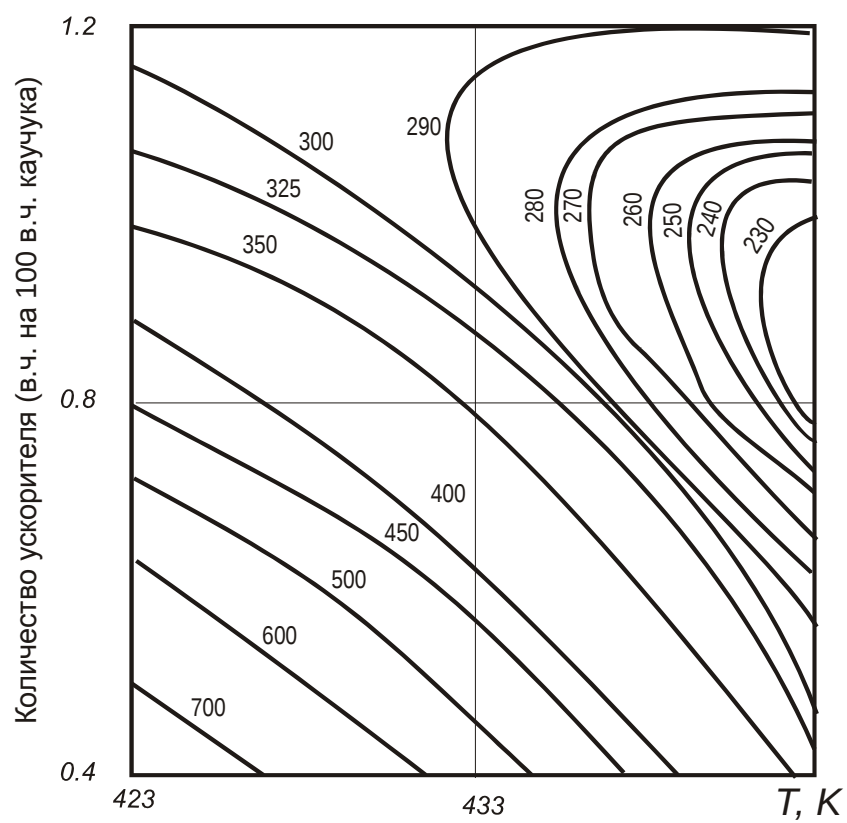


Рис. 2.4. Зависимость термографического плато $\Delta\tau_{пл}$ от температуры и количества ускорителя

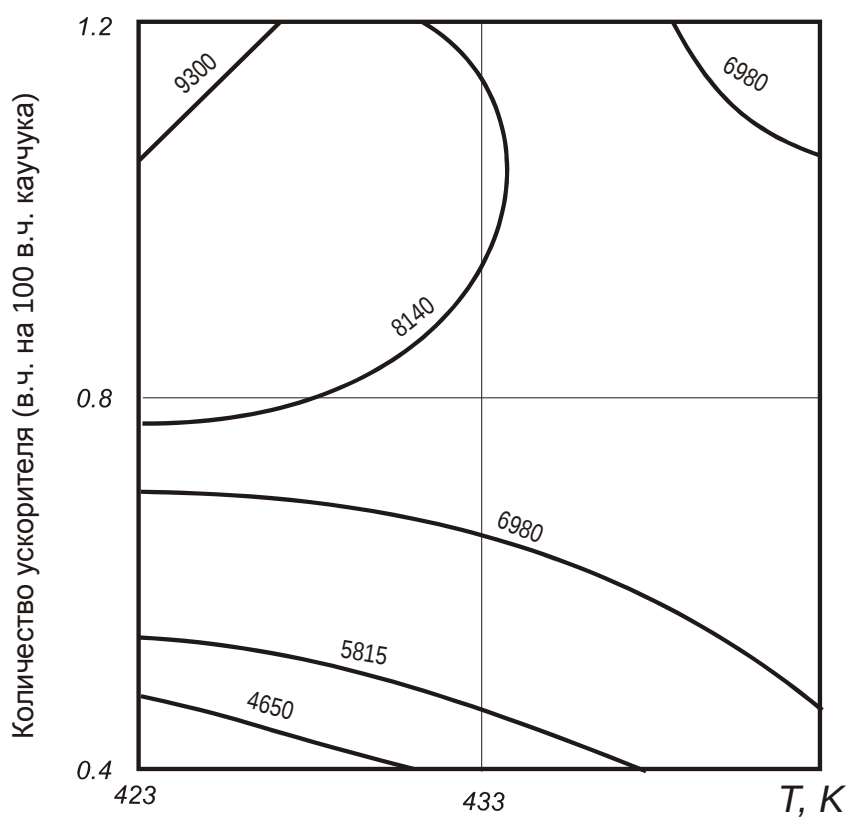


Рис. 2.5. Зависимость интенсивности тепловыделений $Q_{всумм}$, $Вт/м^2$ в максимуме термограммы от температуры и количества ускорителя

Методом термографических балансов для вулканизации монолитных пластин установлено, что термограммы описываются зависимостями вида:

$$\Delta T = A \cdot \tau^B \cdot \exp(-D \cdot \tau), \quad (2.2)$$

где ΔT – разность температур на внутренней и внешней поверхностях пластины, °C; A, B, D – известные коэффициенты для резины.

Из дифференциального уравнения теплопроводности интенсивность тепловыделений g_v может быть рассчитана по формуле:

$$g = -\lambda \nabla^2 + c\rho \partial T / \partial \tau, \quad (2.3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности резины, $c\rho$ – объемная теплоемкость резины, ∇^2 – оператор Лапласа.

В зависимости от состава резин тепловые эффекты могут принимать значения, заметно влияющие на температурные поля в вулканизируемых изделиях. Внутри восстанавливаемого покрытия прирост температур за счет тепловыделений может составлять до 15 К.

Однако процентное содержание серы и ускорителей, как показано выше, неодинаково даже для резин одной и той же марки, что делает невозможным точное определение теплового эффекта реакции вулканизации.

Условия незамкнутого пространства при местном ремонте покрытий приводят и к необходимости учета случайных возмущений.

Таким образом, местный ремонт покрытий гуммировочных объектов протекает в условиях случайных внутренних (теплофизические характеристики, процентное содержание серы в вулканизате) и внешних (температура окружающей среды) возмущений, которые будем рассматривать как факторы неопределенности. Процесс вулканизации при ремонте местных повреждений недостаточно освещен в современной литературе.

Разработку режимов вулканизации восстанавливаемых покрытий часто проводят непосредственно на технологическом оборудовании, что связано со значительными трудностями и затратами. Известные математические модели для описания процесса восстановления защитных покрытий построены без учета указанных выше возмущающих воздействий, что не позволяет осуществить адекватное моделирование этого процесса. В литературе, посвященной стохастическим системам, проблема вулканизации не рассматривалась.

2.2. Состояние вопроса математического моделирования теплопереноса при местном ремонте гуммировочных покрытий

Одной из наиболее важных инженерных задач теплофизики является расчет температурных полей в конструкции вулканизационного оборудования (аппарата) или вулканизуемом изделии, теплофизические характеристики которых зависят от температуры. Решение такой нелинейной задачи позволяет:

- получить достоверную и объективную информацию о распределении температуры внутри изделия и тем самым осуществить неразрушающий контроль теплового процесса [113, 135];
- заменить экспериментальную разработку режимов вулканизации расчетным проектированием, упростить аппаратуру контроля и регулирования температуры вулканизируемого изделия [113, 135];
- прогнозировать тепловые процессы при интенсификации режимов вулканизации;
- моделировать процессы вулканизации изделий с целью неразрушающего контроля их качества [65, 135];
- исследовать внешний теплообмен вулканизационного оборудования вулканизируемых резинотехнических изделий, процесс нагрева и охлаждения многослойных систем [65, 135];
- рассчитывать продолжительность вулканизации изделий в различных сечениях в широком диапазоне температур и оптимумов вулканизации, теплофизических свойств, геометрических параметров [65, 135];
- рассчитывать режимы нагрева изделий при вулканизации с ограничениями на температуру поверхности и температурный градиент [113, 135];
- разработать методы определения теплофизических характеристик полимеров в зависимости от температуры [164].

Таким образом, теплофизические исследования процессов вулканизации определяют направления и перспективы развития технологии и оборудования для вулканизации резинотехнических изделий [114].

В [113] рассматриваются инженерные проблемы теплопередачи применительно к тепловому процессу вулканизации резиновых изделий. Характеризуются теплофизические свойства материалов резинового производства и методы их определения. Приводятся общие сведения об основных методах расчета температурных полей; рассматриваются методы разработки тепловых режимов вулканизации изделий на основе расчетов или экспериментального определения температурных полей в вулканизируемых изделиях. Здесь предложены лишь общие тенденции развития технологических режимов и способов вулканизации, рассмотренные в книге расчеты и математическое моделирование температурных полей требуют уточнения с учетом дву- и трехмерности тепловых потоков. Предложенные математические модели не учитывают вариации теплофизических свойств вулканизата.

В [135] приведены сведения о теплофизических свойствах материалов, применяемых при изготовлении гуммировочных покрытий, об основных методах их определения, указывается, что теплофизические исследования процесса вулканизации определяют направления и перспективы развития технологии и оборудования для вулканизации покрытий и резинотехнических исследований.

В [114] описываются расчетные методы разработки тепловых режимов вулканизации резиновых изделий. Рассматривается проблема нестационарно-

го теплообмена и ее развитие применительно к стадии довулканизации. Изложены принципы построения интенсифицированных режимов вулканизации и приведены примеры неразрушающихся методов контроля качества изготовления изделий по фактическим параметрам, процесс на основе расчетов температурных полей и степени вулканизации резинового изделия с помощью вычислительных машин и лабораторного эксперимента, более экономичного по сравнению с методами разработки режимов вулканизации на изделиях и технологическом оборудовании.

Расчет температурных полей в вулканизируемых изделиях произведен только для тел простой геометрии. Изделия более сложной формы были представлены в виде комбинаций классических форм. В предложенных моделях не учитываются теплота реакции вулканизации (тепловыделениях), коэффициенты теплоотдачи принимаются постоянными. Указанная система допущений не позволяет использовать полученные приближенные решения для практических расчетов крупногабаритных резиновых изделий и изделий, имеющих сложную конфигурацию.

В [20] для прямых задач переноса теплоты и массы вещества, описанных параболическими системами, решения представлены в интегральной форме с ядрами в виде матриц Грина. Обсуждается вопрос применения интегральных характеристик физических величин для решения обратных задач восстановления коэффициентов теплопереноса.

При проведении расчетов были приняты допущения о не зависимости термодинамических характеристик и коэффициентов переноса от координат тела. Конкретная конфигурация тела не учитывалась. Вместо этого вводился коэффициент формы, различный для классических геометрических форм – цилиндра, шара и неограниченной пластины. Матрица Грина получена для граничных условий первого, второго и третьего рода. Однако на практике часто возникает необходимость использования граничных условий четвертого рода, т.е. задано распределение потенциалов на поверхности тела и плотность потоков теплоты как функции времени для каждой точки поверхности тела. При определении теплофизических характеристик предполагается, что они не зависят от пространственных координат. Внутренние источники теплоты описываются известной формулой температуры. Для определения искомых температурных зависимостей теплофизических характеристик необходимо знать температуру и тепловой поток как функцию времени в некотором сечении изделия. Это ведет к появлению погрешностей, связанных с экспериментальным измерением подынтегральной функции, и погрешностей приближенного вычисления интегральных характеристик первого и второго типов.

В [58] описаны методы определения коэффициентов тепло- и температуропроводности твердых материалов при низких температурах, основанные на решении уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами. Тепловой контакт изделия с источниками теплоты считается идеальным. Такой подход к определению теплофизических характеристик требует дополни-

тельных исследований, связанных с оценкой влияния отклонений условий эксперимента на точность определения коэффициентов тепло- и теплопроводности, поскольку ни одно из названных выше условий принципиально не выполняется.

В [151] для приближенного решения ряда задач использовался метод редукции нелинейного уравнения переноса к интегральному уравнению и метод последовательных приближений. Во второй части книги рассматриваются особенности применения метода дифференциальных неравенств к оценке решений нелинейных задач теплопроводности для некоторых классов твердых материалов. Аналитическое задание мажорант областей позволяет получить максимально строго гарантированные оценки. Для тел сложной конфигурации невозможно получить точное решение уравнения переноса теплоты. Поэтому для построения решения задачи применяют приближенные методы. Одним из них является способ деформации тела, заключающийся в сведении тела сложной конфигурации к телу классической формы: пластине конечных размеров, ограниченному цилиндру или слоистой цилиндрической оболочке при постоянных объеме тела и тепловом потоке на его поверхности. Площадь поверхности простого тела меньше площади поверхности тела сложной формы, поэтому для упрощенного случая тепловой поток увеличивается в e раз, e называют "степенью искажения". Она равна отношению площадей поверхностей тел сложной и простой формы. Способ деформации применяют для расчета "деформированных тел" и коррекции граничных условий через коэффициенты e . Метод основан на принципе Сен-Венана для задач теплопроводности.

Расчетные размеры тел классической формы определяются следующими положениями: температурное поле одномерного тела сложной формы тождественно полю неограниченной пластины, температурное поле двумерного тела сложной формы тождественно полю неограниченного цилиндра, температурное поле трехмерного тела сложной формы тождественно полю шара. Подобные преобразования позволяют получить приближенное решение задач теплопроводности.

В источниках [93, 94] показан приближенный метод решения прямых нелинейных задач теплопроводности для тел, имеющих простейшую форму, при граничных условиях первого, второго и третьего рода и сложных начальных условиях. В основу метода положен способ кусочно-линейной или кусочно-ступенчатой аппроксимации граничной функции, которая задана графически в виде произвольной функции времени, и зависимости температуры от координат с последующим разбиением их по временным интервалам и расчетным слоям, предполагая, что теплофизические характеристики тел изменяются с изменением температуры скачкообразно при переходе от одного участка разбиения к другому. Приближенное аналитическое решение прямой нелинейной задачи теплопроводности (ПНЗТ) находится с помощью известного классического метода с применением теоремы Дюамеля и метода припасовывания для "сшивания" решений ПНЗТ по отдельным "полям" при пере-

ходе от одного интервала разбиения к другому. Чтобы найти частное ПНЗТ при произвольных граничных условиях на участках разбиения по временным интервалам используют переходные функции, свойственные отдельному участку разбиения, которые являются функциями времени, координат, теплофизических характеристик.

Температурная зависимость теплофизических свойств задается в виде ступенчатой функции. Указанные упрощения формы и выражения теплофизических характеристик изделия приводят к значительным погрешностям при расчете его температурных полей.

В [83] изложены результаты исследований в области создания методов расчета тепловых и вулканизационных процессов, оценки тепловых свойств эластомерных композиций. Предложенный алгоритм расчета температурных полей в вулканизируемом изделии, лежащий в основе пакета прикладных программ VLC, предусматривает наличие информации о точном содержании ингредиентов в резиновой смеси. Ввод данных по составу эластомерной композиции позволяет рассчитывать теплофизические характеристики материала и температурных полей для изделий элементарных геометрических форм.

Задачи интенсификации процесса местного ремонта до недавнего времени решались без рассмотрения существа происходящих в вулканизаторе физико-химических процессов и возможности оптимизации их режимов.

В [65] разработана математическая модель процесса вулканизации и найдены законы управления для промышленности различных типов размеров без учета действующих возмущений. Отмечается сложность определения теплофизических характеристик ремонтируемых изделий и необходимость решения этой задачи. Проблема идентификации и управления стохастическими системами занимает в настоящее время значительное место в теории и практике управления, однако для процесса местного ремонта покрытий она до сих пор не решена.

Работа [102] посвящена теории управления случайными процессами. Излагаются основные понятия теории марковских процессов, даются определения стохастических функций Ляпунова и стохастической устойчивости, рассматриваются задачи устойчивости, оптимального стохастического управления и синтеза систем управления, задачи исследования стохастических дифференциальных моделей систем управления.

В [96] дано систематическое изложение методов теории случайных функций, нашедших применение в теории автоматического управления в области проектирования и управления артиллерийским огнем и навигационными системами. Авторы ограничиваются почти исключительно применением теории к линейным стационарным и нестационарным задачам автоматического управления. Изложенный в книге материал по большей части возник в связи с исследованиями конкретного и практического характера, проводившимся в лаборатории управления и контроля Массачусетского технологического института.

В [78] отмечается, что в современных условиях научно-технического прогресса, усложнения задач, решаемых динамическими системами, и повышенных требований к ним в связи со случайным характером полезных сигналов и возмущений, а также условий их функционирования является актуальной проблема создания оптимальных автоматических или полуавтоматических систем. В данной книге изложены теоретико-вероятностные методы аналитического и алгоритмического синтеза оптимальных стохастических систем различного назначения.

В [48] исследованы вопросы, связанные с понятием технологического объекта и методами получения информации об объекте. При этом рассматриваются как статический, так и динамический режимы его работы. Изложены методы обработки случайных величин. Во втором разделе книги приведен анализ существующих методов интегрирования, сформулировано понятие степени близости функций, рассмотрены основные принципы теории приближений. Третий раздел включает конкретные методы для математического моделирования объектов, построенного с использованием критериев сильного приближения. Отдельно рассмотрены методы статической и динамической идентификации объектов, вопросы построения моделей объектов с использованием экспериментальных данных, организация сбора информации об объекте при полном факторном эксперименте. Данный метод осложняется при наличии случайных помех и приводит к трудностям вычислительного характера.

В [84] изложена теория анализа параметрической оптимизации и оптимального управления стохастическими объектами управления. Рассмотрены только линейные системы с дискретным и непрерывным временем. В первых главах книги дан краткий обзор общих представлений и некоторых выводов теории случайных процессов. Рассмотрены отдельные виды стохастических процессов, такие как стационарные процессы, марковские процессы, процессы второго порядка и процессы с независимыми приращениями. Проведен анализ динамических систем, входными сигналами которых являются случайные процессы. Приведено решение одной из задач самого простого класса стохастического программирования: линейной системы с одним входом и одним выходом и с критерием линейного среднеквадратичного отклонения на выходе в устойчивом состоянии. Поставлена общая задача стохастического управления для линейных систем при квадратичном критерии.

В [86] изложены основы теории идентификации и оценки параметров сложных физико-химических систем с учетом их характерных особенностей: распределенности в пространстве и времени, нелинейности математических описаний кинетики и гидродинамики, нестационарности и функционирования в условиях случайных неконтролируемых возмущений. Отмечается, что построение адекватного описания химико-технологических процессов часто сдерживалось из-за отсутствия комплексного подхода к настоящей проблеме, основанного на правильном учете стохастической сущности явлений, сопровождающих всякий химико-технологический процесс. В основе развиваемого

в книге подхода лежит метод приведения функциональных операторов объектов к типовым интегральным операторам. Большинство непрерывных процессов химической технологии можно рассматривать как марковские стохастические системы, динамические свойства которых близки к системам с конечной "памятью", в связи с этим для их анализа можно широко использовать мощный аппарат аналитических случайных процессов и на этой основе создавать эффективные алгоритмы решения задач идентификации и оценки параметров состояния химико-технологических процессов. В книге рассмотрены многочисленные примеры применения предлагаемой методики, приведены алгоритмы оптимизации стохастических систем с распределенными параметрами для процесса отжига листового железа в шахте машины вертикального вытягивания, процесса фильтрации.

В работах [137, 145, 152, 174] изложена общая теория решения основных задач расчета оптимальных динамических характеристик систем автоматического управления при наличии случайных возмущений.

В [59] отмечается, что до настоящего времени полностью не решена проблема анализа и синтеза технических, физических и экономических систем в реальных условиях их функционирования, с учетом стохастичности воздействий, отклика и самой системы. Освещаемую в книге проблему можно сформулировать следующим образом – разработка теоретических и практических методов анализа и синтеза систем, описываемых стохастическими параметрическими моделями с погрешностями в исходных данных с применением метода конфлюэнтного анализа.

Монография [30] дает унифицированную и математически строгую теорию широкого класса задач динамического программирования и стохастического оптимального управления с дискретным временем. В книге содержится анализ моделей динамического программирования в рамках унифицированной схемы, применяемой к детерминированным объектам управления, стохастическим объектам управления, минимаксному управлению, последовательным играм и другим областям.

При построении математических моделей и поиске законов управления при местном ремонте не учитывались действующие на процесс возмущения. Поэтому известные математические модели для описания не позволяют осуществить адекватное моделирование этого процесса и, несмотря на использование вулканизационных установок для местного ремонта, до настоящего времени не разработано научно обоснованной методики управления процессом вулканизации, позволяющей с достаточной точностью обеспечивать заданный температурный режим в изделии.

Следует отметить, что нарушение необходимого температурного режима приводит к нерациональному использованию мощности нагревателей, что недопустимо в условиях высокой энергоемкости местного ремонта покрытий.

Глава 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ПОКРЫТИЙ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА

3.1. Алгоритмы моделирования тепловыми технологическими процессами вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий

Вопросы эффективной эксплуатации гуммированных объектов как одной из подсистем химического производства непосредственно связаны с проведением текущих и капитальных ремонтов [8, 13, 135, 185].

Периодичность ремонтов обуславливается режимами эксплуатации, состоянием гуммированного объекта, а также качеством его ремонта. В эксплуатации химических аппаратов и машин как новое, так и отремонтированное гуммировочное покрытие занимает не последнее место. Оно должно выдерживать воздействие агрессивной среды, температуры, механического воздействия и другие факторы. С точки зрения экономики, гуммировочное покрытие должно иметь как можно больший срок службы при меньших затратах в производстве. Срок службы гуммировочного покрытия в целом и долговечность его конструктивных элементов зависит от многих условий. Одни из них связаны с производством, другие – с эксплуатацией покрытий. На протяжении последних лет наряду с повышением прочности гуммировочного покрытия непрерывно возрастает роль эксплуатационных факторов, влияющих на долговечность основных его элементов. Решающее значение в этом отношении имеет рост температурных пределов эксплуатации покрытия, концентрации агрессивной среды и все возрастающие требования по безопасности обслуживания. Таким образом, и в производстве гуммировочных покрытий, и в условиях их эксплуатации происходят перемены, в силу которых ремонт приобретает все большее значение. Важным технологическим звеном ремонта гуммировочного покрытия является его вулканизация, которая представляет собой один из наиболее важных и сложных теплообменных процессов, протекающих при меняющихся по времени тепловых потоках, зависящих от многих факторов.

Структура математического описания процесса теплообмена гуммировочного покрытия при местном ремонте представлена на рис. 3.1.

Представим математическую постановку задачи исследования, а также разработаем математическую модель процесса индукционного нагрева.

Разработка адекватных математических моделей процессов индукционного нагрева материала является весьма сложной проблемой. Значительные успехи в ее решении достигнуты в первую очередь благодаря работам В.П. Вологодина, Л.С. Неймана, А.Е. Слухоцкого, О.В. Тозони, В.С. Немкова, Н.А. Павлова, С.А. Горбаткова, В.Б. Демидовича, А. Стохниола и др.



Рис. 3.1. Структура математического описания процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочных покрытий

Математическая модель процесса индукционного нагрева состоит из взаимосвязанных через нелинейные коэффициенты, существенно зависящие от температуры:

- электромагнитной модели, решение которой позволяет получить источники теплоты;
- тепловой модели, которая использует источники теплоты и вычисляет распределение температуры в нагреваемом теле.

Подробно рассмотрим постановку электромагнитной и тепловой задачи. Особое внимание уделим граничным условиям вышеупомянутых математических моделей, а также взаимной связи между ними. В качестве эталонных моделей при моделировании процессов используем существующие в литературе решения. Рассмотрим теоретические подходы, отражающие реологические свойства резиноподобных материалов.

Задачи подобного типа встречаются в различных технологических процессах, примером которых может быть процесс вулканизации.

Структура математической модели процесса теплообмена при местном ремонте представлена на рис. 3.2.

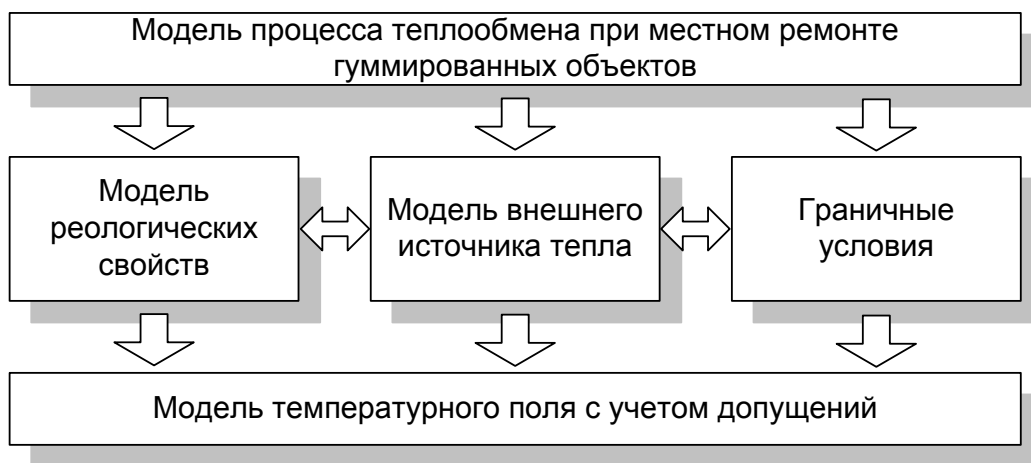


Рис. 3.2. Структура математической модели процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочного покрытия

Наиболее важными вопросами при разработке математической модели процесса вулканизации являются вопросы осуществления нагрева ремонтируемого участка и влияние реологических свойств материала накладки на качественные показатели отремонтированного изделия.

Наиболее перспективным является индукционный нагрев, обладающий следующими характеристиками: высоким качеством нагрева, в силу быстроты процесса; возможностью достижения широкого диапазона температур; возможностью точности нагрева; гибкостью и высокой точностью управления, вследствие малой инерционности процесса; возможностью точного дозирования энергии; наличием нескольких каналов управления; сбережением энергетических ресурсов за счет уменьшения потерь в процессе нагрева; повышением качества изделия; увеличением производительности; уменьшением вредных воздействий на окружающую среду и улучшением условий труда обслуживающего персонала [65].

Перечисленные выше достоинства процесса индукционного нагрева открывают возможность его практической реализации при ремонте гуммировочных покрытий.

Математическая модель внешнего источника теплоты

Для плоскопараллельного поля уравнения Максвелла имеет вид:

$$\begin{aligned} \nabla(1/\gamma(t))\nabla H^{(i)} - j\omega\mu H^{(i)} &= 0, \\ H_T(x) &= H_0 = \text{const}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где H – напряженность магнитного поля; γ – удельная электропроводность.

Уравнение (3.1) можно записать в интегральном виде:

$$2\pi r_Q \rho_Q I_Q + j\omega \int_{S_1} \mu_{QP} I_P dS_T + j\omega \int_{S_2} \mu_{QT} I_T dS_T = U_Q, \quad (3.2)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость; r_Q – радиус Q-го кольца индуктора; ω – круговая частота; ρ_Q – удельное сопротивление; I_Q , I_P , I_T – плотность тока в Q-м, P-м и T-м кольце индуктора; μ_{QP} , μ_{QT} – коэффициент вза-

имной индукции для различных колец индуктора; U_Q – напряжение в Q-м кольце индуктора.

Математическая модель температурного поля с учетом допущений

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda(T) \nabla(T) + W, \quad (3.3)$$

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(r, z, t), \quad (3.4)$$

$$T(r, z, t_0) = T_0(r, z).$$

Граничные условия:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = f_L(T); \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = f_0(T);$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = f_R(T); \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3.5)$$

$$f_s(T) = \alpha_s(T)(T - T_s) - \sigma \varepsilon_i \varepsilon_j \varphi_{ij}(T)(T_i^4 - T_{\text{фj}}^4),$$

$$S = \{L, R, 0\},$$

где λ – коэффициент теплопроводности; z – координата; R – термическое сопротивление; L – длина индуктора; σ – постоянная Больцмана; α_s – коэффициент теплообмена; $\varepsilon_i; \varepsilon_j$ – коэффициенты черноты плиты и футеровки; φ_{ij} – средний угловой коэффициент поверхности индуктора.

3.2. Математическая модель теплового процесса вулканизации гуммировочных покрытий с учетом факторов неопределенности при местном ремонте химических аппаратов и оборудования

Исследования, представленные в предыдущих разделах, показали, что процесс вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий протекает в условиях постоянно действующих возмущений, к которым относятся вариации теплофизических характеристик вулканизата, неравномерное распределение внутренних источников теплоты, обусловленные неоднородностью состава и процентным содержанием серы в покрытии, а также колебания температуры окружающей среды.

Известные математические модели и системы автоматического управления процессом вулканизации не учитывают перечисленные факторы неопределенности, что приводит к значительным отклонениям температуры от заданного режима и, как следствие, к нарушению требуемого комплекса физико-механических свойств отремонтированного изделия и нерациональному использованию электроэнергии.

Представим процесс вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий с действующими тепловыми потоками на рис. 3.3.

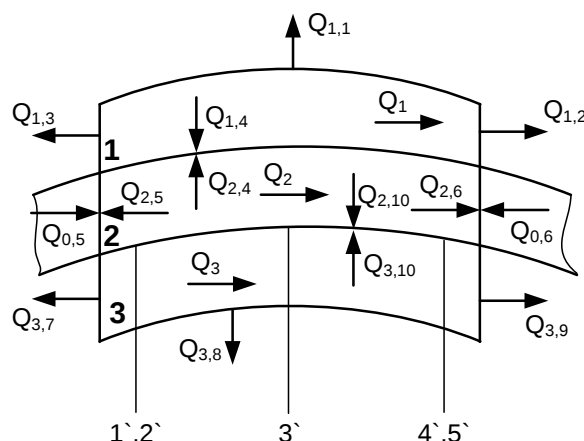


Рис. 3.3. Направления тепловых потоков в процессе вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий:

1, 3 – нагревательные плиты; 2 – ремонтируемый участок гуммировочного покрытия;
 $Q_{i,d}$, $i=1..3$, $d = 1..10$ – тепловые потоки, где d – номер поверхности теплообмена;
 $1'-5'$ – точки контроля температуры.

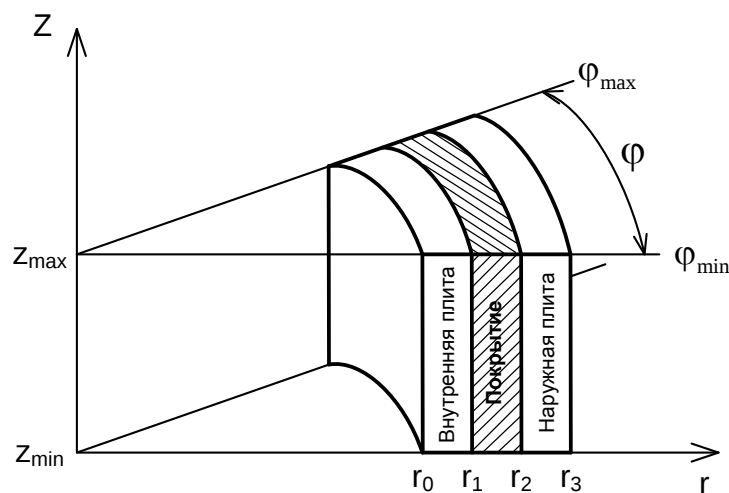


Рис. 3.4. Схема процесса вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий в цилиндрических координатах

При разработке математической модели процесса вулканизации воспользуемся цилиндрической системой координат, адекватной геометрической форме нагревательных плит и ремонтируемого гуммировочного покрытия. Схематично объект «гуммировочное покрытие – нагревательные плиты» в цилиндрических координатах представлен на рис. 3.4.

На основании теоретических аспектов теплообмена, описания процесса вулканизации, влияния факторов неопределенности, вопроса математического моделирования теплопереноса и местного ремонта (представленных в главе 2) примем следующие допущения.

1. Теплофизическими характеристиками, обуславливающими режим нагрева плит и сегмента гуммировочного покрытия, являются теплопроводность, теплоемкость, плотность их материалов.

2. Теплопроводность материала нагревательных плит одинакова во всех направлениях.

3. Внутри нагревательных плит находятся распределенные источники теплоты в виде нагревательных элементов.

4. Тепловой контакт между участком гуммировочного покрытия и нагревательными плитами является идеальным, что обеспечивается конструктивными характеристиками вулканизатора.

Распределение температуры в системе «нагревательные плиты – гуммировочное покрытие» описывается уравнениями теплопроводности.

Теплофизические характеристики, в частности коэффициент теплопроводности (λ), являются важнейшими показателями эластомеров и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства резиновых изделий, особенно многослойных, работающих в условиях деформации. Коэффициент теплопроводности – это одна из теплофизических констант, используемых при разработке и научном обосновании режимов смещения и вулканизации эластомеров.

Сведения о влиянии степени вулканизации и других факторов на теплопроводность резин [113–114] противоречивы. В связи с важностью данной проблемы была исследована теплопроводность ненаполненных вулканизатов на основе СКД, СКС-30АРКП и СКН-26М, состав которых приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Состав ненаполненных вулканизатов

Ингредиент	СКД	СКС-30АРКП	СКН-26М
Сера	2,0	2,0	2,0
Сульфенамид Ц	0,7	-	1,0
Каптакс	-	1,0	-

Коэффициент теплопроводности определяли в стационарном тепловом режиме на приборе ИТ-3, разработанном в Институте технической теплофизики АН УССР. Эффективную концентрацию поперечных связей (n_p) вулканизатов оценивали по методике Шварца [31, 74]. Приближенные зависимости λ - n_p для ненаполненных вулканизатов устанавливали методом парной корреляции на ЭВМ. При этом для ненаполненных вулканизатов на основе СКД предложена параболическая зависимость, для вулканизатов на основе СКС-30АРКП и СКН-26М – кубические зависимости:

$$\lambda=0,2787-0,0198n+0,0022n^2; \text{ ко}=0,9997,$$

$$\lambda=0,2700-0,0150n+0,0007n^2+0,0005n^3; \text{ ко}=0,9927,$$

$$\lambda=0,2880-0,0094n+0,0013n^2+0,0001n^3; \text{ ко}=0,9994,$$

где $n = n_p/10^{19}$; ко – корреляционное отношение.

Данные о соотношении фактических и расчетных коэффициентов теплопроводности приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Фактические (n_3^Φ , λ^Φ) и расчетное (λ^P) значения коэффициентов теплопроводности вулканизатов на основе различных каучуков

Номер точки	$n_3^\Phi \cdot 10^{19}$	λ^Φ , Вт/(м·К)	λ^P , Вт/(м·К)	$\Delta\lambda$, Вт/(м·К)	Относительная ошибка, %
СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАУЧУК ДИВИНИЛЬНЫЙ (СКД)					
1	0,001000	0,278700	0,278692	0,000008	0,002855
2	0,800000	0,265000	0,265022	-0,000022	0,008255
3	1,440000	0,256000	0,256137	-0,000137	0,053376
4	2,040000	0,250000	0,249464	0,000536	0,214553
5	2,520000	0,244700	0,245280	-0,000580	0,079082
6	3,200000	0,241300	0,241109	0,000191	0,079082
7	5,000000	0,240000	0,240011	-0,000011	0,004557
СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАУЧУК БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫЙ СКС-30АРКП					
1	0,001000	0,270000	0,269984	0,000016	0,005949
2	0,710000	0,260000	0,259898	0,000102	0,039270
3	1,440000	0,250700	0,251519	-0,000819	0,326684
4	2,040000	0,249000	0,247016	0,001984	0,796937
5	2,400000	0,244200	0,245658	-0,001458	0,597127
6	3,200000	0,247300	0,247125	0,000175	0,070583
СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАУЧУК СКН-26М					
1	0,001000	0,288000	0,287959	0,000041	0,014280
2	1,440000	0,276700	0,276782	-0,000082	0,029598
3	3,200000	0,268300	0,268364	-0,000064	0,023926
4	5,000000	0,264000	0,263532	0,000468	0,177414
5	6,160000	0,260700	0,261327	-0,000627	0,240476
6	7,000000	0,260000	0,259737	0,000263	0,101294

Влияние эффективной концентрации поперечных связей на коэффициент теплопроводности вулканизатов иллюстрирует рис. 3.5. С увеличением эффективной концентрации поперечных связей λ монотонно уменьшается до оптимальной концентрации ($3 \cdot 10^{19}$ для СКД; $2 \cdot 10^{19}$ для СКС-30АРКП; $6,5 \cdot 10^{19}$ для СКН-26М) и затем практически не изменяется. Из таблицы видно, что λ наполненных вулканизатов ниже, чем λ резиновых смесей.

Как известно [111–114], теплопроводность – это перенос теплоты через тело. Большую роль здесь играет тепловое движение частиц и, в частности, сегментов макромолекул. С увеличением n_3 уменьшается сегментальная подвижность макромолекул и теплопроводность снижается, при оптимальном значении n_3 теплопроводность не изменяется (рис. 3.6). Это предположение подтверждается тем, что теплопроводность резиновых смесей выше, чем λ вулканизатов.

Большое влияние на теплопроводность оказывают также неоднородность вулканизационной сетки, состав и строение полимеров. Так, λ смесей и вулканизатов на основе СКН-26М больше, чем для образцов на основе СКД и СКС-30АРКП.

Установлено, что с увеличением эффективной концентрации поперечных связей коэффициент теплопроводности уменьшается и по достижении оптимального значения практически не изменяется. Значительное влияние на него оказывают также состав и структура эластомеров.

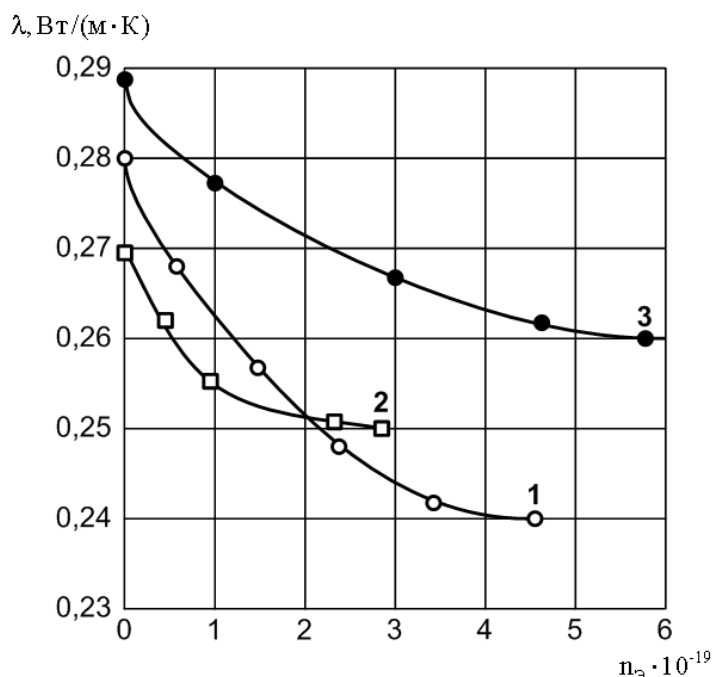


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) вулканизатов от эффективной концентрации поперечной связи ($n_{\text{э}}$):
1 – СКД; 2 – СКС-30АРКП; 3 – СКН-26М

Для учета стохастических вариаций теплофизических свойств вулканизируемого участка гуммировочного изделия введем в уравнения математической модели случайные составляющие Δc , $\Delta \rho$, $\Delta \lambda$ с известными статистическими характеристиками; для учета возмущений, обусловленных неравномерностью распределения внутренних источников теплоты и колебаниями температуры окружающей среды – Δq и $\Delta \xi$ соответственно:

$$(c_i(T_i) + \Delta c_i)(\rho_i(T_i) + \Delta \rho_i) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \text{div}((\lambda_i(T_i) + \Delta \lambda_i) \text{grad}(T_i)) + Q_i(T_i, \tau) + \Delta q_i, \quad (3.6)$$

где τ – текущее время нагрева; r , φ , z – полярные координаты;

$$\tau_0 \leq \tau \leq \tau_1, r_1 < r < r_2, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, z_1 < z < z_2;$$

c_i , ρ_i , λ_i , $i=1..3$ – соответственно теплоемкости, плотности, теплопроводности материалов нагревательных плит и нагреваемого гуммировочного покрытия; T_i , $i=1..3$ – температуры нагревательных плит и гуммировочного покрытия, К; Q_i , $i=1,3$ – мощности распределенных источников теплоты в плитах, Дж/м³; $i=1..3$ – соответственно для нагревательных плит и гуммировочного покрытия; $j=1,2$ – соответственно для наименьшего/наибольшего радиуса (угла φ , высоты z) плиты или нагреваемого гуммировочного покрытия; при $i=1,3$ Δc_i , $\Delta \rho_i$, $\Delta \lambda_i$, Δq_i равны нулю.

Соблюдаются начальные и граничные условия:

$$T_i(r, \varphi, z, \tau)|_{\tau=0} = T_0 + \Delta\xi, i = 1..3 \quad (3.7)$$

$$(\lambda_i(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_i) \frac{\partial T_i(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{r=r_{ij}} = \alpha_i(T_i(r, \varphi, z, \tau) - (T_{0i} + \Delta\xi)) \Big|_{r=r_{ij}}$$

$$i = 1, j = 2; i = 3, j = 1,$$

$$(\lambda_i(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_i) \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{\phi=\phi_{ij}} = \alpha_i(T_i(r, \varphi, z, \tau) - (T_{0i} + \Delta\xi)) \Big|_{\phi=\phi_{ij}} \quad (3.8)$$

$$i = 1, j = 1; i = 1, j = 2; i = 3, j = 1; i = 3, j = 2,$$

$$(\lambda_i(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_i) \frac{\partial T_i(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{z=z_{ij}} = \alpha_i(T_i(r, \varphi, z, \tau) - (T_{0i} + \Delta\xi)) \Big|_{z=z_{ij}}$$

$$i = 1..3, j = 1; i = 1..3, j = 2,$$

$$T_2(r, \varphi, z, \tau)|_{r=r_{ij}} = T_i(r, \varphi, z, \tau)|_{r=r_{ij}}$$

$$(\lambda_2(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_2) \frac{\partial T_2(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{r=r_{ij}} = (\lambda_i(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_i) \frac{\partial T_i(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{r=r_{ij}} \quad (3.9)$$

$$i = 1, j = 1; i = 3, j = 2,$$

$$T_2(r, \varphi, z, \tau)|_{\varphi=\varphi_j} = T_0|_{\varphi=\varphi_j}$$

$$(\lambda_2(T_i(r, \varphi, z, \tau)) + \Delta\lambda_2) \frac{\partial T_2(r, \varphi, z, \tau)}{\partial n} \Big|_{\varphi=\varphi_j} = (\lambda_2(T_0) + \Delta\lambda_2) \frac{\partial T_0}{\partial n} \Big|_{\varphi=\varphi_j}, j = 1; j = 2, \quad (3.10)$$

где n – вектор нормали к поверхности нагревательных плит.

Предложена структура математической модели, представляющая собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процесс вулканизации при местном ремонте эластомерных обкладок в условиях неопределенности.

Для определения законов распределения случайных величин была проведена предварительная обработка данных – значений коэффициентов теплопроводности, удельных теплоемкостей, плотностей гуммировочных смесей, выпускаемых химической промышленностью.

Проверка соответствия распределения случайных величин $\Delta c_i, \Delta \rho_i, \Delta \lambda_i, \Delta q_i, \Delta \xi$ нормальному закону производилась в соответствии с рекомендациями, изложенными в [31, 122].

Для не очень больших выборок $n < 120$ необходимо вычислить среднее абсолютное отклонение (CAO) по формуле

$$CAO = \sum |x_i - \bar{x}| / n,$$

где x_i – значение случайной величины при i -ом наблюдении, $\bar{x}$ – среднее значение наблюдаемого признака.

Для выборки, имеющей нормальный закон распределения, должно быть справедливо выражение

$$|CAO/\bar{s} - 0.7979| < 0.4/\sqrt{n}.$$

Быструю проверку гипотезы нормальности распределения для сравнительно широкого класса выборок $3 < n < 1000$ можно выполнить используя размах варьирования R , подсчитывая отношение $R/\bar{s}$ и сопоставляя его с критическими верхними и нижними границами ($\bar{s}$ – среднеквадратичное отклонение). Если $R/\bar{s}$ меньше нижней или больше верхней границы, то нормального распределения нет.

Для выборок данных (значений Δc_i , Δp_i , $\Delta \lambda_i$, Δq_i , $\Delta \xi$), содержащих 100 элементов, были получены следующие результаты: для Δc $0.0029 < 0.04$; Δp $0.0014 < 0.04$; $\Delta \lambda$ $0.0068 < 0.04$; Δq $0.0099 < 0.04$; $\Delta \xi$ $0.012 < 0.04$.

Методика проверки нормальности распределения по размаху варьирования служит для быстрой "прикидочной" проверки, для основательной же проверки следует применять методику по χ^2 критерию.

Применение критерия χ^2 предполагает использование свойств стандартного нормального распределения. Значения ординат кривой стандартного нормального распределения протабулированы.

Значения χ^2 вычисляются по формуле

$$\chi^2 = \sum (B - E)^2 / E,$$

где B – наблюдаемая абсолютная частота; E – ожидаемая по стандартному нормальному распределению частота.

Для проверки гипотезы нормальности распределения случайных величин в процессе вулканизации при местном ремонте эластомерных обкладок гуммированных аппаратов был проведен анализ результатов экспериментальных исследований и данных, предложенных в источниках [113, 122, 135]. Результаты обработки выборок, содержащих от 100 до 200 компонентов, показали, что законы распределения случайных величин Δc_i , Δp_i , $\Delta \lambda_i$, Δq_i , $\Delta \xi$ являются нормальными, что позволяет использовать для их моделирования генератор случайных чисел.

Интервал колебаний температуры окружающей среды $\Delta \xi$ принимается равным 10К в течение полугодия. Алгоритм расчета уравнений математической модели представлен на рис. 3.6.

Согласно предложенному алгоритму расчета необходимо задать начальное распределение температур в исследуемом объекте T_0 , а также размеры нагревательных плит и сегмента участка эластомерной обкладки гуммированного аппарата (r_0 , r_1 , r_2 , r_3 , $\Phi_{\max}$, $\Phi_{\min}$, $z_{\max}$, $z_{\min}$). Затем с помощью генератора случайных чисел p раз вырабатываются наборы случайных чисел, моделирующих действие факторов неопределенности, где p не меньше $m_{\alpha q}$ – числа контрольных экспериментов, необходимых для подтверждения вероятности адекватности модели при выбранной доверительной вероятности.

С учетом полученных случайных величин с помощью схем, построенных на основе конечно-разностного подхода, рассчитываются поля температур в нагревательных плитах и вулканизируемом сегменте эластомерной обкладки. Затем производится усреднение полученных результатов в каждой точке рассматриваемой области в каждый момент времени. Здесь $\tilde{T}_i(r, \varphi, z, \tau) = \sum_{k=1}^p T_{ik}(r, \varphi, z, \tau)$ – суммарное значение температур в каждой точке в каждый момент времени, $\tilde{T}_i$ – усредненное значение температур.

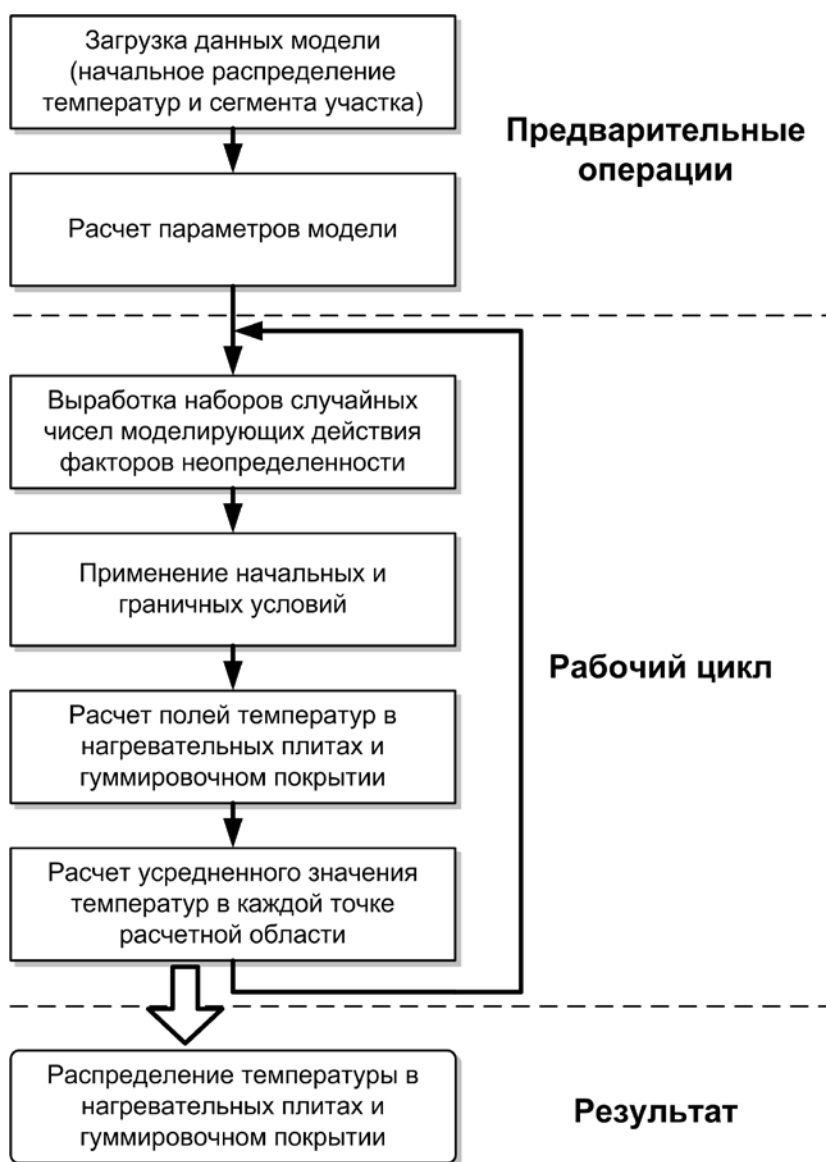


Рис. 3.6. Алгоритм расчета температурных полей в системе нагревательные плиты – гуммировочное покрытие

Решение полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных с использованием точных и приближенных аналитических методов затруднено. Это приводит к необходимости использования численных методов.

Отличительной особенностью применения численных методов является дискретизация пространственной и временной области на первом же этапе решения задачи. При дискретизации выбираются узловые точки в пространственной и временной областях. На втором этапе составляется система алгебраических уравнений относительно значений искомых функций в узловых точках.

Используем для решения один из основных численных методов решения уравнений в частных производных – метод конечных разностей.

Для решения нестационарных задач теплопроводности можно построить большое число "разумных" разностных схем. Однако выбранная дискретная модель должна, с одной стороны, отвечать требованиям к погрешности аппроксимации, устойчивости и связанной с ними точности полученной разностной схемы, т.е. разностная схема должна как можно лучше моделировать (приближать) свойства исходных дифференциальных уравнений, а с другой – обеспечивать экономичность вычислительного алгоритма.

В основе метода лежит сведение дифференциальной задачи к системе линейных алгебраических уравнений путем замены дифференциальных операторов разностными. Разностный аналог математической модели (3.9–3.10) представляет собой систему, содержащую большое число уравнений, решение которой, согласно алгоритму (рис. 3.6), необходимо проводить десятки раз, поэтому с точки зрения экономичности процесса расчета целесообразнее использовать явную разностную схему, алгоритм численного решения которой достаточно прост, при соблюдении условий сходимости и точности метода [10, 126]. Решение данной системы неявным способом на ЭВМ потребует большого объема памяти и продолжительного времени, что делает невозможным его применение в целях управления рассматриваемым процессом.

Условие сходимости разностной схемы заключается в том, что при стремлении к нулю шагов по пространственной и временной координатам сеточная функция разностного решения стремится к сеточной функции точного решения. Погрешность e_n^i различна в разных узлах пространственно-временной сетки.

Для сходимости схемы необходимо и достаточно выполнение двух других условий – аппроксимации и устойчивости.

Условие аппроксимации исходной дифференциальной задачи разностной схемой заключается в том, что погрешность аппроксимации должна стремиться к нулю при измельчении пространственно-временной сетки, т.е. различия между уравнениями разностной схемы и точными уравнениями должно уменьшаться при уменьшении шагов $\Delta\tau$, Δh .

Явная схема имеет такой же порядок аппроксимации, как и неявная, но не требует решения на каждом шаге по времени систем N уравнений. Однако устойчивой при определенном ограничении на величину шага по времени $\Delta\tau$ [10, 122, 126].

Для построения явной разностной схемы введем в рассматриваемой трехмерной области $\bar{G}$ сетку $\bar{w}_h = \chi \in \bar{G}$, где $\chi = (r, \varphi, z)$, и обозначим через γ_h множество узлов $\bar{w}_h$, принадлежащих границе Γ , через w_h – множество внутренних узлов $\chi_i \in \bar{G}$, так что $\bar{w}_h = w_h + \gamma_h$. В пространстве $\bar{G} \times [0 \leq \tau \leq \tau_k]$ требуется найти непрерывную функцию $T(\chi, \tau)$, $\chi \in \bar{G}$, удовлетворяющую (3.11)

$$\begin{aligned} \bar{w}_r &= \{\tau_{jt}, j = 0, 1, 2, \dots, j_0, j_{0t} = \tau_k\} \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \nabla^2 T + f(\chi, \tau), \chi \in \bar{G}, \tau > 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

и дополнительным условиям

$$T(\chi, 0) = T_0(\chi), \chi \in \bar{G}, T(\chi, \tau) = \tilde{\mu}(\chi, \tau), \chi \in \tilde{A}, \tau \geq 0,$$

где ∇^2 – оператор Лапласа.

Построение схемы начинается с аппроксимации оператора Лапласа. Во внутренних узлах $\nabla^2 T \sim \Lambda^2 T$ при $\chi \in w_h$ [10].

Заменяя в (3.11) оператор Лапласа разностным оператором Λ , получим систему дифференциально-разностных уравнений

$$\frac{dv}{dt} = \Lambda^2 v + \varphi(\chi, \tau), \chi \in w_h, \quad (3.12)$$

где $v(\chi, \tau)$ при любом $\tau > 0$ определена на сетке $\bar{w}_h$.

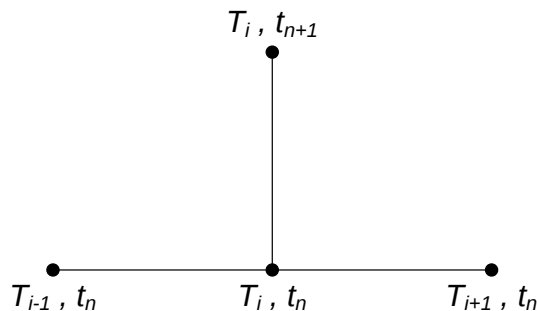
Порядок системы равен N – числу внутренних узлов сетки $\bar{w}_h$, $\varphi(\chi, \tau)$ – функция, аппроксимирующая $f(\chi, \tau)$ на $\bar{w}_h$. Введем теперь сетку по переменному τ с шагом t . Чтобы перейти к разностной схеме для функции $y(\chi, \tau)$, заданной на сетке $\bar{w}_{ht} = \bar{w}_h \times \bar{w}_t = \{(\chi_i, \tau_j), \chi_i \in \bar{w}_h, \tau_j \in \bar{w}_t\}$, надо заменить систему дифференциальных уравнений (3.12) разностной по τ схемой:

$$\begin{aligned} \frac{y^{j+1} - y^j}{t} &= \Lambda y^j + \varphi^j, j = 0, 1, 2, \dots, \\ y^0 &= y(\chi, 0), y^j|_{\gamma_h} = \mu, j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (3.13)$$

Значение y^{j+1} на новом временном слое определяется по формуле

$$y^{j+1} = y^j + t(\Lambda y^j + \varphi^j), j = 0, 1, \dots$$

В качестве Λ возьмем четырехточечный разностный оператор



Разностный аналог уравнений математической модели (3.9)–(3.10) представлен в табл. 3.3.

3.3. Результаты имитационных исследований процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочных покрытий

Результаты проведенных имитационных исследований процесса вулканизации с использованием модели (3.9–3.10) представлены на рис. 3.9–3.12 (отдельными точками и буквой «м»). На этих же рисунках приведены результаты экспериментальных исследований на установке (обозначены кривыми и буквой «э»). Процесс протекал при соблюдении требований к температурному режиму.

Экспериментальные и имитационные исследования процесса вулканизации с использованием модели проводились для ремонта гуммировочных покрытий при толщине стальной подложки $\delta_{ст} = 2$ и 4 мм. Измерение температуры производилось с интервалом 0,5 мин, общее время прогрева 15÷40 мин.

Таблица 3.3

Разностный аналог математической модели

Верхняя нагревательная плита 1	$\frac{T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L}{h_\tau} = \frac{1}{c_1 \rho_1} \cdot \left(\frac{\lambda_{1,\tilde{k}+1/2}^m (T_{1,\tilde{k}+1,\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - \lambda_{1,\tilde{k}-1/2}^m (T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{1,\tilde{k}-1,\tilde{i},\tilde{j}}^L)}{h_z^2} + \right.$ $+ \frac{\lambda_{1,\tilde{i}+1/2}^m (T_{1,\tilde{k},\tilde{i}+1,\tilde{j}}^L - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - \lambda_{1,\tilde{i}-1/2}^m (T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{1,\tilde{k}-1,\tilde{i},\tilde{j}}^L)}{r^2 h_\phi^2} +$ $+ \frac{\lambda_{1,\tilde{j}+1/2}^m (T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}+1}^L - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - \lambda_{1,\tilde{j}-1/2}^m (T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}-1}^L)}{h_r^2} +$ $\left. + \frac{\lambda_{1,\tilde{j}-1/2}^m T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}-1}^L - \lambda_{1,\tilde{j}+1/2}^m T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}+1}^L}{2rh_r} \right) + Q1 / c_1 \rho_1$
Сегмент гуммировочного покрытия 2	$\frac{T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L}{h_\tau} = \frac{1}{(c_2 + \Delta c)(\rho_2 + \Delta \rho)} \cdot \left(\frac{(\lambda_{2,\tilde{k}+1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k}+1,\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - (\lambda_{2,\tilde{k}-1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{2,\tilde{k}-1,\tilde{i},\tilde{j}}^L)}{h_z^2} + \right.$ $+ \frac{(\lambda_{2,\tilde{i}+1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k},\tilde{i}+1,\tilde{j}}^L - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - (\lambda_{2,\tilde{i}-1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{2,\tilde{k}-1,\tilde{i},\tilde{j}}^L)}{r^2 h_\phi^2} +$ $+ \frac{(\lambda_{2,\tilde{j}+1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}+1}^L - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L) - (\lambda_{2,\tilde{j}-1/2}^m + \Delta \lambda)(T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^L - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}-1}^L)}{h_r^2} +$ $\left. + \frac{(\lambda_{1,\tilde{j}-1/2}^m + \Delta \lambda)T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}-1}^L - (\lambda_{1,\tilde{j}+1/2}^m + \Delta \lambda)T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}+1}^L}{2rh_r} + \Delta q \right)$

Нижняя нагревательная плита	$T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}} _{\tau=0} = T_{1,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^0, \quad T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}} _{\tau=0} = T_{2,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^0, \quad T_{3,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}} _{\tau=0} = T_{3,\tilde{k},\tilde{i},\tilde{j}}^0$
Начальные ус- ловия	$-\lambda_{1,1/2}^m \frac{T_{1,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_{1,1,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1}}{h_z} = \alpha_1 (T_{1,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_0),$ $T_{1,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_1 h_z}{\lambda_{1,1/2}^m}} (T_{1,1,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{\alpha_1 h_z}{\lambda_{1,1/2}^m} T_0), z = z_{\min},$ $T_{1,N,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_1 h_z}{\lambda_{1,N-1/2}^m}} (T_{1,N-1,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{\alpha_1 h_z}{\lambda_{1,N-1/2}^m} T_0), z = z_{\max}$ $T_{1,\tilde{k},\tilde{i},0}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_1 h_r}{\lambda_{1,1/2}^m}} (T_{1,\tilde{k},\tilde{i},1}^{L+1} - \frac{\alpha_1 h_r}{\lambda_{1,1/2}^m} T_0), r = r_3$ $T_{1,\tilde{k},0,\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{r \alpha_1 h_\varphi}{\lambda_{1,1/2}^m}} (T_{1,\tilde{k},1,\tilde{j}}^{L+1} - \frac{r \alpha_1 h_\varphi}{\lambda_{1,1/2}^m} T_0), \varphi = \varphi_{\min},$ $T_{1,\tilde{k},N,\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{r \alpha_1 h_\varphi}{\lambda_{1,N-1/2}^m}} (T_{1,\tilde{k},N-1,\tilde{j}}^{L+1} - \frac{r \alpha_1 h_\varphi}{\lambda_{1,N-1/2}^m} T_0), \varphi = \varphi_{\max}$
Г.у. 3-го рода	$T_{2,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{a_2 h_z}{(\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda)}} (T_{2,1,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{a_2 h_z}{(\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda)} T_0), z = z_{\min};$ $T_{2,N,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{a_2 h_z}{(\lambda_{2,N-1/2}^m + \Delta\lambda)}} (T_{2,1,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{a_2 h_z}{(\lambda_{2,N-1/2}^m + \Delta\lambda)} T_0), z = z_{\max}$ $-\lambda_{3,1/2}^m \frac{T_{3,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_{3,1,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1}}{h_z} = \alpha_3 (T_{3,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - T_0),$ $T_{3,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_3 h_z}{\lambda_{3,1/2}^m}} (T_{3,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{\alpha_3 h_z}{\lambda_{3,1/2}^m} T_0), z = z_{\min},$ $T_{3,N,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_3 h_z}{\lambda_{3,N-1/2}^m}} (T_{3,N-1,0,\tilde{i},\tilde{j}}^{L+1} - \frac{\alpha_3 h_z}{\lambda_{3,N-1/2}^m} T_0), z = z_{\max}$

	$T_{3,\tilde{k},\tilde{i},0}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_3 h_r}{\lambda_{3,1/2}^m}} (T_{3,\tilde{k},\tilde{i},1}^{L+1} - \frac{\alpha_3 h_r}{\lambda_{3,1/2}^m} T_0), r = r_0$ $T_{3,\tilde{k},0,\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{r \alpha_3 h_\varphi}{\lambda_{3,1/2}^m}} (T_{3,\tilde{k},1,\tilde{j}}^{L+1} - \frac{r \alpha_3 h_\varphi}{\lambda_{3,1/2}^m} T_0), \varphi = \varphi_{\min},$ $T_{3,\tilde{k},N,\tilde{j}}^{L+1} = \frac{1}{1 - \frac{r \alpha_3 h_\varphi}{\lambda_{3,N-1/2}^m}} (T_{3,\tilde{k},N-1,\tilde{j}}^{L+1} - \frac{r \alpha_3 h_\varphi}{\lambda_{3,N-1/2}^m} T_0), \varphi = \varphi_{\max}$ $\lambda_{1,N-1/2}^m \frac{T_{1,\tilde{k},\tilde{i},N}^{L+1} - T_{1,\tilde{k},\tilde{i},N-1}^{L+1}}{h_r} = (\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{2,\tilde{k},\tilde{i},1}^{L+1} - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},0}^{L+1}}{h_r},$ $\lambda_{3,1/2}^m \frac{T_{3,\tilde{k},\tilde{i},1}^{L+1} - T_{3,\tilde{k},\tilde{i},0}^{L+1}}{h_r} = (\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{2,\tilde{k},\tilde{i},N}^{L+1} - T_{2,\tilde{k},\tilde{i},N-1}^{L+1}}{h_r}$
Г.у. 4-го рода	$(\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{2,\tilde{k},1,\tilde{j}}^{L+1} - T_{2,\tilde{k},0,\tilde{j}}^{L+1}}{h_\varphi} = (\lambda_{2,N-1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{0\tilde{k},N,\tilde{j}}^{L+1} - T_{0\tilde{k},N-1,\tilde{j}}^{L+1}}{h_\varphi},$ $(\lambda_{2,N-1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{2,\tilde{k},N,\tilde{j}}^{L+1} - T_{2,\tilde{k},N-1,\tilde{j}}^{L+1}}{h_\varphi} = (\lambda_{2,1/2}^m + \Delta\lambda) \frac{T_{0\tilde{k},1,\tilde{j}}^{L+1} - T_{0\tilde{k},0,\tilde{j}}^{L+1}}{h_\varphi}$

Изменение температуры в ремонтируемой обкладке, в стальном слое и окружающей среде контролировали электронными потенциометрами типа КВТ и КСП-4 класса точности по показаниям 0,5%. Измерение температур производили с помощью хромель-копелевых термопар ХК. Расчеты температур производились в точках, расположенных в верхней и нижней части покрытия, изображенных на рис. 3.4. Расчеты погрешности измерений термопарами из-за потерь теплоты через термопару теплоотводом, из-за охлаждения измеренного участка изделия и нагрева термопары проводили по методике, описанной в работе [178]. Продолжительность испытаний определяли временем достижения установившегося теплового состояния, когда температуры во всех контролируемых точках стабилизировались. Такое состояние соответствовало тепловому равновесию резинометаллического образца и характеризовало начало наиболее теплонапряженного режима вулканизуемых обкладок. Термопары устанавливали перед вулканизацией ремонтируемых обкладок между слоями, на стыках соседних слоев эластомеров и на стыке обкладок с металлическим слоем. Схема размещения термопар в ремонтируемом образце приведена на рис. 3.7.

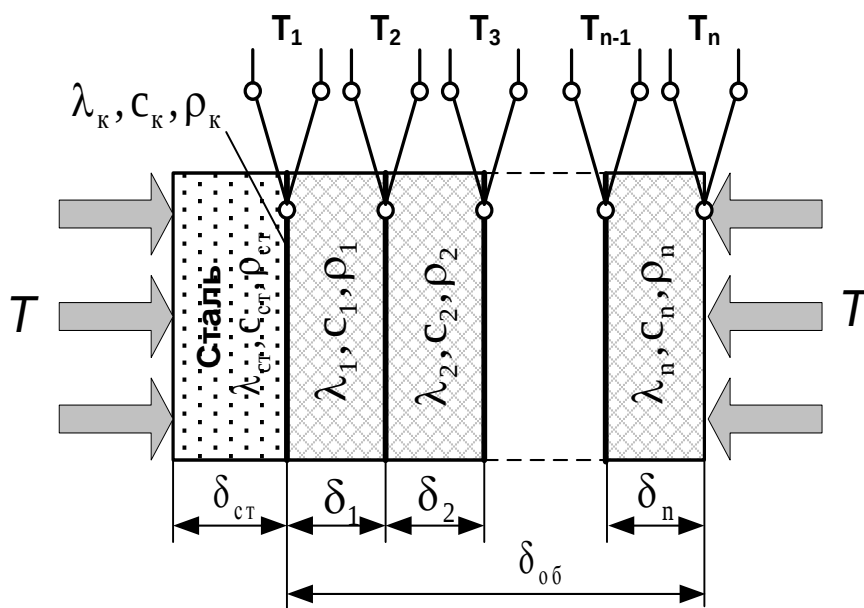


Рис. 3.7. Схема расположения термопар в многослойном покрытии отремонтированного изделия

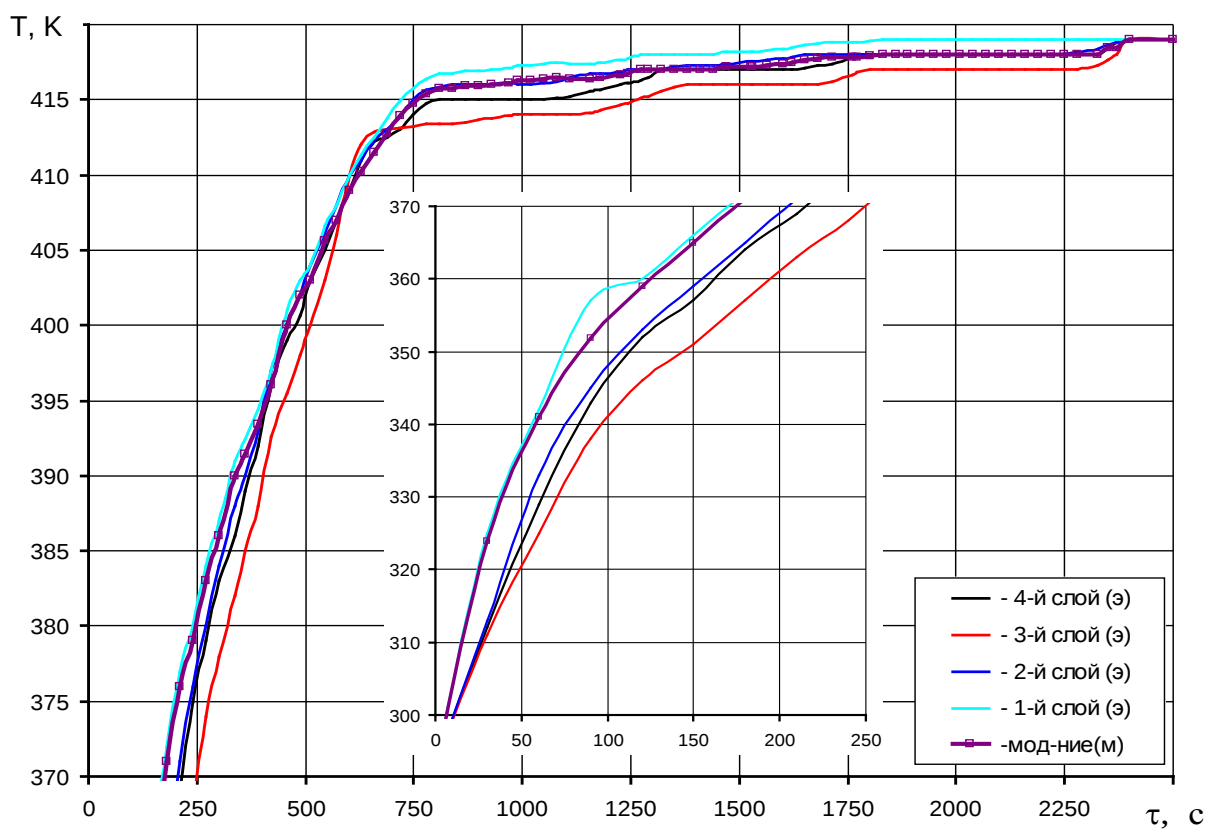


Рис. 3.8. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марки 1751 (1,5) + 2566 (1,5+1,5+1,5) при $\delta_{ст} = 4$ мм

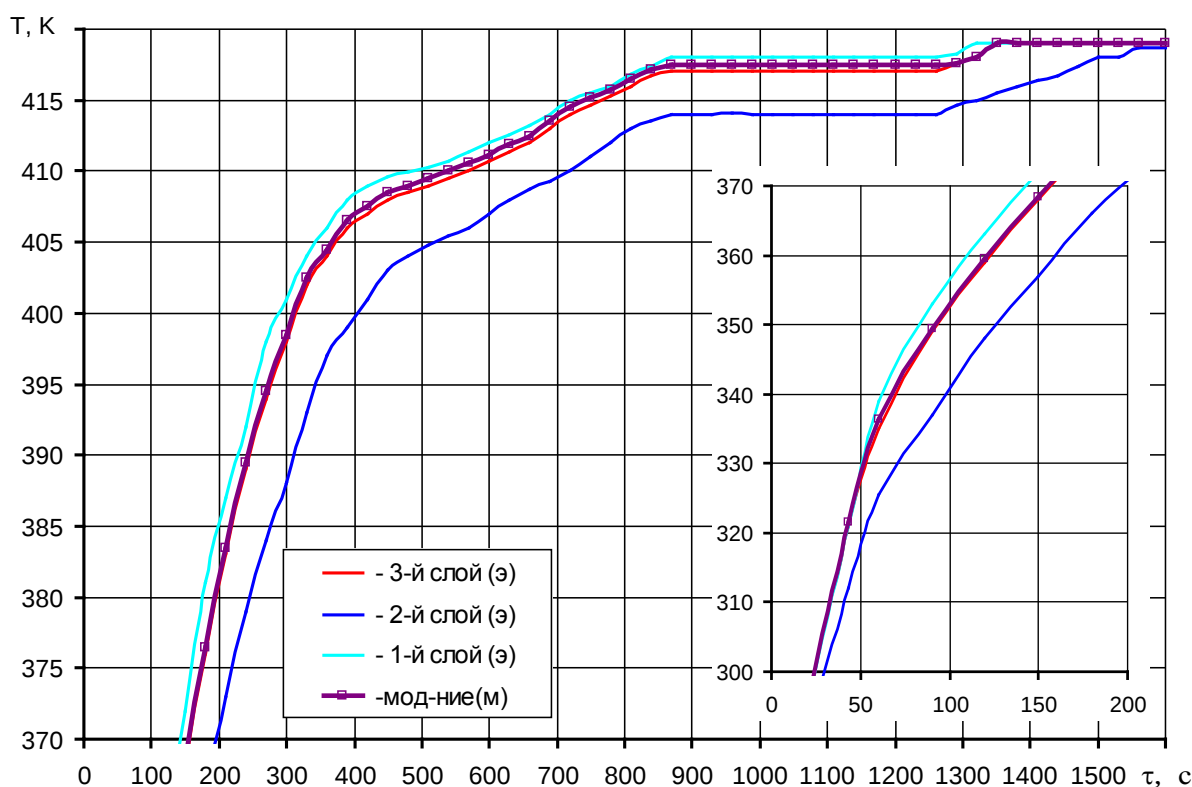


Рис. 3.9. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марки 1751 (1,5) + 1976 (1,5+1,5) при $\delta_{cm} = 2 \text{ мм}$

На основании анализа представленных графиков можно сделать вывод о том, что в течение всего периода нагрева не наблюдается существенное различие между экспериментальными данными, полученными при вулканизации покрытий различных марок. После того как значение подаваемого тока стабилизируется, значение температур устанавливается на определенном уровне, однако для различных покрытий он неодинаков и варьируется в пределах 4-6К.

Характер полученных результатов позволяет отметить достаточно хорошую воспроизводимость экспериментальных и имитационных исследований. Максимальная погрешность составляет не более 4%.

3.4. Расчет полей температур и степени вулканизации в покрытиях методом модельной прямоугольной области

Одной из основных задач при расчете режимов вулканизации резинометаллических изделий является определение зависимости температуры от времени в некоторых контрольных внутренних точках изделия, обычно наиболее удаленных от обогреваемых поверхностей [113–114]. Расчет таких зависимостей может быть реализован на основе уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях [115]. Известные числен-

ные методы – метод конечных разностей и метод конечных элементов – позволяют получать решения для одно- и многосвязных областей с достаточно сложной границей в линейной и нелинейной постановках, когда теплофизические характеристики материала являются функциями координат и температуры. Однако для достижения приемлемой точности необходимо, чтобы была достаточно густая сетка элементов, при которой расчет на персональных ЭВМ занимает определенное время. Поскольку для ускоренной оценки времени прогрева и вулканизации резинометаллических изделий можно ограничиться расчетом зависимости температуры от времени лишь для некоторых контрольных точек, возможно использовать численные или аналитические решения уравнения теплопроводности для модельных областей простой геометрической формы (бесконечная пластина, прямоугольник и др.).

Известные подходы к расчету температурно-временных зависимостей в резиновых изделиях с использованием модельных (эквивалентных) областей в виде пластины, прямоугольника [180] не годятся для неодносвязных областей, когда приток теплоты осуществляется не только по внешней, но и по внутренним границам, что соответствует процессам в резинометаллических изделиях. В связи с этим представляется необходимым при расчете температурно-временных зависимостей для резиновых изделий использовать аналитические решения для модельных областей. В качестве одной из них рассмотрим прямоугольник.

Пусть D – плоская одно- или многослойная область, ограниченная внешним контуром Γ_0 и рядом внутренних контуров Γ_i ($i=1,2,...,n$). Область D представляет собой сечение резинометаллического изделия, к которому относятся температурно-временные зависимости. Предположим, что контуры Γ_0 и Γ_i – кусочно-гладкие [97]. Учитывая, что поток теплоты согласно закону Фурье [115] распространяется по нормали к поверхности (в данном случае к границам области), предлагаем следующую процедуру приведения области D к модельному прямоугольнику. В каждой точке контуров Γ_0 и Γ_i строим соответственно внутренние и внешние нормали, на которых откладываем достаточно малый отрезок длиной h , рассматриваемый как глубина прогрева. Полученные точки соединяем кривыми $\Gamma_0(h)$ и $\Gamma_i(h)$, ограничивающими область $D(h)$. Пусть S_0 – площадь области D , а $S(h)$ – площадь области $D(h)$. Очевидно, что $S(h)=S_0$ при $h=0$. При увеличении h значение $S(h)$ будет убывать и при некотором критическом значении h_k обратится в нуль. Тогда за длину одной из сторон модельного прямоугольника принимаем величину $p=2h_k$, вторую сторону q находим из равенства площадей модельного прямоугольника и исходной области D :

$$q = S_0/2h_k, \quad (3.14)$$

В тех случаях, когда при некоторых значениях h внутренняя область $D(h)$ распадается на несколько подобластей, за $S(h)$ принимаем суммарную площадь образовавшихся подобластей.

Следовательно, исходному сечению D резинового изделия соответствует прямоугольная область со сторонами p и q , а каждой точке области – значение h .

При практическом применении предлагаемая процедура реализуется следующим образом. Сечение изделия D изображаем в масштабе на миллиметровой бумаге. Точки на контурах Γ_0 и Γ_i , в которых восстанавливаются нормали, располагаются равномерно на расстоянии не менее $1/20$ длины соответствующего контура. Шаг по глубине выбираем равным не более половины расстояния между нормальными к контуру. Площадь $S(h)$ для каждой глубины прогрева h находится простым подсчетом по миллиметровой бумаге. Следует отметить, что в ходе предлагаемой процедуры попутно устанавливаются наименее прогреваемые области и точки сечения D.

Предполагая однородность и изотропность теплофизических свойств покрытия [114], а также однородность начального распределения температуры по сечению, можно записать [115] решение нестационарного уравнения теплопроводности для прямоугольной области ($0 \leq x \leq p$; $0 \leq y \leq q$) при граничных условиях первого рода в виде

$$T(x, y, t) = T_c - \frac{16(T_c - T_0)}{\pi^2} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{e^{-\sigma_{ml}at}}{(2m+1)(2l+1)} \sin \frac{(2m+1)\pi x}{p} \sin \frac{(2l+1)\pi y}{q}, \quad (3.15)$$

где T_c – температура нагревательных плит; T_0 – начальная температура покрытия; $\sigma_{ml} = \pi^2 [(2m+1)^2/p^2 + (2l+1)^2/q^2]$; a – коэффициент температуропроводности; t – время.

Окончательно при реализации данного подхода для произвольной точки сечения D зависимость температуры от времени находим из соотношения (3.15) при $x=h$ и $y=q/2$, где h определяем по тому же рисунку, что и зависимость $S(h)$ и значение h_k .

С целью определения пригодности и достоверности предлагаемой методики расчета температурно-временных зависимостей для ремонта гуммировочных покрытий результаты проведенных расчётов были сопоставлены с данными, полученными методом конечных разностей и экспериментальными данными. Из рис. 3.10 видно, что максимальные отклонения данных, полученных для различных глубин прогрева сложного сечения ремонтируемого покрытия методом модельного прямоугольника по соотношению (3.15), от данных, полученных методом конечных разностей, не превышают 15%.

Расчеты по предлагаемой методике проводили на ПЭВМ. К основным преимуществам предлагаемой методики по сравнению с другими можно отнести следующие:

а) возможность использовать аналитическое решение нестационарного уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами для прямоугольной области при расчете температурно-временных зависимостей в резинотехнических изделиях сложной конфигурации. В то же время при применении метода эквивалентной пластины [115] необходимо численно решать уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами;

б) возможность послойного (по глубине) расчета зависимостей температуры от времени для произвольной точки сечения, а не только для наименее прогреваемых точек;

в) относительная в сравнении с методом конечных разностей простота и доступность подготовки исходных данных для расчета, значительно меньшие затраты машинного времени, возможность реализации расчетов на ПЭВМ.

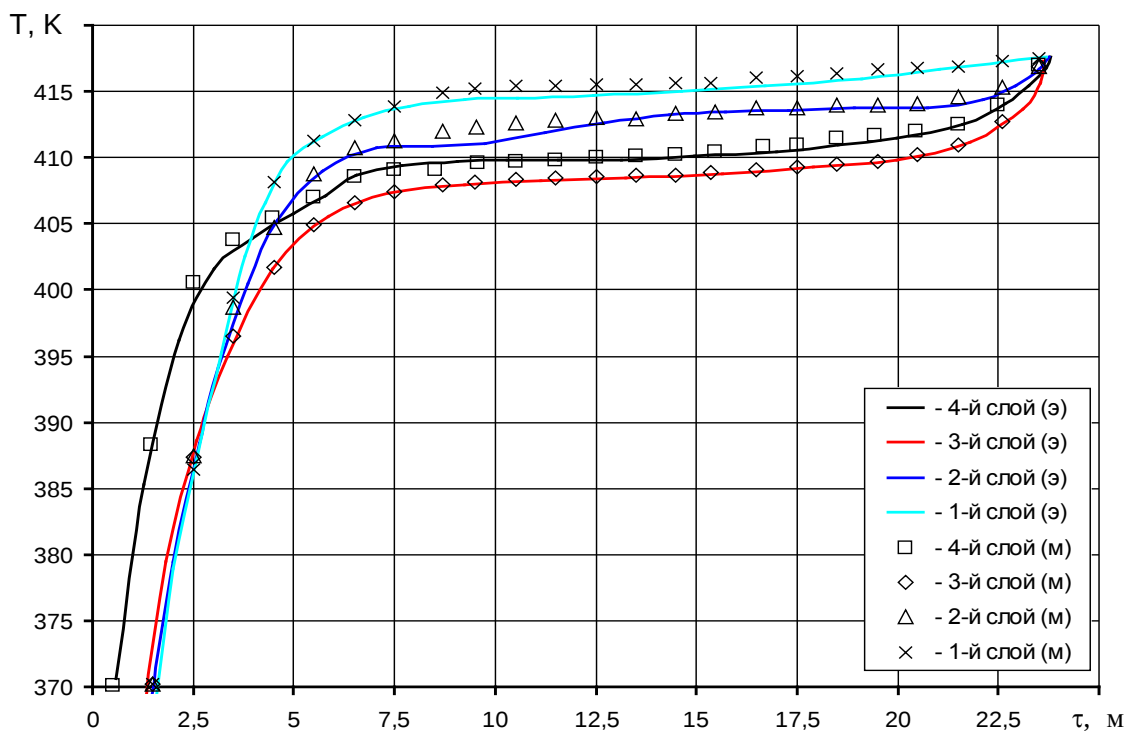


Рис. 3.10. Зависимости температуры от времени для различной глубины прогрева 1,5; 3,0; 4,5 мм

Областью предлагаемой методики могут являться резиновые изделия, формовые РТИ, крупногабаритные РТИ и неформовые изделия, вулканизуемые в расплавах солей, вулканизационных котлах, пресс-формах.

Низкая теплопроводность резины и высокие значения коэффициента теплоотдачи при вулканизации в расплавах солей и вулканизационных котлах позволяют сводить граничные условия третьего рода, соответствующие вулканизации в котлах и солящих вулканизаторах, к граничным условиям первого рода. Это возможно благодаря большой величине критерия Био [115] для резины.

Таким образом, предложена инженерная методика ускоренной оценки температурно-временных режимов прогрева гуммировочных покрытий сложной конфигурации во время ремонта с сечениями в форме как односвязанных, так и многосвязных областей. Сопоставление полученных результатов с данными МКР, аналитическими решениями и экспериментальными данными подтверждает пригодность и достоверность предлагаемой методики.

Глава 4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МЕСТНОМ РЕМОНТЕ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

4.1. Идентификация и оценка адекватности математической модели процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочных покрытий

Можно выделить два основных подхода к определению адекватности математической модели. Первый используется при построении моделей статистическими методами, модель считается адекватной, если остаточная дисперсия не отличается от дисперсии, определяемой ошибками измерения и влияния неконтролируемых факторов. Сопоставление дисперсий проводят в соответствии с процедурой проверки статистических гипотез [31, 74]. Понятие адекватности здесь используется в смысле достоверности, на точность модели жестких ограничений не накладывается, и она не может использоваться при анализе аналогичных процессов.

Другой подход обычно используется при построении аналитических моделей с учетом физико-химических закономерностей исследуемого процесса. В данном случае адекватной считается модель, которая с определенной точностью позволяет прогнозировать изменения фазовых координат изучаемого объекта. Проверка точности прогноза здесь может содержать ряд частей, например: оценки сложности математической формализации [20], ее принципиальной структуры, результатов решения задачи идентификации неизвестных параметров или функциональных зависимостей. Таким образом, вопрос об оценке адекватности математической формализации необходимо решать на основе анализа точности предсказания фазовых координат, рассчитанных с ее использованием. В качестве критерия адекватности целесообразно использовать величину погрешности, получаемую на основе сравнения результатов экспериментальных и имитационных исследований.

Способ определения величины погрешности существенно зависит от типа используемого математического описания для формализации рассматриваемого технологического процесса или объекта. Тип математического описания, в свою очередь, определяется целью проводимых исследований, а также количеством априори известной информации о свойствах и параметрах изучаемого объекта. Для оценки адекватности необходимо ввести в рассмотрение расстояние между векторами расчетных и измеренных значений ρ .

Способы определения представлены на рис. 4.1. и зависят от типа описания математической модели, от описания внутренних свойств, выходных величин и может определяться через функцию принадлежности μ , степень риска R , степень уверенности S и их оценки. Математическая модель является адекватной, если имеет место совпадение с заданной точностью $\rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^3)$ при

выбранной достоверности расчетных значений выходных параметров для детерминированной модели, которая используется для решения какой-либо из задач: анализа, оптимизации, управления, с соответствующими величинами, полученными в результате проведения экспериментальных исследований на изучаемом объекте.

Введем в рассмотрение вектор параметров, анализируя который можно судить об адекватности математической модели для условия k -го эксперимента в предположении отсутствия ошибок при измерении входных величин: $T_k = (T_{1k}, \dots, T_{sk})$.

Истинные значения параметров адекватности обозначим вектором

$$T_k^{\exists} = (T_{1k}^{\exists}, \dots, T_{sk}^{\exists}).$$

Определим расстояние $\rho(T_k, T_k^{\exists})$ как вектор с компонентами

$$(v_1 \rho_1(T_{1k}, T_{1k}^{\exists}), v_1 \rho_2(T_{2k}, T_{2k}^{\exists}), \dots, v_s \rho_s(T_{sk}, T_{sk}^{\exists}))$$

и введем частичное упорядочение следующим образом: $T_k \leq T_k^{\exists}$ при $T_{jk} \leq T_{jk}^{\exists}$, $j=1, \dots, s$, где $v_j (j=1, \dots, s)$ – выбранные положительные постоянные; $\rho_1(T_{1k}, T_{1k}^{\exists})$, $l=(1, \dots, s)$ – расстояние между составляющими T и $T^{\exists}$. Модель считается адекватной объекту, если выполняется соотношение:

$$\forall k \in B: \rho(T_k, T_k^{\exists}) \leq A, \quad (4.1)$$

где $A = (A_1, \dots, A_s)$ – вектор допустимых значений расстояний; B – область возможных значений $T_k^{\exists}$, т.е. область возможных режимов моделируемого объекта.

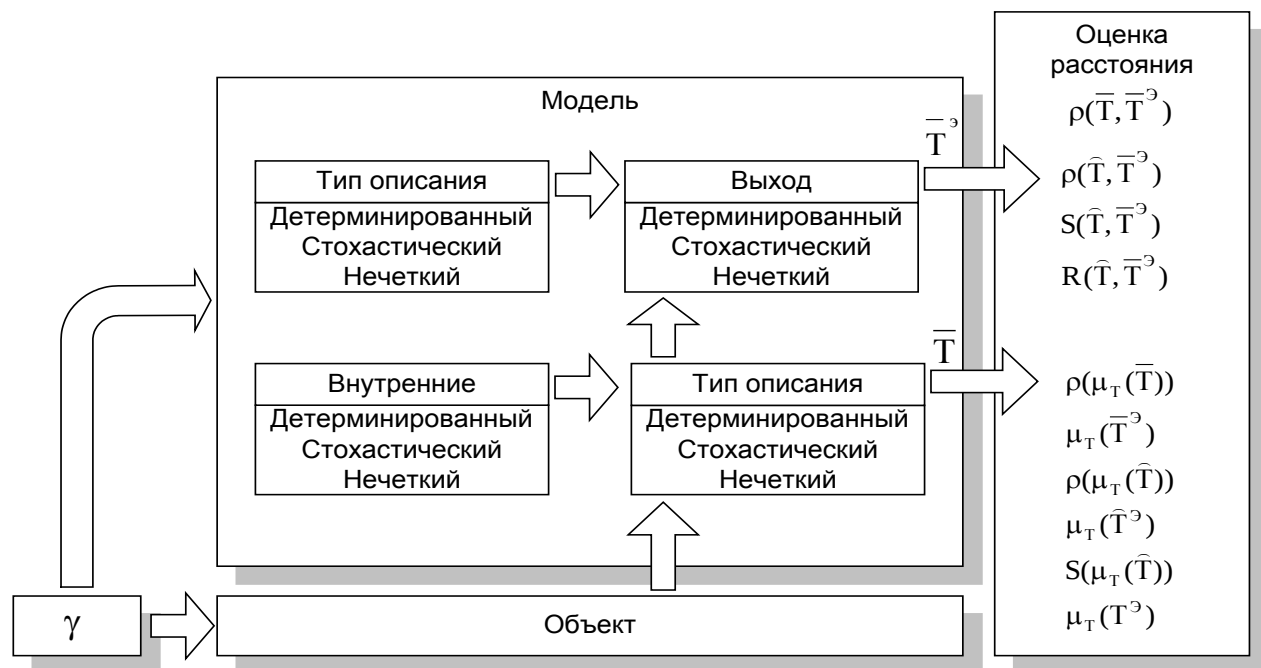


Рис. 4.1. Способы определения расстояния между векторами расчетных и измеренных значений

Так как проверка (4.1) требует бесконечно большого числа контрольных экспериментов, то реально проверку адекватности проводят с использованием соотношения

$$\forall_k=(1,..., m_{\alpha q}): \rho(T_k, T_k^{\vartheta}) \leq A, \quad (4.2)$$

где q – допустимая вероятность неадекватности модели; α – доверительная вероятность; $m_{\alpha q}$ – число контрольных экспериментов, необходимых для подтверждения вероятности $(1-q)$ адекватности модели при выбранной доверительной вероятности α .

Таким образом, при ограниченном числе опытов и выбранной вероятности q модель считается адекватной, если с доверительной вероятностью α выполняется условие

$$\text{Prob} \left\{ \max_{k \in B} \rho(T_k, T_k^{\vartheta}) \leq A \right\} \geq 1 - q, \quad (4.3)$$

где $\text{Prob}\{s\}$ – вероятность появления события s .

На практике измерения T^{ϑ} проводят с ошибками $\varepsilon_T = (\varepsilon_{1T}, ..., \varepsilon_{sT})$, а измерения независимых переменных входов модели $\gamma = (\gamma_1, ..., \gamma_p)$ – с ошибками $\varepsilon_{\gamma} = (\varepsilon_{1\gamma}, ..., \varepsilon_{sp})$.

Как видно из схемы:

$$\bar{T}^{\vartheta} = T^{\vartheta} + \varepsilon_T; \bar{T} = M(\gamma_k + \varepsilon_{\gamma}),$$

где M – оператор модели, причем $T_{lk} = M_l(\gamma_k)$.

Наличие погрешностей ε_T и ε_{γ} приводит к тому, что реально вместо вектора $\rho(T_k, T_k^{\vartheta})$ в каждом эксперименте вычисляем вектор $\rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^{\vartheta})$.

Установим связь между этими векторами. Разложив правую часть математической модели $M(\gamma_k + \varepsilon_{\gamma})$ в ряд и оставляя линейные члены, получим

$$\rho(T_k, T_k^{\vartheta}) = \rho(M(\gamma_k + \varepsilon_{\gamma})), (T_k^{\vartheta} + \varepsilon_T) \approx \rho(T_k + \delta_T, T_k^{\vartheta} + \varepsilon_T), \quad (4.4)$$

где

$$\delta_T = (\delta_{T1}, ..., \delta_{Ts}), \delta_{Ti} = \sum_{l=1}^s \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_l} \varepsilon_{\gamma l}.$$

Значения погрешностей ε_T и ε_{γ} могут быть заданы различным образом. Наиболее часто встречается два случая. В первом для погрешностей задаются максимально допустимые диапазоны, т.е. максимально допустимые погрешности, определяющие классы точности приборов. Во втором случае погрешности задаются законами распределения, обычно принимается нормальный закон с математическим ожиданием $\varepsilon=0$ и дисперсией D_{ε} .

Для первого случая, используя правило треугольника, из (4.3), (4.4) найдем

$$\begin{aligned}
\rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^\vartheta) &\leq \rho(T_k + \delta_T, T_k^\vartheta) + \rho(T_k, T_k^\vartheta + \varepsilon_T) \leq \\
&\leq \rho(T_k, T_k^\vartheta) + \rho(T_k + \delta_T, T_k^\vartheta) + \rho(T_k, T_k^\vartheta + \varepsilon_T) = \\
&= \rho(T_k, T_k^\vartheta) + \rho(0, \delta_T) + \rho(0, \varepsilon_T),
\end{aligned}$$

или, переходя к максимальным расстояниям, получим

$$\begin{aligned}
\max_{k \in B} \rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^\vartheta) &\leq \max_{k \in B} [\rho(T_k, T_k^\vartheta) + \rho(0, \delta_T) + \rho(0, \varepsilon_T)] \leq \\
&\leq \max_{k \in B} \rho(T_k, T_k^\vartheta) + \max_{k \in B} \rho(0, \delta_T) + \max_{k \in B} \rho(0, \varepsilon_T).
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Из (4.3), (4.5) следует, что для выполнения условия (4.3) необходимо удовлетворить соотношения

$$\Pr ob \left\{ \max_{k \in B} \rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^\vartheta) \leq \bar{A} \right\} \geq 1 - q$$

или

$$\forall_k = (1, \dots, m_{\alpha q}): \rho(\bar{T}_k, \bar{T}_k^\vartheta) \leq \bar{A},$$

где

$$\begin{aligned}
\bar{A} &= (\bar{A}_1, \dots, \bar{A}_s) = A + \max_{k \in B} \rho(0, \delta_T) + \max_{k \in B} \rho(0, \varepsilon_T); \\
\bar{A}_l &= A_l + \max_{k \in B} \rho_l \left(0, \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_i} \varepsilon_{j\gamma} \right) + \max_{k \in B} \rho_l(0, \varepsilon_{lT}) = A_l + \delta A_l, l = 1, \dots, s.
\end{aligned}$$

При проверке адекватности моделей статики компоненты вектора расстояний могут быть заданы как

$$\rho_l(T_k, T_k^\vartheta) = |T_l - T_l^\vartheta|, \nu_l = 1 / \Delta_l^T, l = 1, \dots, s,$$

где Δ_l^T диапазоны шкалы прибора, измеряющего T_l . Тогда

$$\bar{T}_l - \bar{T}_l^\vartheta = M_l(\gamma) + \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_i} \varepsilon_{i\gamma} - T_l^\vartheta - \varepsilon_{lT},$$

или, вводя диапазоны шкал Δ_l^T и Δ_l^γ :

$$\frac{\bar{T}_l - \bar{T}_l^\vartheta}{\Delta_l^T} = \frac{T_l - T_l^\vartheta}{\Delta_l^T} + \sum_{i=1}^k \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_i} \frac{\varepsilon_{i\gamma}}{\Delta_i^\gamma} \frac{\Delta_i^\gamma}{\Delta_i^T} - \frac{\varepsilon_{lT}}{\Delta_l^T}.$$

Взяв абсолютные значения для левой и правой частей, для $\max$ по $k \in B$ получим

$$\max_{k \in B} \nu_l \rho_l(\bar{T}_l, \bar{T}_l^\vartheta) \leq \max_{k \in B} \nu_l \rho_l(T_l, T_l^\vartheta) + \max_{k \in B} \sum_{i=1}^p \left| \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_i} \right| \left\| \frac{\varepsilon_{i\gamma}}{\Delta_i^\gamma} \right\| \left\| \frac{\Delta_i^\gamma}{\Delta_i^T} \right\| + \max_{k \in B} \left| \frac{\varepsilon_{lT}}{\Delta_l^T} \right|,$$

где

$$\max_{k \in B} (\varepsilon_{i\gamma} / \Delta_i^\gamma), \max_{k \in B} (\varepsilon_{lT} / \Delta_l^T),$$

- наиболее допустимые относительные погрешности измерительных приборов; $\Delta_i^\gamma / \Delta_i^T$ – масштабные множители, $i = 1, \dots, s_1$.

Таким образом, если модель статистики адекватна, то выполняется условие

$$\forall_k = (1, \dots, m_{\alpha, q}): \frac{\bar{T}_{lk} - \bar{T}_{lk}^{\vartheta}}{\Delta_l^T} \leq A_l + \sum_{i=1}^p \left| \frac{\partial M_l}{\partial \gamma_i} \right| \max_{k \in B} \left| \frac{\varepsilon_{iy}}{\Delta_i^{\gamma}} \right| \left| \frac{\Delta_i^{\gamma}}{\Delta_i^T} \right| + \max_{k \in B} \left| \frac{\varepsilon_{IT}}{\Delta_l^T} \right|.$$

В частности, задаваясь $\alpha=0.9$; $q=0.1$ по таблице значений $m_{\alpha, q} = \lg(1-\alpha)/\lg(1-q)$, находим $m_{\alpha, q} = 22$ [31, 74].

В том случае, когда математическая модель описывает динамическое поведение рассматриваемого объекта, расстояние определяется на основе использования нормы соответствующего функционала пространства, а $v_i, i = 1, \dots, s_2$ положительные на интервале изменения независимой переменной функции, $v_i(t) \geq 0, i = 1, \dots, p_2, t \in [t_0, t_1]$.

Данный подход к оценке адекватности математической формализации основан на том, что существуют неизвестные функциональные зависимости, в нее входящие. В противном случае задача их восстановления при идентификации приобретает особое значение. Рассмотрим задачу идентификации неизвестных функциональных зависимостей, характеризующих теплофизические свойства вулканизата в процессе вулканизации при восстановительном ремонте [65, 113].

Тогда математическая модель для определения неизвестных теплофизических свойств вулканизата имеет вид:

$$\bar{C}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T), \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \tilde{Q}(T), \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} (x, \tau) \in Q = (0, b) \times (0, \tau_m), \quad T(x, 0) = T_0(x), \\ -\lambda(T(0, \tau)) \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = q_1(\tau), \quad -\lambda(T(b, \tau)) \frac{\partial T}{\partial x}(b, \tau) = q_2(\tau). \end{aligned} \quad (4.7)$$

При этом были использованы следующие допущения:

- слой вулканизата рассматривается как пластина конечной толщины,
- воздействие нагревательных плит моделируется соответствующими тепловыми потоками,
- внутренний источник теплоты известен с точностью до диапазона измерения.

Сформулируем задачу восстановления полной совокупности характеристик анализируемого процесса $\bar{C}(T)$, $\lambda(T)$ и $\hat{Q}(T)$ в математической модели (4.6)–(4.7).

Пусть в некотором ограниченном количестве N точек отрезка $[0, b]$ с координатами $x=d_i, (i=1..N)$ установлены термодатчики и фиксируется изменение температуры по времени

$$T^{\vartheta}(d_i, \tau) = f_i(\tau), i = 1, \dots, N. \quad (4.8)$$

Необходимо найти функциональные зависимости $\bar{C}(T)$, $\lambda(T)$ и $\hat{Q}(T)$, доставляющие экстремум функционала невязки

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \rho_i [T(d_i, \tau) - f_i(\tau)]^2 d\tau \cong \delta^2, \quad J \in \min_{C, \lambda, S} \quad (4.9)$$

при ограничениях (4.6)–(4.8).

Будем считать, что искомые функции могут быть представлены параметрически:

$$\bar{C}(T) = \sum_{k=1}^{m_1} c_k \varphi_{1k}(T), \quad \lambda(T) = \sum_{k=1}^{m_2} \lambda_k \varphi_{2k}(T),$$

где $\{\varphi_{jk}(T)\} (k=1, \dots, m_j, j=1, \dots, 4)$ – заданная система базисных функций. Введем суммарный вектор неизвестных параметров

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_m], \quad m = \sum_{j=1}^4 m_j.$$

Для решения задачи (4.6)–(4.9) введем в рассмотрение фиктивные слои, границы которых проходят через точки установки термодатчиков, обладающие одинаковыми теплофизическими свойствами.

В результате система (4.6)–(4.7) примет вид:

$$\begin{aligned} \bar{C}(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \tilde{Q}(T), \\ (x, \tau) \in Q_i &= (d_{i-1}, d_i) \times (0, \tau_m), \quad i=1, \dots, N+1, \quad d_0=0, \quad d_{N+1}=b, \\ T_i(x, 0) &= T_{0i}(x), \quad x \in [d_{i-1}, d_i], \quad i=1, \dots, N+1, \\ -\lambda(T_1(d_0, \tau)) \frac{\partial T_1}{\partial x}(d_0, \tau) &= q_1(\tau), \\ T_i(d_i, \tau) &= T_{i+1}(d_i, \tau), \quad i=1, \dots, N, \\ \frac{\partial T_i}{\partial x}(d_i, \tau) &= \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_i, \tau), \quad i=1, \dots, N, \\ -\lambda(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) &= q_2(\tau). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Для решения задачи (4.9) с ограничениями (4.10) введем в рассмотрение функционал Лагранжа:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \rho_i [T(d_i, \tau) - f_i(\tau)]^2 d\tau + \\ &+ \sum_{i=1}^{N+1} \int_0^{\tau_m} \int_{d_{i-1}}^{d_i} \psi_i(x, \tau) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \tilde{Q}(T) - \bar{C}(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \right] dx d\tau + \\ &+ \sum_{i=1}^{N+1} \gamma_i(x, 0) [T_i(x, 0) - T_{0i}(x)] dx + \\ &+ \int_0^{\tau_m} \eta(d_0, \tau) \left[q_1(\tau) + \lambda(T_1(d_0, \tau)) \frac{\partial T_1}{\partial x}(D_0, \tau) \right] d\tau + \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \nu(d_i, \tau) [T_i(d_i, \tau) - T_{i+1}(d_i, \tau)] d\tau + \\
& + \sum_{i=1}^N \xi(d_i, \tau) \left[\frac{\partial T_i}{\partial x}(d_i, \tau) - \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x}(d_i, \tau) \right] d\tau + \\
& + \int_0^{\tau_m} \eta(d_{N+1}, \tau) \left[q_2(\tau) + \lambda(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) \right] d\tau,
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
& \varphi_i(x, \tau), \gamma_i(x, 0) \overline{(1, N+1)}, \nu(d_i, \tau), \xi \overline{(1, N+1)}, \\
& \nu(d_i, \tau) \overline{(1, N+1)}, \eta(d_0, \tau), \eta(d_{N+1}, \tau).
\end{aligned}$$

- неопределенные множители Лагранжа.

Предположим, что $\bar{C}(T)$ – дважды, а $\lambda(T)$ – трижды непрерывно дифференцируемые функции на некотором отрезке $[T_1, T_2]$, содержащем область значений функции $T(x, \tau)$, и что функции $\bar{C}(T)$, $\lambda(T)$ и $\hat{Q}(T)$ получили некоторые вариации $\bar{C}(T + \Theta) = \Delta \bar{C}(T)$, $\lambda(T + \Theta) = \Delta \lambda(T)$, и $\hat{Q}(T + \Theta) = \Delta \hat{Q}(T)$ соответственно. Тогда температура $T_i(x, \tau)$ изменится на некоторую величину $\Theta_i(x, \tau)$ ($i=1, \dots, N+1$), перепишем уравнение (4.1), используя формулу Тейлора и ограничиваясь только линейными членами ряда т.е.:

$$\begin{aligned}
\bar{C}(T + \Theta) &= T + \frac{\partial \bar{C}(T)}{\partial T} \Theta; \lambda(T + \Theta) = \lambda(T) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \Theta; \\
\tilde{Q}(T + \Theta) &= \tilde{Q}(T) + \frac{\partial \tilde{Q}(T)}{\partial T} \Theta.
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Тогда (4.6)–(4.7) с учетом (4.12) примет вид:

$$\begin{aligned}
& \left(\bar{C}(T) + \frac{\partial \bar{C}(T)}{\partial T} \Theta \right) \frac{\partial (T + \Theta)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\lambda(T) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \Theta \right) \frac{\partial (T + \Theta)}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \tilde{Q}(T)}{\partial T} \Theta \right); \\
& \bar{C}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} + \bar{C}(T) \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}(T)}{\partial T} \Theta \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}(T)}{\partial T} \Theta \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \\
& = \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \lambda(T) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda(T)}{\partial T^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)^2 \Theta + \\
& + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \Theta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda(T)}{\partial T^2} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \Theta + \\
& + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \Theta \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \tilde{Q}(T) + \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial T} \Theta; \\
& - \left(\lambda(T(0, \tau)) \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) + \lambda(T(0, \tau)) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(0, \tau)) \Theta \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(0, \tau)) \Theta \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) = 0
\end{aligned}$$

$$-\left(\lambda(T(b, \tau)) \frac{\partial T}{\partial x}(b, \tau) + \lambda(T(b, \tau)) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(b, \tau)) \Theta \frac{\partial T}{\partial x}(b, \tau) + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(b, \tau)) \Theta \frac{\partial \Theta}{\partial x}\right) = 0.$$

Пренебрегая множителями, имеющими порядок малости выше первого по Θ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{C}(T)}{\partial T} \Theta \frac{\partial \Theta(T)}{\partial \tau}; \frac{\partial \lambda^2(T)}{\partial T^2} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \Theta; \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x} \right)^2; \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} \Theta; \\ & \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(0, \tau)) \Theta \frac{\partial \Theta}{\partial x}; \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(b, \tau)) \Theta \frac{\partial \Theta}{\partial x}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Уравнения (4.13) для модели (4.10) примут вид:

$$\begin{aligned} \bar{C}(T) \frac{\partial \Theta_i}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial \Theta_i}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \frac{\partial \Theta_i}{\partial x} + \\ &+ \left(\frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda^2(T)}{\partial T^2} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial T} - \frac{\partial \bar{C}}{\partial T} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \Theta_i + \\ &+ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \lambda(T) + \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} + \tilde{Q}(T) - \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \bar{C}(T), \\ &i = \overline{1, N+1}, (x, \tau) \in Q_i, Q_i(x, 0) = 0, x \in [0, b], \\ &\lambda(T(d_0, \tau)) \frac{\partial \Theta_1}{\partial x}(d_0, \tau) + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T(d_0, \tau)) \frac{\partial T_1}{\partial x}(d_0, \tau) \Theta_1(d_0, \tau) + \\ &+ \frac{\partial T_1}{\partial x}(d_0, \tau) \lambda(T(d_0, \tau)) = 0. \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\Theta_i(d_i, \tau) = \Theta_{i+1}(d_0, \tau), \quad i = \overline{1, N}.$$

$$\frac{\partial \Theta_i}{\partial x}(d_i, \tau) = \frac{\partial \Theta_{i+1}}{\partial x}(d_i, \tau), \quad i = \overline{1, N}$$

$$\begin{aligned} & \lambda(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \frac{\partial \Theta_{N+1}}{\partial x}(d_i, \tau)(d_{N+1}, \tau) + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \cdot \\ & \cdot \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) \Theta_{N+1}(d_{N+1}, \tau) + \\ & + \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) \lambda(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) = 0. \end{aligned}$$

Выражения для первой вариации Лагранжа (4.11) с учетом (4.14) примут вид:

$$\begin{aligned}
\delta\Phi = & \sum_{i=1}^{N+1} \int_0^{\tau_m} \rho_i [T_i(d_i, \tau) + \Theta_i(d_i, \tau) - f_i(\tau)] d\tau + \\
& + \sum_{i=1}^{N+1} \int_0^{\tau_m} \int_{d_{i-1}}^{d_i} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \frac{\partial \psi_i}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial T} \psi_i - \bar{C} \frac{\partial \psi_i}{\partial \tau} \right] \Theta_i dx d\tau + \\
& + \sum_{i=1}^{N+1} \int_0^{\tau_m} \left\{ \lambda \psi_i \left(\frac{\partial \Theta_i}{\partial x} \right) - \left[\lambda \frac{\partial \psi_i}{\partial x} - \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \psi_i \right] \Theta_i \right\} \Big|_{x=d_{i-1}}^{x=d_i} d\tau - \\
& - \sum_{i=1}^{N+1} \int_{d_{i-1}}^{d_i} (\bar{C} \psi_i \Theta_i) \Big|_{\tau=0}^{\tau=\tau_m} dx + \\
& + \sum_{i=1}^{N+1} \int_{d_{i-1}}^{d_i} \gamma_i(x, 0) \Theta_i(x, 0) dx + \int_0^{\tau_m} \eta(d_0, \tau) \left[\lambda(T_1(d_0, \tau)) \frac{\partial \Theta_1}{\partial x}(d_0, \tau) + \right. \\
& + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T_1(d_0, \tau)) \frac{\partial T_1}{\partial x}(T_1(d_0, \tau)) \Theta_1(d_0, \tau) \Big] d\tau + \sum_{i=1}^N \nu(d_i, \tau) \Theta_i(d_i, \tau) - \\
& - \Theta_{i+1}(d_i, \tau) \Big] d\tau + \sum_{i=1}^N \zeta(d_i, \tau) \left[\frac{\partial \Theta_i}{\partial x}(d_i, \tau) - \left[\frac{\partial \Theta_{i+1}}{\partial x}(d_i, \tau) \right] d\tau + \right. \\
& + \int_0^{\tau_m} \eta(d_{N+1}, \tau) \left[\lambda(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \frac{\partial \Theta_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) + \right. \\
& + \frac{\partial \lambda}{\partial T}(T_{N+1}(d_{N+1}, \tau)) \frac{\partial T_{N+1}}{\partial x}(d_{N+1}, \tau) \Theta_{N+1}(d_{N+1}, \tau) \Big] d\tau + \\
& + \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \int_{d_{i-1}}^{d_i} \psi_i(x, \tau) \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \Delta \lambda(T) + \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right)^2 \Delta \frac{\partial \lambda}{\partial T} + \Delta \tilde{Q}(T) - \right. \\
& - \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \Delta \bar{C}(T) \Big] dx d\tau + \int_0^{\tau_m} \eta(d_0, \tau) \frac{\partial T_1}{\partial x}(d_0, \tau) \Delta \lambda(T_1(d_0, \tau)) d\tau + \\
& + \int_0^{\tau_m} \eta(d_{n+1}, \tau) \frac{\partial T_{n+1}}{\partial x}(d_{n+1}, \tau) \Delta \lambda(T_{N+1}(d_{n+1}, \tau)) d\tau.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Выражения (4.15) положим в основу построения градиентного численного метода вычисления компонент вектора $p = \{p_k\}$, $k = 1, \dots, m$

$$p_{n+1} = p_n - \beta_n \frac{\partial J'}{\partial p_n},$$

где параметр спуска β_n на n -й итерации вычисляется из условия

$$\beta_n = \arg \min_{\beta} J(p_n - \beta J'_n).$$

Приближенно функционал невязки на $n=1$ -й итерации можно представить в виде:

$$J^{n+1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \rho_i \left[T(d_i, \tau, p_n) + \Theta(d_i, \tau, J'_n) - f_i(\tau) \right]^2 d\tau,$$

где $\Theta(d_i, \tau, \beta_n, J'_n)$ – удовлетворяет краевой задаче (4.14) и β имеет вид:

$$\beta_n = \frac{\sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \rho_i [T(d_i, \tau, p_n) - f_i(\tau)] \Theta(d_i, \tau, J'_n) d\tau}{\sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_m} \rho_i [\Theta(d_i, \tau, J'_n)]^2 d\tau}.$$

Таким образом, в работе предлагается новый подход, позволяющий оценить адекватность математических моделей в случае необходимости идентифицировать неизвестные функциональные зависимости.

В табл. 4.1 представлены результаты решения задачи идентификации теплофизических свойств вулканизата и оценка адекватности математической модели (4.6) по предлагаемой методике при ремонте гуммировочного покрытия марки 1751 + 2566. Предложенный алгоритм идентификации может быть использован при решении аналогичных задач для широкого класса химико-технологических объектов.

Таблица 4.1

**Результаты решения задачи идентификации
теплофизических свойств вулканизата**

Время работы [мин]	γ_1 [Т, К]	γ_2 [Вт/(м К)]	$T_1^{\text{э}}$ [Т, К]	T_1 [Т, К]
5	292	0,265	407	406
10	293	0.271	411	409
15	294	0.279	411	410
20	293	0.268	413	413
25	294	0.270	417	415
30	295	0.262	417	417

4.2. Решение задач интенсификации теплообмена при вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий в условиях неопределенности

Результаты исследований [8, 13, 79, 113] позволили выявить связь физико-химических характеристик гуммировочных смесей, которые в значительной мере определяют срок службы отремонтированного участка эластомерной обкладки, т.е. искомого показателя качества, и температурных режимов процесса вулканизации. Поэтому в большинстве известных источников [86–88], посвященных интенсификации работы вулканизаторов, в качестве критерия эффективности используются температурные профили.

Процесс вулканизации относится к классу сложных химико-технологических процессов и протекает в условиях постоянно действующих возмущений стохастической природы, которые являются источниками или факторами неопределенности и существенно влияют на ход технологического процесса вулканизации.

В связи с тем что, как это отмечалось в работе [38, 122, 177], оптимальная стратегия интенсификации процесса вулканизации не инвариантна вариациям возмущающих воздействий, для обеспечения заданного качества вулканизации необходимо учитывать факторы неопределенности. Задача интенсификации данным процессом заключается в повышении качества ремонта при минимуме энергетических затрат, определяется температурным режимом его проведения.

Проблема синтеза в стохастической системе состоит в определении алгоритма или закона управления объектом, обеспечивающего наилучшее, оптимальное протекание процесса или получение наилучшего конечного результата в заданных условиях с учетом случайных полезных сигналов (воздействий) и помех. Формулировка и решение этих стохастических задач осуществляется с применением вероятностных критериев, которые, в отличие от детерминированных, содержат дополнительную операцию статистического осреднения и поэтому являются более сложными.

Постановки задач стохастического программирования, в которых ограничения задачи должны удовлетворяться при всех реализациях случайных параметров, называют жесткими постановками. Жесткие постановки необходимы в тех ситуациях, когда каждое появление невязки в условиях задачи грозит чрезмерно большими штрафами и сводит на нет эффект от оптимизации линейной формы [187].

Область определения задачи стохастического программирования в жесткой постановке представляет собой пересечение многогранных множеств, отвечающих каждой реализации параметров условной задачи. Жесткая постановка в этом случае теряет смысл.

Таким образом, один из простейших путей учета случайного характера условий задачи математического программирования – переход к жесткой по-

становке не всегда приводит к осмысленному и рациональному решению задачи стохастического программирования.

Более сложной моделью управления в условиях неполной информации является модель с вероятностными ограничениями. Во многих задачах управления в условиях неполной информации, связанных с повторяющимися ситуациями, нет необходимости в том, чтобы ограничения удовлетворялись при каждой реализации случая. Затраты на накопление информации или другие затраты, обеспечивающие исключение невязок в условии задачи, может превышать достигаемый при этом эффект. Часто конкретное содержание задачи требует лишь, чтобы вероятность попадания решения в допустимую область превышала заданное число $\alpha > 0$. В тех случаях, когда возможные невязки в отдельных ограничениях вызывают различный ущерб, имеет смысл дифференцированно подходить к разным условиям. Чтобы уравновесить ущерб, определяемый невязками в разных условиях задачи, следует ограничить снизу вероятность выполнения каждого из них различными числами $\alpha > 0$. Обычно $\alpha_1 > 1/2$. Подобные постановки задач стохастического программирования называют моделями с вероятностными ограничениями.

При работе с вероятностью выполнения поставленной проблемы исходная стохастическая задача заменяется эквивалентной детерминированной минимаксной задачей, для решения которой используются методы, изложенные в [187].

Таким образом, задача интенсификации процесса термообработки эластомерных обкладок заключается в следующем: необходимо определить такие законы изменения токов нагревательных элементов плит, при которых достигается минимум математического ожидания суммы квадратов отклонений рассчитанной по математической модели и экспериментально определенной температур в "характерных" точках нагревательных плит при ограничениях на мощность и конструктивные параметры нагревательных элементов.

Решение задачи с ограничениями затруднительно [12], поэтому системе уравнений математической модели ставится в соответствие система обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная путем дискретизации уравнений математической модели по пространственным координатам (6 точек разбиения) с использованием интерполяционных формул Лагранжа [10, 12, 149]. Температурные зависимости в точках дискретизации с соответствующими коэффициентами приведены в приложении 4.

Результаты оценки адекватности полученной модели доказали ее пригодность в целях моделирования и интенсификации процесса термообработки при ремонте эластомерных обкладок гуммированных аппаратов.

В результате получим:

$$\dot{x}(\tau) = f(\tau, x, u, a, b), \tau_0 \leq \tau \leq \tau_1, \quad (4.16)$$

$\dim(\mathbf{x})=n$, $\dim(\mathbf{u})=m$, $\dim(\mathbf{b})=r$, $u(\tau) = \{I_1(t), I_2(t)\}$ – вектор управляющих воздействий; $I_1(t) \equiv u_1(t)$, $I_3(t) \equiv u_3(t)$, $\underline{u}_1 \leq u_1 \leq \bar{u}_1$, $\underline{u}_3 \leq u_3 \leq \bar{u}_3$.

С соответствующими начальными условиями: $\mathbf{x}(\tau)|_{\tau=0} = \mathbf{x}_0 + \xi_0$.

Критерий оптимальности имеет вид:

$$I_0(v) = M[f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \rightarrow \min_v,$$

$$f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1)) = \sum_{i=1}^{10} (x_i(\tau_1) - x'_i(\tau_1))^2, v = \{u, a\}, \quad (4.17)$$

где $x_{i,i=1,10}$, $x'_{i,i=1,10}$ – соответственно расчетная и измеряемая в "характерных" точках температура, при условиях связи, представленных в виде уравнения теплопроводности при конкретных граничных условиях и ограничениях на конструктивные параметры и управляющие воздействия:

$$\bar{\rho} \frac{l_1}{S_1} - R_{01} \leq 0, \quad \bar{\rho} \frac{l_3}{S_3} - R_{03} \leq 0$$

и на мощность нагревателя $Q_1 - N_{01} \leq 0, Q_3 - N_{03} \leq 0$.

Для решения задачи воспользуемся методами оптимизации систем со случайными параметрами [34]. При этом задача (4.16–4.17) может быть формализована следующим образом:

$$I_0(v) = M[f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \rightarrow \min,$$

$$\dot{x} = f(\tau, x, u, a, b), \tau \in [\tau_0, \tau_1], \quad x(\tau_0) = x_0,$$

$$I_s(v) = M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \leq 0, \quad s \in J_1 = 1, q, \quad (4.18)$$

$$\psi_s(u) \leq 0, \quad s \in J_2 = 1, k,$$

$$g_s(a) \leq 0, \quad s \in J_3 = 1, q_0,$$

где

$$\Psi_s(u) = \begin{cases} u_1 - \bar{u}_1, \\ \underline{u}_1 - u_1, \\ u_3 - \bar{u}_3, \\ \underline{u}_3 - u_3, \\ Q_1 - N_{01}, \\ Q_3 - N_{03}. \end{cases} \quad g_s(a) = \begin{cases} \bar{\rho} \frac{l_1}{S_1} - R_{01}, \\ \bar{\rho} \frac{l_3}{S_3} - R_{03}. \end{cases}$$

$I_s(v)$, $s = 1, \dots, q$ представляет собой часть компонентов вектора фазовых координат, не используемых в (4.17). Определим необходимые условия оптимальности для рассматриваемой задачи, используя методы математической теории экстремальных задач [7, 34, 56, 72, 145].

Вариации δv , где $v = \{u, a\}$, в точке v будем называть возможными, если достаточно малое перемещение из точки $v \in \Theta$ в направлении вариаций не выводит за пределы множества Θ , т.е. существует такое малое положительное $\varepsilon > 0$, $(v + \varepsilon \delta v) \in \Theta$.

Функционал (4.18) является выпуклым и ограниченным, что следует из [7, 34, 56, 72, 145] и для того чтобы он достигал минимума на Θ в точке $v^* = \{u^*, a^*\}$, необходимо и достаточно, чтобы в этой точке не было подходящих вариаций [34].

Представим итерационный алгоритм поиска оптимального решения задачи по шагам в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Итерационный алгоритм поиска

№ шага	Выполняемые действия
1	Определение исходного управления $u^n(\tau)$, a^n , p^n ($n=0, 1, 2, \dots$), выбор σ, θ
2	Решение задачи Коши с имеющимся исходным приближением
3	Определение исходного приближения x^n_1 , вычисление $M[f_s(x, x')]$, $\Psi_s(u)$, $g_s(a) \forall \tau \in [\tau_0, \tau_1]$
4	Формирование множества индексов $J_1(v^n)$, $J_2(u^n)$, $J_3(a^n)$ и $J(v^n, \varepsilon^n)$.
5	Определение конуса возможных вариаций
6	Выбор допустимых вариаций δu_p^n , δa_i^n
7	Определение $\Delta I_0 = I_0(u^{n+1}) - I_0(u^n)$, $\Delta H = M[H(u^{n+1}) - H(u^n)]$
8	Оценка ΔI_0 , ΔH если $ \Delta I_0 \leq \varepsilon_0$, $ \Delta H \leq \varepsilon_0$, $J(v^n, \varepsilon^n) = J(v^n)$ – прекращение процесса; иначе переход к п. 2 с новым приближением $u^{n+1}(\tau)$, a^{n+1}

Решение задачи начинается с определения некоторого исходного $u^n(\tau)$, a^n , p^n , $n=0, 1, 2, \dots$; где n – номер текущей итерации, $p=(x_0, b)$.

Во многих, практически важных случаях начальное приближение можно построить из физических соображений рассматриваемой задачи либо подбором. В нашем случае исходным приближением может служить построенное при решении детерминированной задачи, являющееся аналогом исходной в предположении, что случайные возмущения, записываются соответствующими математическими ожиданиями u^0 .

Задача Коши для уравнения (4.16), согласно п. 2 и 3 таблицы 4.2, решается с заданным приближением u^n , a^n . Определяется исходное приближение x^n_1 и вычисляются значения функционалов $M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))]$ и функций $\Psi_s(u)$, $g_s(a)$ при каждом фиксированном $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$.

Далее формируется множество индексов (п. 4):

$$\begin{aligned} J_1(v^n) &= \{s \in J_1 : M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))] = 0\}, \\ J_2(u^n) &= \{s \in J_2 : \Psi_s[u(\tau)] = 0, \tau \in \tau_s\}, \\ J_3(a^n) &= \{s \in J_3 : g_s(a) = 0\}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} &J(v^n, \varepsilon^n) \cup J_1(v^n, \varepsilon^n) \cup J_2(v^n, \varepsilon^n) \cup J_3(v^n, \varepsilon^n): \\ J_1(v^n, \varepsilon^n) &= \{s \in J_1 : -\varepsilon^n \leq M[f_s(x, x')] \leq 0\}, \\ J_2(u^n, \varepsilon^n) &= \{s \in J_2 : -\varepsilon^n \leq \Psi_s[u(\tau)] \leq 0, \tau \in \tau_s\}, \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$J_3(a^n, \varepsilon^n) = \{s \in J_3 : -\varepsilon^n \leq g_s(a) \leq 0\},$$

$$\tau_s = \{\tau \in [\tau_0, \tau_1] : \Psi_s[u(\tau)] = 0\},$$

$$\tau_s = \{\tau \in [\tau_0, \tau_1] : -\varepsilon^n \leq \Psi_s[u(\tau)] \leq 0\},$$

где $J_1 = \{1, 2\}$, $J_2 = \{1, 4\}$, $J_3 = \{1, 2\}$, $\tau_s \subset \tau_s$, множества $J(v^n) = J(v^n, \varepsilon^n)$ совпадают при $\varepsilon^n = 0$, если $\tau'_s = \tau''_s$, где ε – параметры, вводимые для обеспечения сходимости итерационного алгоритма.

Согласно методу возможных направлений [34], введем искусственную переменную σ , вектор с положительными компонентами θ , и определим конус возможных вариаций (п. 5):

$$K_0 = \{\delta u^n, \delta a^n\} - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau +$$

$$\sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_1(v^n, \varepsilon^n),$$

$$\sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u} \delta u_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_2(u^n, \varepsilon^n),$$

$$\sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a} \delta a_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_3(a^n, \varepsilon^n).$$
(4.21)

Выберем из всех допустимых вариаций δu_p^n , δa_i^n , удовлетворяющих (4.21), вариации, имеющие наибольшую скорость убывания функционала (4.17). Вводя нормализацию $\|\delta u_p^n\| \leq 1$, $\|\delta a_i^n\| \leq 1$, приходим к необходимости решения задачи вида:

$$\max \left\{ \sigma^n - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_1}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \right.$$

$$s \in J_1(v^n, \varepsilon^n),$$

$$\sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \delta u_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n),$$

$$\sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n),$$

$$\left. - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_1}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \sigma^n \leq 0 \right\},$$
(4.22)

где $H = \sum_{i=1}^n \Lambda_i(\tau) p_i(\tau, x, u, a, b)$; $\Lambda_i(\tau) \neq 0$ непрерывные случайные функции, определенные следующим образом:

$$\dot{\Lambda}_i = -\frac{\partial H^s}{\partial x_i}, \tau \in [\tau_1, \tau_0], \Lambda_i(\tau_1) = -\frac{\partial f_s}{\partial x_{i1}}, s = 0, \dots, q.$$

Произвольный вектор $(\delta u_p^n, \delta a_i^n, \sigma^n)$, удовлетворяющий (4.22), при $\sigma \geq 0$ определяет возможные подходящие вариации, так как

$$\begin{aligned} K = \{ \delta u^n, \delta a^n \} - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \\ \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_1(v^n, \varepsilon^n), \\ \sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \delta u_p^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\ \sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_p^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, s \in J_3(a^n, \varepsilon^n); \end{aligned} \quad (4.23)$$

- есть конус возможных вариаций [34],

$$\delta I_0 = -\sum_{p=1}^r M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_0}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n \leq -\sigma^n \leq 0.$$

Следовательно, за счет максимизации σ^n выбираются такие подходящие вариации $\delta u^n, \delta a^n$, в направлении которых функционал (4.17) убывает, а функция $M[H(\tau, x, u, a, b, \Lambda)]$ переменного u почти для всех $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$ возрастает достаточно быстро. Основное значение нормализации – это обеспечение единственности решения вспомогательной задачи выбора подходящих вариаций. В направлении наискорейшего спуска $\delta u_p^n = \alpha_p^n \left(\frac{\partial H^0}{\partial a_i} \right)$ задача о выборе возможных вариаций (4.22) сводится к отысканию конечномерного вектора $(\alpha^n, \delta a^n)$, обеспечивающего

$$\begin{aligned}
& \max \left\{ \delta u^n - \sum_{p=1}^r \left[\int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \right] \alpha_p^n + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \right. \\
& s \in J_1(v^n, \varepsilon^n), \\
& \sum_{p=1}^r \left[M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \right] \alpha_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\
& \sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n), \\
& \left. - \sum_{p=1}^r \left[\int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \right] \alpha_p^n + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \sigma^n \leq 0, \sigma^n \geq 0 \right\}.
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Здесь коэффициенты при неизвестных α_p^n – известные величины, вычисляемые при u^n, a^n, p^n вдоль n -ых траекторий по формулам:

$$\dot{\Lambda}_i^s = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \tau \in [\tau_1, \tau_0], \Lambda_i^s(\tau_1) = -\frac{\partial f_s}{\partial x_{i1}}, s = 0, \dots, q. \tag{4.25}$$

Случайные величины и вектор-функции, входящие в правые части (4.24), (4.25), моделируются по их заданным вероятностным характеристикам. Наиболее простую вычислительную схему имеют алгоритмы, построенные на основе метода Монте-Карло (статистических испытаний). Для каждой выборки значений реализаций случайных векторов и вектор-функций при помощи численных методов интегрируется система (4.25), причем численное интегрирование проводится многократно [34]. Далее, в зависимости от выбранного метода анализа точности, рассчитываются требуемые вероятностные характеристики: θ_s если s соответствуют нелинейным ограничениям; $\theta_s=0$, если s соответствуют линейным ограничениям. Выбор θ_s произволен.

Задача выбора подходящих вариаций (4.24) является задачей линейного программирования с двухсторонними ограничениями на переменные. При ее решении возникают затруднения, связанные с тем, что задача линейного программирования (4.23) имеет бесконечное число ограничений. Поэтому, как известно [104], для того чтобы преодолеть эту трудность, интервал времени $[\tau_0, \tau_1]$ покрывается счетной сеткой с шагом τ (узлы сетки $\tau_v = v\tau$ ($v=0, \dots, \tau_1=(N_\tau)$)) и улучшение управляющей функции производится при каждом фиксированном $\tau_v \in [\tau_0, \tau_1]$. Таким образом, решение (4.24) сводится к приближенному.

Величина шага h^n , на который следует сместиться в направлении подходящих вариаций $\delta u^n, \delta a^n$, вычисляется как наименьший, положительный корень уравнений:

$$\delta I_0 = \sum_{p=1}^r \left[\int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \right] \alpha_p^n + \sum_{i=1}^{m_0} \left(\frac{\partial f_0}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n = 0, \tag{4.26}$$

$$M[f_s(x(\tau_1), x(\tau_1))] = 0 \quad (s \in J_1), \quad \Psi_s(u) = 0 \quad (s \in J_2), \quad g_s(a) = 0 \quad (s \in J_3). \quad (4.27)$$

Частные производные и функции вычисляются в точке $(u^n(\tau) + h^n \delta u^n(\tau)|_{\tau \in \tau''}, a^n + h^n \delta a^n)$; h^n – единственная переменная; $u^n(\tau), a^n, \delta u^n, \delta a^n$ – известные векторы; $\tau'' = \cup_s \tau_s$. Если какое-либо из уравнений (4.27) не имеет положительных корней, то его наименьший положительный корень полагается равным ∞ .

Определим $\Delta I_0 = I_0(u^{n+1}) - I_0(u^n)$ (п. 7 таблицы 4.2). Поскольку решение задачи имеет в большинстве случаев быструю сходимость по функционалу и несколько медленнее сходится по управлению, то находится также

$$\Delta H = M[H(u^{n+1}) - H(u^n)] \text{ для каждого } [\tau_0, \tau_1].$$

Согласно п. 8 таблицы 4.2, производим оценку $\Delta I_0, \Delta H$.

Если $|\Delta I_0| < \varepsilon_0, |\Delta H| < \varepsilon_0, J(v^n, \varepsilon^n) = J(v^n)$, то итерационный процесс прекращается. В противном случае переходим к п. 1 таблицы 4.2 и продолжаем вычисления, используя новое приближение

$$u^{n+1}(\tau) = u^n(\tau) + h^n \delta u^n(\tau)|_{\tau \in \tau''}, \quad a^{n+1} = a^n + h^n \delta a^n.$$

Таким образом, метод возможных направлений предусматривает выбор начального приближения, выбор подходящих вариаций, в направлении которых функционал $I_0(v)$ убывает, а функция $M[H]$ переменного u почти для всех $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$ возрастает достаточно быстро, обеспечение условий сходимости процесса к оптимальному решению, определение длины шага и оценку приближений.

Результаты решения задач интенсификации для различных марок ремонтируемых гуммировочных покрытий представлены на рис. 4.2–4.3, где под буквой «а» показаны законы изменения токов нагревательных элементов плит, под буквой «б» – изменение во времени средней по поверхности температуры вулканизируемого участка ремонтируемого покрытия.

Кривая 1 описывает изменения средней по поверхности температуры, при эксперименте, по результатам реализации детерминированной задачи процесса вулканизации, 2 – кривая, характеризует изменение температуры, полученное при реализации решения вероятностной задачи.

На рис. 4.2а представлено управляющее воздействие процессом вулканизации при ремонте покрытия марки 1751 (1,5) + 2566 (1,5+1,5+1,5) при $\delta_{ст} = 4$ мм, которое представляет собой кусочно-постоянную функцию. График имеет две ярко выраженные площадки (основной нагрев и остывание в индукторе), что не противоречит физико-химическим основам процесса вулканизации. Первая площадка, находящаяся на уровне 4,2 А, имеет продолжительность 2400 с. и соответствует процессу разогрева, вторая соответствует процессу выдержки.

При сравнении результатов, представленных на рис. 4.2б–4.3б, можно сделать обоснованный вывод, что введение в математическую модель формализованных возмущений стохастической природы позволяет существенно

снижать максимальные значения токов (до 5–7%) и, как следствие, обеспечивать меньшие затраты электроэнергии.

В то же время, как видно из анализа рис. 4.2б–4.3б, диапазон разброса температур, возникающих при реализации найденных законов, соответствует технологическим условиям [32, 135] и находится в пределах 5К.

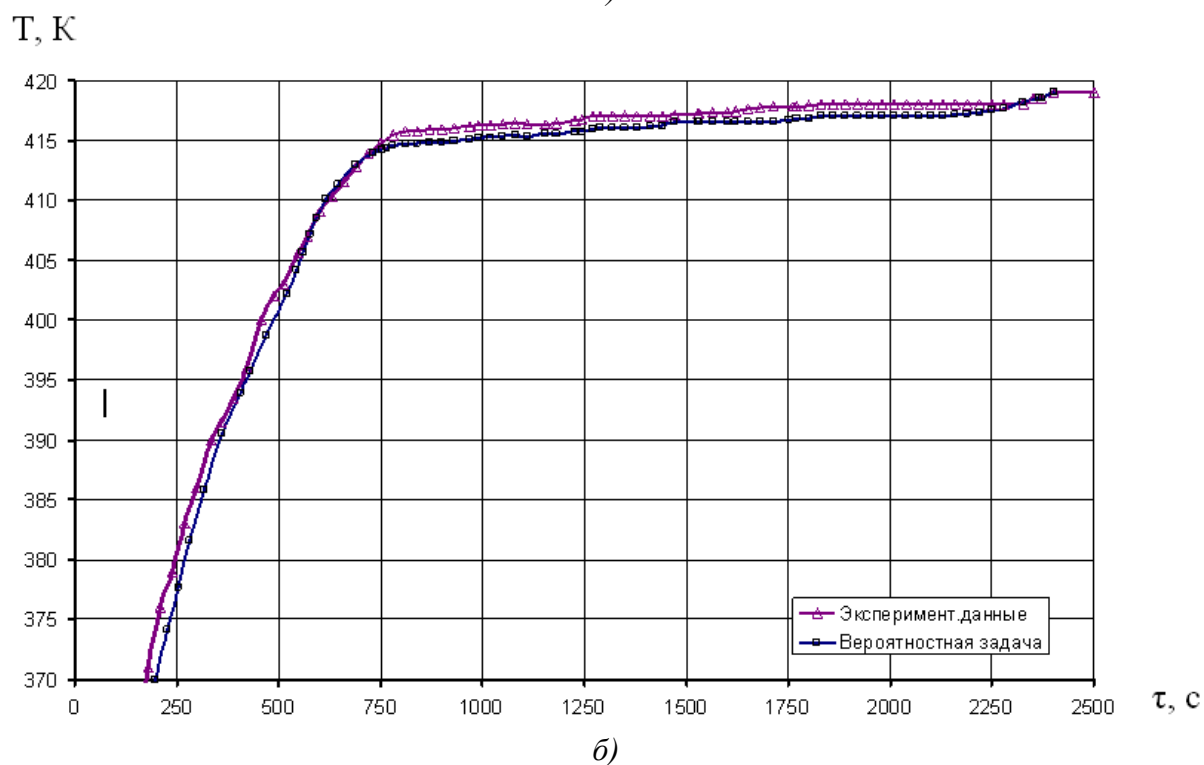
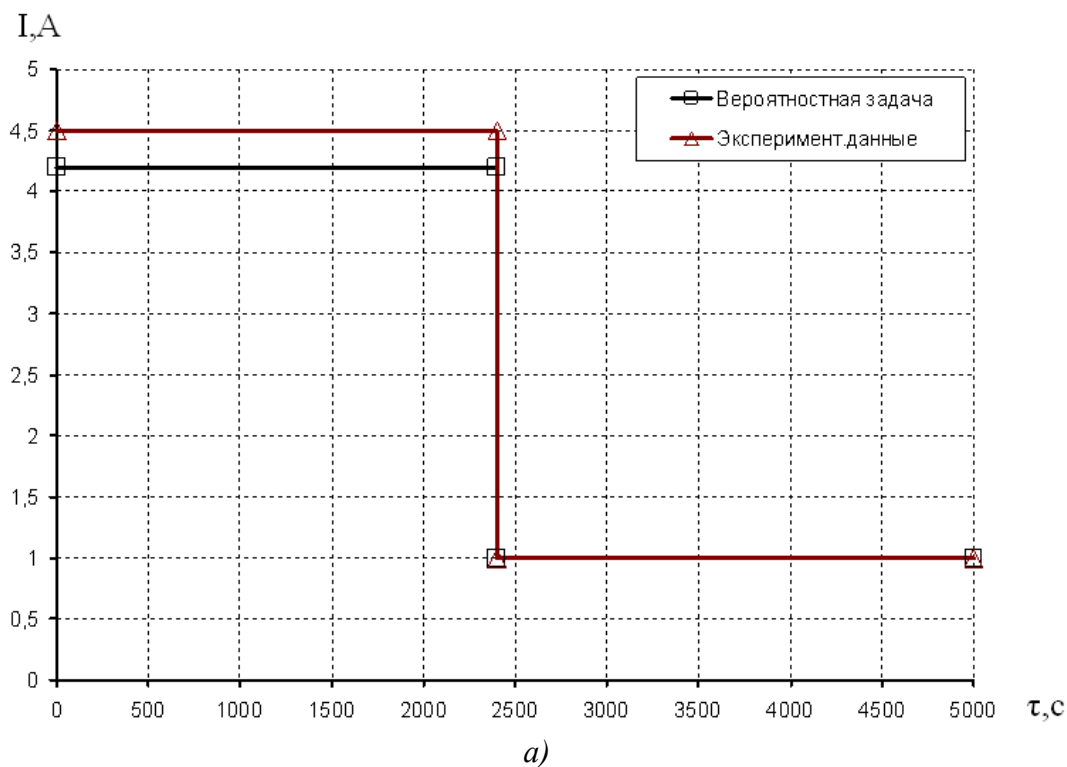


Рис. 4.2. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марки 1751 (1,5) + 2566 (1,5+1,5+1,5) при $\delta_{cm} = 4$ мм, до и по результатам решения вероятностной задачи

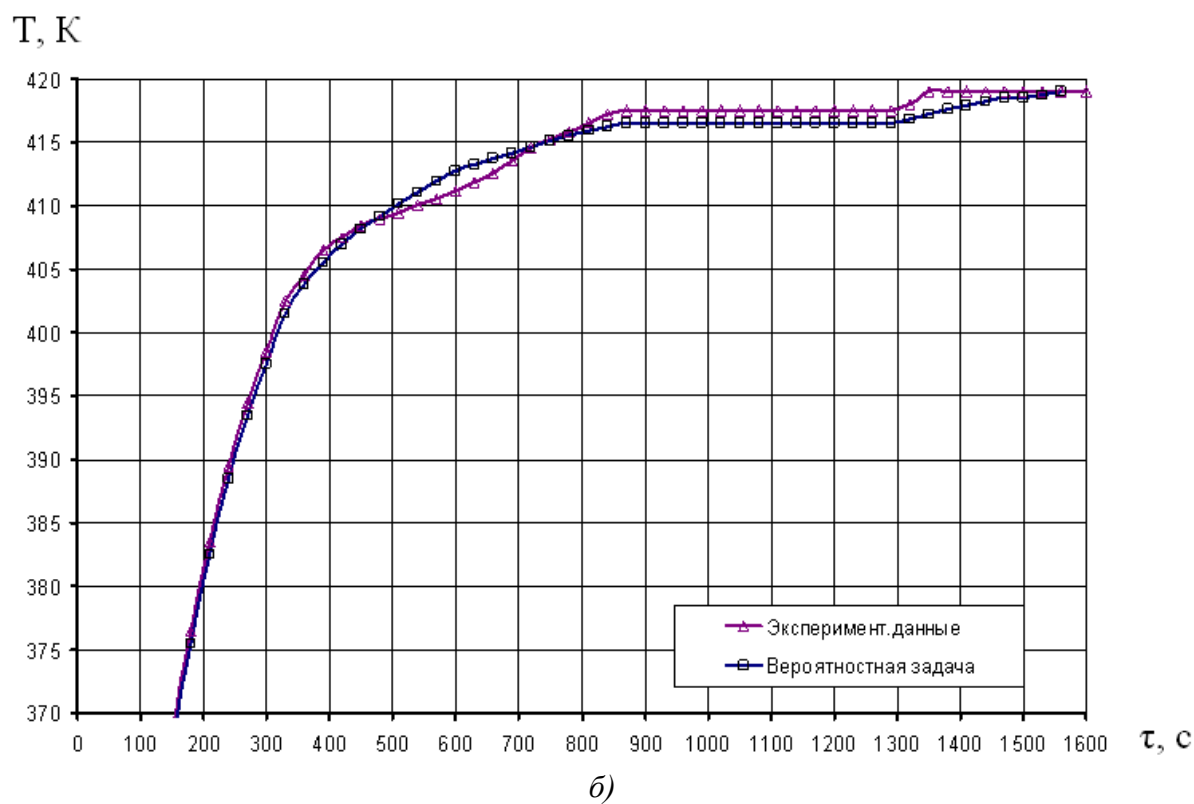
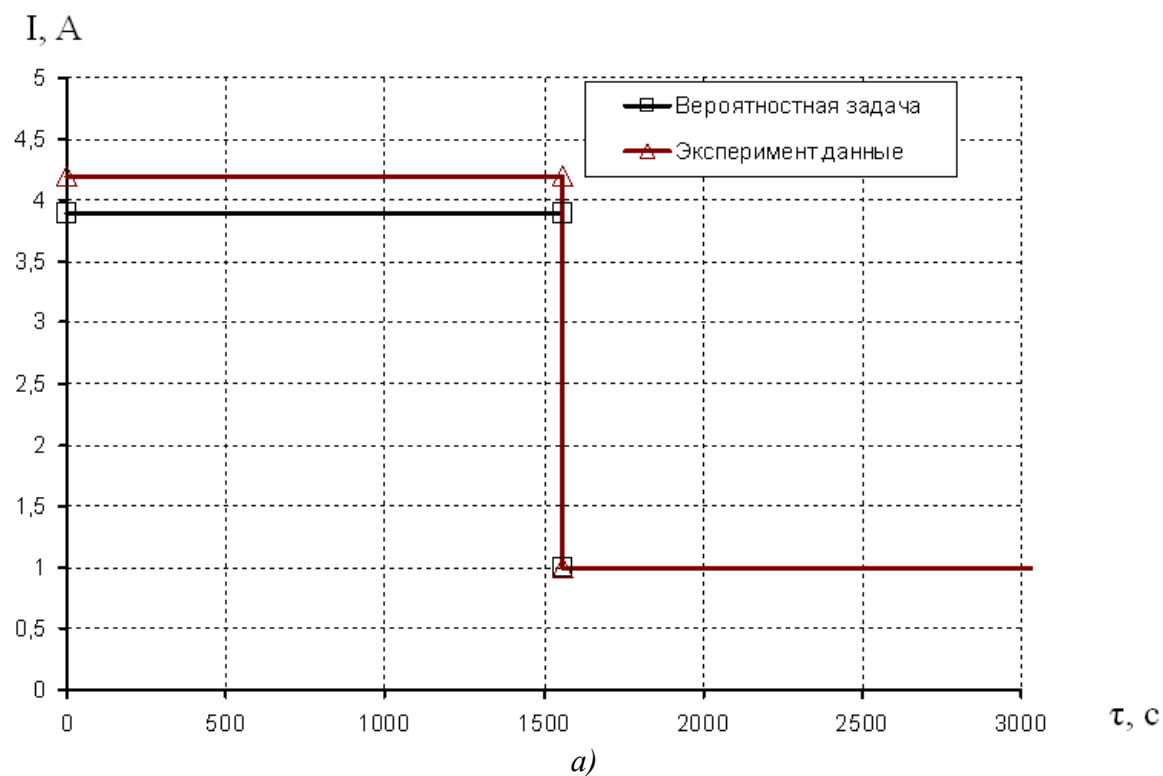


Рис. 4.3. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марки 1751 (1,5) + 1976 (1,5+1,5) при $\delta_{cm} = 2$ мм., до и по результатам решения вероятностной задачи

4.3. Экспериментальное исследование ремонта покрытий гуммированных объектов

Технологический процесс ремонта осуществлялся по схеме, приведенной на рис. 4.4.

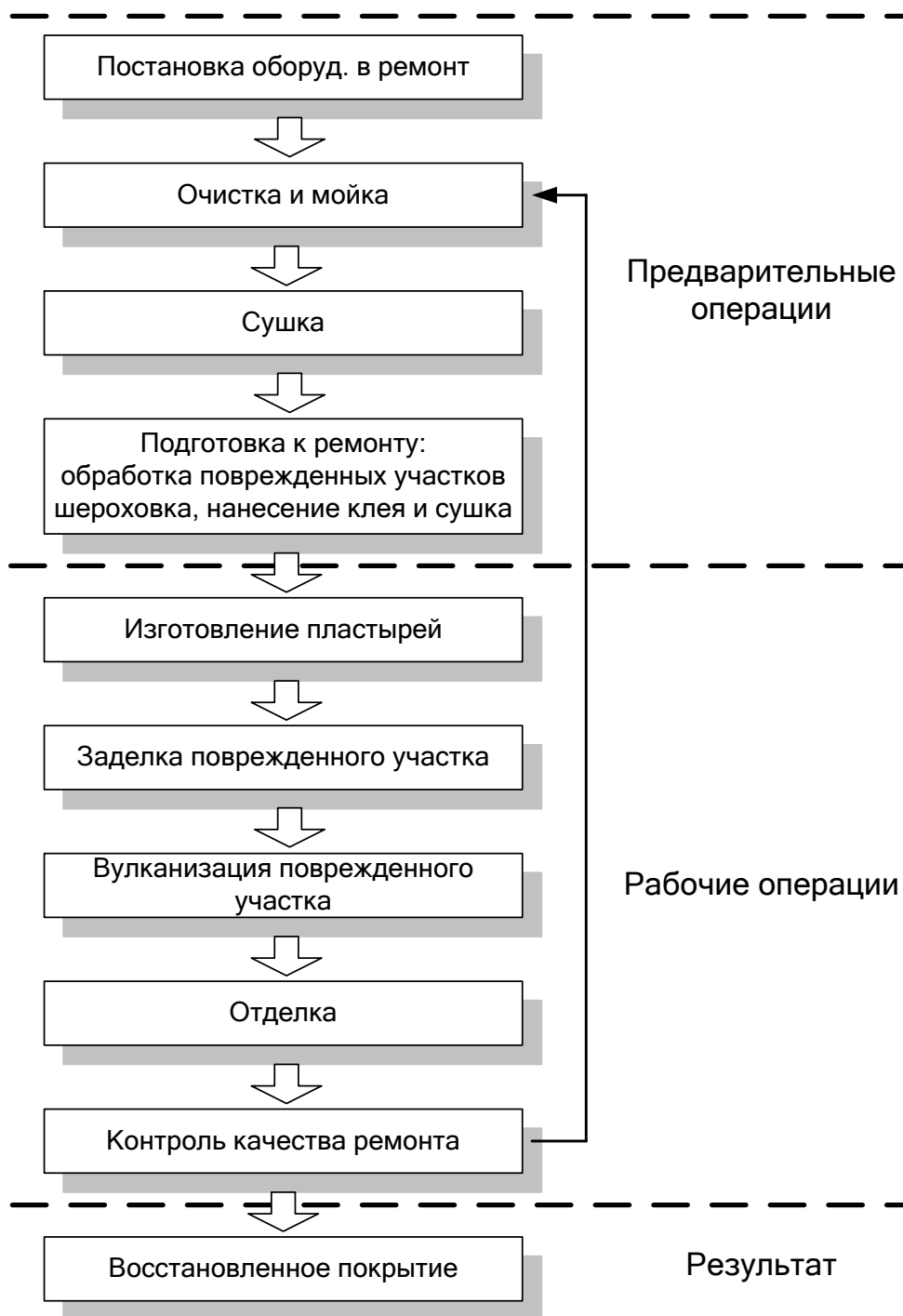


Рис. 4.4. Принципиальная схема технологического процесса
местного ремонта гуммировочных покрытий

Анализ технологических стадий процесса местного ремонта с точки зрения их влияния на качество отремонтированного изделия позволяет сделать следующий вывод: наиболее важной технической стадией является та, на которой проводится процесс теплообмена (вулканизация) на ограниченном участке ремонтируемого гуммировочного покрытия.

Для ремонта местных повреждений в условиях химических производств использовали покрытия, эксплуатировавшиеся в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.016-87 и РТМ-38.40535-77.

Назначение вулканизации – создать прочное монолитное соединение починочных материалов с ремонтируемыми участками покрытия и придать пластичной сырой резиновой смеси починочного материала эластичность и высокую прочность. Вулканизацию ремонтируемых покрытий производили на экспериментальной установке, принципиальная схема которой показана (рис. 4.5.).

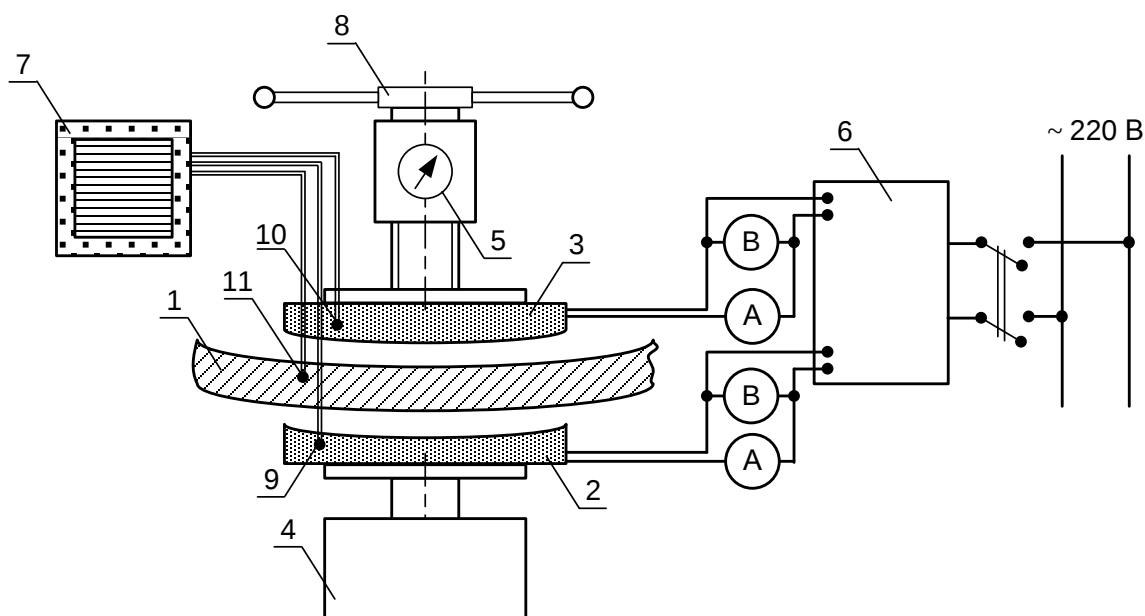


Рис. 4.5. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – опытный образец; 2 – нижняя нагревательная плита; 3 – верхняя нагревательная плита; 4 – основание установки; 5 – манометр для измерения давления прессования; 6 – устройство регулирования температуры; 7 – самопишущий многоточечный потенциометр; 8 – регулятор давления; 9 – термопара для контроля температуры в нижней нагревательной плите; 10 – термопара для контроля температуры в верхней нагревательной плите; 11 – термопары для контроля температуры опытного образца

К аппарату имеются нагревательные плиты с различной площадью прессования. Посадкой контурных сегментов нагревательные плиты в течение одной минуты можно установить таким образом, чтобы они соответствовали форме ремонтируемого покрытия.

После вулканизации гуммировочного покрытия подвергали отделке, которая сводится к удалению наплывов резины, неровностей и заусенцев на отремонтированных участках. Отделку выполняли вручную ножом и абразив-

ным кругом, закрепленным на гибком валу и приводимым в движение от электродвигателя.

Цикл вулканизации разделяли на несколько периодов. Во время первого периода покрытие нагревали до температуры вулканизации. В этот период происходит размягчение и растекание вновь наложенных материалов. Увеличение продолжительности этого периода ведет к значительному перетеканию материалов, в результате чего появляются большие выпрессовки резины, образуются наплывы и другие дефекты.

Во время второго периода покрытие выдерживали при температуре вулканизации. За этот период ремонтные материалы приобретали заданные физико-механические свойства. Увеличение продолжительности этого периода ведет к перевулканизации (ухудшение свойств ремонтных материалов), а его сокращение – к недовулканизации, т.е. ухудшению свойств гуммированного покрытия.

Экспериментальные исследования проводились с использованием датчиков и вторичных приборов, представленных в пункте 3.3. Полученные теоретические законы были реализованы на оборудовании с блоком измерения и регулирования температуры нагрева. Представленное устройство позволяет оперативно, с высокой точностью производить измерение температуры в вулканизируемом изделии и значительно повысить качество регулирования. Прибор имеет небольшую потребляемую мощность, отличается малыми конструктивными параметрами и компактным исполнением, что позволяет легко осуществить его установку на различных вулканизаторах местного ремонта.

Нагревательные плиты обеспечивают поддержание температуры в диапазоне от 373 до 523 К с колебаниями не более $\pm 1,5\text{K}$, малая их инерционность нагрева улучшала задачу регулирования температуры.

Техническая характеристика устройства: напряжение однофазного электрического тока 220 В; управляемая мощность 3000 Вт; диапазон рабочих температур от 373 до 453 К; давление прессования до 5 МПа; класс точности 1,0; габариты 80x60x315 мм; вес 2,0 кг. Время нагрева устанавливается с помощью реле времени, которое позволяет выбирать режим в диапазоне 1–99 минут. По истечении установленного времени нагрев автоматически прекращается, при этом подается звуковой сигнал. Температура задается с помощью расположенных на панели датчиков температуры, позволяющих установить необходимый режим на нагревательных плитах. Прибор регистрации температуры установлен в верхней части панели и позволяет определить момент выхода вулканизатора на режим задания цикла вулканизации.

Гуммировочные покрытия, прошедшие местный ремонт, имеют определенные наружные видовые дефекты. Рассмотрим эксплуатационные качества отремонтированных покрытий.

4.4. Влияние условий теплообмена при термообработке на качественные показатели готовых отремонтированных гуммировочных покрытий

4.4.1. Основные закономерности и методы оценки степени вулканизации резин в отремонтированных гуммированных объектах.

Кинетика неизотермической вулканизации

Свойства отремонтированных гуммировочных резин, в частности механические, обусловлены структурой материалов, а следовательно, характером и степенью поперечного сшивания. Вместе с тем, вследствие температурно-временной зависимости неравновесные механические свойства по-разному проявляются в различных режимах нагружения и оказываются неоднозначно связанными со степенью вулканизации. В наиболее простом виде взаимосвязь структура – свойство обнаруживается при равновесном нагружении, для которого исключается влияние времени, скорости или частоты деформации.

Изменение различных свойств в зависимости от степени или времени вулканизации (кинетика вулканизации при постоянной температуре) неодинакова [113]. Оказывается, что с увеличением продолжительности вулканизации значения показателей одних свойств проходят через максимум, как прочность и долговечность некоторых резин, других свойств – через минимум (степень набухания, удлинение при разрыве, остаточная деформация), третьих – меняются неопределенно, завися от состава резин (эластичность по отскоку, гистерезис). Такие свойства, как, например, теплофизические характеристики резин, изменяются со степенью вулканизации резин очень незначительно.

Вопрос об определении оптимума вулканизации поэтому не может быть решён однозначно: по каждому свойству для одной и той же смеси имеется свой оптимум. Очевидно, что понятие оптимума несколько условно. Технический оптимум – это время вулканизации, за которое достигается наилучшая совокупность свойств вулканизата; выбор совокупности свойств, естественно, зависит от назначения материала в резинометаллическом изделии.

Для того чтобы оценить, какие условия изотермической вулканизации при $T=T_{\text{экв}}=\text{const}$ эквивалентны неизотермическому процессу $T=T(\tau)$ по продолжительности (давая те же результаты или одинаковые степени изотермической и неизотермической вулканизации), рассчитывают эквивалентные (неизотермическому процессу) времена изотермической вулканизации $S_{\text{экв}}$, принимая определенные допущения о характере реакции.

Введем понятие о температурном коэффициенте вулканизации K – отношении продолжительности вулканизации $\tau_{(T+a)}$ и τ_T при двух постоянных температурах $(T+a)$ и T (или об обратном отношении констант скоростей реакций).

Для $K_a=\text{const}$ в резинотехнической промышленности принято $a=10$, $K=2$. На самом деле это правило приближенно выполняется лишь в узком диапазоне температур 403–423 К для резин, у которых реакция вулканизации характеризуется энергией активации $U=23,8$ ккал/моль.

Если считать константу скорости реакции функцией абсолютной температуры T по уравнению Аррениуса, где $Q_a=U$, то по [113]:

$$K = \frac{K_0 \cdot \exp\left(-\frac{U}{R \cdot (T+10)}\right)}{K_0 \cdot \exp\left(-\frac{U}{R \cdot T}\right)} = \exp\left[\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T+10}\right)\right] = \exp\left(\frac{U \cdot 10}{R \cdot T^2}\right), \quad (4.28)$$

где R – универсальная газовая постоянная. Таким образом, температурный коэффициент вулканизации при $T_1 = 411\text{K}$ для $U=23,8\text{ккал/моль}$ и $T_2=421\text{K}$, $K=2$. Однако K – функция температуры T .

Если $T_1=451\text{ K}$ из (4.28) получим $K=1,78$, а для $T_1=351\text{ K}$, $K=2,15$.

Эквивалентные времена вулканизации находят по одинаковым эффектам вулканизации E разных по температурному режиму процессов. Эффект вулканизации при переменной температуре равен:

$$E = \int_{\tau_{\text{инд}}}^{\tau_B} I \cdot d\tau, \quad (4.29)$$

где I – относительная интенсивность неизотермического процесса $T(\tau)$ для $K=2$, $a=10$; $T_0=373\text{K}$ (T_0 – стандартная температура, для которой I равна един.):

$$I = K^{(T(\tau)-373)/10}. \quad (4.30)$$

Тогда для $K(T)$ по формуле (4.28):

$$E = \exp\left(\frac{U}{R \cdot T_0}\right) \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_B} \frac{d\tau}{\exp\left(\frac{U}{R \cdot T(\tau)}\right)}. \quad (4.31)$$

При постоянной температуре обозначим интенсивность процесса через $I_{\text{из}}$, тогда

$$E = I_{\text{из}} \cdot \tau, \quad (4.32)$$

где τ – продолжительность изотермического процесса. Например, для $T=T_{\text{экв}}=\text{const}$, $K=2$, $a=10$.

$$I_{\text{из}} = 2^{(T_{\text{экв}}-373)/10}. \quad (4.33)$$

Из (4.32) видно, что $E_{\text{отэкв}}=I_{\text{тэкв}}$ при $\tau=1$. Для неизотермического процесса $T(\tau)$ при $K=K(T)$ по (4.28):

$$I_{\text{из}K=K(T)} = E_0 = \frac{\exp\left[U / (R \cdot T_0)\right]}{\exp\left[U / (R \cdot T_{\text{экв}})\right]}. \quad (4.34)$$

Если эффекты вулканизации E равны в изотермическом и неизотермическом процессах, причем неизотермический процесс длится от τ_0

до τ_B , то $\tau = S_{\text{ЭКВ}}$ изотермического процесса находится из равенства эффектов вулканизации:

$$S_{\text{ЭКВ}} = e^{\frac{U}{R \cdot T_{\text{ЭКВ}}}} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_B} \frac{d\tau}{e^{\frac{U}{R \cdot T(\tau)}}} \quad (4.35)$$

Поскольку обычно и температурные замеры в вулканизируемом изделии, и расчеты $T(\tau)$ производят через определенные промежутки времени ($\Delta\tau$), то формулу (4.35), применяя правило трапеций Симпсона, следует переписать в конечно-разностном виде:

$$S_{\text{ЭКВ}} = m \cdot (\Delta\tau) \cdot e^{\frac{U}{R \cdot T_{\text{ЭКВ}}}} \times \left[\sum_{i=2}^{m-1} \frac{1}{e^{\frac{U}{R \cdot T_i}}} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{U}{R \cdot T_1}}} + \frac{1}{e^{\frac{U}{R \cdot T_m}}} \right) \right], \quad (4.36)$$

где $m(\Delta\tau) = (\tau_B - \tau_0)$.

Определение энергии активации U обычно производят на вулканометрах, реометрах, вискозиметрах, кьюрометрах [148], набирая данные для расчета по следующей формуле для энергии активации:

$$Q_a = \frac{\lg(K_2 / K_1) \cdot 4,576 \cdot T_1 \cdot T_2}{(T_2 - T_1)} \quad (4.37)$$

при двух температурах T_1 и T_2 на стадии структурирования до достижения одного и того же уровня (относительного) амплитудного значения сдвигового усилия (или на кьюрометрах – сдвиговой деформации). Можно то же определять по любым кинетическим кривым и свойствам, чувствительным к степени вулканизации.

Константы скорости находятся из предположения о реакции взаимодействия каучука с серой как реакции первого порядка. Если при термообработке покрытий имеется индукционный период, то обычно его продолжительность в изотермическом процессе равна:

$$\tau_{\text{инд}} = \tau_{00} \cdot \exp\left(\frac{U_{\text{инд}}}{R \cdot T}\right), \quad (4.38)$$

причем часто $U_{\text{инд}} = U$, т.е. энергия активации периода собственно вулканизации и индукционного периода практически совпадают.

Для облегчения расчетов $S_{\text{ЭКВ}}$ при $T_{\text{ЭКВ}}$ и разных значениях U составлены вспомогательные таблицы. В них рассчитаны $S_{\text{ЭКВ}}$ за 1 минуту при различных постоянных температурах для $T_{\text{ЭКВ}} = 416\text{K}$ и $U = 23.8$ ккал/моль.

Если нет таблиц, а энергия активации определена, например 26.2 ккал/моль, то соответственно описанной методологии вычисляют по формуле (4.29) величины $\Delta S_{\text{ЭКВ } i}$. Если полученные $S_{\text{ЭКВ}}$ при $T_{\text{ЭКВ}} = 416\text{K}$ необходимо перевести в значения при других $T_{\text{ЭКВ}}$, то пользуются переводными (для $T_{\text{ЭКВ}} = 416\text{K}$) коэффициентами, которые зависят от $T_{\text{ЭКВ}}$ и U .

4.4.2. Исследование влияния условий теплообмена при повторной вулканизации гуммировочных покрытий

При вулканизации восстанавливаемого участка существующее гуммировочное покрытие испытывает воздействие повышенных температур, по времени равное или несколько большее продолжительности вулканизации нового защитного покрытия. При многократном восстановлении покрытия длительность суммарного теплового воздействия на существующее покрытие может в 3–5 раз превысить продолжительность вулканизации нового покрытия.

Гуммировочные покрытия, содержащие серу в качестве вулканизующего агента, вулканизовали при температурах 411, 431 и 451К в течение различного времени. Известно, что с увеличением продолжительности вулканизации значение ряда физико-механических показателей вначале возрастает (сопротивление разрыву и раздиру, напряжение при 300% удлинении). Затем на стадии реверсии свойства вулканизатов ухудшаются (снижается сопротивление разрыву и раздиру, относительное удлинение). Однако, как показали проведенные исследования, при дальнейшем значительном увеличении продолжительности вулканизации покрытий (превышающей обычно изучаемые в технологической практике пределы) реверсия практически прекращается и свойства вулканизатов мало изменяются (рис. 4.6–4.9).

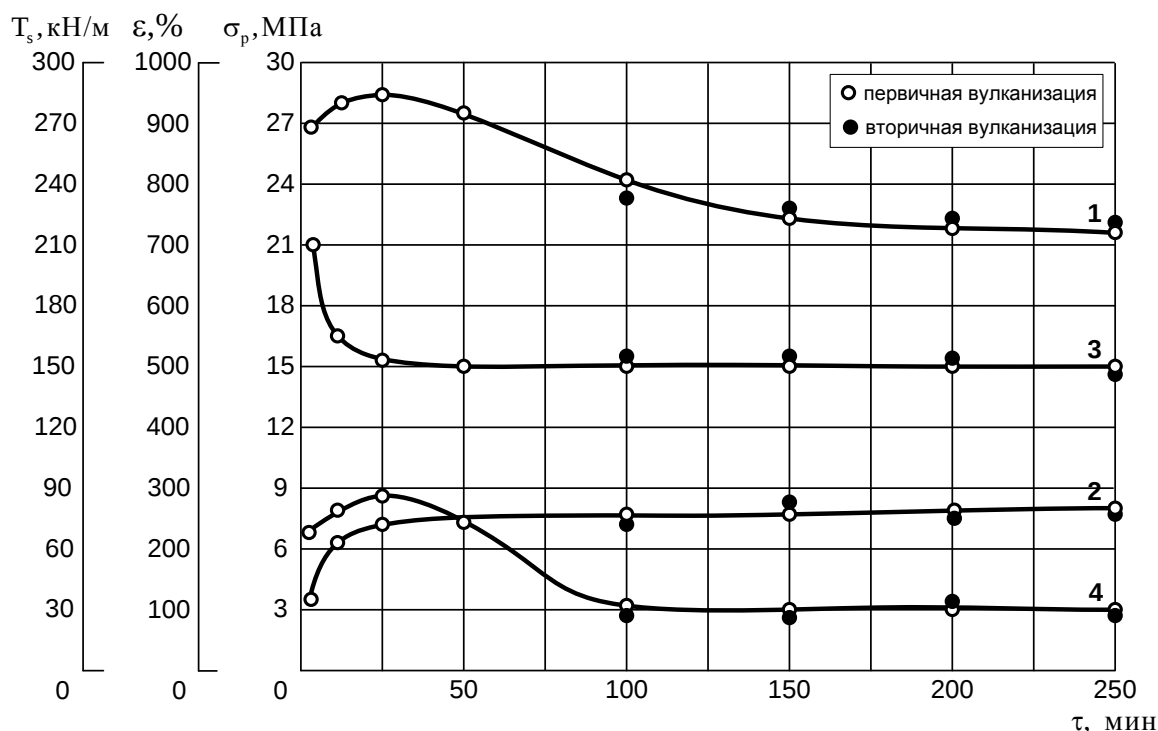


Рис. 4.6. Влияние продолжительности вулканизации гуммировочного покрытия марки 1726 на основе НК при 411 К на их механические свойства:
1 – сопротивление разрыву; 2 – напряжение при 300% удлинении;
3 – относительное удлинение; 4 – сопротивление раздиру

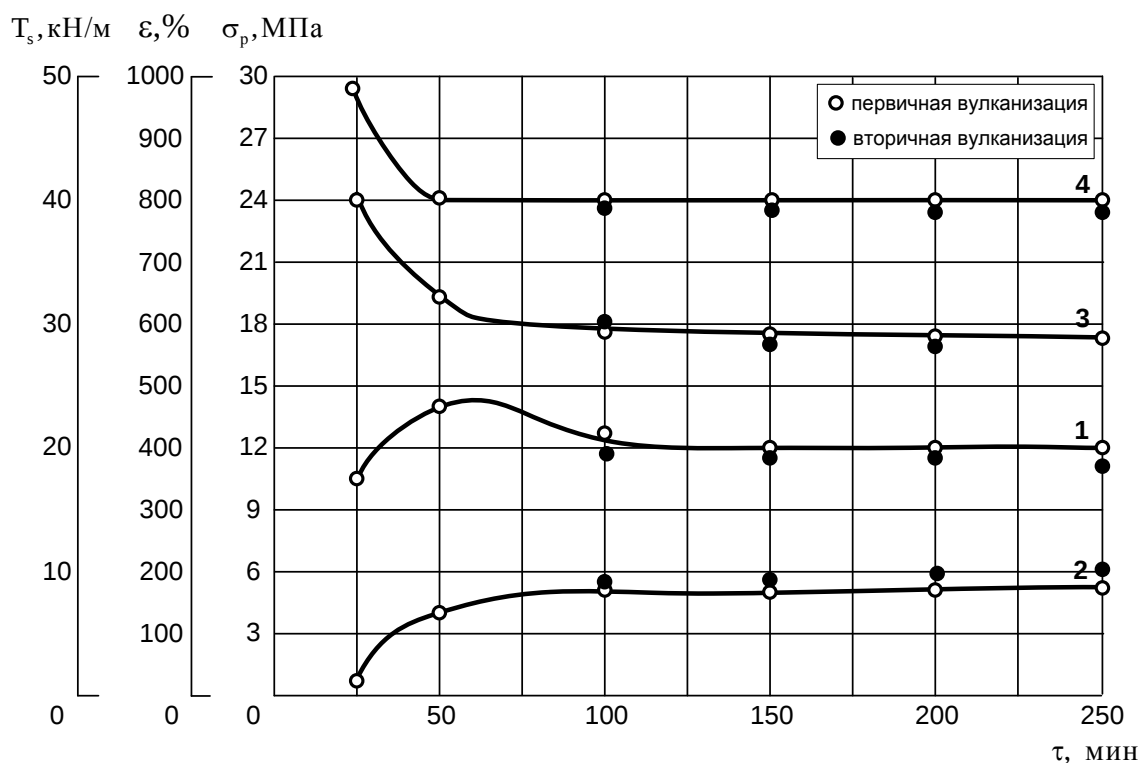


Рис. 4.7. Влияние продолжительности вулканизации гуммировочного покрытия марки 1751.6/СКМС при 411 К на их механические свойства:
 1 – сопротивление разрыву; 2 – напряжение при 300% удлинении;
 3 – относительное удлинение; 4- сопротивление раздиру

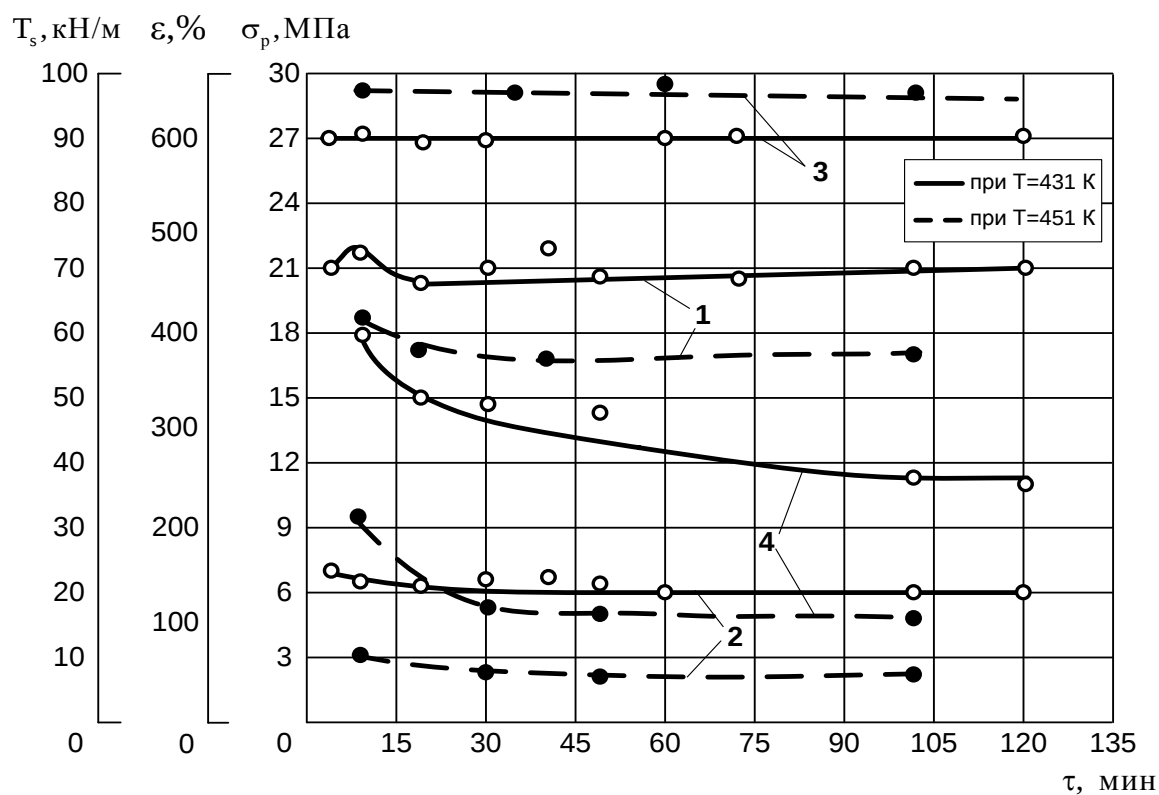


Рис. 4.8. Влияние температуры вулканизации гуммировочного покрытия марки 1726 на основе НК на их механические свойства:
 1 – сопротивление разрыву; 2 – напряжение при 300% удлинении;
 3 – относительное удлинение; 4 – сопротивление раздиру

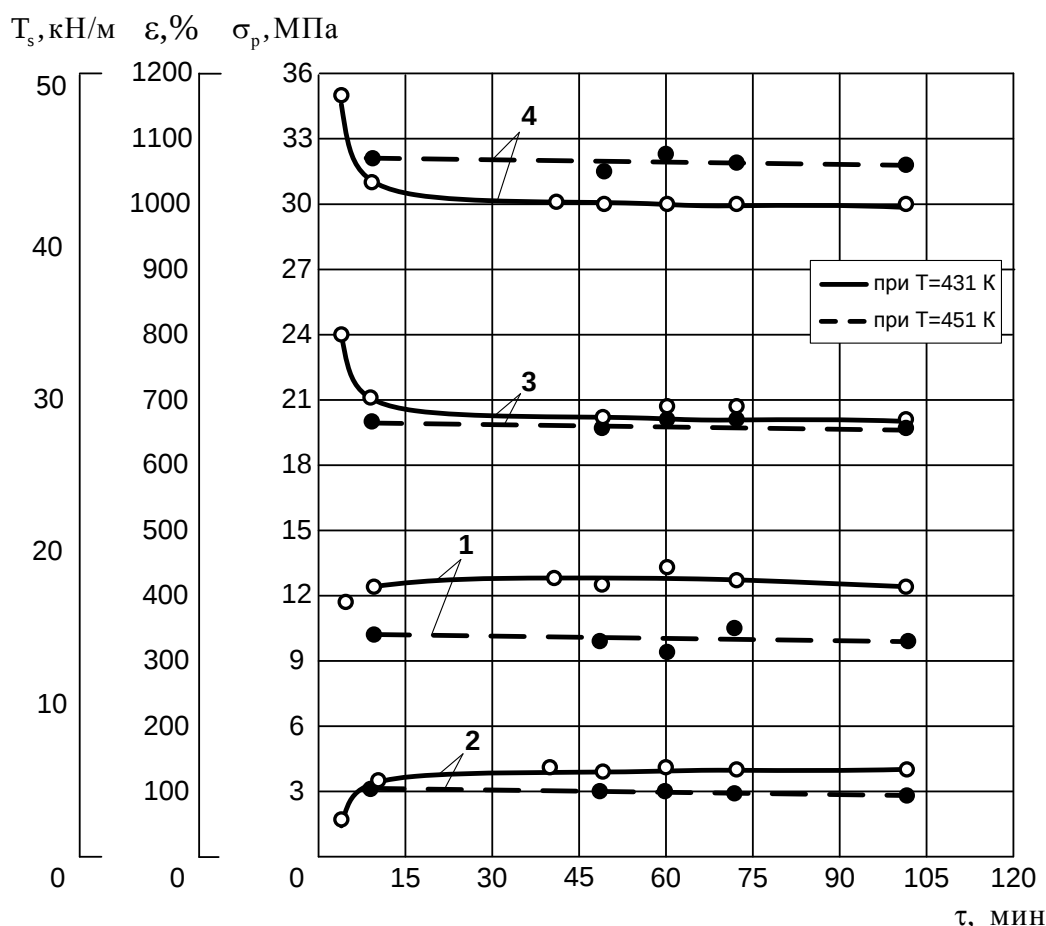


Рис. 4.9. Влияние температуры вулканизации гуммировочного покрытия марки 1751.6/СКМС на их механические свойства:
 1 – сопротивление разрыву; 2 – напряжение при 300% удлинения;
 3 – относительное удлинение; 4 – сопротивление раздиру

При повышении температуры вулканизации свойства эластомеров ухудшаются: уменьшается их сопротивление разрыву и раздиру, напряжение при 300% удлинения. Однако характер изменения свойств в процессе вулканизации одинаков в исследованном интервале температур. Работы производили по ГОСТ 209-75, ГОСТ 21751-76, ГОСТ 23016-78, ГОСТ 262-93, ГОСТ 26365-84.

Повторной вулканизации при 411К подвергали покрытия, полученные при вулканизации смесей в течение 45 и 40 мин соответственно при той же температуре. Продолжительность отдыха эластомеров между первичной и повторной вулканизацией составляла 1 сутки. Изменение свойств покрытия в процессе повторной вулканизации было таким же, как и в случае длительной первичной вулканизации (рис. 4.6–4.7).

Известно, что на начальных стадиях вулканизации протекают процессы структурирования, деструкции полимерных цепей и перегруппировки поперечных связей [113], обуславливающие нестабильность свойств вулканизатов. С увеличением продолжительности вулканизации между этими процессами, по-видимому, наступает равновесие, в результате чего свойства вулканизатов практически не изменяются. При повторной вулканизации

эластомеров после непродолжительного «отдыха», не вызывающего заметного их старения, свойства вулканизатов также не меняются. Таким образом, нет оснований опасаться значительного ухудшения свойств гуммировочных покрытий при многократном их восстановлении.

Механические показатели покрытий, полученных в оптимуме вулканизации, в процессе эксплуатации под действием внешних факторов, в частности тепловых воздействий, могут достигать того же уровня, что и при длительной вулканизации. Поэтому в ряде случаев свойства резин целесообразно оценивать не в оптимуме их вулканизации по «нестабильным» значениям того или иного показателя, а после достаточно продолжительной вулканизации. Это также дает возможность прогнозировать изменение свойств эластомеров в процессе их эксплуатации.

4.4.3. Исследование влияния условий теплопередачи на температуру и степень довулканизации отремонтированных гуммировочных покрытий в период их послевулканизационного охлаждения

При интенсифицированных режимах вулканизации отремонтированное покрытие освобождается от нагревательных плит горячим, вследствие чего из-за медленного охлаждения на воздухе оно существенно довулканизовывается, причем неравномерность степени вулканизации покрытия выравнивается в период ее довулканизации. Очевидно, что на степень довулканизации и равномерность вулканизации отремонтированного участка, а следовательно, и на его качество в значительной мере будут влиять условия теплообмена охлаждаемого покрытия с воздушной средой.

Согласно методу определения нестационарного обмена на вулканизационном оборудовании [113] произведен расчет зависимости степени довулканизации покрытия марки 1751 + 2566 при ее охлаждении вне оборудования. Расчет проводили двумя способами: с использованием граничных условий (значений коэффициентов теплоотдачи α , изменяющихся во времени τ в зависимости от перепадов температур и уровней тепловых потоков) и с использованием начальных условий при поэтапном решении задачи охлаждения покрытия, задании величины α в виде сопротивлений на сетке наборного поля и ее ступенчатом изменении во времени. В обоих случаях расчету периода послевулканизационного охлаждения предшествует представленный выше расчет нагрева ее на оборудовании в системе «нагревательные плиты – покрытие». Установившееся к концу периода вулканизации на оборудовании распределение температур по сечению гуммировочного покрытия обуславливает выбор начальных условий его охлаждения вне оборудования. В частности, оно определяет не только начальные температуры, но и тепловые потоки, функцией которых является величина α .

При расчетах по первому способу задавались двумя значениями $\alpha = \alpha(\tau)$: одним – по внешнему, другим – по внутреннему контуру исследуемого уча-

стка покрытия. При использовании второго способа расчета величина α изменялась не только во времени, но и по контуру. Поэтапное решение задачи заключалось в том, что на каждый малый период охлаждения локального участка покрытия значения α принимались постоянными. Полученное к концу предыдущего этапа распределение температур на локальном участке покрытия служило начальным для последующего этапа, для которого принимали новые значения α в соответствии с экспериментально установленной зависимостью α от величины теплового потока q .

На рис. 4.10 показано влияние температуры $T_{\text{нач}}$ покрытия, извлеченного из вулканизационного оборудования, и величины коэффициента теплоотдачи α на степень довулканизации наименее прогреваемого и наиболее медленно охлаждаемого участка покрытия. Степень довулканизации покрытия характеризуется приростом ΔS эквивалентного времени вулканизации [113]. Очевидно, что на величину ΔS влияет не только $T_{\text{нач}}$, но и уровень α .

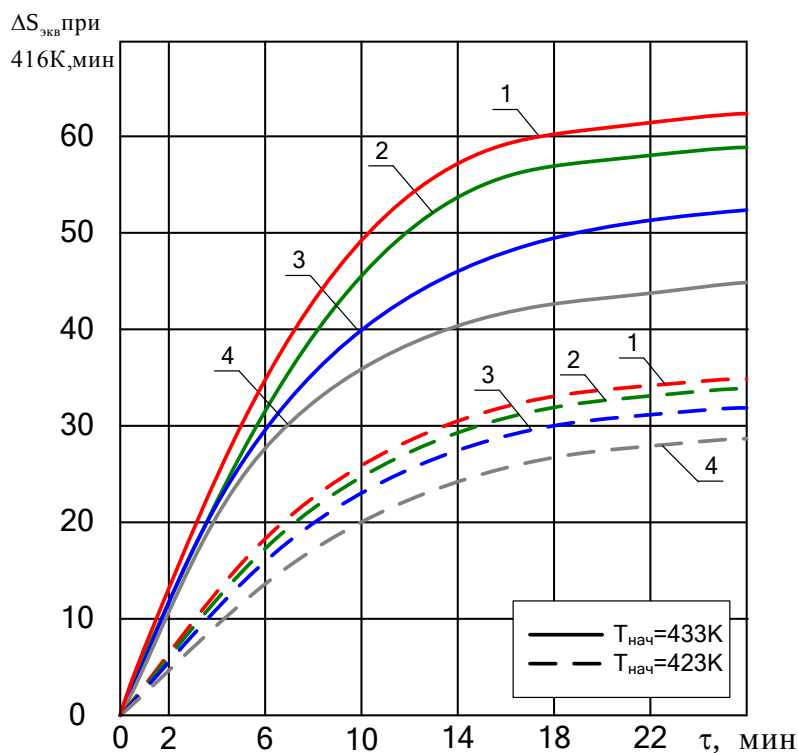


Рис. 4.10. Кинетика довулканизации гуммировочного покрытия марки 1751 (СКБ) (1,5 мм) + 2566(НК+СКБ) (1,5 мм × 3) при послевулканизационном охлаждении – при различных начальных температурах и коэффициентах теплоотдачи:
 1 – $\alpha = 11 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; 2 – $\alpha_n = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; 3 – $\alpha = 9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; 4 – $\alpha = 8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$

Из полученных данных следует, что наиболее существенно на степень довулканизации охлаждаемого покрытия влияет его начальная температура $T_{\text{нач}}$. Чем выше $T_{\text{нач}}$, тем больше степень довулканизации покрытия вне вулканизационного оборудования.

Повышение начальной температуры покрытия увеличивает интенсивность тепловых потоков с наружной поверхности, при этом соответственно

возрастают значения коэффициентов теплоотдачи (рис. 4.11) и повышается скорость охлаждения. В области отремонтированного гуммировочного покрытия воздух заметно нагревается, вследствие чего снижаются перепады температур и величины тепловых потоков и соответственно уменьшается значение α и его изменение во времени τ . Таким образом, интенсивность теплообмена не только влияет на температурное поле и степень довулканизации отремонтированного участка, но и в свою очередь зависит от температуры внутри покрытия.

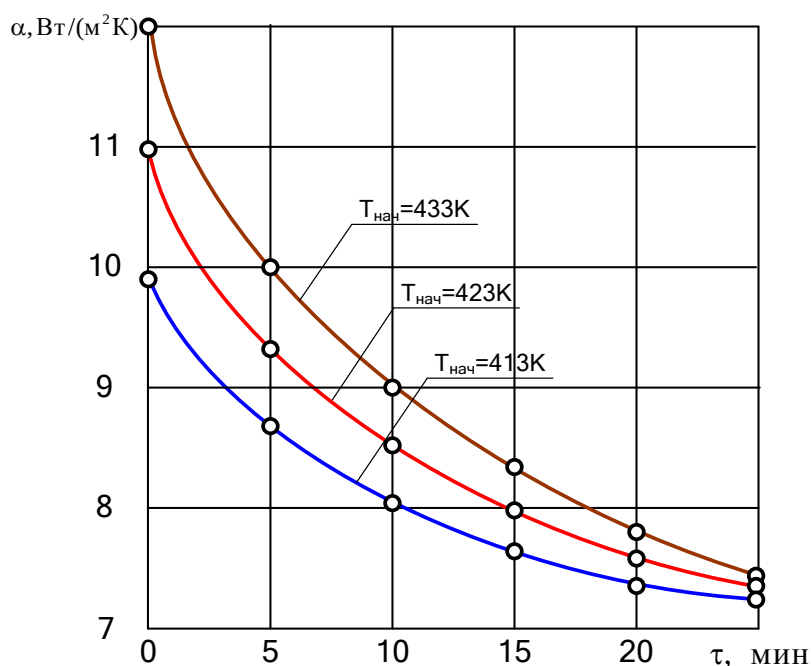


Рис. 4.11. Изменение в процессе охлаждения коэффициента теплоотдачи α отремонтированного покрытия марки 1751 (СКБ) + 2566 (НК+СКБ) при различных $T_{нач}$

Очевидно, что на интенсивность теплообмена будет влиять и температура воздушной среды $T_{ср}$. Результаты расчета показывают, что с повышением температуры отремонтированного покрытия степень ее довулканизации увеличивается (кр. 2, рис. 4.10). При использовании вместо переменной температуры T_v некоторого среднего ее значения величины ΔS изменяется (кривые 2 и 4). Замена фактического переменного значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_n = \alpha(\tau)$ со стороны внешней или с внутренней поверхности покрытия $\alpha_k = \alpha(\tau)$ некоторой средней величиной α также изменяет результаты расчета (кр. 1 и 2, 2 и 3).

При этом величина ΔS изменяется тем резче, чем больше отклонение фактических переменных α и T_v от их средних значений. Поэтому существенное расхождение расчетных данных получается при одновременной замене $\alpha(\tau)$ и $T_v(\tau)$ постоянными их значениями (кр. 2).

В условиях проведения ремонта покрытий существенную долю общей степени вулканизации покрытие приобретает при послевулканизационном охлаждении (рис. 4.10), и правильная оценка общей степени вулканизации покрытия определяется надежностью метода выбора условий теплообмена для этого периода. Следовательно, при задании условий теплообмена отремонтированного покрытия для расчетов необходимо учитывать изменение температуры воздуха у покрытия и значений коэффициента теплоотдачи в процессе охлаждения покрытия, обусловленное изменением величины тепловых потоков в нем.

4.4.4. Экспериментальное исследование температурного поля теплообмена при ремонте гуммировочных покрытий

При ремонте резинометаллических изделий наличие клеевых соединений между гуммировочным покрытием и металлом, а также между слоями покрытия вносит особенности в формирование температурных полей [113, 114, 134, 135].

Процесс вулканизации ремонтных накладок гуммированных объектов – сложный тепловой процесс, протекающий в изменяющихся во времени тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и нагреваемым объектом, зависящих от нестационарного распределенного поля температур в вулканизуемом объекте [127, 135]. Скорость прогрева обкладок резинометаллических изделий ограничена их тепловыми свойствами, обусловленными составом, конфигурациями и размерами объекта.

Определение температурного поля отремонтированного участка резинометаллического изделия при вулканизации в нагревательных плитах с измерением температуры одновременно в нескольких точках объема эластомера поведено на экспериментальной установке.

На рис. 4.12 представлены результаты изменения температуры в ремонтной обкладке марки 1751+2566. Очевидно, что температурное поле в образце ассиметрично относительно оси симметрии обкладки. В начале процесса вулканизации покрытия из-за малой теплопроводности резины возникает значительный перепад температуры между поверхностью изделия и его серединой. Наиболее высокую температуру внутри образца в этот момент времени наблюдали в наружных слоях: стальном слое и внешнем слое обкладки из резины марки 2566, самую низкую температуру в начальный период вулканизации – в подслое из эбонита, примыкающем к стальному слою.

На рис. 4.13 показано распределение температуры в ремонтном образце с обкладкой из эбонита марки 1752 (четыре слоя). Установившийся тепловой режим наступал через 1530 с. При дальнейшей термообработке обкладок из

эбонитов наблюдали повышение температуры внутри обкладок выше температуры нагревательных плит, причем более значительное, чем при вулканизации резиновых обкладок. Доказательство внутреннего тепловыделения, связанного с повышением температуры, обусловлено содержанием связанной серы в эластомере: чем ее больше, тем температура выше. В эбонитовых смесях выделяется при вулканизации до $920 \cdot 10^3$ Дж/кг каучука [100, 113].

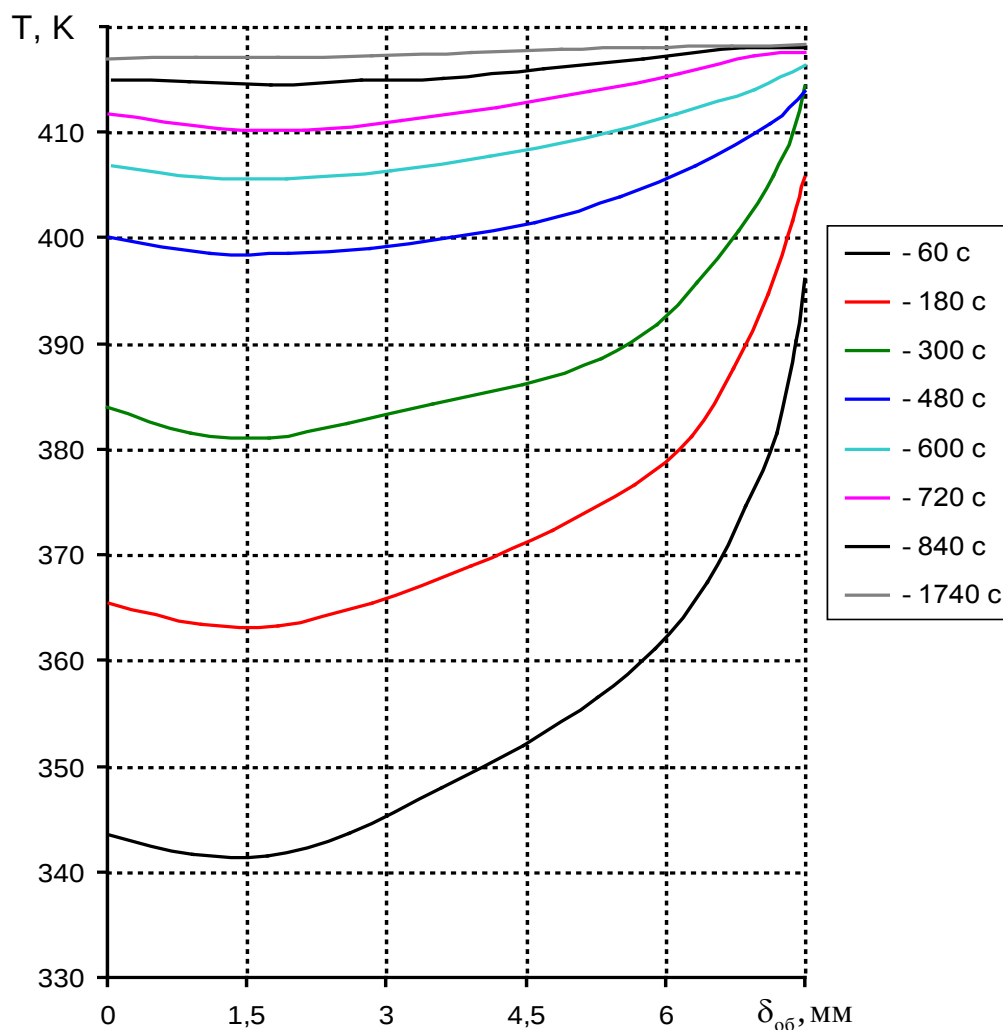


Рис.4.12. Кривые распределения температуры в покрытии марки 1751+ четыре слоя 2566 при $\delta_{см} = 4$ мм и $T_c = 418$ К и различном времени вулканизации

Скорость вулканизации и степень ее протекания (степень вулканизации) зависят от температуры, а следовательно, количества подведенной тепловой энергии. В свою очередь, тепловой эффект реакций представляет собой функцию степени вулканизации. При вулканизации можно количественно определить ее скорость. Сопоставляя скорости тепловыделения и вулканизации, можно заметить условия, при которых тепловые эффекты вулканизации оказывают отрицательное влияние на качество обкладок резинометаллических объектов. Особенно это заметно при высоких температурах вулканиза-

ции (выше 428K). Результаты экспериментов по вулканизации покрытий марок: 1751+ 2566 и 1752 при толщине стальной основы 2 и 4 мм показали, что время установления теплового состояния, при котором температура во всех контролируемых точках равна температуре среды ($T_c=418K$), растет с увеличением толщины ремонтного покрытия.

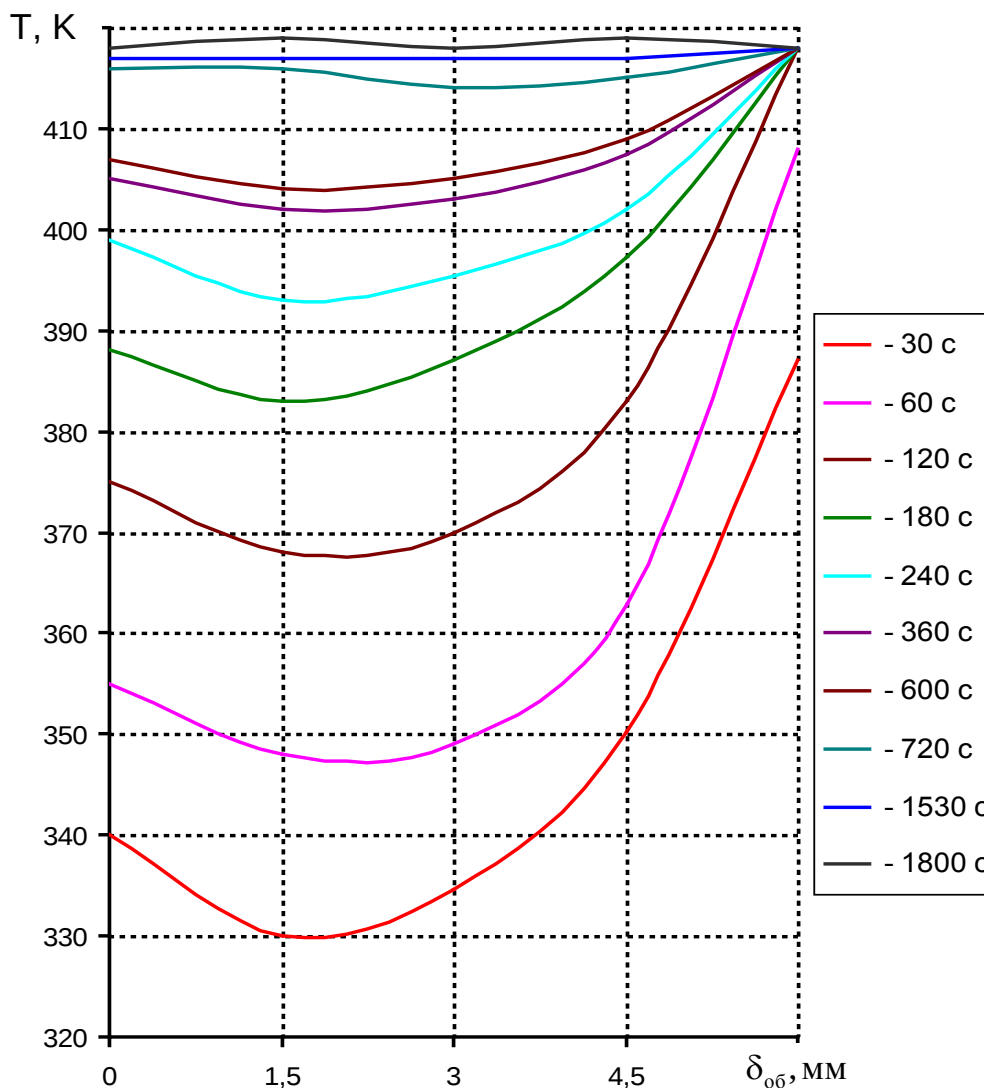


Рис. 4.13. Кривые распределения температуры в четырехслойном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{cm} = 2$ мм и $T_c = 418$ K и различном времени вулканизации

Исследования по определению времени прогрева покрытий марок 1751 + четыре слоя 2566 и четыре слоя 1752 показали, что время достижения установившегося теплового состояния обкладок растет также с увеличением толщины металлического слоя.

После расчета температурных полей необходимо оценить влияние местного ремонта на качественные показатели покрытий, в числе основных химическую стойкость и др.

4.4.5. Основные факторы теплопереноса, влияющие на скорость и степень вулканизации при местном ремонте покрытий

Обкладки, изготовленные из резиновых смесей на основе различных каучуков, подвергались ремонту вулканизацией индукционным нагревом. В процессе вулканизации происходит плавление серы ($T=392\text{ K}$), которая первоначально образует маленькие капельки, исчезающие по мере течения процесса. Это исчезновение серы обуславливается растворением и химическим взаимодействием ее с каучуком [58]. Растворимость серы в разных эластомерах различна и увеличивается с повышением температуры. Для процесса вулканизации характерно постепенное увеличение плотности смеси и выделение теплоты вулканизации, идущее вслед за коротким эндотермическим периодом, обусловленным плавлением серы и других компонентов смеси.

Сильное влияние на интенсивность вулканизации оказывает толщина эластомерного покрытия. Скорость реакции вулканизации и степень ее протекания зависят от температуры, а следовательно, количества подведенной теплоты (чем толще ремонтируемый участок, тем больше необходимо подвести теплоты, чтобы прогреть эластомер в период процесса вулканизации). Несмотря на то что в присутствии ускорителей реакция присоединения серы к каучуку требует меньшего количества энергии для разрыва устойчивого восьмичленного кольца молекулы серы, однако с увеличением толщины необходимое количество тепловой энергии увеличивается. Задача придания резине определенных свойств в процессе вулканизации решается просто для тонкостенных покрытий. Затруднения при выборе режима вулканизации возрастают при увеличении размеров изделий, особенно толщины обкладок, в связи с малой теплопроводностью резины. Вследствие этого по мере увеличения размеров обкладки увеличивается разность температур ее внутренних и внешних слоев при нагревании и охлаждении. Поэтому даже при постоянной температуре среды процесс вулканизации протекает при переменных температурах, различных для разных частей покрытия.

Динамика процесса ремонта покрытий обкладок прослежена по содержанию свободной серы, интенсивности поглощения гамма-излучения и изменению физико-механических свойств, функционально связанных с пределом набухания, сопротивлением разрыву, расслаиванию и т.д. [134–135].

В работе для исследования содержания свободной серы в покрытиях использовался радиоизотопный метод контроля степени вулканизации покрытий. Для быстрого и более точного контроля степени вулканизации обкладок был применен анализ качества обкладок по интенсивности поглощения гамма-излучения [113, 131, 135].

На рис. 4.14. приведены кривые распределения свободной серы по слоям отремонтированных покрытий.

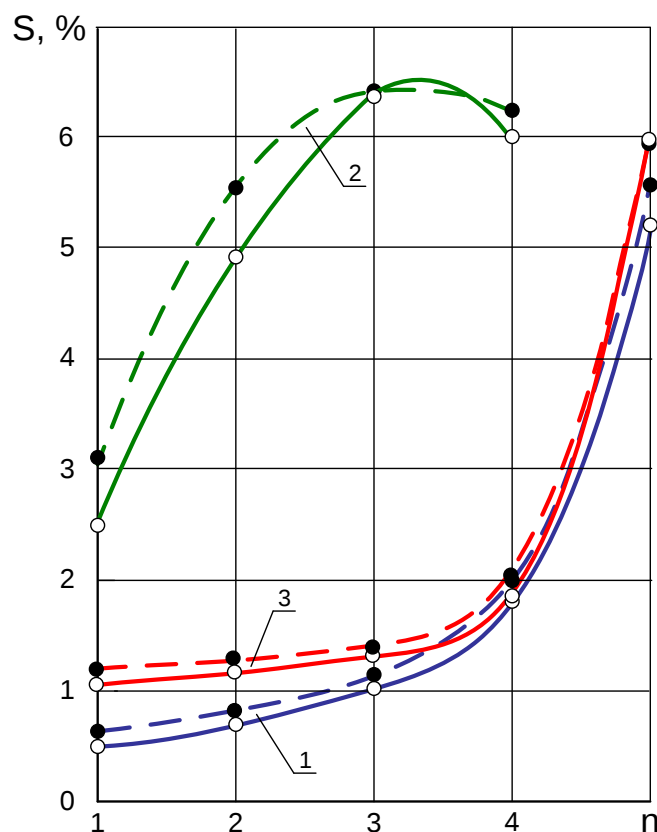


Рис. 4.14. Содержание свободной серы по слоям в исходных (после термообработки в вулканизационном котле при $T=418K$, $\tau=18000$ с.) —○— и отремонтированных —●— покрытиях:
 1 – 1751 (СКБ) (1,5 мм) + 2566 (НК+СКБ) (1,5 мм × 4); 2 – 1751 (СКБ) (1,5 мм × 4);
 3 – 1751 (СКБ) (1,5 мм) + 1976 (СКБ) (1,5 мм × 4)

Полученное распределение свободной серы, которое характеризует степень вулканизации, а следовательно, качество отремонтированного изделия, было сравнено с данными, полученными до ремонта. Распределение свободной серы по слоям обкладок до и после ремонта неодинаково. Для обкладок наибольшее содержание свободной серы приходится на внутренний слой (порядок отсчета слоев обкладки – от наружного слоя). Сравнение показывает, что количество свободной серы и его равномерность по слоям отремонтированного покрытия практически соответствует показателям доремонтного.

4.4.6. Исследование химической стойкости отремонтированного покрытия

Химическая стойкость, прочность крепления и другие качественные показатели обкладок зависят от произведенного ремонта покрытия, так как в процессе термообработки (вулканизации) протекает ряд химических реакций, приводящих к образованию в каучуке поперечных связей (структурированию), в результате чего технические свойства последнего сильно меняются.

Для сопоставления химической стойкости обкладок, проведены эксперименты термообработки покрытий до и после ремонта. В качестве основы использовали сталь марки Ст.3, а адгезивов для крепления обкладок – клеи 2572, 4508, ПТ-201 и другие [32, 33, 135].

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 9030-74. Для испытания резины на набухание пользовались образцами размером 40×40 мм, вырубленными из вулканизованных пластин. Препарирование образцов проводилось следующим образом. Для отделения слоев покрытия был изготовлен режущий инструмент. Резинометаллический образец закреплялся в зажимном устройстве, при вертикальной подаче режущего инструмента происходило отделение слоя резинового покрытия по клеевому шву.

Каждый образец перед испытанием тщательно осматривался; при обнаружении язв, пор, наружных повреждений и других видимых дефектов образец браковался. Испытание слоев резин на набухание в исследованных жидкостях заключалось в определении веса испытываемого образца резины до и после набухания. Количество жидкости (масла, щелочи, кислоты, топлива и др.) бралось из расчета более 30 мл на 1 г образца слоя резинового покрытия. Для испытания слоев резины на набухание использовался весовой метод определения: при определении весового набухания резины испытываемый образец взвешивался на весах до и после набухания. Весовой процент набухания (М) вычислялся по формуле:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \cdot 100\%, \quad (4.39)$$

где M_0 – масса образца до набухания, г.; M_1 – масса образца после набухания, г.

При испытании резины на набухание взвешивание производили с точностью до 0,001 г. Образцы подвешивали на тонкой проволоке, стойкой против разрушения в испытываемой жидкости, помещали в подвешенном положении в сосуд таким образом, чтобы образцы не касались друг друга, стенок и дна сосуда, т.е. чтобы все стороны образца были покрыты жидкостью. Жидкости, в которых производилось набухание, были проверены на соответствие требованиям стандартов. Число испытанных образцов от каждой характеризуемой пробы было не менее трех.

Рассмотрена стойкость обкладок из отремонтированных эластомеров на основе марок [60, 175] при нормальной температуре (293К) в 40% азотной кислоте, 50% уксусной, 60% серной, 33% соляной кислотах. Химическую стойкость эластомеров оценивали по степени набухания образцов (по массе после их нахождения в коррозионных средах), по изменению внешнего вида и физико-механических показателей после набухания. В необходимых случаях мягкую резину крепили к металлу через эбонитовый подслой. На рис. 4.15, 4.16 и 4.17 приведены кинетические кривые набухания покрытий в уксусной, соляной и азотной кислотах после ремонта и до него.

Исследования обкладок, проведенные только в средах, в которых они нормально работают, показали, что химическая стойкость отремонтированных покрытий из эластомеров на основе каучуков разных типов, полученных вулканизацией посредством индукционного нагрева, практически идентична первоначальному, имеет расхождение не более 5%.

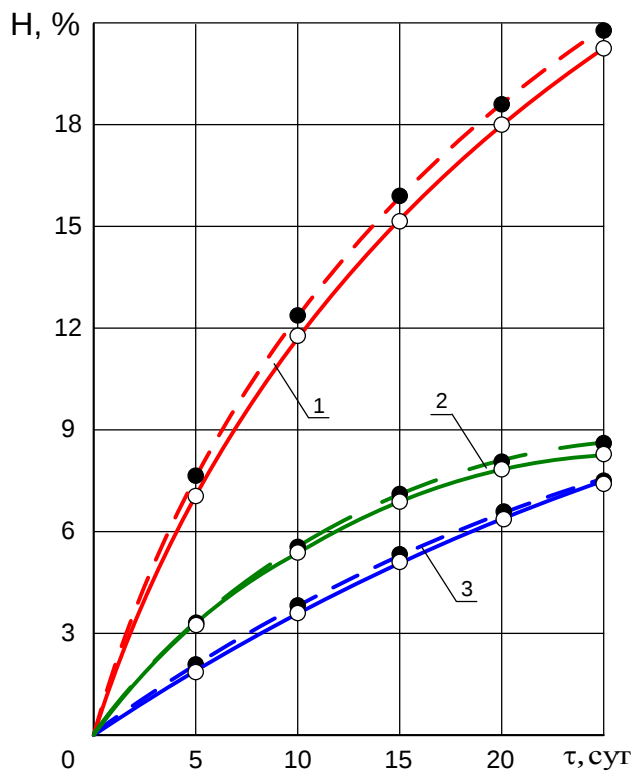


Рис. 4.15. Кинетические кривые набухания в исходном —○— (после термообработки в вулканизационном котле при $T=418K$, $\tau=18000$ с.) и отремонтированном —●— покрытии марки 1752 (НК+СКБ) $\delta_{cm} = 2$ мм, $\delta_{об} = 6$ мм в разных кислотах: 1 — в азотной (40%); 2 — соляной (33%); 3 — уксусной (50%)

Быстрое сильное набухание резины при относительно небольших сроках испытания обусловлено значительной скоростью диффузии среды. Уменьшение прочности резины в этом случае объясняет ослабление сил межмолекулярного взаимодействия в результате проникновения жидкости в резину. Молекулярная масса отрезков цепи между соседними узлами пространственной сетки, характеризующими густоту сетки, не изменилась.

При более длительном воздействии диффузанта густота пространственной сетки слоев резины начинает уменьшаться, т.е. химически нестойкие пространственные связи разрушаются. Процесс разрушения пространственных связей соответствует процессу частичного растворения слоев резины в коррозионной среде, о прохождении которого свидетельствует уменьшение набухания, и является, по-видимому, основным фактором, обуславливающим дальнейшее уменьшение их прочности.

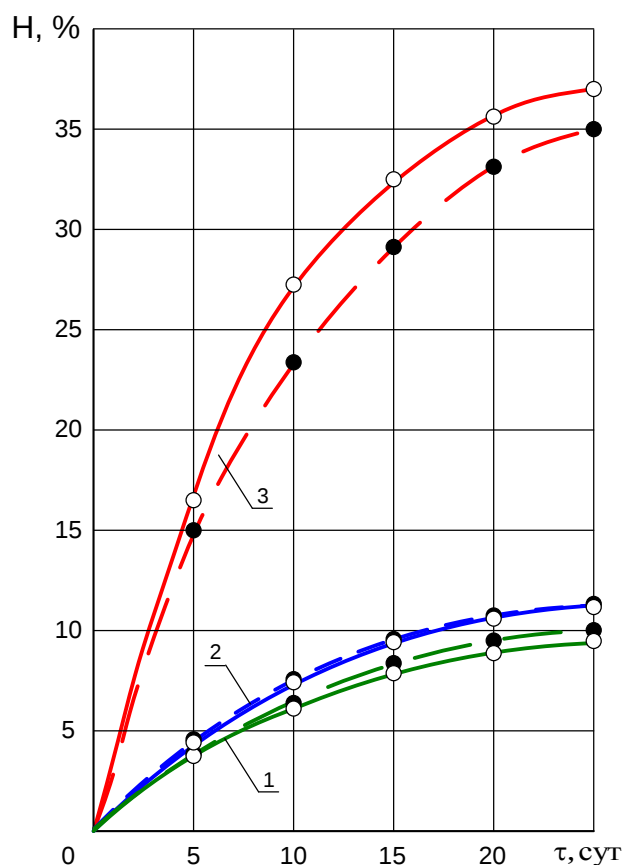


Рис. 4.16. Кинетические кривые набухания в исходном —○— (после термообработки в вулканизационном котле при $T=423\text{K}$, $\tau=18000\text{ с.}$) и отремонтированном —●— покрытии марки 2566 (НК+СКБ) $\delta_{\text{ст}} = 2\text{ мм}$, $\delta_{\text{об}} = 6\text{ мм}$ в разных кислотах: 1 – в азотной (40%); 2 – соляной (33%); 3 – уксусной (50%)

При испытании слоев резины и эбонита с относительно большим числом химически стойких пространственных связей их исходная прочность и химическая стойкость после действия кислоты сохраняется в большей степени. Это относится, в первую очередь к эбонитовому подслою, а также к 3 и 4 слоям резинового покрытия. Набухание эбонитового подслоя в 10–14 раз меньше набухания резиновых слоев при выдержке образцов в кислоте до 20 сут и в 25–35 раз – при выдержке 30–70 сут. Это связано с большой химической стойкостью эбонита и с характером распределения температур по толщине покрытия в процессе вулканизации. Вероятно, более низкая химическая стойкость наружных слоев (первого и второго) связана также с деструкцией под действием высоких температур.

Проанализировав данные, можно заключить, что лучше противостоят коррозионным средам эбонитовые подслои и слои, прилегающие к ним; для некоторых марок покрытий, типов каучуков и сред – вторые слои, слабее противостоят внешние и средние слои покрытия.

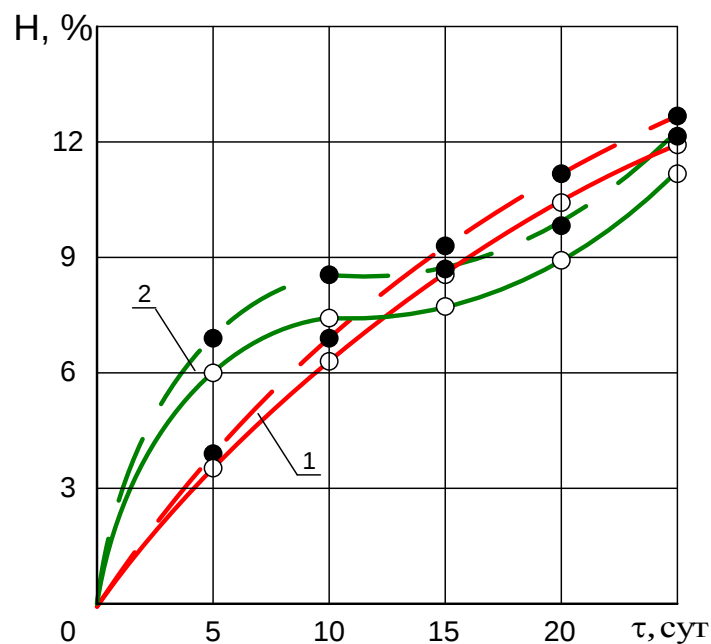


Рис. 4.17. Кинетические кривые набухания в исходном —○— (после термообработки в вулканизационном котле при $T=418K$, $\tau=18000$ с.) и отремонтированном —●— покрытии марки 1976 (СКБ)
 $\delta_{cm} = 2$ мм, $\delta_{об} = 4,5$ мм в разных кислотах:
 1 – в серной (60%); 2 – азотной (40%)

Внешние слои в процессе термообработки проявляют тенденцию к реверсии и перевулканизации (свойства ухудшаются по сравнению с оптимальными). Яркая выраженная реверсия наблюдается для резиновых смесей на основе натурального каучука. Внутренние же слои, очевидно, недовулканизуются, т.е. вулканизация их как кинетический процесс не достигает плато вулканизации (степень вулканизации их увеличивается со временем, свойства слоя вулканизата изменяются монотонно, но не достигают оптимальных значений).

Для многослойных обкладок вулканизация представляет собой сложный тепловой процесс, протекающий при меняющихся по времени тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и изделием, зависящий от многих факторов, в частности от нестационарного распределенного поля температур в вулканизационном объекте, оказывающим влияние на все качественные показатели покрытий, в том числе и на химическую стойкость слоев и покрытия в целом.

4.4.7. Прочность связи многослойных отремонтированных резинометаллических систем

Прочность крепления отремонтированных покрытий к металлу изучали по изменению параметров сопротивления отрыву, сдвигу, расслоению и отслоению [135].

Так как при ремонте гуммировочных покрытий осуществляется крепление к металлу многослойных покрытий, рассматриваем отдельно основные процессы, протекающие на границе разделов металл – эластомер и эластомер – эластомер. Кроме того, взаимодействие резиновой смеси при креплении ее в процессе вулканизации осуществляется не непосредственно, а через слой клея, поэтому рассматриваем основные процессы, протекающие на границе разделов эластомер – клей и клей – металл.

Прочность крепления и образование связей между резиновыми смесями и клеем на границе их раздела во многом зависят от скоростей реакций, которые происходят в каучуке, клее и на поверхности их раздела [23, 90]. Известно, что для достижения прочной связи скорость реакции на поверхности раздела резиновая смесь – клей с образованием трехмерной структуры выше, чем скорость вулканизации резиновой смеси и клея. Способность двух приведенных в соприкосновение поверхностей одного и того же эластомера обеспечивать прочную связь, препятствующую их разделению по месту контакта, представляет аутогезию.

Эластомеры благодаря особому строению молекул представляют класс веществ, у которых возможно сочетание достаточной когезионной прочности с достаточной способностью к коалесценции (слиянию) [154]. Для коалесценции двух слоев эластомера одного контакта недостаточно, так как должно произойти протекающее во времени восстановление в зоне контакта структуры высокомолекулярного вещества, т.е. переплетение цепей эластомера, характерное для любого участка в объеме. Восстановление эластомера в зоне контакта происходит за счет перемешивания (диффузии) молекул. Перемешивание молекул в целом особенно легко происходит, когда контакт слоев эластомера осуществляется при температуре, лежащей выше температуры течения эластомера. Перемешивание (диффузия) отдельных сегментов макромолекулы происходит при температурах, отвечающих высокоэластичному состоянию эластомера, когда возможно микроброуновское и невозможно макроброуновское движение. В результате диффузии макромолекул или их сегментов между приведенными в контакт слоями эластомера создается достаточно прочная связь, что и получает свое выражение в том или ином значении аутогезионной прочности.

Определение прочности связи между слоями резины с резиной и резины с другими материалами заключается в расслоении испытуемого образца на разрывной машине и в вычислении нагрузки в килограммах, отнесенной к средней ширине образца. Все испытания проводили в соответствии с ГОСТ 6768-75. Образцы для испытаний на сопротивление расслоению имели форму прямоугольных полосок шириной 25 мм и длиной 100 мм.

Испытания проводили на разрывной машине, номинальное значение шкалы которой не превышало более чем в пять раз измеряемую величину нагрузки при расслоении. Скорость движения нижнего зажима при испытании

была 200 ± 20 мм/мин. Число испытываемых образцов для каждой пробы было не менее пяти. Показатель сопротивления расслоению (прочности связи между слоями) $\tau_{\text{рас}}$ в Н/м вычисляли по формуле:

$$\tau_{\text{рас}} = \frac{F_{\text{ср}}}{b}, \quad (4.40)$$

где $F_{\text{ср}}$ – нагрузка, подсчитываемая как среднее арифметическое из 5 пар записанных максимальных и минимальных показателей по шкале в Н; b – ширина испытываемого образца в м.

Зависимости прочности связи при расслаивании слоев покрытий из эластомеров марки 2566 (рис. 4.18 кр.1) от времени вулканизации индукционным нагревом доказывают правильность взгляда на образование связи между слоями одного и того же эластомера как на диффузионный процесс [91] тем, что прочность двух приведенных в контакт слоев эластомера всегда увеличивается со временем, причем прочность связи растет сначала быстро, а затем все медленнее.

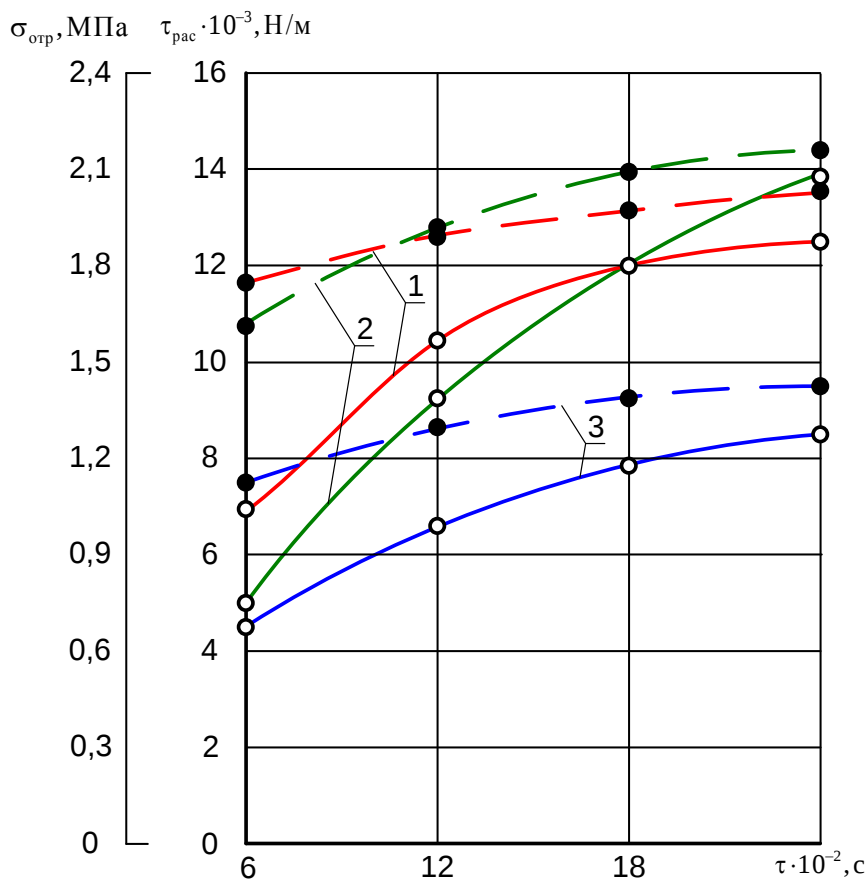


Рис. 4.18. Кривые изменения прочности при расслаивании и прочности связи при отрыве исходных —○— (после термообработки методом простой конвекции при $T=423\text{K}$, $\tau=18000$ с.) и отремонтированных —●— покрытий:
 1 – при расслаивании покрытия из резины 2566 (НК+СКБ);
 2 – прочность связи резины 2566 (НК+СКБ) с металлом при отрыве;
 3 – прочность связи резины 1976 с металлом при отрыве

Так прочность крепления при расслаивании слоев обкладки в процессе вулканизации методом простой конвекции – 7,0; 10,5; 12,0 и 12,5 (кН/м) при температуре 428 К через 600, 1200, 1800 и 2440 с с момента начала термообработки. Данные для вулканизации отремонтированных покрытий соответственно составляют: 10,8; 12,8; 13,3 и 13,6 (кН/м). Прочность связи между слоями при расслаивании покрытий марки 2566 после ремонта в среднем в 1,3 раза выше, чем без него.

Резиновые обкладки к металлу обычно крепят через полуэбонитовый или эбонитовый подслои с помощью тонкой прослойки адгезива, обеспечивающей постоянство расположения относительно друг друга слоев покрытия или эбонитового подслоя и металла и участвующей в распределении внешней нагрузки в материале.

Согласно теории диффузии адгезия эластомеров, как и аутогезия, сводится к диффузии длинноцепных молекул или отдельных участков и к образованию вследствие этого прочной связи между адгезивом и эластомерным субстратом. Отличие адгезии слоя эбонита к слою резины от аутогезии состоит в том, что при адгезии происходит диффузия макромолекул двух разных типов, имеющих различную подвижность, а при аутогезии диффундируют одинаковые молекулы. Большей способностью к диффузии обладают молекулы адгезива, например клея марки 2572, 4508, 51-К-19, 51-К-24, 51-К-26, 51-К-27, ПТ-701 и др. Однако может происходить диффузия молекул субстрата в адгезив. Оба эти процесса приводят к исчезновению границы между фазами и к образованию спайки, представляющей постепенный переход от одного полимера к другому.

Механизм адгезии при креплении слоев эластомера друг к другу и всей обкладки к металлу в процессе вулканизации имеет некоторые особенности. При вулканизации эластомеров происходит диффузионное перемещение макромолекул и их сегментов, особенно интенсивное в начальный период вулканизации, когда температура в зоне контакта не достигает еще значений, при которых начинается образование поперечных связей. Особенность заключается в том, что процесс взаимопроникновения макромолекулярных цепей обрывается накладываются на него процессом вулканизации эластомеров, закрепляющим продиффундировавшие макромолекулы или их участки прочными химическими связями. Это приводит к образованию прочной склейки, значительно превосходящей по прочности связи при расслоении невулканизированные склейки, в которых продиффундировавшие макромолекулы закреплены более слабыми межмолекулярными связями.

Таким образом, явление вулканизации эластомеров представляет собой два совместно протекающих процесса:

- 1) процесс диффузионного перемещения макромолекул или сегментов, приводящий к исчезновению границы раздела между соприкасающимися поверхностями эластомеров с образованием промежуточного гомогенного слоя;

2) процесс вулканизации, закрепляющий поперечными химическими связями продиффундировавшие участки цепей. Для создания высокой прочности связи при вулканизации необходимо правильно выбрать способ и условия вулканизации, которые способствовали бы максимально благоприятному протеканию диффузионных процессов в зоне контакта слоев эластомеров.

Определение прочности связи резины металлом методом отрыва заключается в приложении усилия, необходимого для разрушения связи между склеенными поверхностями резины и металла путем растяжения цилиндрического образца резины.

Усилие, вызывающее отрыв, должно действовать перпендикулярно поверхности отрыва.

Определение прочности связи резины с металлом при отрыве исследовали согласно ГОСТ 209-75. Испытание на определение прочности связи отремонтированного покрытия с металлом производили на разрывной машине, номинальное значение шкалы которой не должно превышать более чем в пять раз измеряемую величину нагрузки при испытании. Скорость движения зажима машины должна быть 25–100 мм/мин. Размеры резиновой части образца, подвергаемого испытанию: высота $2,0^{+0,5}$ и диаметр $25^{+0,2}$ мм.

Испытание проводили при температуре 293 ± 5 К. Образец закрепляли в приспособлении, устанавливаемом на разрывной машине. Включали разрывную машину и производили отрыв металла от резины. По шкале разрывной машины отмечали максимальную нагрузку, соответствующую разрушению образца. Число испытываемых образцов было не менее пяти.

Прочность связи резины с металлом в МПа ($\sigma_{отр}$) вычисляли по формуле:

$$\sigma_{отр} = \frac{F}{A}, \quad (4.41)$$

где F – нагрузка, при которой происходит отрыв, Н; A – площадь образца в м^2 .

Вычисление результатов испытаний производят в соответствии с ГОСТ 269-75. Характер разрушения отмечался следующим образом: Р – разрушение произошло по массиву резины; М – при разрушении имело место полное оголение поверхности металла; К – отрыв произошел по клеевой пленке; С – разрушение носит смешанный характер (одновременно по пленке и по массиву резины).

Результаты проведенных работ показывают, что применение местного ремонта покрытий гуммированных объектов позволяет получать покрытия, не уступающие по качеству исходным. На рис. 4.21 (кр. 2 и 3) приведены кинетические кривые нарастания прочности связи резин марок 2566 и 1976 с металлом при отрыве после вулканизации.

Так как в результате вулканизации происходит структурирование эластомера обкладки, то, очевидно, что продолжительность вулканизации влияет

на характер пространственной сетки вулканизата, а степень поперечного сшивания – на механические и физико-механические свойства отремонтированного покрытия и прочность крепления.

4.4.8. Влияние давления прессования на прочность связи в отремонтированных гуммировочных покрытиях

В связи с необходимостью разработки интенсифицированных режимов вулканизации, обеспечивающих высокое качество отремонтированных покрытий, актуален вопрос о влиянии на него давления прессования.

Результаты проведенных ранее исследований [113, 114, 135] свидетельствуют о благоприятном влиянии повышения давления прессования на твердость, плотность, износостойкость, динамическую прочность, сопротивление многократному сдвигу резин, а также прочность связи гуммированного покрытия (рис. 4.19 и 4.20). Увеличение давления при вулканизации способствует уменьшению времени установки резиновой смеси. Практически не зависят от давления относительное удлинение, остаточная деформация, сопротивление раздиру, эластичность.

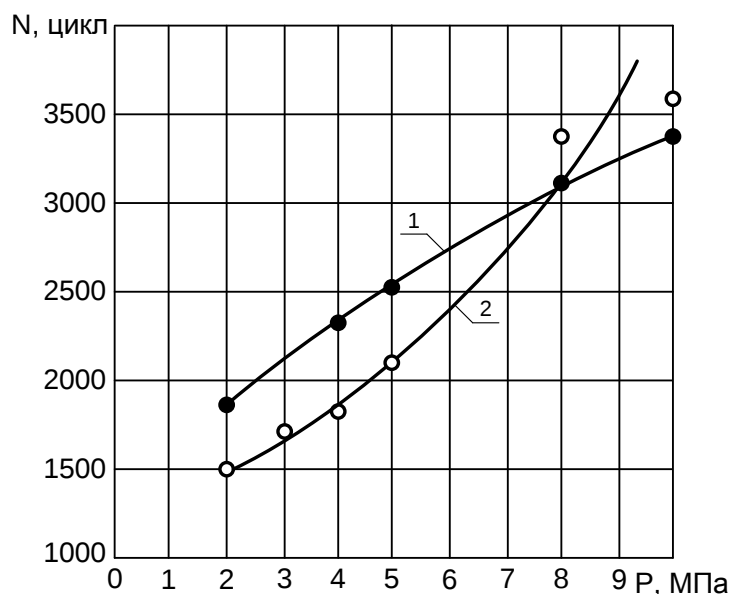


Рис. 4.19. Зависимость выносливости при многократном сдвиге образцов с вертикальными стыкам покрытий от давления прессования при вулканизации:
1 – резиновые образцы (на основе НК);
2 – резиновые образцы СКМС-30АРКМ и СКИ-3

Таким образом, при прессовой вулканизации наряду с повышением температур теплоносителей для интенсификации процесса желательное повышение давления прессования.

Повышение давления теплоносителя приводит, однако, к утяжелению оборудования, усложнению условий его эксплуатации необходимости использования более надежной арматуры, изменению сечений и повышению надежности уплотнений подводящих трубопроводов и т.п. Поэтому повышение давления разумно до тех пределов, в которых вызываемое им повышение качества покрытия окупает затраты на усложнение технологического процесса.

В связи с применением конструкций с вулканизацией ремонтных покрытий нагревателем индукционного типа были изучены механические свойства и прочность связи элементов многослойного покрытия марки 1751 + 2566, моделирующих часть гуммированного аппарата химического производства, по разработанной методике.

Покрытия вулканизовали при поддержании постоянных давлений на образец (0,2; 1,0-4,0; 6,0; 8,0 МПа). Выбранный расчетным путем режим вулканизации соответствовал режиму ремонта гуммировочных покрытий. В качестве вулканизационной пресс-формы использовалась стальная рамка. Заготовка модельной пластины превышала высоту пресс-формы на 4–5 мм для передачи давления прессования на образец.

Прочность связи между элементами системы, а также показатели механических свойств отремонтированного гуммировочного покрытия определяли в соответствии с ГОСТ 263-75, ГОСТ 411-77, ГОСТ 209-75. Результаты определения прочности связи между слоями системы в зависимости от давления вулканизации иллюстрирует рис. 4.20, данные механических испытаний приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Влияние давления на образец при вулканизации на механические свойства отремонтированного покрытия марки 1751 + 2566

Показатель	Давление, МПа					
	0,20	1,02	3,06	3,57	4,08	6,63
Напряжение при удлинении 300%, МПа	15,96	15,98	14,86	16,03	16,01	16,31
Прочность при растяжении, МПа	25,87	24,57	24,69	26,06	26,26	25,46
Относительное удлинение, %	428	424	452	452	460	428
Остаточная деформация, %	10,8	13,2	12,4	12,0	12,8	12,0
Сопротивление раздиру, кН/м	63,0	73,4	97,7	67,8	83,8	91,1
Твердость по Шору А	67	67	67	66	70	68
Эластичность по отскоку						
	при 293К	40	38	37	38	36
	при 373К	56	58	58	57	55

Установлено, что повышение давления на образец от 0,2 до 2,0 МПа приводит к увеличению прочности связи в слоях до 24%, дальнейший рост практически не влияет на прочность связи (усилия расслоения), но изменяет характер разрушения в слоях резинометаллических систем. При давлении на образец 8 МПа разрушение происходит по слоям резинового покрытия. Отслоение резины происходит при минимальной, а расслоение по резине – при повышенной прочности связи резины с металлом. Изменение характера разрушения расслаиваемых поверхностей свидетельствует о благоприятном влиянии повышения давления вулканизации на прочность связи элементов исследуемых систем.

Анализ полученных результатов показывает, что при разработке интенсифицированных режимов вулканизации ремонта гуммировочных покрытий давление прессования должно быть не менее 2,0 МПа.

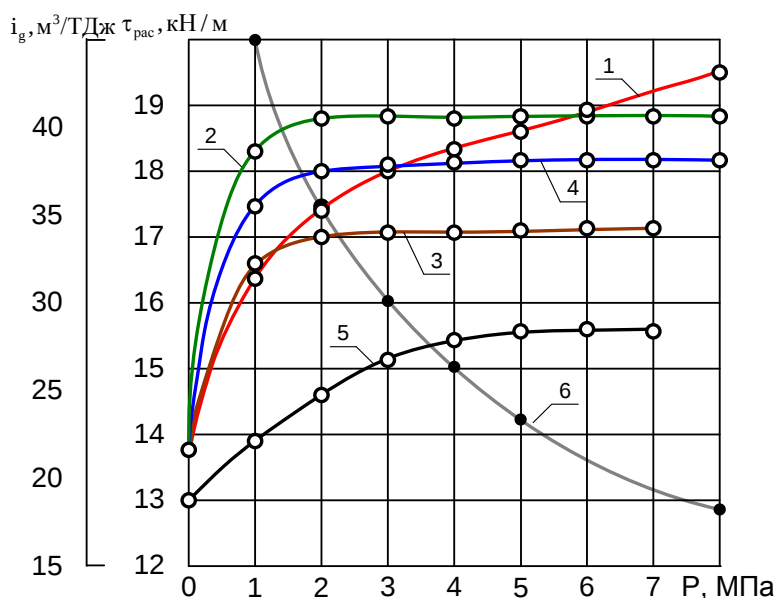


Рис. 4.20. Зависимость прочности связи между слоями (1-5) и истираемости i_g покрытий (6) покрытия марки 1751 (СКБ) (1,5мм) + 2566 (НК+СКБ) (1,5 мм × 4) и $\delta_{ст}=4$ мм от давления прессования на образец

Глава 5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В ХИМИЧЕСКУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

5.1. Инженерная методика расчета индукционного нагрева ремонтируемых покрытий гуммированных объектов

Индукционный обогрев токами промышленной частоты с встроенными нагревателями имеет следующие преимущества: получение высокопрецизионного температурного поля; большая концентрация энергии; высокие энергетические характеристики – электрический КПД близок к единице, коэффициент мощности $\cos\varphi=0,8\div0,9$; высокая скорость нагрева, легкость регулирования и автоматизации режима; хорошие эксплуатационные характеристики и надежность в работе; благоприятные санитарно-гигиенические условия [57, 63, 92, 125, 139, 159].

Исходными уравнениями теории индукционного нагрева являются уравнения электромагнитного поля, полученные Максвеллом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\vec{E}}{\rho} + \frac{d\vec{D}}{dt}, & \vec{B} &= \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}, & \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt}, & \vec{D} &= \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \vec{E}, & \operatorname{div} \vec{E} &= \sigma, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где H – магнитная напряженность; D – электрическая индукция; μ – относительная магнитная проницаемость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; μ_0 и ε_0 – магнитная и электрическая постоянные; σ – плотность электрических зарядов; B – магнитная индукция; E – напряженность электрического поля.

Основные понятия индукционного нагрева применительно к индукционной системе, в которой индуктор окружен со всех сторон нагреваемой поверхностью. На рис. 5.1 показана схема индукционной системы.

Индукционный нагрев – один из видов электронагрева, заключающийся в нагреве электропроводящих материалов в переменном электромагнитном поле. Сущность индукционного нагрева заключается в том, что электроток переменной частоты, протекая по индуктору, создает переменное электромагнитное поле, под воздействием которого в металле возникает движение электронов, большая часть энергии которых при соударениях преобразуется в теплоту. Переменные токи, возникающие в металле вследствие электромагнитной индукции, носят название вихревых или индуктированных токов. Плотность вихревых токов по сечению нагреваемого металла будет неравномерной. Наибольшая плотность тока будет в точках, лежащих на поверхности проводника, наименьшая на его оси. Явление неравномерного распределения переменного тока по сечению с концентрацией его в поверхностном слое проводника носит название поверхностного эффекта. Определено, что 86%

всей подведенной энергии преобразуется в тепло в приграничном с индуктором слое металла толщиной Δ , условно названной глубиной проникновения тока. Глубина проникновения тока является важной характеристикой индукционного нагрева и определяется по формуле:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (5.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; μ – относительная магнитная проницаемость проводника; f – частота тока.

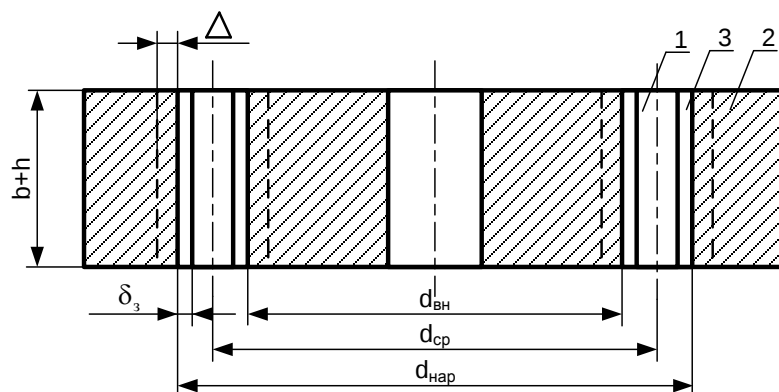


Рис. 5.1. Схема индукционной системы:

1 – индуктор; 2 – нагревательная плита; 3 – зазор между индуктором и нагревательной плитой; $d_{нар}$ – наружный диаметр паза; $d_{вн}$ – внутренний диаметр паза; $d_{ср}$ – средний диаметр индуктора; $b + h$ – полупериметр сечения паза; δ_z – зазор между индуктором и стенкой паза; Δ – глубина проникновения электромагнитной волны

В индукционной системе (рис. 5.1) основная часть тепловой энергии выделяется в нагревательной плите 2, кроме того, частично в индукторе 1 и в зазоре δ_z между индуктором и стенкой паза плиты. Все характеристики, относящиеся к индуктору, обозначаем индексом 1, к нагревательным плитам индексом 2, к зазору между ними – индексом 3.

Решение уравнений Максвелла тем или иным методом позволяет рассчитать активные и реактивные энергии поля для каждого участка индукционной системы. В результате можно составить баланс энергий на участках в единицу времени, т.е. активных P_1 и P_2 и реактивных Q_1 , Q_2 и Q_3 мощностей участков:

$$P_s = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2}. \quad (5.3)$$

Рассчитанные мощности позволяют определить энергетические характеристики системы индуктор – нагревательные плиты: электрический КПД η и коэффициент мощности $\cos\varphi$:

$$\eta_s = \frac{P_2}{(P_1 + P_2)}, \quad (5.4)$$

$$\cos \varphi = \frac{(P_1 + P_2)}{P_s} . \quad (5.5)$$

Выражения для активной и реактивной мощностей в общем виде можно записать:

$$P = 10^{-3} \cdot H^2 \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \cdot S \cdot F , \quad (5.6)$$

$$Q = 10^{-3} \cdot H^2 \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \cdot S \cdot G , \quad (5.7)$$

где F и G – поправочные функции, учитывающие форму нагреваемого проводника; S – площадь энерговоспринимающей поверхности.

Активная мощность, приходящаяся на 1 м² поверхности паза в нагревательной плите, называется удельной поверхностной мощностью P_0 и является одним из определяющих параметров индукционной системы.

Для достижения наибольшего значения η_0 необходимо, чтобы у индукционной системы P_1 была существенно больше P_2 . Это достигается прежде всего подбором материалов индуктора и нагревательных плит. Для индуктора фактор потерь $\sqrt{\rho \cdot \mu}$ должен быть минимальным, поэтому его обычно изготавливают из меди или алюминия, обладающих низкими значениями ρ и $\mu=1$. Электрический КПД зависит от зазора между индуктором и стенкой паза. С увеличением зазора напряженность магнитного поля на поверхности паза уменьшается, т.е. P_2 и η_2 снижаются.

На η_0 и $\cos \varphi$ влияет отношение периметра сечения индуктора к его радиусу (l/R). При $l/R > 10$ система имеет наибольшие значения η_0 и $\cos \varphi$, которые с уменьшением l/R снижаются.

При нагреве изменяются электрофизические параметры металлов, поэтому меняются потребляемая мощность, электрический КПД и $\cos \varphi$.

Методика расчета индукционных нагревателей включает тепловой расчет нагревательной плиты (НП) и электромагнитного расчета системы нагревательных плит.

5.1.1. Тепловой расчет нагревательных плит для ремонта покрытий гуммированных объектов

Тепловой расчет необходим для определения мощности индукционных нагревателей. Суммарный расход теплоты на обогрев НП рассчитываем исходя из теплового баланса согласно выражению:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{проч}} , \quad (5.8)$$

где $Q_{\text{расх}}$ – суммарный расход теплоты на обогрев НП, Вт; $Q_{\text{пол}}$ – тепловой поток, получаемый от НП, собственно для вулканизации ремонтного участка, Вт; $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери на нагрев оборудования и окружающей среды, Вт;

$Q_{\text{проч}}$ – прочие потери теплоты, не поддающиеся расчету, составляющие примерно 3–5% от всех потерь теплоты.

Полезная теплота расходуется на нагрев ремонтируемого участка оборудования от начальной температуры до температуры вулканизации и на проведение реакции вулканизации эластомера до приобретения резиной необходимых свойств.

Метод расчета полезной теплоты покажем применительно к гуммированным объектам как наиболее сложным резинометаллическим изделиям. Поскольку при вулканизации ремонтного участка применяем двухсторонний обогрев, для теплового расчета НП необходимо определить долю полезной теплоты, получаемой от НП.

Известная в теплотехнике формула (5.9) [115] для расчета удельного теплового потока при стационарном режиме нагрева с представлением покрытия в виде n -слойной пластины приводит к неудовлетворительным результатам, так как не учитывает нестационарный характер тепловых процессов при вулканизации покрытия и погрешности приведения ее к многослойной пластине:

$$q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (5.9)$$

где q – удельный тепловой поток Вт/м^2 ; T_1 и T_{n+1} – температура наружных поверхностей покрытия, К; δ_i – толщина i -го слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; n – количество слоев с одинаковыми физическими характеристиками.

При обогреве участка покрытия в процессе его вулканизации действуют встречные тепловые потоки разной мощности, направленные от НП и от диафрагмы. Внутри покрытия происходит наложение тепловых потоков и на некотором его участке, границы которого за цикл вулканизации изменяются, действует уже результирующий тепловой поток. Этот факт необходимо учитывать при определении тепловых потоков, воздействующих на покрытие со стороны резины и металлической подложки. В условиях нестационарного режима вулканизации тепловой поток со стороны НП $Q_{\text{пол}}$ можно рассчитать, зная его удельное значение $q_{\text{фи}}$ по каждому участку гуммировочного покрытия и площадь поверхности этих участков F_i (5.10):

$$Q_{\text{пол}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{фи}} F_i, \quad (5.10)$$

$$q_{\text{фи}} = \lambda_{\text{пр}}^i \frac{T_{x=0}^i(\tau) - T_{x=h}^i(\tau)}{h^i}, \quad (5.11)$$

где $T_{x=0}^i(\tau)$, граничная температура со стороны НП; $T_{x=h}^i(\tau)$ – приграничная температура в покрытии на расстоянии h от поверхности покрытия; h^i – толщина приграничного слоя, равного шагу по координате; $\lambda_{\text{пр}}^i$ – коэффициент теплопроводности покрытия.

Граничная температура аппроксимируется при возрастании по (5.12) и при убывании – по (5.13):

$$T_x(\tau) = T_x^{\tau=0} + \sum_{i=0}^m \frac{T_x^{\tau_{i+1}} - T_x^{\tau_i}}{\tau_{i+1} - \tau_i}, \quad (5.12)$$

$$T_x(\tau) = T_x^{\text{const}} + \sum_{i=0}^m \frac{T_x^{\tau_i} - T_x^{\tau_{i+1}}}{\tau_{i+1} - \tau_i}, \quad (5.13)$$

где τ – текущее время; m – число интервалов аппроксимации; $T_x^{\tau=0}$ – температура на начало вулканизации; T_x^{const} – температура в стационарный период вулканизации.

Тепловые потери на нагрев вулканизационного оборудования и окружающей среды $Q_{\text{пот}}$ от рабочих поверхностей НП рассчитываются по (5.14):

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{бок}}. \quad (5.14)$$

Потери теплоты от горизонтальной поверхности нижней НП через теплоизоляционную прокладку определяются по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{\lambda_{\text{прокл}}}{\delta_{\text{пр}}} \cdot F_{\text{пр}} \cdot \Delta t_{\text{пр}}, \quad (5.15)$$

где $\lambda_{\text{прокл}}$ – коэффициент теплопроводности прокладки, Вт/м·К; $\delta_{\text{пр}}$ – толщина прокладки, м; $F_{\text{пр}}$ – площадь прокладки, м²; $\Delta t_{\text{пр}}$ – разность между температурами на поверхности НП и стола вулканизатора, К.

Тепловые потери верхней полуформы через планшайбу $Q_{\text{пл}}$ включают в себя тепловой поток (Q_p) через металлическую стенку по площади примыкания поверхности полуформы и ребер планшайбы; тепловой поток, образующийся в результате теплопередачи через сложную стенку, состоящую из прослойки воздуха и металла планшайбы ($Q_{\text{воз.пр.}}$).

$$Q_{\text{пл}} = Q_p + Q_{\text{воз.пр.}}. \quad (5.16)$$

Тепловой поток через ребра планшайбы определяется по формуле:

$$Q_p = \frac{\lambda_{\text{пл}}}{\delta_n} \cdot F_p \cdot \Delta t_p, \quad (5.17)$$

где $\lambda_{\text{пл}}$ – коэффициент теплопроводности металла планшайбы, Вт/м·К; δ_p – толщина планшайбы, м; F_p – суммарная площадь поверхности ребер планшайбы, находящихся в контакте с полуформой, м²; Δt_p – разность между температурами на поверхности НП и планшайбы, К.

Значения теплового потока $Q_{\text{воз.пр.}}$ можно получить из выражения:

$$Q_{\text{воз.пр.}} = \frac{t_{\phi} - t_{\text{пл}}}{\frac{\delta_{\text{воз.пр.}}}{\lambda_{\text{эф.}}} + \frac{\delta_{\text{пл.}}}{\lambda_{\text{пл.}}}} F_{\text{воз.пр.}}, \quad (5.18)$$

где $\delta_{\text{воз.пр.}}$ – толщина воздушной прослойки, м; $\delta_{\text{пл.}}$ – толщина планшайбы в зоне воздушной прослойки, м; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/м·К; $F_{\text{воз.пр.}}$ – суммарная площадь поверхности в зоне воздушных прослоек, м².

При НП с обогревом необходимо оценивать время их разогрева от холодного состояния до рабочей температуры. Время разогрева $\tau_{\text{раз}}$, определяется из отношения количества теплоты, необходимого для разогрева НП к теплоте, выделяемой нагревателями за один час:

$$\tau_{\text{раз}} = \frac{Q_{\text{раз}}}{Q_{\text{расх}}} = \frac{c_{\phi} \cdot G_{\phi} \cdot \Delta t_{\phi}}{Q_{\text{расх}}}, \quad (5.19)$$

где $Q_{\text{раз}}$ – количество теплоты, необходимое для разогрева НП до рабочей температуры, Дж; C_{ϕ} – теплоемкость материала НП, Дж/кг·К; G_{ϕ} – масса НП, кг; Δt_{ϕ} – разность между температурами НП в рабочем режиме и холодном состоянии, К.

5.1.2. Методы электромагнитного расчета индукционных нагревателей для ремонта гуммировочных покрытий

Для расчета индукционных нагревателей, работающих на токе промышленной частоты, широко применяется метод, основанный на теории связанных контуров, в представлении системы индуктор – нагрузка в виде воздушного трансформатора, первичной цепью которого является индуктор, а вторичной – плита в качестве одного витка (рис. 5.2).

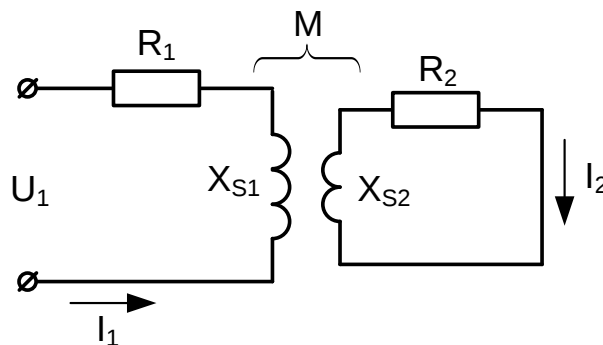


Рис. 5.2. Схема замещения индуктора в виде двух связанных контуров:

R_1, X_{s1} – активное и индуктивное сопротивление индуктора;

R_2, X_{s2} – активное и индуктивное сопротивление НП; U_1 – напряжение на индукторе;

I_1 и I_2 – ток соответственно в индукторе и НП; M – взаимная индуктивность

Приведем алгоритм расчета индукционных нагревателей, построенный на основе теории связанных контуров. Расчет начнем с определения глубины проникновения вторичного тока Δ , м:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot f}}, \quad (5.20)$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление НП, Ом·м; μ_2 – относительная магнитная проницаемость НП; f – частота тока, Гц.

Вычислим площадь поперечного сечения S_2 НП, через которую проходит вторичный ток:

$$S_2 = l_2 \cdot \Delta, \quad (5.21)$$

где l_2 – длина периметра поперечного сечения паза, м.

Рассчитываем проводимость поверхностного слоя паза, G_R :

$$G_R = \frac{S_2}{\rho_2 \cdot l_2}. \quad (5.22)$$

Число витков W индуктора:

$$w = u_1 \cdot \sqrt{\frac{G_R}{3 \cdot P_2}}. \quad (5.23)$$

где U_1 – напряжение питания, В; P_2 – активная мощность, Вт, необходимая для нагрева НП, полученная из теплового расчета.

Далее определяем активные и индуктивные сопротивления первичной и вторичной цепей:

$$R_1 = \frac{\rho_1 \cdot w \cdot l_1}{q_1} \cdot [1 + \beta(t_\phi - 20)], \quad (5.24)$$

где R_1 – активное сопротивление индуктора, Ом; ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала индуктора, Ом·м; l_1 – средняя длина витка индуктора, м; q_1 – площадь поперечного сечения проводника индуктора, м²; β – температурный коэффициент; t_ϕ – температура НП в рабочем режиме, К.

$$X_1 = \frac{3.925 \cdot 10^{-7} \cdot w^2 \cdot l_1 \cdot \left(h - \frac{2}{3}h_1\right)}{b}, \quad (5.25)$$

где x_1 – индуктивное сопротивление индуктора, Ом; h – глубина паза в НП, м; h_1 – высота индуктора, м; b – ширина паза, м.

$$h_1 \approx d_o \left[0.134 + 0.866 \cdot d_o \left(\frac{n}{b} \right) \right] - \text{без межслойной изоляции}; \quad (5.26)$$

$$h_1 \approx d_o \left(\frac{n}{b} \right) (d_o + a) - \text{с межслойной изоляцией};$$

где d_0 – диаметр проводника индуктора с изоляцией; a – толщина межслойной изоляции, м.

$$R_2 = \frac{w^2}{G_R} \cdot [1.1 + \beta(t_{\Phi} - 20)], \quad (5.27)$$

где R_2 – активное сопротивление поверхностного слоя паза, Ом.

$$X_2 = 1.1 \cdot \frac{w^2}{G_R} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (5.28)$$

где X_2 – индуктивное сопротивление поверхностного слоя паза, Ом; $\operatorname{tg} \varphi$ – отношение индуктивного сопротивления поверхностного слоя паза к активному сопротивлению поверхностного слоя паза при комнатной температуре, $\operatorname{tg} \varphi = 0,7$.

$$R_s = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}, \quad (5.29)$$

где R_s – полное сопротивление, Ом.

Рассчитав сопротивления электрических цепей, определяем выходные параметры индукционного нагревателя: коэффициент мощности $\cos \varphi$, силу тока I и мощность P_2 :

$$\cos \varphi = \frac{(R_1 + R_2)}{R_s}, \quad I_1 = \frac{U_1}{R_s}, \quad P_2 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi. \quad (5.30)$$

Указанный метод позволяет получить корректные результаты лишь при ярко выраженном поверхностном эффекте и немагнитных нагрузках. Применение его при ферромагнитной нагрузке и низких частотах приводит к совершенно неудовлетворительным результатам, прежде всего вследствие неопределенности в этих случаях значения взаимной индуктивности M . Кроме того, в расчетах по этому методу не учитывается зависимость относительной магнитной проницаемости нагрузки μ_2 от напряженности магнитного поля. Величина μ_2 принимается средней для всех материалов, а именно $\mu_2 = 180$.

Для расчетов индукционных систем обогрева, особенно с использованием токов высокой частоты, применяются методики, разработанные на основе электрических схем замещения индуктора с нагрузкой. Полная электрическая схема замещения индуктора с нагрузкой приведена на рис. 5.3.

В формулах для расчета активного и реактивного сопротивлений нагрузки относительную магнитную проницаемость принимаем постоянной, что не соответствует действительности.

Непостоянство μ учитываем введением в расчетные формулы (5.31) и (5.32) поправочных коэффициентов $f_1(n)$ и $f_2(n)$.

$$R_2 = \frac{l}{h} \cdot \frac{\rho_2}{\Delta} \cdot w^2 \cdot f_1(n)_1, \quad (5.31)$$

$$X_2 = \frac{l}{h} \cdot \frac{\rho_2}{\Delta} \cdot w^2 \cdot f_2(n)_2, \quad (5.32)$$

где Δ – глубина проникновения тока; ρ_2 – удельное сопротивление стали; w – число витков индуктора; l – средняя длина окружности нагрузки; h – высота нагрузки; n – числовой параметр, характеризующий магнитное поле.

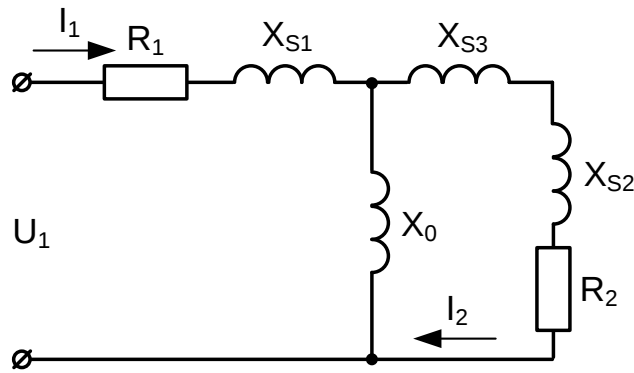


Рис. 5.3. Полная электрическая схема замещения индуктора с нагрузкой:

R_1, X_{s1} – активное и индуктивное сопротивление индуктора;

R_1, X_{s1} – активное и индуктивное сопротивление НП;

X_{s3} – сопротивление рассеяния магнитного потока в зазоре между индуктором и нагрузкой; X_0 – сопротивление обратного замыкания магнитного потока;

U_1 – напряжение на индукторе; I_1 и I_2 – ток соответственно в индукторе и нагрузке

При сильных магнитных полях ($H > 4 \cdot 10^4$ А/м) $n = \infty$ и поправочные коэффициенты имеют значения: $f_1(n) = 1,37$, $f_2(n) = 0,972$. С учетом этого активное сопротивление нагрузки почти на 40% больше, чем сопротивление среды с постоянным μ . Соответственно большей оказывается и активная мощность при одинаковой напряженности магнитного поля.

Проведенные расчеты индукционных нагревателей по вышеизложенным методикам для ремонта гуммировочных покрытий также дали большие погрешности. Так, расчеты, выполненные по экспериментальным данным для индукционных систем с различными параметрами, показали, что напряженности магнитного поля при индукционном обогреве НП токами промышленной частоты находятся в диапазоне между $1 \cdot 10^4$ А/м и $3 \cdot 10^4$ А/м. Эта область магнитного поля промежуточная между слабым ($H_0 < 4 \cdot 10^3$ А/м) и сильным ($H_0 > 4 \cdot 10^4$ А/м) магнитным полем. Для промежуточной области магнитного поля методы расчета индукторов, построенные на теории связанных контуров или на основе электрических схем замещения, дают погрешность 25–50%.

Критический анализ указанных методов расчета индукционных нагревателей, их расчетно-экспериментальная проверка, результаты исследования магнитного поля при индукционном нагреве НП токами промышленной частоты показали, что наиболее предпочтительным является расчет по методу баланса мощностей.

Систему индуктор – нагревательная плита можно представить схемой (рис. 5.1), характеризующей нагрев покрытия индуктором, расположенным внутри нее. Исходными данными для расчета являются: активная мощность в НП P_2 ; напряжение сети U_1 , В; температура рабочей поверхности НП t_{ϕ} , К; ширина паза $b = 0,5$; $(d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}})$; h – высота паза, м; $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр индуктора, м; частота тока f , Гц.

Активную мощность, которая необходима для обогрева НП, получаем из теплового расчета. Температуру рабочей поверхности определяем из расчетов

режима вулканизации ремонта покрытия. Ширину паза и средний диаметр индуктора задаем при конструировании НП. Высоту паза задаем диапазоном допустимых значений $h_{\min}$ - $h_{\max}$ и в расчетах уточняем в зависимости от количества витков и диаметра провода индуктора. Должны быть известны также материал индуктора и марка стали НП.

Выходными параметрами являются: количество витков индуктора w , фактическая активная мощность устройства $P_{\text{и}}$, Вт, диаметр d_0 и тип провода индуктора, окончательно уточняем высоту паза h , м, ток в индукторе I_1 , А, коэффициент мощности $\cos\varphi$, электрический КПД η .

Расчет индукционных нагревателей выполняем в определенной последовательности. Определяем площадь поверхности паза $S_{\text{п}}$, м:

$$S_{\text{п}} = 2\pi \cdot d_{\text{ср}}(b - n). \quad (5.33)$$

Удельная мощность P_0 , кВт/м², равна:

$$P_0 = \frac{P_2}{S_{\text{п}}}. \quad (5.34)$$

Вычисляем напряженность магнитного поля H_{02} , А/м, на поверхности паза НП:

$$H_{02} = \sqrt{\frac{P_0}{10^{-6} \sqrt{\rho_2 \cdot \mu_2 \cdot f \cdot F_{\text{ц}}}}}, \quad (5.35)$$

где $F_{\text{ц}}$ – поправочная функция, учитывающая форму нагреваемого проводника.

Поправочные функции $F_{\text{ц}}$ и $G_{\text{ц}}$ учитывают форму и геометрические размеры нагреваемого проводника и зависят от соотношения $\frac{\sqrt{2}}{2}d_{\text{ср}}/\Delta$, где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр паза. При $\frac{\sqrt{2}}{2}d_{\text{ср}}/\Delta \geq 10$ поправочные функции $F_{\text{ц}}=G_{\text{ц}}=1$.

Напряженность магнитного поля на поверхности индуктора H_{01} определяется по формуле

$$H_{01} = H_{02} \cdot k_{\text{св}}, \quad (5.36)$$

где $k_{\text{св}}$ – коэффициент связи.

Для индукторов, расположенных внутри стальной загрузки и плотно прилегающих к стенкам паза, магнитные напряженности на поверхности паза и индуктора практически одинаковы, т.е. $k_{\text{св}}=1.0$.

Тогда активная P_1 (кВт) и реактивная Q_1 (квар.) мощности в индукторе вычисляются по формулам (5.37) и (5.38):

$$P_1 = 3.1 \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \cdot d_{\text{ср}} \cdot l_1 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot f \cdot F_{\text{ц}}} \cdot (1/k_1), \quad (5.37)$$

где l_1 – периметр сечения индуктора, принимается с учетом размера паза и толщины наружной изоляции индуктора $\delta_{\text{из}}$, $l_1=l_2-4\delta_{\text{из}}$; k_1 – коэффициент заполнения индуктора, равный 0,9.

$$Q_1 = |P_1| \frac{G_u}{F_u}. \quad (5.38)$$

Активная мощность P_2 (кВт), которую необходимо выделить в НП, задана из теплового расчета. Реактивная мощность в НП Q_2 (квар.) равна:

$$Q_2 = 0.6 |P_2| \frac{G_u}{F_u}. \quad (5.39)$$

Реактивная мощность Q_3 (квар) в зазоре δ_3 между индуктором и стенками паза вычисляем по формуле:

$$Q_3 = 3.1 \cdot 10^{-9} \cdot H_{01}^2 \cdot f \cdot l_1 \cdot \delta_3^2. \quad (5.40)$$

Затем определяется полная мощность P_s (квар.) индукционной системы:

$$P_s = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2}. \quad (5.41)$$

Электрический коэффициент полезного действия η_s и коэффициент мощности $\cos \varphi$ вычисляются следующим образом:

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_u}, \quad \cos \varphi = \frac{P_u}{P_s}, \quad (5.42)$$

где P_u – активная мощность индукционной системы, $P_u = P_1 + P_2$ (кВт). Определяем значение тока I_1 (А) в индукторе:

$$I_1 = \frac{P_s \cdot 10^3}{U}. \quad (5.43)$$

Количество витков w индуктора составляет

$$w = \frac{H_{01} \cdot l_1}{\sqrt{2} \cdot I_1}. \quad (5.44)$$

Сечение провода q_1 (мм²) индуктора подбирается таким образом, чтобы плотность тока i не превышала допустимого значения. Для медного провода в электротехнике принято $i < 5$ А/мм². Тогда сечение провода:

$$q_1 = \frac{I_1}{i}. \quad (5.45)$$

Исходя из допустимого сечения провода и максимальной температуры НП, выбираем подходящие диаметр провода и тип его изоляции. Затем рассчитывается заполнение проводом паза и при необходимости выполняется корректировка высоты паза в зависимости от диаметра провода с изоляцией, толщины межслойной изоляции и изоляции поверхности индуктора в пределах $h_{\min}$ – $h_{\max}$:

$$h_1 = \frac{w d_{\text{из}}}{b - 2\delta_1} \cdot (d_{\text{из}} - \delta_2) - \delta_2 + 2\delta_1, \quad (5.46)$$

где h_1 – высота индуктора; $d_{\text{из}}$ – диаметр провода с изоляцией; b – ширина паза; δ_1 , δ_2 – толщина соответственно наружной изоляции индуктора и межслойной изоляции.

Если при выбранном диаметре провода не обеспечивается удовлетворительного совпадения принимаемой в расчете высоты паза h_2 и высоты индуктора h_1 , проводится оптимизация расчетов до тех пор, пока

$$h_1 \approx h_2 \in [h_{\min} - h_{\max}].$$

Расчеты индукционных нагревателей для сокращения времени и трудоемкости производили в среде MathCad.

Для достижения оптимальной эффективности нагревательные плиты с индукционным обогревом для ремонта покрытий должны соответствовать следующим основным требованиям: обеспечивать заданную технологическим режимом температуру поверхности, в том числе разную по зонам; иметь возможность регулирования температуры по зонам обогрева; обладать непродолжительным периодом разогрева от холодного состояния до рабочей температуры; должны быть надежными в работе и несложными в техническом обслуживании и ремонте; срок службы индукторов должен соответствовать сроку службы нагревательных плит; обладать оптимальной металлоемкостью.

Произведя расчет согласно вышеизложенным выкладкам определили, что экспериментальные данные отличаются от расчетных не более чем на 5%. Расхождение расчетных и экспериментальных данных в указанном пределе удовлетворяет требованиям, предъявляемым при проектировании и изготовлении индукторов, и практически не может быть снижено из-за того, что применяемые в расчетах исходные электромагнитные характеристики материалов имеют погрешность не менее 5%. Кроме того, фактическая мощность индукционных нагревателей плит, как правило, несколько больше расчетной, что является положительным фактором в практическом использовании данного типа нагрева.

5.2. Экономическая характеристика состояния вопроса и направления исследования

Необходимость оценки эффективности защиты основных фондов предприятий химической промышленности от коррозии продиктована масштабом коррозионных потерь и затрат на их предотвращение. Особенно важными эти задачи являются для химической промышленности с ее агрессивными средами, способствующими износу оборудования, а также технологическими процессами, связанными с выделением в окружающую среду вредных веществ, значительно ускоряющими коррозионные процессы, наносящими ущерб окружающей среде.

Многообразие рабочих сред и условий эксплуатации химического оборудования, а следовательно, коррозионных разрушений, приводит к необходимости разработки и использования самых разнообразных средств и методов противокоррозионной защиты, а также выбора наиболее эффективных мето-

дов их ремонта. При оптимальном использовании имеющихся средств, эффективных способах ремонта коррозии можно избежать (по данным зарубежных экспертов), предотвращая около 25% коррозионных потерь. Исходя из этого, необходимо не только совершенствование технологических процессов ремонта, обеспечивающих восстановление от разрушения, но и совершенствование управления этими сферами деятельности в области разработки новых средств и методов ремонта, создание надежного механизма отбора наиболее прогрессивных из них, где критерием оценки может служить показатель экономической эффективности защиты, рассчитанный с учетом как технико-экономических, так и экологических параметров. Особенно актуальным комплексный учет этих факторов является в современных условиях, когда рациональное природопользование должно стать неотъемлемым требованием при осуществлении противокоррозионных мероприятий.

Между уровнем коррозионных разрушений и состоянием окружающей среды существует тесная взаимосвязь. Так, в присутствии агрессивных частиц, загрязняющих атмосферу и водные ресурсы, значительно ускоряются коррозионные процессы конструкций, машин, оборудования. В свою очередь, продукты коррозии, попадая в окружающую среду, дополнительно загрязняют ее. Любое же мероприятие, направленное на защиту от коррозии, его поддержание, является по своей природе ресурсосберегающим, природоохранным. Внедрение местного ремонта продляет срок службы оборудования, позволяет существенно сократить расходы, связанные с созданием нового оборудования, осуществить оптимальный подбор коррозионно-стойких материалов, сберегая тем самым остродефицитные металлы. Использование отходов в качестве компонентов при ремонте защитных покрытий также способствует, наряду с улучшением технических параметров работы оборудования, сохранению окружающей среды.

Основной целью исследования является разработка методического подхода к оценке экономической эффективности от внедрения восстановления покрытий в химической промышленности на основе расчета полного экономического эффекта с учетом технико-экономических и экологических параметров этих разработок.

В соответствии с поставленной целью исследования сформулированы задачи, решение которых рассматривается ниже: влияние износа оборудования на технико-экономические показатели работы химических производств, анализ состояния основных фондов химической промышленности, установление зависимости этого состояния уровня развития научно-исследовательских работ в области восстановления противокоррозионных покрытий, а также направлений развития и темпов НТП самой химической промышленности;

- установление взаимосвязи основных направлений в химической промышленности в области ремонта противокоррозионной защиты;

- обобщение исследований основных методических проблем, связанных с определением экономического эффекта мероприятий, направленных на ускорение НТП, улучшение состояния окружающей среды в различных отраслях промышленности; выработка подхода к оценке экономического эффекта от внедрения новых прогрессивных методов ремонта.

Объект исследования – местный ремонт антикоррозионных покрытий, внедряемый на предприятиях химической промышленности, в том числе направленный на охрану окружающей среды, ресурсосбережение. Ограничение объекта исследования рамками химической промышленности объясняется большим объемом коррозионных потерь в этой отрасли из-за высокого износа вследствие агрессивности рабочих сред, а также наличием большого количества технологических процессов, связанных с выделением в окружающую среду вредных веществ и низким процентом их улавливания и утилизации. Однако данные ограничения не являются препятствием к распространению подхода, выработанного в результате исследования на другие отрасли, использующие противокоррозионную защиту.

Научный анализ проведен на основе годовых отчетов химических предприятий, статистических материалов, публикаций в периодической печати, научной литературы [147].

Научной стороной исследования является разработка методического подхода к определению полного экономического эффекта от мероприятий, направленных на широкое внедрение в практику восстановительного ремонта гуммировочных покрытий химических аппаратов, ликвидацию (сокращение) потерь от коррозии и затрат на противокоррозионную защиту. При этом при расчете величины полного экономического эффекта учитываются улучшения технико-экономических параметров защищаемых объектов (основной результат), а также сопутствующий результат – экологическая составляющая от внедрения.

Практическая значимость заключается в возможности объективной, комплексной оценки затрат и результатов внедрения восстановления покрытий гуммированных объектов, их экономической эффективности, выбора наиболее прогрессивных методов восстановления при разработке стратегии развития исследований в области ремонта, что позволяет значительно снизить трудоемкость расчетов, повысить их достоверность за счет использования накопленных данных по оценке величины полного экономического эффекта и эффективности. Подобный подход может быть использован в любой отрасли, где используются различные методы ремонта антикоррозионных покрытий.

5.3. Оценка экономического ущерба от износа и основные направления научно-технического прогресса в области ремонта покрытий гуммированных объектов

Значительное моральное старение и физический износ основных фондов химических предприятий РФ обуславливают увеличение объема и трудоемкости ремонта технического обслуживания оборудования и, как следствие, снижение экономической эффективности и конкурентоспособности предприятий.

С середины 1990-х годов предприятия ряда отраслей оказались в принципиально новой конкурентной ситуации, характеризующейся многоаспектностью интересов конкурирующих сторон, динамизмом и агрессивностью. В последние десятилетия ускорился процесс глобализации экономики. Различные рынки, в частности капитала, технологии и товаров, а в известной степени и труда, становятся все более взаимосвязанными и интегрированными в многослойную сеть транснациональных корпораций (ТНК). Глобализация обострила конкуренцию на традиционных рынках, поскольку к внутренним конкурентам присоединились сильные внешние конкуренты.

В настоящее время наличие глобального рынка технологий, рабочей силы, сырьевых ресурсов, финансового капитала приводит к тому, что проблема достижения конкурентоспособности организаций приобретает совершенно иное содержание и значение. Конкурентное преимущество, по мнению ряда исследователей, теперь может быть достигнуто за счет создания и развития некоторого отличительного качества, пользующегося спросом у потребителей, на основе отличительных способностей самой организации, а не технологии и ресурсов, к которым она имеет доступ. Основными факторами, определяющими конкурентоспособность в условиях глобализации экономики, являются: технологические мощности; доступ на крупный, интегрированный рынок; разница между производственными издержками у производящей стороны и ценами на целевом рынке; политические возможности национальных и межнациональных институтов управлять стратегиями стран и регионов, находящихся под их юрисдикцией.

Старение действующего производственного оборудования химических предприятий обуславливает значительное увеличение объема и трудоемкости ремонта и технического обслуживания. В себестоимости химической продукции удельный вес на содержание и ремонт покрытий оборудования составляет 8–11%. По действующим нормам амортизации полное обновление химического оборудования может происходить в среднем за 17–20 лет. Однако недостаточный объем инвестиционных ресурсов является причиной того, что на предприятиях химической промышленности эксплуатируется значительное количество физически и морально устаревшего оборудования, срок службы которого превышает установленный. В сложившихся условиях конкурентоспособность и экономическая эффективность предприятий химической и нефтехимической промышленности напрямую зависят от эффективности

проведения ремонтных работ. Опережающие темпы роста затрат на обслуживание, ремонт оборудования по сравнению с темпами роста основных фондов и выпуском продукции можно объяснить прежде всего прогрессирующим физическим износом оборудования, сложностью вновь вводимого оборудования, а также нерациональностью организации ремонтных служб.

Основные факторы, влияющие на величину затрат на техническое обслуживание и местный ремонт оборудования, можно условно разделить на технические, организационные, экономические, а также факторы внешнего окружения. В настоящее время особую роль приобретает эффективная организация ремонтных работ. Особенно это актуально для химических и нефтехимических предприятий, представляющих собой сложные технологические системы, являющиеся совокупностью технологических аппаратов и машин.

5.4. Комплексная оценка экономического эффекта от осуществления мероприятий, направленных на восстановление покрытий гуммированных объектов

Ускорение темпов научно-технического прогресса в химической промышленности в области создания новых композиционных, полимерных, конструкционных материалов, синтетических смол позволяет избежать или существенно уменьшить коррозионный износ оборудования. Одновременно замена традиционных металлических материалов на неметаллические позволяет повысить надежность работы оборудования и снизить расходы по его эксплуатации и ремонту. Использование отходов в качестве компонентов при ремонте покрытий способствует, наряду с улучшением технических параметров работы оборудования, сохранению окружающей среды. В этом свете важным является вопрос о необходимости комплексной оценки экономического эффекта от осуществления мероприятий, направленных на ремонт покрытий гуммированных объектов, с учетом технико-экономических и экологических параметров этих разработок (рис. 5.4).

На основании анализа существующих в отечественной и зарубежной практике методов определения экономического эффекта выработаем методический подход к его определению от внедрения местного ремонта в химической промышленности, его экономической эффективности.

Показатель экономического эффекта на всех этапах реализации восстановления покрытий определяется как превышение результатов их внедрения над совокупными затратами ресурсов за весь срок осуществления мероприятий: от начала разработки до плановых сроков ремонта оборудования, конструкций, сооружений, оборудования, аппаратов (с учетом их морального износа).



Рис. 5.4. Показатели, характеризующие ремонт гуммированных покрытий

Исходя из единства принципиального подхода к определению экономического эффекта, принимаются основные положения "Методических рекомендаций по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение НТП", но при этом учитываются особенности новой техники в области ремонта антикоррозионных покрытий.

Особенности расчета экономического эффекта от внедрения данных мероприятий проявляются при определении результатов их осуществления и необходимых для этого затрат.

Результатом использования восстановления противокоррозионных покрытий для защиты основных фондов от коррозии получаются за счет:

- увеличения срока службы оборудования, вследствие его ремонта противокоррозионной защиты, за пределы нормативного;
- снижения расходов по эксплуатации отремонтированного защищенного оборудования;
- снижения стоимости оборудования в результате применения более прогрессивной, дешевой защиты;
- снижения себестоимости основной продукции, полученной на защищенном оборудовании и др. (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Технико-экономические и экологические результаты ремонта гуммировочных покрытий

Расходы на осуществление местного ремонта складываются из затрат, связанных с ликвидацией коррозии, а также с её предотвращением (рис. 5.6), и включают все затраты на создание, производство и использование противокоррозионной защиты:

$$Z_T = Z_T^C + Z_T^П + Z_T^И, \quad (5.47)$$

где Z_T^C , $Z_T^П$, $Z_T^И$ – затраты по созданию, производству и эксплуатации основных фондов с использованием местного ремонта покрытий за расчетный период.



Рис. 5.6. Затраты на местный ремонт покрытий гуммированных объектов

Сопутствующий экономический эффект (экологическая составляющая) от внедрения восстановления антикоррозионных покрытий ($\mathcal{E}^c$) выражается суммой предотвращенного годового экономического ущерба от загрязнения окружающей среды (Y_{np}) и годового прироста дохода от улучшения производственных результатов деятельности предприятия (ΔD):

$$\mathcal{E}^c = Y_{np} \pm \Delta D. \quad (5.48)$$

Экологическая составляющая рассчитывается за весь срок службы отремонтированного оборудования.

Учет предотвращенного ущерба от загрязнения окружающей среды в результате осуществления местного ремонта возможен для случаев:

1) снижения загрязняющих выбросов:

$$\text{а) в атмосферу: } Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \quad (5.49)$$

$$\text{б) в воду: } Y = Y = \gamma \cdot \sigma_k \cdot M, \quad (5.50)$$

где γ – множитель, численное значение которого равно 104,8 руб./усл.т (для выбросов в атмосферу) и 20000 руб./усл.т (для выбросов в водоемы) [147]; σ , σ_k – показатель относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха над территориями различных типов либо различных водохозяйственных участков; f – поправка, учитывающая характер рассеяния примеси в атмосфере; M – приведенная масса годовых выбросов загрязнений в атмосферу, водохозяйственный участок.

2) экономии водных ресурсов:

а) в результате снижения их потребления для теплообмена:

$$\Delta V = V_1 - V_2, \quad (5.51)$$

где V_1 , V_2 – объем оборотной воды до и после восстановления покрытия.

Объем оборотной воды, используемой в теплообменниках, рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{Q}{c \cdot (t_1 + t_2) \rho}, \quad (5.52)$$

где V – объем воды, м³; Q – количество теплоты, снимаемое охлаждающей водой, Мкал; t_1 , t_2 – температура воды соответственно на входе и выходе теплообменника, К; ρ – плотность воды, равная 1 т/м³; c – теплоемкость воды, равная 1 Мкал.

б) при внедрении восстановления покрытий, способствующих увеличению коэффициента теплопередачи.

Экономия охлаждающей воды рассчитывается по формуле:

$$\Delta V = F \frac{t^{\wedge} - t^{\wedge\wedge}}{2,3 \lg \frac{t^{\wedge}}{t^{\wedge\wedge}}} \cdot \frac{K_1 - K_2}{c(t_1 - t_2) \rho}, \quad (5.53)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты теплопередачи до и после проведения мероприятий; F – охлаждающая поверхность теплообменника; t', t'' – перепад температур химического продукта и воды соответственно на входе и на выходе теплообменника.

3) возможности использования отходов.

Предотвращенный экономический ущерб от внедрения восстановления покрытий с использованием отходов определяется по формуле:

$$Y_{np} = Y \cdot A, \quad (5.54)$$

где Y – экономический ущерб, причиняемый выбросом единицы отходов в атмосферу (воду) либо наносимый удалением и захоронением отходов, руб./год; A – количество утилизируемых отходов, т.

Экономический ущерб, наносимый удалением и захоронением отходов, рассчитывается по формуле:

$$Y = Y_{yd} + Y_m, \quad (5.55)$$

где Y_{yd} – затраты на удаление и содержание единицы отходов на свалке или в отвалах, руб./т.; Y_t – экономический ущерб, наносимый изъятием территории под складирование единицы отходов, создание отвалов, руб./т.

При внедрении восстановления покрытий с использованием отходов образуется дополнительный доход ΔD от их утилизации, который рассчитывается по формуле:

$$\Delta D = (C_0 - I_0) A_0, \quad (5.56)$$

где C_0 – оптовая цена реализуемого на сторону отхода, руб.; I_0 – эксплуатационные затраты предприятия на сбор и подготовку единицы отходов к реализации, руб.; A_0 – объем реализуемого отхода, т.

Таким образом, при использовании предложенного методического подхода создается возможность для расчёта полного экономического эффекта с учетом изменения не только технико-экономических, но и экологических факторов в результате внедрения местного ремонта покрытий. Эффективность определяется соотношением между полным экономическим эффектом внедрения и необходимых для этого затрат:

$$\Theta_{\Sigma} = \frac{\Theta^o + \Theta^c}{Z_t}. \quad (5.57)$$

ВЫВОДЫ

Исследование посвящено моделированию процессов теплопереноса и энергосберегающей технологии теплообмена при местном ремонте покрытий гуммированных объектов. Основные результаты и выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Выполнен анализ известных решений в области теплопереноса при ремонте гуммировочных покрытий; определены случайные возмущения – факторы неопределенности, действующие на тепловой процесс вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий и способы их формализации.
2. Разработана структура математической модели теплового процесса индукционного нагрева гуммировочных покрытий с учетом факторов неопределенности, учитывающая с достаточной полнотой реальные, неидеализированные, особенности процесса термообработки; проведен анализ действующих возмущений в процессе вулканизации, представляющих собой вариации значений теплофизических характеристик вулканизата, неравномерное распределение внутренних источников теплоты, колебания наружной температуры окружающей среды, и выявлен их вероятностный характер.
3. Разработан и реализован алгоритм решения уравнений математической формализации. В результате теоретико-экспериментальных исследований установлено: математическая модель процесса теплообмена характеризуется высокой точностью получаемых результатов и инвариантностью к геометрии ремонтируемого покрытия. Проведена идентификация и доказана адекватность полученной математической модели процесса теплообмена при местном ремонте гуммировочных покрытий.
4. Решены задачи интенсификации теплообмена при вулканизации при местном ремонте гуммировочных покрытий в условиях неопределенности. Приведенные результаты реализации предложенной методики, полученные посредством введения в модель формализованных возмущений стохастической природы, позволяют существенно снижать затраты энергии.
5. Экспериментально доказано влияние условий теплообмена при термообработке на качественные показатели готовых отремонтированных гуммировочных покрытий: использование при ремонте покрытий индукционного обогрева нагревательных плит в сочетании с оптимизацией вулканизации позволяет получить более равномерную степень вулканизации гуммировочных покрытий, сохранить на первоначальном уровне и повысить их некоторые физико-механические показатели.
6. Разработана инженерная методика расчета индукционного нагрева ремонтируемых покрытий гуммированных объектов; определена эффективность внедрения предложенного метода ремонта в промышленность.
7. Разработаны и доведены до конечной реализации методы расчета процессов термообработки гуммировочных покрытий, внедренные в расчетную практику ряда промышленных предприятий Вологодской области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. № 1647538 СССР, МПК⁵ G05D23/19. Устройство для управления тепловым процессом вулканизации изделий / Г.Г. Воробьев, В.И. Муратов, А.А. Павловский, И.Е. Яковлев, Н.Г. Сидоров, В.Г. Пороцкий, В.В. Савельев, В.И. Сапрыкин; заявитель Куйбышевское специальное конструкторское бюро научно-производственного объединения "Нефтехимавтоматика". – № 4632671; заявл. 05.01.89; опубл. 07.05.1991.
2. А.с. № 839730 СССР, МПК⁵ B29H5/24, G05D23/22. Устройство для регулирования режима вулканизации изделий / А.И. Лукомская, В.Г. Пороцкий, Б.Т. Сытник, Б.С. Левочко, Г.И. Загарий; заявитель П/Я В-8749. – № 2829520; заявл. 18.10.79; опубл. 23.06.1981.
3. Абдуллин, И.Г. Коррозия нефтезаводского и нефтехимического оборудования / И.Г. Абдуллин, В.В. Кравцов, С.Н. Давыдов. – Уфа: УНИ, 1986. – 94 с.
4. Андрашников, Б.И. Интенсификация процессов приготовления и переработки резиновых смесей / Б.И. Андрашников. – Москва: Химия, 1986. – 224 с.
5. Андрашников, Б.М. Новая техника на заводах по производству шин и РТИ / Б.И. Андрашников. – Москва: Химия, 1979. – 116 с.
6. Андрашников, Б.И. Справочник по автоматизации и механизации производства шин и РТИ / Б.И. Андрашников. – Москва: Химия, 1981. – 294 с.
7. Аоки, М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки. – Москва: Наука, 1971. – 424 с.
8. Ахияров, Р.Ж. Выборочный ремонт подземных металлических трубопроводов при локальном нарушении изоляционных покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Р.Ж. Ахияров; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2001. – 24 с.
9. Бабенкова, Л.И. Математическое моделирование и исследование процессов теплообмена в движущихся средах применительно к нагревательным устройствам и аппаратам: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05 / Л.И. Бабенкова; Куйбышевский политехн. ин-т. – Казань, 1979. – 20 с.
10. Бабушка, И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений / И. Бабушка, Э. Витасек, М. Прагер. – Москва: Мир, 1969. – 368 с.
11. Баденков, П.Ф. Состояние и перспективы развития процессов вулканизации шин / П.Ф. Баденков. – Москва: Химия, 1973. – 68 с.
12. Балакирев, В.С. Оптимальное управление процессами химической технологии. / В.С. Балакирев, В.М. Володин, А.М. Цирлин. – Москва: Химия, 1978. – 384 с.
13. Ремонт дымовых труб, градирен и антикоррозионных покрытий оборудования электростанций: справочное пособие / Г.А. Балалаев, В.С. Васильцов, В.Г. Гутов [и др.]. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 217 с.

14. Выбор резин, устойчивых к износу в агрессивной пульпе / А.П. Балашов, Р.А. Краснобрыжая, Е.И. Панченко, Г.А. Блох // Производство шин, РТИ и АТИ. – 1983. – № 11. – С. 9-11.
15. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. Том 1. Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов, А.В. Вязьмин. – Москва: Логос, 2000. – 480 с.
16. Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – Москва: Химия, 1984. – 280 с.
17. Бартенев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев. – Москва: Химия, 1964. – 387 с.
18. Бартенев, Г.М. Структура и релаксационные свойства полимеров / Г.М. Бартенев. – Москва: Химия, 1979. – 228 с.
19. Басин, В.Е. Основы адгезии полимеров / В.Е. Басин, А.А. Берлин. – Москва: Химия, 1974. – 391 с.
20. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технологии / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. – Ленинград: Химия, 1968. – 823 с.
21. Башкатов, Т.В. Технология синтетических каучуков / Т.В. Башкатов, Я.Л. Жигалин. – Ленинград: Химия, 1987. – 360 с.
22. Белозеров, Н.В. Технология резины / Н.В. Белозеров. – Москва: Химия, 1979. – 472 с.
23. Белый, В.А. Адгезия полимеров к металлам. / В.А. Белый, Н.М. Егоренков, Ю.Ю. Плескачевский. – Минск: Наука и техника, 1971. – 266 с.
24. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника, 1976. – 416 с.
25. Беляев, Н.М. Методы нестационарной теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – Москва: Высшая школа, 1978. – 328 с.
26. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности: в 2 ч. Ч.1 / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – Москва: Высш. школа, 1982. – 327 с.
27. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности: 2 ч. Ч.2 / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – Москва: Высш. школа, 1982. – 304 с.
28. Беляев, Н.М. Основы теплопередачи / Н.М. Беляев. – Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. – 343 с.
29. Берг, Б.В. Теплотехника: учебник для вузов / Б.В. Берг, О.К. Витт. – Москва: Энергия, 1991. – 224 с.
30. Бертсекас, Д. Стохастическое оптимальное управление: случай дискретного времени / Д. Бертсекас, С. Шрив. – Москва: Наука, 1985. – 280 с.
31. Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок. / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – Москва: Статистика, 1980. – 263 с.
32. Бирюков, И.В. Технология гуммирования химической аппаратуры / И.В. Бирюков. – Москва: Химия, 1967. – 200 с.
33. Гуммирование химического оборудования / Л.Г. Богатков, А.С. Булатов, Н.К. Глобин [и др.]. – Москва: Химия, 1977. – 208 с.

34. Боднер, В.А. Оптимизация терминальных стохастических систем / В.А. Боднер, Н.Е. Роднищев, Е.П. Юриков. – Москва: Машиностроение, 1987. – 208 с.
35. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления / В.Г. Болтянский. – Москва: Наука, 1969. – 408 с.
36. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – Москва: Химия, 1975. – 576 с.
37. Бродский, Г.И. Истирание резин / Г.И. Бродский. – Москва: Химия, 1975. – 239 с.
38. Брусин, В.А. Об управлении динамическими системами в условиях неопределенности / В.А. Брусин // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 115–121.
39. Бунин, А.А. Анализ статистических данных о надежности и долговечности химической аппаратуры / А.А. Бунин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1971. – № 3. – С. 30.
40. Вазан, М. Стохастическая аппроксимация / М. Вазан. – Москва: Мир, 1972. – 352 с.
41. Вакула, В.Л. Физическая химия адгезии полимеров / В.Л. Вакула, Л.М. Притыкин. – Москва: Химия, 1984. – 222 с.
42. Вигак, В.М. Оптимальное управление нестационарными температурными режимами / В.М. Вигак; АН УССР; Ин-т прикл. пробл. механики и математики. – Киев: Наукова думка, 1979. – 359 с.
43. Вигак, В.М. Управление температурными напряжениями и перемещениями / В.М. Вигак; АН УССР; Институт прикладных проблем механики и математики. – Киев: Наукова думка, 1988. – 311 с.
44. Воробьева, Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов / Г.Я. Воробьева. – Москва: Химия, 1981. – 295 с.
45. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: особые линейные и нелинейные системы / А.А. Воронов. – 2-е изд. перераб. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 303 с.
46. Вулканизация эластомеров / под ред. Г. Аллигера, И. Сьетуна. – Москва: Химия, 1967. – 428 с.
47. Габасов, Р. Методы оптимизации / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова. – Минск: Изд-во БГУ, 1981. – 350 с.
48. Гихман, И.И. Теория случайных процессов. Т.1 / И.И. Гихман, А.В. Скороход. – Москва: Наука, 1971. – 342 с.
49. Глебов, С.Г. Математическое программирование в задачах химической технологии: учебное пособие / С.Г. Глебов, А.И. Мубараков. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – 79 с.
50. ГОСТ 209-75. Резина и клей. Методы определения прочности связи с металлом при отрыве. – Введ. 01.01.1977. – Москва: Изд-во Стандартов, 1992. – 15 с.

51. ГОСТ 261-79. Резина. Методы определения усталостной выносливости при многократном растяжении. – Введ. 01.01.1981. – Москва: Изд-во Стандартов, 1992. – 25 с.
52. ГОСТ 262-93 (ИСО 34-79). Резина. Определение сопротивления раздиру (раздвоенные, угловые и серповидные образцы). – Введ. 01.01.1995. – Москва: Изд-во Стандартов, 1995. – 15 с.
53. ГОСТ 263-75 (СТ СЭВ 1198-78). Резина. Метод определения твердости по Шору А. – Введ. 01.01.1977. – Москва: Изд-во Стандартов, 1995. – 7 с.
54. ГОСТ 269-66 (СТ СЭВ 983-89). Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. – Введ. 01.07.1966. – Москва: Изд-во Стандартов, 1992. – 15 с.
55. ГОСТ 411-77. Резина и клей. Методы определения прочности связи с металлом при отслаивании. – Введ. 01.07.1978. – Москва: Изд-во Стандартов, 1992. – 13 с.
56. ГОСТ 12535-84 (СТ СЭВ 3813-82). Смеси резиновые. Методы определения вулканизационных характеристик на вулканометре. – Введ. 01.01.1986. – Москва: Изд-во Стандартов, 1992. – 14 с.
57. Химические аппараты с индукционным обогревом / С.А. Горбатков, А.В. Кувалдин, В.Е. Минеев, В.С. Жуковский. – Москва: Химия, 1985. – 176 с.
58. Гофман, В. Вулканизация и вулканизирующие агенты / В. Гофман. – Москва: Химия, 1971. – 228 с.
59. Грешилов, А.А. Анализ и синтез стохастических систем / А.А. Грешилов. – Москва: Радио и связь, 1990. – 320 с.
60. Грожан, Е.М. Резины и эбониты в антикоррозионной технике / Е.М. Грожан. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1976. – 56 с.
61. Гузеев, А.П. Гуммирование изделий из металлов / А.П. Гузеев. – Москва: Химия, 1987. – 95 с.
62. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.И. Кулезнев. – Москва: Высшая школа, 1972. – 320 с.
63. Гуревич, С.Г. Анализ математических моделей индукционных нагревателей / С.Г. Гуревич, Н.А. Павлов, В.С. Немков // Применение токов высокой частоты в электротермии: X Всесоюзная научно-техническая конференция: тез. докл. – Ленинград, 1986. – С. 103–104.
64. Девятериков, И.П. Оценивание параметров линейных систем в условиях помех / И.П. Девятериков, А.С. Позняк. – Москва: МФТИ, 1985. – 412 с.
65. Денисов, А.П. Методы и алгоритмы моделирования и управления технологическими процессами вулканизации в подсистемах транспортной системы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / А. П. Денисов; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2002. – 31 с.
66. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация тепломассобменных процессов в химической технологии / Н.Д. Демиденко. – Москва: Наука, 1991. – 240 с.

67. Догадкин, Б.И. Химия эластомеров / Б.И. Догадкин, А.А. Донцов, В.А. Шершнева. – Москва: Химия, 1981. – 374 с.
68. Донцов, А.А. Процессы структурирования эластомера / А.А. Донцов. – Москва: Химия, 1978. – 287 с.
69. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1974. – 264 с.
70. Дырда, В.И. Исследование молекулярного механизма разрушения резин методом инфракрасной спектроскопии / В.И. Дырда, В.И. Веттегрень, П.П. Надутый // Каучук и резина. – 1974. – № 10. – С. 30–32.
71. Евланов, Л.Г. Системы со случайными параметрами / Л.Г. Евланов, В.М. Константинов. – Москва: Наука, 1976. – 568 с.
72. Егоров, А.И. Математические методы оптимизации процессов теплопроводности и диффузии / А.И. Егоров, Р.Р. Рафатов. – Фрунзе: Илим, 1990. – 336 с.
73. Зуев, Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации / Ю.С. Зуев. – Москва: Химия, 1982. – 280 с.
74. Ивахненко, А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – Москва: Радио и связь, 1987. – 119 с.
75. Износостойкие материалы в химическом машиностроении: справочник / под ред. Ю. М. Виноградова. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 256 с.
76. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кафанов [и др.]. – Москва: Высш.школа, 1979. – 495 с.
77. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
78. Казаков, И.Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев. – Москва: Наука, 1980. – 384 с.
79. Кайзер, М.Ф. Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в химической промышленности / М.Ф. Кайзер, С.И. Суков. – Москва: НИИТЭХИМ, 1975. – Вып. 5. – С. 18.
80. Каргов, А.И. Разработка и исследование алгоритмов оптимального управления процессами технологического нагрева с подвижными формами источников энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / А.И. Каргов; Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2001. – 21 с.
81. Карпов, В.Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности / В.Н. Карпов. – Москва: Химия, 1987. – 338 с.
82. Касаткин, А.Г. Основные процессы химической технологии / А.Г. Касаткин. – Москва: Химия, 1973. – 750 с.
83. Каспаров, М.Н. Вулканизация резиновых изделий, новые виды оборудования и расчеты процесса / М.Н. Каспаров, С.Е. Шаховец. – Ленинград: ЛДНТП, 1990. – 20 с.

84. Катковник, В.Я. Линейные оценки и стохастические задачи оптимизации / В.Я. Катковник. – Москва: Наука, 1976. – 320 с.
85. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химической технологии / В.В. Кафаров. – Москва: Химия, 1976. – 290 с.
86. Кафаров, В.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Л.В. Гурьев. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 191 с.
87. Кафаров, В.В. Проблемы управления детерминированно – стохастическими моделями / В.В. Кафаров, В.И. Бодров, В.Г. Матвейкин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 3. – С. 663–666.
88. Кафаров, В.В. Развитие идей перспективного стохастического программирования для задач химической технологии / В.В. Кафаров, В.И. Бодров, В.Г. Матвейкин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 4. – С. 918–921.
89. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – Москва: Наука, 1975. – 500 с.
90. Качанов, Л.М. Разрушение композитных материалов путем расслоения / Л. М. Качанов // Механика полимеров. – 1976. – № 5. – С. 918–922.
91. Кирпичников, П.А. Химия и технология синтетического каучука / П.А. Кирпичников, Л.А. Аверко-Антонович, Ю.О. Аверко-Антонович. – Ленинград: Химия, 1987. – 424 с.
92. Коган, М.Г. Расчет индукторов для нагрева тел вращения / М.Г. Коган. – Москва: ВНИИЭМ, 1966. – 68 с.
93. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Москва: Наука, 1975. – 227 с.
94. Коздоба, Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Киев: Наукова думка, 1977. – 136 с.
95. Коломейцева, М.Б. Оптимизация нагрева массивных тел внутренними источниками / М.Б. Коломейцева, С.А. Панасенко // Автоматика и телемеханика. – 1976. – № 4. – С. 4–20.
96. Колосов, Г.Е. Синтез оптимальных автоматических систем при случайных возмущениях / Г.Е. Колосов. – Москва: Наука, 1984. – 255 с.
97. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1977. – 832 с.
98. Коростелев, А.П. Стохастические рекуррентные процедуры / А.П. Коростелев. – Москва: Наука, 1984. – 290 с.
99. Котляр, Я.М. Методы и задачи тепломассообмена / Я.М. Котляр, В.Д. Совершенный, Д.С. Стриженов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 316 с.
100. Кошелев, Ф.Ф. Общая технология резины / Ф.Ф. Кошелев, А.Е. Корнева, А.М. Буканов. – Москва: Химия, 1978. – 528 с.
101. Кроу, К. Математическое моделирование химических производств / К. Кроу. – Москва: Мир, 1973. – 392 с.
102. Кугинер, Г. Дж. Стохастическая устойчивость и управление / Г. Дж. Кугинер. – Москва: Мир, 1969. – 200 с.

103. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – Москва: Высшая школа, 2000. – 261 с.
104. Лабутин, А.Л. Антикоррозионные и герметизирующие материалы на основе синтетических каучуков / А.Л. Лабутин. – Ленинград: Химия, 1982. – 214 с.
105. Лапшенков, Г.И. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности / Г.И. Лапшенков, Л.М. Полоцкий. – Москва: Химия, 1988. – 287с.
106. Лепетов, В.А. Расчеты и конструирование резиновых изделий / В.А. Лепетов, Л.Н. Юрцев. – Москва: Химия, 1977. – 407 с.
107. Лившиц, М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06 / М.Ю. Лившиц; Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2001. – 47 с.
108. Лотарев, В.Я. Температурные поля и напряжения в телах конечных размеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16 / В.Я. Лотарев; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2000. – 19 с.
109. Лукомская, А.И. Автоматическое управление технологическими процессами в резиновой промышленности / А.И. Лукомская, В.Г. Пороцкий. – Москва: Химия, 1984. – 160 с.
110. Лукомская, А.И. Механические свойства резинордных систем / А.И. Лукомская. – Москва: Химия, 1981. – 281 с.
111. Лукомская, А.И. Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин. / А.И. Лукомская, В.Ф. Евстратов. – Москва: Химия, 1975. – 360 с.
112. Лукомская, А.И. Оценка кинетики неизотермической вулканизации / А.И. Лукомская, В.И. Сапрыкин. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. – 66 с.
113. Лукомская, А.И. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий / А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Каперша. – Москва: Химия, 1978. – 280 с.
114. Лукомская, А.И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеберша.-Москва: Химия, 1972. – 360 с.
115. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – Москва: Высшая школа, 1966. – 600 с.
116. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд. – Москва: Энергия, 1978. – 480 с.
117. Манин, В.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации / В.Н. Манин, А.Н. Громов. – Ленинград: Химия, 1980. – 248 с.
118. Мацевитый, Ю.М. Гибридное моделирование тепловых процессов / Ю.М. Мацевитый, Й. Кунеш – Киев: Наук. думка, 1987. – 268 с.

119. Машины и аппараты резинового производства / под ред. А.М. Барскова. – Москва: Химия, 1975. – 600 с.
120. Мелошев, Ю.К. Основы автоматизации химических производств и техника вычислений / Ю.К. Мелошев. – Москва: Химия, 1982. – 260 с.
121. Моисеев, Ю.В. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах / Ю.В. Моисеев, Г.Е. Зайков. – Москва: Химия, 1990. – 286 с.
122. Мосягина, Н.Г. Математическое моделирование и энергосберегающее управление процессом вулканизации при местном ремонте шин в условиях неопределенности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Н.Г. Мосягина; Тамбовский гос. тех. ун-т. – Тамбов, 2000. – 17 с.
123. Мотовиловец, И.А. Теплопроводность пластин и тел вращения / И.А. Мотовиловец. – Киев: Наук.думка, 1969. – 325 с.
124. Невельсон, М.Б. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание / М.Б. Невельсон, Р.З. Хасьминский. – Москва: Наука, 1972. – 302 с.
125. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Ленинград: Машиностроение, 1988. – 280 с.
126. Нурминский, Е.А. Численные методы решения детерминированных и стохастических минимаксных задач / Е.А. Нурминский. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 160 с.
127. Осипов, Ю.Р. Автоматизация технологических процессов гуммировочных производств / Ю.Р. Осипов, С.Ю. Загребин. – Москва: Классик Прим, 2004. – 275 с.
128. Осипов, Ю.Р. Гуммирование как способ защиты оборудования от коррозии / Ю.Р. Осипов, Р.М. Тамарина, С.Ю. Осипов // Труды международного Форума по проблемам науки техники и образования. Вып. 2 / Академия наук о Земле. – Москва, 1997. – С. 57–59.
129. Осипов, Ю.Р. Исследование работоспособности композиционных эластомерных материалов / Ю.Р. Осипов, Л.И. Огородов // Работоспособность строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов / КХТИ. – Казань, 1984. – С. 16–18.
130. Осипов, Ю.Р. Исследование структуры клеевых швов и слоев обкладок резинометаллических объектов / Ю.Р. Осипов, В.А. Румянцев. – Москва, 1982. – 14 с. – Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш 15.11.1982, № 901-82.
131. Осипов, Ю.Р. Неразрушающий способ определения степени вулканизации обкладок резинометаллических изделий / Ю.Р. Осипов, А.А. Аваев // Заводская лаборатория. – 1979. – № 3. – С. 242–243.
132. Осипов, Ю.Р. О стойкости эластомерных обкладок гуммированных изделий после различных способов термообработки // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1983. – XXVI, № 3. – С. 360–363.
133. Осипов, Ю.Р. Пути совершенствования технологии и оборудования для термообработки гуммировочных покрытий / Ю.Р. Осипов, А.К. Уйбо,

- С.Ю. Осипов // Тез. докл. международной конференции "Передовые технологии 21 века" / НИЦ Инженер. – Москва, 1998. – С. 357–360.
134. Осипов, Ю.Р. Режимы вулканизации и прогнозирование свойств гуммированных покрытий: монография / Ю.Р. Осипов. – Вологда: ВоПИ, 1992. – 204 с.
135. Осипов, Ю.Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов / Ю.Р. Осипов. – Москва: Машиностроение, 1995. – 232 с.
136. Остром, К. Введение в стохастическую теорию управления / К. Остром. – Москва: Мир, 1973. – 321 с.
137. Островский, Г.М. Алгоритмы оптимизации химико-технологических процессов / Г.М. Островский, Т.А. Бережинская, А.Р. Беляева. – Москва: Химия, 1978. – 294 с.
138. Патрикеев, Г.А. Структурные уровни и механика резин / Г. А. Патрикеев // Каучук и резина. – 1986. – № 2. – С. 8–12.
139. Павлов, Н.А. Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей / Н.А. Павлов. – Ленинград: Энергия, 1978. – 120 с.
140. Пенкин, Н.С. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин. – Москва: Машиностроение, 1977. – 199 с.
141. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Н.С. Пенкин, Е.П. Капралов, П.В. Маляров [и др.]. – Москва: Недра, 1992. – 265 с.
142. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.Н. Николаев. – Москва: Химия, 1987. – 496 с.
143. Подстригач, Я.С. Температурные поля и напряжения в телах с тонкими покрытиями / Я.С. Подстригач, П.Р. Шевчук // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1967. – Вып. 7. – С. 227–233.
144. Полякова, Л.М. Стойкость резин и эбонитов в агрессивных средах: тем. обзор / Л.М. Полякова, Л.Г. Фомина, Ю.С. Зуев. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. – 108 с.
145. Попырин, Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин. – Москва: Энергия, 1978. – 416 с.
146. Потураев, В.Н. Прикладная механика резины / В.Н. Потураев, В.Н. Дырда, И.И. Круш. – Киев: Наукова думка, 1975. – 215 с.
147. Радченко, И.А. Оценка экономической эффективности внедрения противокоррозионных разработок в химической промышленности: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / И. А. Радченко; Моск. ин-т управления. – Москва, 1991. – 18 с.
148. Резниковский, М.М. Механические испытания каучука и резины / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская. – Москва: Химия, 1986. – 500 с.

149. Ректорис, К. Вариационные методы в математике, физике и технике / К. Ректорис; под ред. К.И. Бабенко, Б.Е. Победри. – Москва: Мир, 1985. – 589 с.
150. Вострокнутов, Е. Г. Реологические основы переработки эластомеров / Е.Г. Вострокнутов, Г.В. Виноградов. – Москва: Химия, 1998. – 232 с.
151. Рихтмайер, Р. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – Москва: Мир, 1972. – 418 с.
152. Рузинов, Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов / Л.П. Рузинов. – Москва: Химия, 1972. – 199 с.
153. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский – Москва: Наука, 1983. – 552 с.
154. Санжаровский, А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий / А.Т. Санжаровский. – Москва: Наука, 1974. – 115 с.
155. Сафрончик, В.И. Защита от коррозии строительных конструкций и технологического оборудования / В.И. Сафрончик. – Ленинград: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1988. – 255 с.
156. Свистунов, М.В. Моделирование процесса теплообмена и автоматическая корректировка тепловых режимов вулканизации покрытий гуммированных объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / М.В. Свистунов; Вологодский гос. техн. ун-т. – Череповец, 2000. – 170 с.
157. Сиразетдинов, Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем / Т.К. Сиразетдинов. – Москва: Машиностроение, 1988. – 158 с.
158. Скороход, А.В. Исследование по теории случайных процессов / А.В. Скороход. – Киев: Наук. думка, 1980.
159. Установки индукционного нагрева / Л.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.С. Павлов, А.В. Бамунер. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
160. Соколов, В.А. Кислотоупорные футеровочные, винипластовые и гуммировочные работы / В.А. Соколов, Е.И. Чекулаева. – Москва: Высшая школа, 1990. – 174 с.
161. Справочник резинщика: материалы резинового производства / ред. кол.: П.И. Захарченко, Ф.И. Яшунская, В.Ф. Евстратов, П.И. Орловский – Москва: Химия, 1991. – 608 с.
162. Тамарина, А.М. Фрактография сталей, сплавов и гуммировочных покрытий / А.М. Тамарина, Ю.Р. Осипов. – Вологда: ВНКЦ РАН, 1999. – 415 с.
163. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
164. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: справочник / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наук. думка, 1994. – 244 с.
165. Технический анализ и контроль производства синтетических каучуков / Г.А. Белова, Н.А. Исакова, В.С. Фихтипольц, Е.Д. Панкратова. – Ленинград: Химия, 1987. – 184 с.

166. Технология резиновых изделий: учеб. пособие для вузов / Ю.О. Аверко-Антонович, Р.Я. Омельченко, Н.А. Охотин, Ю.Р. Эбич; под ред. П.А. Кирпичникова. – Ленинград: Химия, 1991. – 352 с.
167. Электронно-фрактографическое исследование поверхности разрушения наполненных смесей бутадиен-стирольного сополимера СКС-85 / М.Н. Толмачева, М.Н. Каменский, В.Г. Раевский [и др.] // Механика полимеров. – 1970. – № 3. – С. 437–444.
168. Точилова, Т.Г. Теплофизические характеристики резинометаллических систем / Т.Г. Точилова, А.И. Лукомская. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1984. – 52 с.
169. Третьяченко, Г.Н. Тепловое и напряженное состояние многослойных покрытий / Г.Н. Третьяченко, В.Г. Барило // Пробл. прочности. – 1993. – № 1. – С. 41–49.
170. Уральский, М.Л. Классификация и методы идентификации дефектных гетерогенных образований в резиновых смесях и резинах / М.Л. Уральский, Р.А. Горелик, А.М. Буканов // Каучук и резина. – 1975. – № 4. – С. 49–51.
171. Устинова, Т.А. Испытание резин в физически агрессивных средах: обзор / Т.А. Устинова. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – 92 с.
172. Федюкин, Д.Л. Технические и технологические свойства резины / Д.Л. Федюкин, Ф.А. Махлис. – Москва: Химия, 1985. – 236 с.
173. Ускоренный неразрушающий метод контроля резиновых смесей / Д.Л. Федюкин, В.Д. Зайцева, Л.В. Емельянова [и др.] // Каучук и резина. – 1970. – № 5. – С. 43.
174. Флеминг, У. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами / У. Флеминг, Р. Ришел. – Москва: Мир, 1978. – 316 с.
175. Фокин, М.Н. Защитные покрытия в химической промышленности / М.Н. Фокин, Ю.В. Емельянов. – Москва: Химия, 1981. – 304 с.
176. Харчевников, В.М. Вулканизация резиновых изделий / В.М. Харчевников, Е.Н. Корчемкин. – Ленинград: Химия, 1984. – 96 с.
177. Цыпкин, Я.З. Рекуррентные алгоритмы оптимизации в условиях неопределенности / Я.З. Цыпкин, А.С. Позняк // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. – Москва: ВИНТИ, 1983. – Т. 16. – С. 3–70.
178. Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков и др.; под ред. А.В.Лыкова. – Москва: Энергия, 1973. – 336 с.
179. Шварц, А.Г. Оптимизация, контроль и управление качеством резин: обзор / А.Г. Шварц. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. – 77 с.
180. Шевчук, В.А. Обобщенные граничные условия теплообмена тела со средой через многослойное тонкое покрытие / В.А. Шевчук // Мат. методы и физ.-мех. поля. – 1995. – Вып. 38. – С. 116–120.

181. Шевяков, А.А. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов / А.А. Шевяков, Р.В. Яковлева. – Москва: Машиностроение, 1968. – 320 с.
182. Шеин, В.С. Основные процессы резинового производства / В.С. Шеин, Ю.Ф. Шутилин, А.П. Гриб. – Ленинград: Химия, 1988. – 160 с.
183. Шингаркина, О.В. Оценка долговечности полимерных материалов в конструкциях машин и аппаратов химических производств / О.В. Шингаркина, И.Р. Кузеев // XXXXIX науч. – техн. конф.: тез. докл. / УГНТУ. – Уфа, 1998. – С. 214–215.
184. Шингаркина, О.В. Повышение защитных свойств композиций для ремонта стеклоэмалевых покрытий нефтехимической аппаратуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / О. В. Шингаркина. – Уфа, 2001. – 24 с.
185. Щеглов, В.В. Ремонтное обслуживание машин и агрегатов химических производств при наличии диагностики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.09 / В.В. Щеглов; Моск. ин-т хим. машиностроения. – Москва, 1989. – 15 с.
186. Энциклопедия полимеров / ред. кол.: В.А. Карпин (гл.ред.) и др. – Москва: Советская энциклопедия, 1972. – Т. 1. – 1244 с.
187. Юдин, Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д.Б. Юдин. – Москва: Сов. радио, 1979. – 254 с.
188. Ярцев, В.П. Влияние основы на физико-химические константы эластомерного клея, определяющего его сопротивление механическому разрушению / В. П. Ярцев // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1987. – № 8. – С. 78–82.
189. Acetta, A. Calculation of temperature and extent of reaction during the vulcanization of powdered rubber / A. Acetta // Rubber chemistry and technology. – 1994. – V. 59, № 4. – P.678-701.
190. Griffiths, D.F. Numerical analysis / D.F. Griffiths, G.A. Watson. – Longman Scientific & Technical, 1986.
191. Holman, J. P. Experiments on individual droplet heat transfer rates / J. P. Holman, P. E. Jenkins, F. G. Sullivan. — Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1972. – V. 15. – P. 1489–1495.
192. Lienhard, John, H. IV. A heat transfer textbook: 3rd edition / John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. – Phlogiston press: Cambridge Massachusetts, 2003. – 762 с.
193. Shevchuk, V.A. Calculation of thermal state of bodies with multilayer coatings / V.A. Shevchuk // Lecture Notes in Computer Sciences. – 2002. – Vol. 2330. – P. 500–509.

ПРИМЕНЕНИЕ ГУММИРОВОЧНЫХ ОБКЛАДОК В ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Характеристика рабочей среды	Концентрация, %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Раствор хлористого натрия	Произвольная	303	1206/30	7
Газообразный хлористый водород	Произвольная	303-313	1206/30	3-7
Жидкий хлористый водород	Произвольная	303-313	1206/30	7
Фосфорная кислота	Произвольная	293	1206/30	5
Уксусная кислота (синтез поливинилхлорида)	10	293	1206/30	6
Ацетилен и следы соляной кислоты (производство синтеза хлористого винила)	-	303	1206/30	6
Ацетальдегид и сернокислая закись – окись железа +H ₂ SO ₄ + соли ртути + металлическая ртуть	-	363	1206/30	7-8 месяцев
Рассол + влажный хлор (электролиз щелочей)	-	353	D 9/25i + D 9/25к	1,5
Белильный раствор (хранилище) хлор свободный	12	303	D 9/25i + D 9/25к	5
Водный раствор солей закиси железа с 15% свободной серной кислоты (генераторы)	-	368-373	1206/30	7-8 месяцев
Пар + ацетилен + водный раствор солей закиси железа с 15% свободной H ₂ SO ₄ (газопроводы)	-	368	1206/30	2
Газовая смесь (газопроводы от генераторов до холодильников) ацетальдегид ацетилен водяной пар металлическая ртуть кетоновый альдегид уксусная кислота	25 20 50-55 следы следы следы	363-368	206/30 или D 9/25i + D 9/25к	5-7 месяцев
Газовая смесь Ацетальдегид Ацетилен Водяной пар	40 30 30	333-343	1206/30 или D 9/25i + D 9/25к	1,5
Раствор гипохлорита натрия	0,5 г/л	288-308	1206/30	7
Раствор едкого натра + газообразный хлор NaCl хлор	8-10 100	288-308	1206/30	3-4 месяца

Характеристика рабочей среды	Концентрация, %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Раствор гипохлорита натрия хлор	0,1-0,5 г/л	288-308	1206/30	>7
Ацетилен с примесью хлора хлор	20-30 мг/м ³	288-308	1206/30	>5
Насыщенный раствор NaCl хлор	250-300 г/л 1 г/л	363	206/30	2-3 (НК с диатомитами до 5 лет)
Ртутный электролиз хлоридов щелочных металлов: Хлоросодержащие рассолы NaCl Хлор газообразный хлор, насыщенный влагой раствор щелочи	250-300 г/л 1 г/л 97-98 50	363	D 9/25i + D 9/25к	1-2 (НК – 5 лет)
Влажный хлористый водород	97	363	1206/30	4
Фосфорная техническая кислота (производство катализатора)	98	288-291	1206/30	1
Раствор фосфата натрия	8-30	до 373	1206/30	1
Водный раствор бутандиола в присутствии небольшого количества муравьиной кислоты (производство катализатора)	33-36 pH 2-6	288-291	1206/30	Не ограничен
Слабощелочная суспензия Фенил β-нафтиламина	pH 2-6	293	1206/30	>7
Чистая вода	-	298-303	V141P ₂	>7
Раствор поваренной соли	Произвольная	291-293	1206/30	>7
Раствор хлористого кальция	26 (объемн.)	291-293	1206/30	>7
Соляная кислота	5	291-293	1206/30	>7
Перекись водорода	4	291-293	1206/30	>2
Соляная кислота	Концентрир.	291-293	1206/30	>5
Раствор персульфата калия	5	253	1206/30	>7
Водная фталевая кислота	Произвольная	353-363	1206/30	9 месяцев
Раствор хлорного железа	5	291-293	1206/30	Не ограничен
Серная кислота	30	283-323	366	>3
Соляная кислота	17			
Спирт этиловый	14-39			
Вода	-			

Характеристика рабочей среды	Концентрация, %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Фосфорная кислота (производство альдоля)	18-24 (объемн.)	30 3-323	1206/30	>8
Фосфорная кислота (производство альдоля)	70-80	303		
Фосфорная кислота (производство альдоля)	75-80	313-318		
3% водные растворы эмульгаторов, мыла	pH = 5, 12-13	293	1206/30	>7
Резервуары емкостью 160 м ³	Конденсаци- онная вода	293	V141P ₂	>5
Трубопроводы диаметром 150 мм	5	293	1206/30	>5
Циркуляционная вода (трубопроводы и фильтры)	-	291-293	1206/30	>8
Растворы поваренной соли (напорные резервуары, трубопроводы и насосы)	Концентрир.	291-293	1206/30	>8
Уксусная кислота (цистерны, напорные баки, трубопроводы и насосы)	16	291-293	1206/30	>8
Латекс (валки для лентоотливочной машины)	Произвольная	291-293	НК	>8
Чистая вода (фильтровальные установки)	-	298-308	V141P ₂	Не ограничен
Вофатитовая вода (трубопроводы, вентили, фильтры)	-	291-293	1206/30	Не ограничен
Эмульгатор (резервуары)	17; pH 8	291-293	1206/30	>6
Перекись водорода	4	291-293	1206/30	>2
Персульфат калия (резервуары)	1-4			
Латекс поливинилхлорида (центробежные насосы)	Произвольная	291-293	1206/30	>2
Латекс поливинилхлорида (резервуары, насосы)	pH 9-10	291-293	1206/30	>2
Газовая смесь (смесители) ацетилен + хлористый водород + сырой газообразный винилхлорид + 3% соляной кислоты	-	323	1206/30	3
Газовая смесь (трубопроводы диаметром 200-300 мм) ацетилен + хлористый водород + сырой газообразный винилхлорид + 3 % соляной кислоты	-	323	1206/30	3
соляная кислота	4	283-1288	1206/30	4-5 месяцев
этиленхлоргидрин	4			

**РЕЗИНЫ, ПОЛУЭБОНИТЫ И ЭБОНИТЫ,
СКРЕПЛЕННЫЕ С МЕТАЛЛОМ,
СТОЙКИЕ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ**

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировоч- ного материала)
	среда	концент- рация, %, не более	темпе- ратура, К, не выше	
Резины				
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Азотная кислота	5	293	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслой эбонита 1814 (2566)
$\frac{343}{СКМС}$	Азотная кислота	10	303	Клей лейконат с последующим прессованием в пресс-форме (343)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серная кислота	Любая	293	Клей термопрен
$\frac{829}{НК + СКБ}$	Серная кислота	50	338	Подслой эбонита 1814
$\frac{4849}{НК}$	Серная кислота	70	293	Клей термопрен (4849)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серная кислота	70	343	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслой эбонита 1814
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серная кислота	Любая	293	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслой эбонита 1814 (2566)
$\frac{ИПР - 1025}{Наирит}$	Серная кислота	36	343	Клей лейконат с последующим прессованием (ИРП-1025)
$\frac{4849}{НК}$	Фосфорная кислота	Любая	343	Подслой эбонита 1814 (4849)
$\frac{8 - ЛТИ}{СКС}$	Фосфорная кислота	80	338	Клей лейконат с последующим прессованием (8-ЛТИ)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Фтористо-водородная кислота	Любая	343	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслой эбонита 1814 (2566)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировоч- ного материала)
	среда	концент- рация, %, не более	темпе- ратура, К, не выше	
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серный ангидрид	2	313	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ}$	Едкий натр, едкое кали	Любая	343	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566; 4860)
$\frac{1976 - M}{СКБ}$	Суспензия $CaHPO_4$ $Ca_3(PO_4)_2$	-	298	Подслои эбонита 1814 (1976-М)
$\frac{1976 - M}{СКБ}$	Раствор $CaCl_2$	10	298	Подслои эбонита 1814 (1976-М)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}; \frac{4849}{НК}$	Раствор $ZnCl_2$	50	338	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566; 4849)
$\frac{2566}{НК + СКБ}$	Реакционн. газ производства метилхлорида CH_2Cl_2 ; CH_3Cl ; $CHCl_3$, CCl_4 , HCl , H_2O		343	Подслои полуэбонита 1751 (2566)
$\frac{1976 - M}{СКБ}; \frac{4476}{СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Белильная из- весть, извест- ковое молоко	Любая	338	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566; 4849)
Полуэбониты				
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Азотная кислота	15	293	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6; 2169)
$\frac{1752}{СКВ + НК};$	Серная кислота	30	373	Подслои полуэбонита 1751 (1752; 1752.5)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Серная кислота	70	293	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Соляная кислота	36	343	Клей 2572 (1751), подслои полуэбонита 1751 (1751.6)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировоч- ного материала)
	среда	концент- рация, %, не более	темпе- ратура, К, не выше	
$\frac{1751}{СКБ}$	Соляная кислота	Любая	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Фосфорная кислота	Любая	343	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6; 2169)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Уксусная кислота	Любая	293	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Едкий натр; едкое кали	Любая	343	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор NaCl	25	313	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС};$ $\frac{1752}{СКВ + НК}$	Раствор ZnCl ₂	50	338	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6; 2169; 1752; 1752.5)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор диметилдитино-карбамата натрия	20	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор железотрилонового комплекса	3	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1752}{СКВ + НК}$	Раствор осадител. ванны производства вискозного шелка		323	Подслои полуэбонита 1751 (1752)
$\frac{1752}{СКВ + НК};$ $\frac{1752.5}{СКМС + СКИ}$	Раствор осадительной ванны штапельного производства: H ₂ SO ₄ (8-14%); Na ₂ SO ₄ (до 20%); ZnSO ₄ (до 20%); CS ₂ и H ₂ S (до 0,5%)		323	Подслои полуэбонита 1751 (1752; 1752.5)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор персульфата калия	2	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор ронгалита с сульфатом железа	1,5	293	Клей 2572 (1751)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировоч- ного материала)
	среда	концент- рация, %, не более	темпе- ратура, К, не выше	
$\frac{1751}{СКБ}$; $\frac{1751.6}{СКМС}$ $\frac{1752}{СКВ + НК}$; $\frac{1752.5}{СКМС + СИ}$	Белильная из- весть; извест- ковое молоко	Любая	338	Клей 2572 (1751); подслой полуэбони- та 1751 (1751.6; 2169; 1752; 1752.6)
$\frac{1751}{СКБ}$	Водяной пар, насыщенный капельками H_3PO_4 с 32% P_2O_5 ; H_2SiFe_6 ; HF		343	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}$; $\frac{1751.6}{СКМС}$	Газообразный хлор сухой и влажный	98	331	Клей 2572 (1751); подслой полуэбони- та 1751 (1751.6)
$\frac{1751}{СКБ}$	Гипохлорит NaOH (4-5%); своб. хлор Cl (12%)	-	308	Клей 2572 (1751)
Эбониты				
$\frac{2109}{СКБ}$; $\frac{1726}{НК}$	Азотная кислота	15	293	Клей 2572 (2109; 1726)
$\frac{2109}{СКБ}$; $\frac{1726}{НК}$	Серная кислота	70	293	Клей 2572 (2109; 1726)
$\frac{1726}{НК}$	Серная кислота	Любая	343	Подслой полуэбо- нита 1751 (1726)
$\frac{2109}{СКБ}$	Соляная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)
$\frac{1726}{НК}$	Соляная кислота	Любая	343	Клей 2572 (1726)
$\frac{2109}{СКБ}$	Соляная кислота	36	343	Клей 2572 (2109)
$\frac{2109}{СКБ}$	Уксусная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)
$\frac{1726}{НК}$	Уксусная кислота	Любая	343	Подслой полуэбо- нита 1751 (1726)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировоч- ного материала)
	среда	концент- рация, %, не более	темпе- ратура, К, не выше	
$\frac{2109}{СКБ}, \frac{1726}{НК}$	Фосфорная кислота	Любая	343	Клей 2572 (2109); подслои полуэбонита 1751 (1726)
$\frac{6024}{НК}$	Фтористоводородная кислота	50	313	Подслои полуэбонита 1751 (6024; 1726)
$\frac{1726}{НК}$	Фтористоводородная кислота	50	323 (кратковремен. до 343)	Подслои полуэбонита 1751 (6024; 1726)
$\frac{2109}{СКБ}$	Фтористоводородная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)
$\frac{2109}{СКБ}, \frac{1726}{НК}$	Едкий натр; едкое кали	Любая	343	Подслои полуэбонита 1751 (1726); клей 2572 (2109)
$\frac{ИПР-1394}{СКИ}$	Раствор NaCl	31	343	Подслои полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{2109}{СКБ}, \frac{1726}{НК}, \frac{6024}{НК}$ $\frac{ИПР-1394}{СКИ}$	Раствор ZnCl ₂	50	338	Клей 2572 (2109); подслои полуэбонита 1751 (1726; 6024); подслои полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{2109}{СКБ}, \frac{1726}{НК}, \frac{6024}{НК}$ $\frac{ИПР-1394}{СКИ}$	Белильная известь; известково-е молоко	Любая	338	Клей 2572 (2109); подслои полуэбонита 1751 (1726; 6024); подслои полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{ИПР-1213}{НК}$	Газообраз. хлор сухой и влажный	98	от 298 до 353К	Подслои полуэбонита ИРИ-1212 (ИРП-1213); подслои полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)

КОНСТРУКЦИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АППАРАТОВ И ДЕТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аппарат или деталь и их назначение	Марка резины, полуэбонита или эбонита			Толщина покрытия, мм		Марка клея, применяемая для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (подслой + промеж. слой + основн. покрытие)	общая	
Послойное гуммирование в два приема						
Аппарат, работающий под наливом и под давлением при температуре до 343 К	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
	1751	-	1976-М	3,0+3,0	6,0	2572 и 4508
Аппарат, работающий под наливом и под давлением при температуре до 373 К	1751 или 1751.6	-	1752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	2572
Аппарат, работающий под вакуумом	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Аппарат, работающий под наливом при температуре до – 313К	1976-М	2196	1976-М	1,5+3,0+1,5	6,0	2572 и 4508
	751	849	726	1,5+3,0+1,5	6,0	572 и 4508
	1751	1976-М	752	1,5+3,0+1,5	6,0	572 и 4508
	-	-	751 или 1751.6	6,0	6,0	572
Аппарат, работающий под напряжением электрического тока	751 или 1751.6	-	752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	572
Аппарат, работающий в средах производства искусственных волокон	751 или 1751.6	-	752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	2572
	-	-	751 или 1751.6	6,0	6,0	572
	751	-	976-М	3,0+3,0	6,0	572 и 4508
Аппарат, работающий в среде влажного и сухого хлора при температуре от 293 до 371 К	ИПР-1212	-	ПР-1211	1,5+4,5	6,0	572
	ИПР-1395	-	ИПР-1394	1,5+4,5	6,0	2572

Аппарат или деталь и их назначение	Марка резины, полуэбонита или эбонита			Толщина покрытия, мм		Марка клея, применяемая для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (подслой + промеж. слой + основн. покрытие)	общая	
Центрифуги	-	-	751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Колена, тройники, отводы, вентили	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Ванны, баки, вентиляционные трубы, работающие при температуре не выше 333К	-	-	29 или 2566	6,0	6,0	2572 и 4508
	1814	-		1,5+3,0	4,5	
Аппарат и деталь, работающие в средах производства двуокиси титана	1751 или 1751.6	-	1752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	2572
Послойное гуммирование в два приема – основное покрытие и один слой (1,5 мм) на рабочие части						
Аппарат и деталь, работающие в средах производства двуокиси титана	1751 или 1751.6	1752 или 1752.5	1976-М	1,5+4,5+1,5	7,5	2572 и 4508
Гуммирование послойное в два–три приема						
Аппарат, работающий в условиях абразивного износа	1751	-	976-М	3,0+(от 3,0 до 6,0)	6,0-9,0	2572 и 4508
	-	-	1751 или 1751.6	6,0-7,5	6,0-7,5	2572
Мешалка	1751 или 1751.6	-	1752 или 1752.5	1,5+(от 4,5 до 6,0)	6,0-7,5	2572
	1751	-	976-М	3,0+(от 3,0 до 6,0)	6,0-9,0	2572 и 4508
Послойное гуммирование в два–четыре приема						
Аппарат и деталь, работающие в средах производства двуокиси титана	1751 или 1751.6	-	51-1574	1,5+(от 4,5 до 10,5)	6,0-12	2572
Детали, работающие на истирание (диски, шайбы, втулки и т. д.)	-	-	1751 или 1751.6	6,0-12,0	6,0-12	2572
	-	-	4385,2	6,0-12,0	6,0-12	2572 и 4508

Аппарат или деталь и их назначение	Марка резины, полуэбонита или эбонита			Толщина покрытия, мм		Марка клея, применяемая для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (подслой + промеж. слой + основн. покрытие)	общая	
Послойное гуммирование в три–четыре приема						
Детали, работающие на истирание (диски, шайбы, втулки и т. д.)	-	-	1751	3,0+(от 6,0 до 9,0)	9,0-12	2572
	1751 или 1751.6	-	51-1574	1,5+(от 7,5 до 10,5)	9,0-12	2572
Послойное гуммирование в три–восемь приемов						
Валы и ролики	1751	-	1976-M	1,5+(от 7,5 до 22,5)	7,5-24	2572 и 4508
	1751	-	4476	1,5+(от 7,5 до 22,5)	7,5-24	2572 и 4508
	814	-	29 или 2566	1,5+(от 7,5 до 22,5)	7,5-24	2572 и 4508
	1814 или 1752	-	4860	1,5+(от 7,5 до 22,5)	7,5-24	2572 и 4508
Гуммирование в один прием						
Трубы			1751 или 1751.6	4,5-6,0	4,5-6,0	2572
	1751	-	-	1,5+(3,0 до 4,5)	4,5-6,0	2572 и 4508

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ
В ТОЧКАХ ДИСКРЕТИЗАЦИИ С СООТВЕТСТВУЮЩИМИ
КОЭФФИЦИЕНТАМИ**

$$T_1(z, r, \varphi, \tau) = a_1(r)T_1(z, 0, \varphi, \tau) + a_2(r)T_1(z, 1/(N-1), \varphi, \tau) + a_3(r)T_1(z, 2/(N-1), \varphi, \tau) + \\ + a_4(r)T_1(z, 3/(N-1), \varphi, \tau) + \dots + a_N(r)T_1(z, 1, \varphi, \tau),$$

где

$$T_1(z, 0, \varphi, \tau) = a_1(\varphi)T_1(z, 0, 0, \tau) + a_2(\varphi)T_1(z, 0, 1/(N-1), \tau) + a_3(\varphi)T_1(z, 0, 2/(N-1), \tau) + \\ + a_4(\varphi)T_1(z, 0, 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(\varphi)T_1(z, 0, 1, \tau);$$

$$T_1(z, 0, 0, \tau) = a_1(z)T_1(0, 0, 0, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 0, 0, \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 0, 0, \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 0, 0, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 0, 0, \tau);$$

$$T_1(z, 0, 2/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 0, 2/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 0, 2/(N-1), \tau) + \\ + a_3(z)T_1(2/(N-1), 0, 2/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 0, 2/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 0, 2/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 0, 3/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 0, 3/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 0, 3/(N-1), \tau) + \\ + a_3(z)T_1(2/(N-1), 0, 3/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 0, 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 0, 3/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 0, 1, \tau) = a_1(z)T_1(0, 0, 1, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 0, 1, \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 0, 1, \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 0, 1, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 0, 1, \tau);$$

$$T_1(z, 1/(N-1), \varphi, \tau) = a_1(\varphi)T_1(z, 1/(N-1), 0, \tau) + a_2(\varphi)T_1(z, 1/(N-1), 1/(N-1), \tau) + \\ + a_3(\varphi)T_1(z, 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_4(\varphi)T_1(z, 1/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(\varphi)T_1(z, 1/(N-1), 1, \tau);$$

$$T_1(z, 1/(N-1), 0, \tau) = a_1(z)T_1(0, 1/(N-1), 0, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1/(N-1), 0, \tau) + \\ + a_3(z)T_1(2/(N-1), 1/(N-1), 0, \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1/(N-1), 0, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1/(N-1), 0, \tau);$$

$$T_1(z, 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \\ + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1/(N-1), 2/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 1/(N-1), 1, \tau) = a_1(z)T_1(0, 1/(N-1), 1, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1/(N-1), 1, \tau) + \\ + a_3(z)T_1(2/(N-1), 1/(N-1), 1, \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1/(N-1), 1, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1/(N-1), 1, \tau);$$

$$T_1(z, 2/(N-1), \varphi, \tau) = a_1(\varphi)T_1(z, 2/(N-1), 0, \tau) + a_2(\varphi)T_1(z, 2/(N-1), 1/(N-1), \tau) + \\ + a_3(\varphi)T_1(z, 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_4(\varphi)T_1(z, 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(\varphi)T_1(z, 2/(N-1), 1, \tau);$$

$$T_1(z, 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 2/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \dots + \\ a_N(z)T_1(1, 2/(N-1), 2/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \\ + a_2(z)T_1(1/(N-1), 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 2/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 2/(N-1), 3/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 3/(N-1), \varphi, \tau) = a_1(\varphi)T_1(z, 3/(N-1), 0, \tau) + a_2(\varphi)T_1(z, 3/(N-1), 1/(N-1), \tau) + \\ a_3(\varphi)T_1(z, 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_4(\varphi)T_1(z, 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \dots \\ .. + a_N(\varphi)T_1(z, 3/(N-1), 1, \tau);$$

$$T_1(z, 3/(N-1), 0, \tau) = a_1(z)T_1(0, 3/(N-1), 0, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 3/(N-1), 0, \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 3/(N-1), 0, \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 3/(N-1), 0, \tau) + \dots \\ ... + a_N(z)T_1(1, 3/(N-1), 0, \tau);$$

$$T_1(z, 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \\ + a_2(z)T_1(1/(N-1), 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 3/(N-1), 2/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 3/(N-1), 2/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \\ + a_2(z)T_1(1/(N-1), 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 3/(N-1), 3/(N-1), \tau) + \dots \\ ... + a_N(z)T_1(1, 3/(N-1), 3/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 3/(N-1), 1, \tau) = a_1(z)T_1(0, 3/(N-1), 1, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 3/(N-1), 1, \tau) + \\ + a_3(z)T_1(2/(N-1), 3/(N-1), 1, \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 3/(N-1), 1, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 3/(N-1), 1, \tau);$$

$$T_1(z, 1, \varphi, \tau) = a_1(\varphi)T_1(z, 1, 0, \tau) + a_2(\varphi)T_1(z, 1, 1/(N-1), \tau) + a_3(\varphi)T_1(z, 1, 2/(N-1), \tau) + \\ + a_4(\varphi)T_1(z, 1, 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(\varphi)T_1(z, 1, 1, \tau);$$

$$T_1(z, 1, 0, \tau) = a_1(z)T_1(0, 1, 0, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1, 0, \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 1, 0, \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1, 0, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1, 0, \tau);$$

$$T_1(z, 1, 1/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 1, 1/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1, 1/(N-1), \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 1, 1/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1, 1/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1, 1/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 1, 2/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 1, 2/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1, 2/(N-1), \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 1, 2/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1, 2/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1, 2/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 1, 3/(N-1), \tau) = a_1(z)T_1(0, 1, 3/(N-1), \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1, 3/(N-1), \tau) + \\ a_3(z)T_1(2/(N-1), 1, 3/(N-1), \tau) + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1, 3/(N-1), \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1, 3/(N-1), \tau);$$

$$T_1(z, 1, 1, \tau) = a_1(z)T_1(0, 1, 1, \tau) + a_2(z)T_1(1/(N-1), 1, 1, \tau) + a_3(z)T_1(2/(N-1), 1, 1, \tau) + \\ + a_4(z)T_1(3/(N-1), 1, 1, \tau) + \dots + a_N(z)T_1(1, 1, 1, \tau).$$

Выражения для сегмента покрытия 2 и нагревательной плиты 3 получаем путем замены индекса при T_1 на соответствующие индексы.

$$a_1(\rho) = \frac{(\rho-1/N)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(0-1/N)(0-2/N)(0-3/N)\dots(0-1)};$$

$$a_2(\rho) = \frac{(\rho-0)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(1/N-0)(1/N-2/N)(1/N-3/N)\dots(1/N-1)};$$

$$a_3(\rho) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(2/N-0)(2/N-1/N)(2/N-3/N)\dots(2/N-1)};$$

...

$$a_N(\rho) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-2/N)\dots(\rho-(N-1)/N)}{(1-0)(1-1/N)(1-2/N)\dots(1-(N-1)/N)};$$

$$a_1(f) = \frac{(\rho-1/N)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(0-1/N)(0-2/N)(0-3/N)\dots(0-1)};$$

$$a_2(f) = \frac{(\rho-0)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(1/N-0)(1/N-2/N)(1/N-3/N)\dots(1/N-1)};$$

$$a_3(f) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(2/N-0)(2/N-1/N)(2/N-3/N)\dots(2/N-1)};$$

...

$$a_N(f) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-2/N)\dots(\rho-(N-1)/N)}{(1-0)(1-1/N)(1-2/N)\dots(1-(N-1)/N)};$$

$$a_1(z) = \frac{(\rho-1/N)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(0-1/N)(0-2/N)(0-3/N)\dots(0-1)};$$

$$a_2(z) = \frac{(\rho-0)(\rho-2/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(1/N-0)(1/N-2/N)(1/N-3/N)\dots(1/N-1)};$$

$$a_3(z) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-3/N)\dots(\rho-1)}{(2/N-0)(2/N-1/N)(2/N-3/N)\dots(2/N-1)};$$

...

$$a_N(z) = \frac{(\rho-0)(\rho-1/N)(\rho-2/N)\dots(\rho-(N-1)/N)}{(1-0)(1-1/N)(1-2/N)\dots(1-(N-1)/N)}.$$

Научное издание

Осипов Юрий Романович
Осипов Сергей Юрьевич
Шлыков Сергей Александрович

**Технологические режимы при восстановлении гуммировочных
покрытий с учетом технико-экономических критериев**

Монография

Подписано в печать 26.10.2015. Формат 60 × 84/16.

Усл. п. л. 10,25. Тираж 500 экз. Заказ № 2.

РИО ВоГУ. 160000, г. Вологда, ул. С. Орлова, 6.