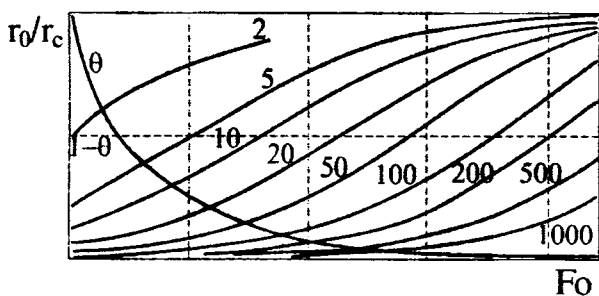


Ю.Р.Осипов
С.Ю.Осипов
О.А.Панфилова

===== ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ
ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
СИСТЕМ С ЭЛАСТОМЕРНЫМИ
===== ПОКРЫТИЯМИ



Вологда
2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Вологодский государственный технический университет

Ю.Р.Осипов, С.Ю.Осипов, О.А.Панфилова

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС
ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
СИСТЕМ С ЭЛАСТОМЕРНЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ**

Монография

Вологда
2012

УДК 66.011:66.021.3:66.021.4
ББК 31.312 .
О-74

Рецензенты:

Н.Н. Шестаков, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, заслуженный работник высшей школы РФ, кафедра теплоэнергетики и теплотехники Череповецкого государственного университета;

В.Р. Аниелес, д-р техн. наук, профессор, зам. директора по научной и учебной работе Череповецкого филиала Санкт-Петербургского института бизнеса и права, заслуженный химик РФ

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВоГТУ

Осипов, Ю.Р.

О 74 Теплоперенос при термообработке многослойных систем с эластомерными покрытиями: монография / Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – 155 с.

ISBN 978–5–87851–466–6

Рассматриваются вопросы совершенствования производственных технологий термообработки многослойных покрытий гуммированных объектов на основе интенсификации процессов тепло- и массопереноса. Исследуются качественные и эксплуатационные показатели гуммированных объектов. Приводится инженерная методика расчета тепловых режимов термообработки эластомерных покрытий.

Монография рассчитана на научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области массопереноса, теплофизики и термодинамики. Может быть полезна аспирантам и студентам высших учебных заведений, обучающимся по направлениям 151000.62 «Технологические машины и оборудование», 280700.62 «Техносферная безопасность», 140100.62 «Теплоэнергетика и теплотехника», 270800.62 «Строительство».

УДК 66.011:66.021.3:66.021.4
ББК 31.312

ISBN 978–5–87851–466–6

© ВоГТУ, 2012
© Осипов Ю.Р., 2012
© Осипов С.Ю., 2012
© Панфилова О.А., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ КОНВЕКТИВНЫМ СПОСОБОМ	
1.1. Конвективный тепломассоперенос при вулканизации эластомерных покрытий гуммированных объектов	7
1.2. Аналитические методы решения задач тепломассопереноса	10
1.3. Приближенные аналитические методы решения задач тепломассопереноса	18
1.4. Численные методы решения задач тепломассопереноса	20
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ	
2.1. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке однослойных гуммировочных покрытий	22
2.2. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке двухслойных гуммировочных покрытий и вулканизации двухслойных резинометаллических объектов.....	26
2.3. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке симметричных трехслойных гуммировочных покрытий.....	30
2.4. Математическое моделирование процесса теплопереноса при вулканизации многослойных гуммировочных покрытий и многослойных резинометаллических объектов.....	35
2.5. Определение количества теплоты, выделенного внутренними ис- точниками в процессе вулканизации	39
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ	
3.1. Массоперенос при вулканизации гуммировочных покрытий	43
3.2. Математическое моделирование процесса массопереноса в гуммировочных покрытиях при предварительной термообработке	46
3.3. Математическое моделирование процесса массопереноса в эластомерных покрытиях при вулканизации многослойных гуммированных объектов	50

3.4. Определение коэффициентов массопроводности гуммировочных покрытий.....	52
3.5. Определение коэффициентов массоотдачи при конвективной вулканизации.....	56
4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ПОКРЫТИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ	
4.1. Планирование и методика проведения экспериментов, основные влияющие факторы и их уровни	57
4.2. Влияние характера вулканизационных структур на физико-химические, механические, прочностные и эластические свойства гуммировочных покрытий	64
4.3. Влияние степени вулканизации на качество гуммировочных покрытий	71
4.4. Диффузия агрессивных сред в гуммировочные покрытия.....	78
4.5. Химическая стойкость гуммировочных покрытий	85
4.6. Адгезия гуммировочных покрытий.....	90
4.7. Определение коэффициентов диффузии агрессивных сред в гуммировочные покрытия	94
5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ	
5.1. Постановка задачи	101
5.2. Количество теплоты, расходуемой в процессе предварительного нагрева и вулканизации	102
5.3. Количество вулканизирующего агента в гуммировочных покрытиях	103
5.4. Время нагрева и вулканизации материала	105
5.5. Определение температуры, требующейся для достижения заданного количества вулканизирующего агента в эластомерном покрытии	106
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	107
ПРИЛОЖЕНИЯ	123

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности и в сельскохозяйственном производстве широко используются гуммированные и резиноталлические изделия. Это связано с тем, что резина обладает комплексом полезных технических свойств: стойкостью к воздействию агрессивных сред, эластичностью, вибростойкостью, способностью выдерживать мощные гидродинамические удары, водо- и газонепроницаемостью, тепло- и морозостойкостью. Гуммирование является одним из основных способов защиты оборудования от коррозии, кавитационных, эрозионных и других видов воздействия, которое позволяет сократить расход дорогостоящих материалов [29, 31, 169, 193].

В настоящее время в промышленности гуммируются готовые металлические изделия. Внедрение в производство поточных линий для изготовления гуммированного металлического полотна сделает возможным использовать скоростные технологические режимы, механизировать и автоматизировать основные и вспомогательные операции.

Для формирования многослойного гуммировочного покрытия в поточную линию включен участок вулканизации резиноталлических объектов. Свойства вулканизатов обусловлены характером и степенью поперечного сшивания, т.е. зависят от степени или времени вулканизации. Таким образом, режим вулканизации оказывает существенное влияние на формирование физико-механических свойств готового продукта. Выбор наиболее рационального теплового режима вулканизации покрытий способствует улучшению качественных и эксплуатационных свойств эластомерных покрытий, а именно химической стойкости, прочности крепления слоев и др.

Скорость протекания процесса вулканизации и качество гуммировочного покрытия сильно зависят и определяются закономерностями переноса вещества и энергии во взаимодействующих фазах. При моделировании процесса вулканизации используется теория тепломассопереноса, которая учитывает взаимную связь между тепломассопереносными характеристиками обрабатываемого материала и теплоносителя. Совершенствование производственных технологий при вулканизации эластомерных покрытий тесно связано с интенсификацией процессов тепло- и массопереноса, со снижением расхода энергии на единицу выпускаемой продукции и повышением показателей ее качества.

В результате вулканизации в окружающей среде накапливаются взрыво- и пожароопасные вещества, отсюда возникает необходимость соблюдения повышенных требований техники безопасности и противопожарной безопасности на производстве. Выделенные в процессе вулканизации летучие соединения загрязняют производственную сферу и ухудшают экологическую обстановку.

Вулканизация многослойных эластомерных гуммировочных покрытий является одним из наиболее сложных тепловых процессов, протекающих при нестационарных тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и нагреваемым изделием. Термодиффузионные и вулканизационные процессы сопровождаются большими затратами энергии, нуждаются в совершенствовании и имеют наибольшее значение во всем цикле работ, связанных с изготовлением гуммированных объектов, так как непосредственно влияют на качество и эксплуатационные свойства получаемых изделий.

Повышение эффективности процессов тепловой вулканизации эластомерных покрытий возможно за счет создания непрерывных технологических процессов, применения предварительной тепловой обработки гуммировочных покрытий, использования высокотемпературных теплоносителей, выбора рационального теплового режима, уменьшения тепловых потерь. Следовательно, дальнейшее повышение качества и сокращение цикла вулканизации возможно лишь при внедрении в производство поточных линий для гуммирования, непрерывности и ритмичности технологического процесса изготовления, стабилизации параметров теплоносителей, интенсификации и автоматизации операций, которые должны базироваться на современных результатах исследований теплопереноса в гуммировочных покрытиях.

Таким образом, актуальной является проблема совершенствования расчетов и математического моделирования термодиффузионных полей в резинометаллических изделиях, вулканизуемых в конвективных аппаратах с различными теплоносителями; определения степени вулканизации покрытий с учетом реальных изменений свойств материалов при вулканизации для получения объективной информации о результатах процесса, разработки инженерной методики и рекомендаций по проектированию рациональных тепловых режимов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ КОНВЕКТИВНЫМ СПОСОБОМ

1.1. Конвективный теплообмен при вулканизации эластомерных покрытий гуммированных объектов

При вступлении газа или жидкости в контакт с поверхностью твердого тела, имеющего другую температуру, протекает конвективный процесс теплообмена.

Теоретическому изучению процессов теплообмена при конвективном подводе тепла посвящены работы таких ученых, как: Лыков А.В., Михайлов Ю.А., Кутателадзе С.С., Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Мотовиловец И.А., Беляев Н.М., Рядно А.А., Карташов Э.М., Кудинов А.А., Кудинов В.А., Калашников В.В., Цой П.В., Зарубин В.С., Дульнев Г.Н., Коздоба Л.А. и др. [1-3, 7, 8, 17, 22-26, 33, 34, 39, 66, 76, 77, 80, 82, 83, 89, 90, 97-101, 104, 110-117, 120-123, 125 - 127, 129, 132, 138 - 141, 146, 149, 152, 156, 158, 172, 189, 191, 195, 197, 199, 201, 214, 219, 244, 245, 247, 249, 250, 253, 255 - 270]. Процесс массопереноса вещества исследован в работах Рудобашты С.П., Карташова Э.М., Райченко А.И., Самарского А.А. [26, 28, 59, 66, 68, 69, 122, 129, 142, 143, 156, 157, 172, 199, 206, 210-212, 215, 219, 246], а массоперенос и диффузия агрессивных сред – в работах Зуева Ю.С., Лукомской А.И., Степанова Р.Д., Шленского О.Ф., Тынного А.Н., Головина В.А., Бухиной М.Ф., Осипова Ю.Р. [28, 30, 36, 46, 47, 85-87, 133 – 137, 143, 145, 151, 158 – 189, 235]. Сам процесс гуммирования и вулканизация резинометаллических покрытий подробно рассмотрены в работах Гофмана В., Гуля В.Е., Догадкина Б.И., Донцова А.А., Кошелева Ф.Ф., Лукомской А.И., Бирюкова И.В., Богаткова Л.Г., Пенкина Н.С., Давыдова А.П., Осипова Ю.Р. и др. [32, 43, 57, 61, 62, 72 - 74, 78, 79, 93, 102, 103, 118, 124, 128, 130, 131, 133 – 137, 158 - 189, 194, 196, 198, 200, 202, 204, 205, 207 – 210, 217, 218, 220, 225, 226, 230 – 232, 236, 238 – 243, 248].

Анализ работ перечисленных авторов позволяет сделать вывод о важности и значимости процессов тепло- и массопереноса при термообработке гуммировочных покрытий и констатировать, что внутренние задачи при термообработке эластомерных покрытий требуют дальнейшего изучения и решения.

Рационального использования конвективного подвода теплоты можно достигнуть лишь в результате углубленного теоретического и математического исследования процесса теплообмена, так как нерешенным остается множество проблем, связанных с увязкой получаемых решений с условиями гидродинамического взаимодействия фаз, предварительной

термообработки, послевулканизационного охлаждения, конструктивной реализации и др.

Процесс конвективной термообработки определяется двумя основными задачами: внутренней и внешней. Внутренняя задача характеризуется превращениями, происходящими с эластомерными материалами в процессе их термообработки, и изменениями температуры по толщине образца. Внешняя задача определяет условия нагрева материала и интенсивность тепло- и массообмена между теплоносителем и поверхностью, в результате которых устанавливается необходимая для совершенствования внутренних превращений температура.

Процесс конвективного теплопереноса в многослойном резино-металлическом изделии при вулканизации может быть описан системой дифференциальных уравнений (1.1) с начальным условием (1.2) и граничными условиями (1.3 - 1.6) (третья краевая задача в общем виде):

$$\frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i(x, \tau) \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + Q_i(x, \tau), \quad (1.1)$$

где $\delta_{i-1} < x < \delta_i$, $\delta_0 = 0$, $\delta_n = \delta$, $i = 1, 2, \dots, n$, $\tau > 0$,

$$T_i(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0(x), \quad \delta_0 < x < \delta_n, \quad (1.2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\delta_0, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 [T_1(\delta_0, \tau) - T_c] = 0, \quad (1.3)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(\delta_n, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_c - T_n(\delta_n, \tau)] = 0, \quad (1.4)$$

$$T_i(x, \tau) = T_{i+1}(x, \tau), \quad \lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, \tau)}{\partial x} \quad \text{при } x = \delta_i. \quad (1.5, 1.6)$$

Расчету и математическому моделированию стационарных и нестационарных термодиффузионных полей на основе решения задач тепло-массообмена посвящено множество работ как в России [7, 30, 69, 80, 83, 84, 142, 172, 240, 252, 256], так и за рубежом [257, 261, 263, 267, 271]. В них используются разнообразные постановки линейных и нелинейных задач тепло- и массопроводности, учитывающих индивидуальные физические, геометрические условия и механизмы переноса. При этом используются различные методы решения дифференциальных уравнений. Для интенсивных процессов разрабатываются специальные решения, использующие, в частности, методы улучшения сходимости рядов; для регулярных режимов – упрощенные решения.

Возможны разнообразные способы классификации методов решения задач тепло- и массопереноса.

Так, например, в работах [111, 112] методы разделяются на группы: аналитические и численные; точные и приближенные; детерминированные и вероятностные.

В [114] рассматриваются три группы аналитических методов решения задач теплопроводности и диффузии: точные; методы, основанные на дискретизации временной, пространственных координат либо определяющих характеристик процесса; приближенные методы с упрощением постановки задачи.

Наконец, в [68] все теоретические методы делятся на группы по комплексу признаков: 1) точные; 2) асимптотические; 3) численные; 4) приближенные; 5) комбинированные.

Классификация методов решения тесно связана с видом математической формулировки задачи теплопроводности.

Аналитические методы позволяют получить функциональные зависимости для распределения температуры и концентрации и проанализировать влияние различных факторов на температурное и концентрационное состояние тела. Численные методы дают значения температуры или концентрации вещества в некоторых заданных точках тела в фиксированные моменты времени. К ним также следует отнести и методы моделирования температурных полей, основанные на математической аналогии процессов теплопроводности с некоторыми другими физическими явлениями (например, с процессами распространения зарядов в электрических цепях [123]). В этом случае решение задачи получается в результате пересчета числовых значений экспериментально измеренных физических величин, соответствующих температуре или тепловому потоку. Конечно, результаты численного решения задачи посредством соответствующей обработки можно аппроксимировать для дальнейшего использования аналитическими зависимостями, и наоборот, решение, полученное в аналитической форме, можно затем представить в виде таблиц числовых значений. Поэтому деление методов на аналитические и численные является в известной степени условным, особенно в тех случаях, когда в процессе решения задачи устанавливается аналитическая зависимость температуры тела от координат и (или) времени, а коэффициенты этой зависимости представлены в числовом виде.

Кратко рассмотрим методы решения задач тепло- и массопроводности, характерные для различных вариантов их математической формулировки.

1.2. Аналитические методы решения задач тепломассопереноса

Существуют различные точные аналитические методы решения линейных задач тепломассопереноса и диффузии: метод разделения переменных (метод Фурье); метод произведения решений (для задач в двух- и трехмерной области); метод Дюамеля; метод интегральных преобразований; метод функций Грина; операционный метод; метод продолжений; метод источников и стоков и др. Важной стороной аналитической теории тепломассопереноса является возможность варьирования классическими аналитическими методами при решении рассматриваемой задачи. Это объясняется тем, что решение одной и той же тепловой или диффузионной задачи можно искать в виде функций различного класса, которые должны удовлетворять по крайней мере двум условиям: достаточно легко находиться и обеспечивать сходимость процессов настолько, чтобы можно было сделать заключение о свойствах полученного решения. Аналитические решения той же задачи, получаемые в различных функциональных формах, численно тождественны, но их не всегда можно перевести из одной формы в другую с помощью тождественных преобразований. В то же время варьирование функциональными формами одного и того же решения задачи диффузии позволяет выбрать наиболее удобную форму записи решения, например для больших времен в виде ряда Фурье, а для малых - в виде формулы суммирования Пуассона.

Метод разделения переменных (метод Фурье или метод собственных функций) [98, 99, 140] лежит в основе почти всех аналитических подходов (метода интегральных преобразований, метода функций Грина, метода продолжений, метода произведений, метода источников и стоков) к решению линейного уравнения теплопроводности или диффузии и линейных краевых условий. Типичные задачи тепломассопереноса, для решения которых на практике применяют метод Фурье, - краевые задачи в ограниченных областях для однородного уравнения теплопроводности или диффузии с однородными граничными условиями. В принципе этот метод можно применять в неограниченной, полуограниченной областях для решение неоднородного уравнение диффузии с неоднородными граничными условиями (совместно с методом продолжений), но с меньшим успехом.

Формула решения третьей краевой задачи нестационарной теплопроводности методом Фурье.

Рассмотрим задачу:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + Q(x, \tau), \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \delta, \quad (1.7)$$

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad (1.8)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} - \alpha [T(0, \tau) - T_c] = 0, \quad (1.9)$$

$$\lambda \frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_c - T(\delta, \tau)] = 0. \quad (1.10)$$

Пусть μ_n и φ_k – собственные значения и собственные функции соответствующей одномерной задачи:

$$\varphi''(x) + \mu\varphi(x) = 0, \quad \lambda\varphi'(0) - \alpha[\varphi(0)] = 0, \quad \lambda\varphi'(\delta) + \alpha[\varphi(\delta)] = 0.$$

Решение третьей краевой задачи дается в следующем виде:

$$T(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k(x)}{\|\varphi_k\|^2} e^{-(a\mu_k)^2 \tau} \int_0^{\delta} T_0 \varphi_k(x) dx + a \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k(x)}{\|\varphi_k(x)\|^2} \times \\ \times \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} e^{-(a\mu_k)^2 (\tau - \tau')} \frac{1}{\lambda} T_c \varphi_k(x') d\tau' dx' + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k(x)}{\|\varphi_k(x)\|^2} \times \\ \times \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} e^{-(a\mu_k)^2 (\tau - \tau')} Q(x', \tau') \varphi_k(x') d\tau' dx'. \quad (1.11)$$

Метод разделения переменных – классический метод решения краевых задач теплопроводности – сводит подлежащее решению дифференциальное уравнение в частных производных к системе двух или более обыкновенных дифференциальных уравнений, общие решения которых хорошо известны или могут быть найдены обычными методами интегрирования. Строго говоря, не в любой системе координат дифференциальное уравнение теплопроводности имеет частное решение в форме произведения, что с самого начала предполагается в методе разделения переменных. В то же время непосредственное применение метода разделения переменных к решению краевой задачи теплопроводности зависит не только от возможности выполнения самого разделения переменных в уравнении теплопроводности, но и от возможности согласовать решение, получаемое в форме произведения с начальными и граничными условиями. Для этого необходимо, чтобы граничные условия задачи были однородными. В работе [97, 98] показано, что неоднородные граничные условия с помощью специальных подстановок в некоторых случаях могут быть сведены к однородным.

Как показывают рабочие формулы [98, 99] записи аналитических решений краевых задач нестационарной теплопроводности для конечных областей, основная трудность при решении состоит в нахождении собст-

венных значений и собственных функций соответствующей однородной задачи для данной области. Если эту задачу удастся решить, то тем самым практически находится аналитическое решение и самой краевой задачи.

Независимо от геометрической формы тела, где изучается процесс нестационарной теплопроводности, аналитические решения любой краевой задачи имеют одинаковую конструкцию, т.е. представляют собой сумму бесконечного ряда, члены которого расположены по экспоненциальным функциям, быстро убывающим с течением времени t . Таким образом, форма аналитического решения задачи удобна для исследования достаточно развитой стадии процесса при больших временах t .

При нагревании или охлаждении тел наблюдаются два этапа. При малых значениях времени t , когда процесс нагревания (охлаждения) зависит ещё от начальных условий (начальной температуры), от ряда случайных факторов, не обусловленных условиями нагрева и охлаждения тела, процесс носит характер неупорядоченного режима. В этих условиях распределение температуры в теле при однородных граничных условиях описывается выражением, где каждый член содержит экспоненту, причем показатель экспоненты по абсолютной величине представляет собой ряд возрастающих чисел.

При малых значениях времени t ряды сходятся очень медленно и при числовых расчетах с использованием этих рядов приходится брать много первых членов, чтобы избежать больших ошибок при вычислении. Следовательно, для малых значений времени t желательно иметь другую форму аналитического решения той же краевой задачи теплопроводности.

На втором этапе, начиная с некоторого момента времени, начальное состояние тела перестает влиять на изменение температурного поля, и процесс нагревания (охлаждения) полностью определяется только условиями нагревания на границе тела и среды, физическими свойствами тела, его геометрической формой и размерами. Ряд становится настолько быстро сходящимся, что, начиная с момента $t > 0$ первый, отличный от нуля член преобладает над суммой остальных членов; температурное поле в теле описывается простой экспонентой. Вторая стадия нагревания называется регулярным режимом.

При работе с методом разделения переменных следует отметить большие трудности его применения для полуограниченных тел. Значительные трудности возникают при решении краевых задач с граничными условиями 4-го рода, а также в случае неоднородных граничных условий, которые вначале должны быть приведены к однородным. Следует отметить, что изучение процессов нестационарной теплопроводности методом Фурье требует большой изобретательности, хороших технических навыков, больших затрат времени.

Метод произведения решений [98, 99] позволяет записать аналитическое решение задачи диффузии в двух- или трехмерной области в виде произведения решений одномерных задач. Для этого начальную температуру или концентрацию следует выразить (если это возможно) в виде произведения функций, каждая из которых зависит от одной пространственной переменной, а граничные условия должны быть однородными.

Метод Дюамеля [98, 99] заключается в том, что решение краевой задачи нестационарной теплопроводности или диффузии с граничными условиями, зависящими от времени, можно выразить через решение соответствующей задачи, в которой граничные функции не зависят от времени.

Решение краевых задач с применением метода Дюамеля разбивается на несколько этапов. Начальная температура равна нулю, источники теплоты отсутствуют; граничные функции являются заданными функциями координат и времени или только времени. Формулируется вспомогательная задача с использованием теоремы Дюамеля. Решение вспомогательной задачи возможно методом разделения переменных, а затем получают аналитическое решение исходной задачи.

При всей очевидности большого значения метода Дюамеля для аналитической теории теплопроводности этот метод имеет следующие недостатки:

1) необходимо предварительно решить вспомогательную задачу с постоянными граничными условиями, если заранее не было известно соответствующее решение; 2) во многих случаях не удастся получить эффективное решение при переменных граничных функциях, так как это решение представляет собой определенный интеграл, который не всегда вычисляется.

Поэтому в ряде случаев с самого начала предполагают искать решение исходной задачи с переменными граничными функциями операционным методом или методом интегральных преобразований.

Метод интегральных преобразований [98, 99, 212, 234] математически эквивалентен методу Фурье, но обладает по сравнению с ним рядом существенных преимуществ, а именно: возможность непосредственного применения метода для решения как однородных, так и неоднородных краевых задач в одно-, двух- и трехмерных областях; более простая техника вычислений, свойственная именно интегральным методам; наличие таблиц прямых и обратных преобразований, что упрощает технику решения.

В то же время для метода интегральных преобразований характерны те же ограничения, что и для метода разделения переменных: он применим только к линейным дифференциальным уравнениям с линейными граничными условиями, причем для достаточно простых областей изменения пространственных переменных. И хотя принципиально метод интегральных преобразований не расширяет класс задач, для которого возможно получить аналитическое решение, где метод Фурье становится бессильным (или ход решения задачи этим способом чрезвычайно усложняется), тем не менее, внутри этого класса применение метода интегральных преобразований

более целесообразно, так как позволяет экономить труд и время при решении задачи.

Метод бесконечных и конечных интегральных преобразований, развитый в [100, 101], эффективен для получения аналитических решений краевых задач в любом случае, где можно произвести разделение переменных и сформулировать спектральную задачу Штурма - Лиувилля на собственные значения и собственные функции. Этот метод имеет преимущества по сравнению с традиционными методами (операционным, функций Грина, Дюамеля, тепловых потенциалов, конформных отображений и др.), заключающиеся в наличии быстродействующей расчетной схемы, позволяющей по стандартной методике получить аналитическое решение краевой задачи с быстроходящимися рядами.

Суть метода состоит в следующем. Вместо определения искомой функции в дифференциальном уравнении тепло- или массопроводности предварительно рассматривают её интегральное преобразование, содержащее выбранную функцию – ядро интегрального преобразования.

Выбор ядра интегрального преобразования по той или иной пространственной переменной определяется двумя факторами: а) областью определения пространственной переменной; б) типом граничных условий искомого решения по данной переменной в граничных точках области.

После выбора ядра и применения преобразования дифференциальное уравнение тепло- или массопроводности (в частных производных) с n независимыми переменными переходит в обыкновенное дифференциальное уравнение с $n-1$ независимой переменной, что облегчает решение исходной задачи.

После того как будет найдено решение преобразованной задачи, с помощью обратного преобразования находится решение исходной задачи.

Интегральные преобразования делятся на два класса: интегральные преобразования по времени τ (этот класс преобразований составляет операционное исчисление); интегральные преобразования по пространственным переменным в соответствии с геометрической формой тела и граничными условиями задачи.

Наиболее эффективно применять интегральные преобразования при решении краевых задач стационарной и нестационарной теплопроводности, для бесконечных и полубесконечных пластин и цилиндров, с граничными условиями 4-го рода.

Существенным недостатком метода интегральных преобразований является неравномерная сходимость ряда в решении задачи на границе интервала изменения той переменной, по которой произведено преобразование. Причиной плохой сходимости рядов, представляющих решения краевых задач нестационарного тепло- и массопереноса с неоднородными граничными условиями, является то, что эти ряды не удовлетворяют неоднородным граничным условиям, в то время как отдельные члены этих рядов

удовлетворяют однородным условиям. Поэтому в окрестности границ указанного интервала полученные ряды сходятся неравномерно, и найденное решение нуждается в дополнительной доработке.

Одним из способов улучшения сходимости полученных рядов является переход от неоднородных граничных условий в исходной задаче к однородным граничным условиям в преобразованной задаче. В результате из решения исходной задачи вычитается дополнительный ряд и одновременно приבלается выражение.

Подробно указанный способ улучшения сходимости рядов для краевых задач теплопроводности изложен в работах [98 - 101], для диффузии – в работах [212].

Улучшение сходимости ряда для третьей краевой задачи (1.7) – (1.10). Решение третьей краевой задачи методом конечных интегральных преобразований дается в следующем виде:

$$T(x, \tau) = \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \cos(\mu_n x / \delta) + (\alpha \delta / \lambda) \sin(\mu_n x / \delta)}{\left(\mu_n^2 + (\alpha \delta / \lambda)^2\right) + 2\alpha \delta / \lambda} e^{-\left(\sqrt{a} \mu_n\right)^2 \tau} \times$$

$$\int_0^{\delta} T_0(x') \left(\mu_n \cdot \cos(\mu_n x' / \delta) + (\alpha \delta / \lambda) \sin(\mu_n x' / \delta)\right) dx' + \frac{2\alpha \delta^2 T_c}{\lambda \mu_n} \times$$

$$\times \left(e^{\left(\frac{a \mu_n^2 \tau}{\delta^2}\right)} - 1 \right) + \int_0^{\tau} \int_0^{\delta} Q(x', \tau') \cdot e^{\left(\frac{a \mu_n^2 \tau'}{\delta^2}\right)} \mu_n \cos(\mu_n x' / \delta) +$$

$$+ (\alpha \delta / \lambda) \sin(\mu_n x' / \delta) d\tau' dx', \quad (1.12)$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\operatorname{ctg} \mu = \mu \lambda / (2\alpha \delta) - \alpha \delta / (2\lambda)$.

После улучшения сходимости решение выглядит следующим образом:

$$T(x, \tau) = T_c + \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \cos(\mu_n x / \delta) + (\alpha \delta / \lambda) \sin(\mu_n x / \delta)}{\left(\mu_n^2 + (\alpha \delta / \lambda)^2\right) + 2\alpha \delta / \lambda} \times$$

$$\times e^{-\left(\sqrt{a} \mu_n\right)^2 \tau} \int_0^{\delta} T_0(x') \left(\mu_n \cdot \cos(\mu_n x' / \delta) + (\alpha \delta / \lambda) \sin(\mu_n x' / \delta)\right) dx' -$$

$$- \frac{2\alpha \delta^2 T_c}{\lambda \mu_n} + \int_0^{\tau} \int_0^{\delta} Q(x', \tau') e^{\left(\frac{a \mu_n^2 \tau'}{\delta^2}\right)} \mu_n \cdot \cos(\mu_n x' / \delta) + (\alpha \delta / \lambda) \times$$

$$\times \sin(\mu_n x' / \delta) d\tau' dx'. \quad (1.13)$$

Метод функции Грина [98, 99] весьма универсален: его можно применять для решения краевых задач при их достаточно общей постановке в одно-, двух- и трехмерных областях, в ограниченных, полугограниченных и неограниченных областях, при неоднородных краевых условиях, а также для решения неоднородных нестационарных и стационарных уравнений. Идея метода проста: вначале находят (например, методом интегральных преобразований) специальное решение краевой задачи диффузии того же типа (так называемая функция Грина), но более простой, и через него определяют искомое решение задачи в интегральной форме, включающее все неоднородности в исходной постановке.

Этот метод применим к линейным уравнениям теплопроводности с линейными краевыми условиями.

Операционный метод [70, 71, 97 - 99, 139 - 141] - один из эффективных аналитических методов, используемых при решении линейных задач нестационарной диффузии. Хотя он является разновидностью метода интегральных преобразований (по временной переменной), тем не менее операционный метод в силу специфики выделен в самостоятельное направление. С помощью операционного метода можно получить аналитические решения задач термодиффузии в разных функциональных формах для малых и больших отрезков времени после начала переноса, что иногда составляет главную задачу исследования.

Конечно, операционный метод обладает рядом недостатков: метод применим лишь для линейных дифференциальных уравнений теплопроводности с линейными граничными условиями; возникают определенные технические трудности, когда начальные условия заданы в виде функции пространственных координат, или при решении многомерных задач, или в областях достаточно сложной формы, когда найденное в пространстве изображение по Лапласу решение задачи содержит специальные функции, в индексы которых входит лапласова переменная.

В основе операционного метода решения краевых задач теплопроводности в соответствии с общим принципом интегральных преобразований лежит следующая идея: вначале определяется функция, являющаяся решением некоторого интегрального преобразования по временной координате искомого решения, затем с помощью обратного преобразования находят искомое решение.

Наличие таблиц прямых и обратных преобразований [70, 71, 139, 140] существенно упрощает процедуру нахождения аналитического решения задачи; с ряде случаев для областей достаточно сложной формы (сектор, сегмент, клин и т.д.), в которых не построены классические интегральные преобразования по пространственным переменным, операционный метод незаменим.

Операционный метод незаменим при рассмотрении задач нестационарной теплопроводности на нагревание или охлаждение системы соприкасающихся тел (слоистые среды) с граничными условиями 4-го рода, а также при наличии несовершенного теплового контакта между соприкасающимися телами.

В большинстве случаев теории теплопроводности применение операционного метода приводит к решениям в виде бесконечных рядов. Метод преобразования Лапласа является чисто формальным методом получения решения, правильность которого нужно проверять в каждом отдельном случае.

Метод источников и стоков (иногда его называют методом разложения) [98] основан на физической интерпретации функции Грина; его применение в аналитической теории теплопроводности и диффузии ограничено.

Метод источников позволяет найти функции Грина для первой и второй краевых задач для целого ряда областей, обладающих специальными свойствами симметрии. Например, можно найти в явном виде функции Грина первой и второй краевых задач для двугранного угла величиной π/n , первой краевой задачи для шара и полукруга, для пространственного слоя между двумя параллельными плоскостями.

Метод источников применяется весьма ограниченно: с помощью него нельзя найти функцию Грина второй краевой задачи для шара и круга, для любой конечной области. Большие трудности возникают в результате применения этого метода к третьим краевым задачам. Во всех случаях можно применить метод интегральных преобразований, как наиболее эффективный.

Возможности точных аналитических методов ограничены, как правило, решением линейных задач теплопроводности, когда теплофизические характеристики материала тела не зависят от температуры, а граничные условия выражаются линейной комбинацией температуры и ее градиента на поверхности тела. Если в теле действуют внутренние источники теплоты, мощность которых является функцией температуры, то эта функция также должна быть линейной.

Сферу применения точных аналитических методов удастся расширить путем линеаризации нелинейных задач. Однако, получая точное решение линеаризованной задачи, не следует забывать о тех погрешностях, которые внесены в математическую формулировку при линеаризации. В некоторых случаях эти погрешности могут быть настолько существенными, что приведут к большим количественным ошибкам, а иногда исказят и физический смысл полученного решения [77, 80].

Точное аналитическое решение нелинейных задач теплопроводности обычно возможно лишь при определенных сочетаниях зависимо-

стей теплофизических характеристик материала тела от температуры [142]. Оно получается путем подстановок или функциональных преобразований уравнений, и его целесообразно использовать как контрольное для оценки погрешности, которая получается при том или ином способе линеаризации.

Задачи теплопереноса для многослойных конструкций относятся к задачам с граничными условиями 4-го рода. Для получения многослойных материалов с заданными свойствами наилучшим образом подходят аналитические решения, так как они в явном виде содержат основные физические свойства среды. Следует отметить, что получение решений задач теплопроводности для многослойных тел с помощью точных аналитических методов представляет большие математические трудности. Особая трудность состоит в необходимости решения многопараметрических трансцендентных уравнений, не имеющих в настоящее время решений в общем виде.

И все же, в заключение отметим преимущества использования аналитических методов решения задач теплопереноса: независимость объема вычислений от значений пространственных и временных координат и отсутствие накопления систематических расчетных погрешностей; возможность расчета потоков, средних и локальных значений, балансовых соотношений; возможность использования частных полученных ранее решений; возможность использования унифицированного набора задач; возможность анализа и упрощения решений для характерных и предельных значений параметров процесса; наглядность промежуточных и конечных расчетных результатов.

1.3. Приближенные аналитические методы решения задач теплопереноса

Для приближенного аналитического решения нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности разработаны методы последовательных приближений (простой итерации [4] или усреднения функциональных поправок [121]), возмущений (малого параметра) [4], различные асимптотические методы [4].

В последнее время все большее применение в теории теплообмена получают приближенные аналитические методы (вариационные, взвешенных невязок, наименьших квадратов, коллокаций и др.). Эти методы менее универсальны и более сложны, чем численные. Однако они обладают тем определенным преимуществом, что позволяют получать решения, хотя и приближенные, но в аналитической форме. Вследствие максимальной простоты этих решений они наиболее приспособлены для использования их в инженерной практике.

Все эти методы подходят под определение прямых методов, основная идея которых заключается в следующем. Выбирается семейство функций, зависящее от некоторого числа параметров

$$T_n = \Phi(x, y, z, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (1.14)$$

которые точно удовлетворяют либо дифференциальному уравнению (метод Треффца, коллокаций, наименьших квадратов и др.), либо краевым условиям (методы Ритца, Л.В. Канторовича, Бубнова - Галеркина и др.) при любых значениях этих параметров. Далее находят такие значения параметров a_k , ($k=1, 2, \dots, n$), при которых функция T_n наилучшим образом удовлетворяет дифференциальному уравнению задачи или граничным условиям. Таким образом, прямые методы сводят задачу определения a_k , к решению системы алгебраических уравнений, коэффициенты и свободные члены которой обычно выражаются через интегралы от координатных функций и некоторых их производных по области.

Исключение составляет метод Л.В. Канторовича, который приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и представляет известное видоизменение метода Ритца [92, 110]. Оно заключается в том, что при разыскивании решения и виде

$$T_n(x, y) = \psi_0(x, y) + \sum_{k=1}^n a_k \psi_k(x, y) \quad (1.15)$$

в состав его вместо неопределенных постоянных a_k включают неопределенные функции одной переменной f_k , для нахождения которых из условия минимума функционала получают системы дифференциальных уравнений Эйлера - Лагранжа.

Л.В. Канторович [92], исходя из вариационного принципа, доказал, что уравнения этой системы могут быть составлены иным путем, - пользуясь методом Галеркина. Последнее позволяет в ряде случаев значительно сократить объем вычислений, а также применять этот метод для решения задач, не связанных с вариационными принципами.

Если перейти к пределу при $n \rightarrow \infty$, то при определенных условиях можно получить точное решение; если же предельного перехода не осуществлять, то будет получено приближенное решение, причем значительно более точное, чем при использовании метода Ритца с теми же координатными функциями и с тем же числом членов приближения n [92, 110]. Большая точность решения при применении метода Л.В. Канторовича достигается потому, что неопределенные функции f_k находятся в соответствии с характером задачи. Таким образом, метод Л.В. Канторовича позволяет учесть свойства оператора краевой задачи по одной из ее независимых переменных.

Система координатных функций $\psi_k(x, y)$ существенно влияет на скорость сходимости приближенного решения, объем и степень сложности

вычислений, вследствие чего успех применения вариационных методов в значительной мере зависит от рационального выбора этой системы. Методы построения координатных функций, позволяющих получать решения удовлетворительной точности при наименьшем количестве приближений, еще недостаточно разработаны. Решению этой проблемы посвящено большое число работ [92, 121, 150, 244].

1.4. Численные методы решения задач тепломассопереноса

Основным численным методом решения дифференциального уравнения теплопроводности является метод конечных разностей [6, 9, 45, 97 – 99, 115, 116, 141]. Формально он базируется на приближенной замене в дифференциальном уравнении и граничных условиях производных разностными соотношениями между значениями температур в узлах конечно-разностной сетки. В итоге для каждого узла с неизвестным значением температуры получается алгебраическое уравнение, которое для задачи стационарной теплопроводности может быть также получено из условия баланса тепловых потоков в дискретной модели тела, состоящей из теплопроводящих стержней [140]. Методы решения таких уравнений хорошо разработаны [116], а для их реализации в математическом обеспечении современных ЭВМ предусмотрены стандартные программы [101]. В уравнении теплопроводности можно аппроксимировать конечными разностями производные не по всем независимым переменным. В итоге получится система дифференциальных уравнений (обыкновенных или в частных производных). Если удастся получить аналитическое решение такой системы, то оно будет приближенным решением задачи, так как при конечно-разностной аппроксимации внесена погрешность в математическое описание процесса теплопроводности. Однако обычно такой прием частичной замены производных конечными разностями, известный как метод прямых [91], используется для решения полученной системы уравнений одним из эффективных численных методов.

Вместе с развитием приближенных аналитических методов, а также методов конечных элементов и его различных разновидностей продолжалось дальнейшее совершенствование конечно-разностных методов [22, 23]. Конечно-разностная формулировка позволяет сделать более непосредственный подход к решению дифференциальных уравнений, чем методы конечных элементов. В данном случае производные заменяются конечно-разностными выражениями, и требуется точное выполнение алгебраических уравнений в угловых точках. Трудности возникают здесь при наложении граничных условий для произвольных областей, когда необходимость измельчения сетки приводит к большим системам алгебраических уравнений. С целью упрощения решения таких систем предложены метод расще-

пления (локально-одномерный метод) [91] и метод переменных направлений (метод одномерных прогонок и дробных шагов). Большое распространение при решении многомерных задач получили так называемые экономичные разностные схемы, основанные на методе дробных шагов по временной переменной. Эти схемы сочетают положительные стороны явных и неявных разностных схем. При их использовании исходная многомерная задача сводится к решению серии одномерных задач, при решении которых применим метод прогонки. Как показывают расчеты, объем вычислительной работы при последовательном решении нескольких одномерных задач оказывается меньшим, чем при решении исходной многомерной задачи. Широкое применение численных методов объясняется их универсальностью и возможностью преодоления таких «препятствий» как нелинейность, анизотропия и др., затрудняющих получение решения с помощью аналитических методов.

Численные методы были использованы в работе [122] применительно к решению краевых задач по определению критических условий теплового воспламенения и времени индукции теплового взрыва в режимах зажигания и очагового воспламенения при переменных во времени граничных условиях.

Анализ рассмотренных теоретических исследований позволяет сделать вывод о важности и значимости процессов тепло- и массопереноса при термообработке гуммировочных покрытий и констатировать, что внутренние задачи при термообработке эластомерных покрытий требуют дальнейшего изучения и решения.

Рационального использования конвективного подвода теплоты можно достигнуть лишь в результате углубленного теоретического и математического исследования процесса тепломассопереноса, так как нерешенным остается множество проблем, связанных с увязкой получаемых решений с условиями гидродинамического взаимодействия фаз, предварительной термообработки, послевулканизационного охлаждения, конструктивной реализации и др.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке однослойных гуммировочных покрытий

Тепловая вулканизация эластомерных материалов – ответственная и энергоемкая операция в технологическом процессе производства резиноталлических изделий, представляющая собой нестационарный тепловой процесс. Особое влияние на качество готовых изделий оказывает оптимизация тепловых режимов вулканизации. Повышение средней начальной температуры вулканизуемого изделия и вулканизуемых элементов является одним из теплотехнических факторов интенсификации теплового режима при производстве гуммированных объектов. Начальные температуры вулканизуемого гуммировочного покрытия могут быть повышены путем его предварительного нагрева.

Предварительный нагрев эластомерного покрытия существенно улучшает качество готового изделия (позволяет избежать неравномерной вулканизации) и снижает время конечной обработки и энергозатраты на неё [57, 73, 137, 159, 168, 169, 173, 175, 176, 180, 187, 193]. Особенно это характерно для предварительной тепловой обработки в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (СВЧ) [57, 159, 176].

Ряд теоретических и экспериментальных исследований предварительного нагрева гуммировочных многослойных покрытий [57, 159, 173, 176, 180, 187] показал, что значительно уменьшается общая длительность термообработки при сохранении на высоком уровне практически всех необходимых качественных показателей: степени вулканизации, прочности крепления, химической стойкости и др.

На практике для установления оптимальных режимов вулканизации гуммированных объектов необходимо знать распределение температурных полей после предварительного нагрева изделия.

Рассмотрим многослойное покрытие из эластомера одной марки. Учитывая, что механические и теплофизические свойства слоев гуммировочного покрытия не отличаются, можно свести его к однослойной системе [57, 123, 136, 137, 140, 141].

В ходе математического моделирования процесса теплообмена эластомерной заготовки были приняты следующие допущения:

– об отсутствии переноса теплоты в поперечном и продольном направлении, так как толщина покрытия значительно меньше его длины и ширины;

- об отсутствии внутренних источников теплоты, так как рассматривается процесс предварительного прогрева покрытия до начала вулканизации [19, 29, 32, 57, 72, 73, 118, 124, 131, 137, 169, 170, 176, 188, 251];
- о пренебрежении термическим сопротивлением клеевых прослоек;
- теплообмен на границе (нагреваемой поверхности) покрытия происходит по закону Ньютона-Рихмана, с заданной температурой теплоносителя (окружающей среды) и найденным экспериментально коэффициентом теплоотдачи от среды к поверхности;
- с учетом геометрической симметрии покрытия и воздействия одного и того же теплоносителя, позволительно рассмотреть теплообмен на половине покрытия.

Процесс теплопереноса в однослойном эластомерном покрытии при предварительной термообработке (рис. 2.1) может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \delta \quad (2.1)$$

с начальными условиями

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0 = const, \quad (2.2)$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (2.3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_c - T(\delta, \tau)] = 0. \quad (2.4)$$

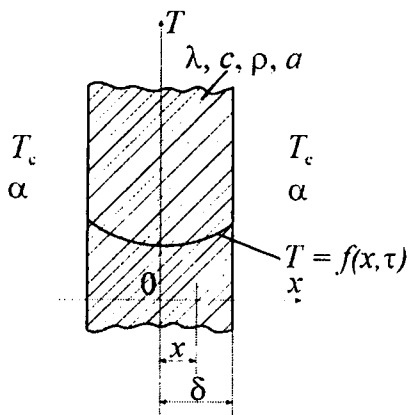


Рис. 2.1. Расчетная схема теплопереноса в однослойном эластомерном покрытии

Учитывая подобие процессов передачи теплоты и вещества [90, 140, 206, 211, 223] и применяя операционный метод Лапласа [70, 71, 116, 140, 141], решение краевой задачи (2.1) - (2.4) получено в следующем виде:

$$\frac{T_0 - T(x, \tau)}{T_0 - T_c} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (2.5)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения $ctg \mu = \frac{\mu^2 - Bi^2}{2\mu Bi}$.

Здесь приняты следующие обозначения: T - температура, К; T_0 - начальная температура пластины, К; T_c - температура окружающей среды, К; τ - время, с; x - пространственная координата, мм; δ - толщина эластомерной обкладки, мм; a - коэффициент температуропроводности, m^2/s ; λ - коэффициент теплопроводности, $W/(m^2 \cdot K)$; α - коэффициент теплообмена, $W/(m^2 \cdot K)$; $Bi = \alpha \delta / \lambda$ - критерий Био; $Fo = a \tau / \delta^2$ - число Фурье.

Решение приведенной краевой задачи получено с помощью операционного метода. Также решение может быть найдено с помощью метода разделения переменных. Но операционный метод обладает следующим преимуществом перед обычными методами: он позволяет получать ряд приближенных решений для разных значений Fo и Bi , в которых достаточно ограничиться первыми членами ряда.

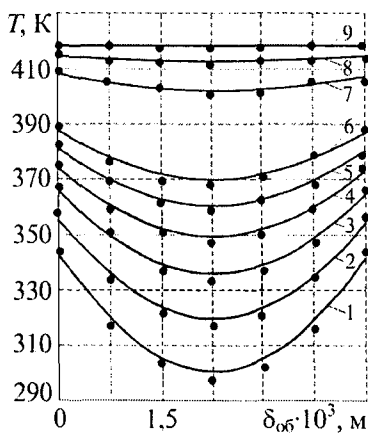
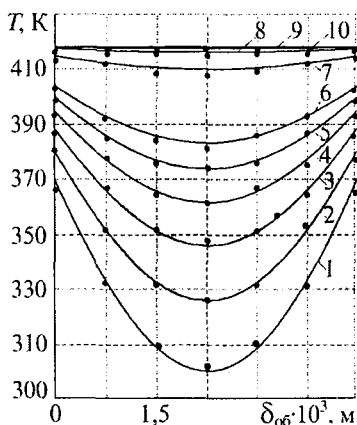


Рис. 2.2. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/($m^2 \cdot K$), время прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с (— - расчет, • - эксперимент)

На основе решения (2.5) построены кривые распределения температуры в резиноталлических объектах с покрытиями марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. [Прил. 10] с помощью пакета программ Mathcad. В качестве

примеров на рис. 2.2 и 2.3 приведены температурные кривые в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) (рис. 2.2) и 1752 (НК+СКБ) (рис. 2.3), которые сравнены с экспериментальными данными [169, 170, 176, 188]. Отклонение аналитических расчетов от опытных данных, которое определяли по методу наименьших квадратов, составило 1 – 6 %.

Рис. 2.3. Кривые распределения температуры в однослойном эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К); время прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 300 с, 10 – 600 с (— - расчет, • - эксперимент)



По результатам расчетов температуры в покрытиях марок 1976 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2566 (НК+СКБ), 1814 (СКБ) и др. можно сделать следующие выводы.

Очевидно, что температурное поле в однослойных эластомерных обкладках симметрично относительно оси симметрии обкладок. В начале процесса предварительной термообработки покрытий из-за малой теплопроводности эластомеров возникает значительный перепад температуры между поверхностью обкладки и её серединой.

Причем на эбонитовых обкладках разность температур больше, так как теплопроводность эбонита существенно ниже теплопроводности резины. Наиболее высокая температура вычислена на внешних слоях обкладок из эбонита марок 1752, 1814 и на внутренних слоях из резины марок 1976, 2566. Установившийся режим при $\delta_{об} = 4,5$ мм наступает через 1000 ... 1200 с.

2.2. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке двухслойных гуммировочных покрытий и вулканизации двухслойных резинометаллических объектов

Из общей краевой задачи конвективного теплопереноса в многослойных объектах при $i=2$ (число слоев) можно выделить следующие задачи теплопереноса в двухслойных системах (рис. 2.4):

1) задача теплопереноса при предварительной термообработке двухслойного гуммировочного покрытия (комбинированное покрытие: эбонит + резина);

2) вулканизации двухслойного резинометаллического объекта (подложка – сталь, обкладка – эбонит или резина).

Эластомерные обкладки в каждом из указанных случаев могут состоять из нескольких подслоев. Материалы и толщины эластомерных подслоев одинаковы и имеют одинаковые теплофизические и конструктивные параметры.

В ходе математического моделирования процесса термообработки двухслойной системы были приняты следующие допущения: отсутствие переноса теплоты в поперечном и продольном направлении; отсутствие внутренних источников теплоты; отсутствие влияния термического сопротивления клеевых прослоек; начальная температура слоев одинакова, постоянная и равна T_0 ; теплообмен на внешних поверхностях покрытия происходит по закону Ньютона-Рихмана; в плоскости соприкосновения пластин имеют место равенство тепловых потоков и равенство температур на границе соприкосновения слоев.

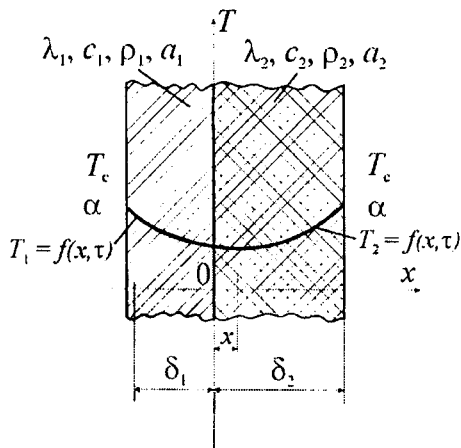


Рис. 2.4. Расчетная схема теплопереноса в двухслойном резинометаллическом объекте

Таким образом, процесс теплопереноса в двухслойных гуммировочных покрытиях при предварительной термообработке или в двухслойных резинометаллических объектах при вулканизации (рис. 2.4) может быть описан дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad -\delta_1 < x < 0, \quad (2.6)$$

и
$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \delta_2, \quad (2.7)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial T_1(-\delta_1, \tau)}{\partial x} + h_1 [T_c - T_1(-\delta_1, \tau)] = 0, \quad (2.8)$$

и
$$\frac{\partial T_2(\delta_2, \tau)}{\partial x} - h_2 [T_c - T_2(\delta_2, \tau)] = 0. \quad (2.9)$$

Условия контакта между слоями имеют вид:

$$T_1(-0, \tau) = T_2(0, \tau) \quad (2.10)$$

и
$$K\lambda \frac{\partial T_1(-0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x}. \quad (2.11)$$

Начальное условие записано в виде

$$T_1(x, \tau)|_{\tau=0} = T_2(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = const. \quad (2.12)$$

Здесь $h_1 = \frac{\alpha}{\lambda_1}$; $h_2 = \frac{\alpha}{\lambda_2}$; $K\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

Для решения данной задачи использован операционный метод. Характеристическое уравнение для двухслойной пластины имеет вид

$$\begin{aligned} & (\nu\mu_n + Bi_1 \operatorname{tg} \nu\mu_n)(Bi_2 - \mu_n \operatorname{tg} \mu_n) + K_\varepsilon (\mu_n + Bi_2 \operatorname{tg} \mu_n) \times \\ & \times (Bi_1 - \nu\mu_n \operatorname{tg} \nu\mu_n) = 0, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $K_\delta = \frac{\delta_1}{\delta_2}$, $K_a = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$, $\nu = K_\delta \cdot K_a$, $K_\varepsilon = K\lambda \cdot K_a$, $\theta_0 = T_c - T_0$;

$Bi_1 = \frac{\alpha \cdot \delta_1}{\lambda_1}$, $Bi_2 = \frac{\alpha \cdot \delta_2}{\lambda_2}$ – критерии Био в каждом из двух слоев.

Нулевой корень равен нулю, а остальные корни находят из характеристического уравнения (2.13).

Решение краевой задачи (2.6) – (2.12) получено с помощью операционного метода.

Температура в первом слое $-\delta_1 < x < 0$ равна

$$\begin{aligned}
 T_1(x, \tau) = T_c - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[-\theta_0 \left(\cos(\mu_n) \sin \left(v \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) - K_\varepsilon \sin(\mu_n) \times \right. \right. \right. \\
 \times \cos \left(v \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) \Big] \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 + \theta_0 \text{Bi}_1 \mu_n \left(\sin(\mu_n) \sin \left(v \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) - K_\varepsilon \times \right. \\
 \times \cos(\mu_n) \cos \left(v \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) \Big) + \theta_0 \text{Bi}_2 v \mu_n \cos v \mu_n \left(1 + \frac{x}{\delta_1} \right) + \theta_0 \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \times \\
 \left. \left. \left. \times \sin v \mu_n \left(1 + \frac{x}{\delta_1} \right) \right] \exp \left(-v^2 \mu_n^2 \text{Fo}_1 \right) \right\} \cdot \varphi^{-1}(\mu_n). \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

Температура в втором слое $0 < x < \delta_2$ находится из формулы:

$$\begin{aligned}
 T_2(x, \tau) = T_c - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\theta_0 \left(\cos(v \mu_n) \cos \left(\mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) - K_\varepsilon \sin(v \mu_n) \times \right. \right. \right. \\
 \times \sin \left(\mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) \Big] \text{Bi}_2 v \mu_n + \theta_0 \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \left(\sin(v \mu_n) \cos \left(\mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) + K_\varepsilon \times \right. \\
 \times \cos(v \mu_n) \sin \left(\mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) \Big) - K_\varepsilon \theta_0 \text{Bi}_1 \text{Bi}_2 \sin \mu_n \left(1 - \frac{x}{\delta_2} \right) + K_\varepsilon \theta_0 \text{Bi}_1 \mu_n \times \\
 \left. \left. \left. \times \cos v \mu_n \left(1 - \frac{x}{\delta_2} \right) \right] \exp \left(-\mu_n^2 \text{Fo}_2 \right) \right\} \cdot \varphi^{-1}(\mu_n), \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

где
$$\begin{aligned}
 \varphi(\mu_n) = \mu_n^2 (\text{Bi}_2 v + K_\varepsilon \text{Bi}_1) (v \sin(v \mu_n) \cos(\mu_n) + \cos(v \mu_n) \times \\
 \times \sin(\mu_n)) + \mu_n^2 (\text{Bi}_1 + K_\varepsilon v \text{Bi}_2) (v \cos(v \mu_n) \sin(\mu_n) + \sin(v \mu_n) \times \\
 \times \cos(\mu_n)) + v \mu_n^2 (\cos(v \mu_n) \sin(\mu_n) + K_\varepsilon \sin(v \mu_n) \cos(\mu_n)) + \mu_n \times \\
 \times (v \mu_n^2 - K_\varepsilon \text{Bi}_1 \text{Bi}_2) (\cos(v \mu_n) \cos(\mu_n) - v \sin(v \mu_n) \cdot \sin(\mu_n)) +
 \end{aligned}$$

$$+ Bi_1 Bi_2 (\sin(\nu \mu_n) \cos(\mu_n) + K_E \cos \nu \mu_n \sin \mu_n) + \\ + \mu_n (K_E \nu \mu_n^2 - Bi_1 \cdot Bi_2) \cdot (\nu \cos \nu \mu_n \cos \mu_n - \sin \nu \mu_n \sin \mu_n);$$

$Fo_1 = \frac{a_1 \tau}{\delta_1^2}, Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{\delta_2^2}$ - числа Фурье двух слоев.

Решение также может быть получено методом конечных интегральных преобразований.

Рис. 2.5. Кривые распределения температуры при предварительном нагреве в двухслойном эластомерном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) + 2566 (СКБ) при $T_c = 418 \text{ K}, T_0 = 293 \text{ K}, \alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \delta_{об} = 1,5 + 3,0 \text{ мм};$ время прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 600 с, 10 – 900 с

(— расчет, • - эксперимент)

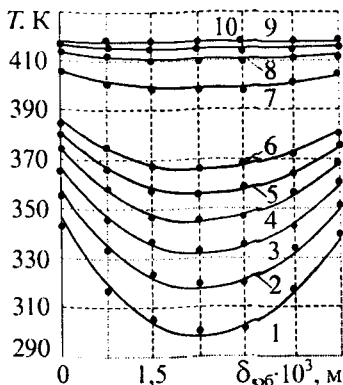
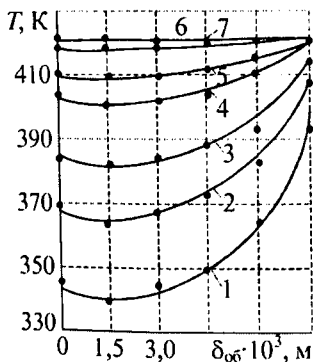


Рис. 2.6. Кривые распределения температуры при вулканизации в двухслойном резинометаллическом изделии с покрытием марки 1976 (СКБ), $\delta_{об} = 6,0 \text{ мм}, \delta_{ст} = 3,0 \text{ мм}, T_0 = 293 \text{ K}, T_c = 418 \text{ K}, \alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$ время прогрева объекта 1 – 60 с, 2 – 180 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с, 5 – 600 с, 6 – 720 с, 7 – 1500 с
(— расчет, • - эксперимент)

На основе решений (2.14) – (2.15) построены кривые распределения температуры в гуммировочных покрытиях и резинометаллических объектах с эластомерными обкладками марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. [Прил. 10] с помощью пакета программ Mathcad. В качестве примера на рис. 2.5 и 2.6 приведены температурные кривые, которые сравнены с экс-

периментальными данными [169, 170, 175]. Отклонение аналитических расчетов от опытных данных составило 2 – 7 %.

Анализируя температурные кривые на рис. 2.5 и 2.6, можно сделать выводы о неравномерности прогрева двухслойных пластин на начальных этапах вулканизации. С увеличением продолжительности вулканизации покрытий температурные поля постепенно выравниваются.

В гуммировочных покрытиях (рис. 2.5) асимметричность кривых объясняется разницей теплофизических параметров эластомерных слоев (слева эбонитового, а справа резинового). В резинометаллическом изделии (рис. 2.6) металлическая основа нагревается быстрее, чем эластомерная обкладка, поэтому также наблюдается смещение центра симметрии температурных кривых вправо.

2.3. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке симметричных трехслойных гуммировочных покрытий

К задаче теплопереноса при предварительной термообработке симметричного трехслойного гуммировочного покрытия приводят следующие случаи комбинирования слоев:

- а) металлическая подложка + эластомерное покрытие + металлическая подложка;
- б) эластомерное покрытие + металлическая подложка + эластомерное покрытие;
- в) резиновый слой + эбонитовый слой + резиновый слой.

В случае, когда материал слоев в многослойном покрытии имеет разные теплофизические характеристики, тогда, на основании данных [137], строгая замена многослойной пластины на «эквивалентную» однослойную невозможна.

В связи с этим, рассмотрим симметричную систему тел, состоящую из трех неограниченных пластин (рис. 2.7). Средняя пластина толщиной $2\delta_1$ находится в соприкосновении с двумя другими пластинами, каждая из которых имеет толщину δ_2 . Материал двух крайних пластин одинаков и отличен от материала пластины, находящейся в середине. Начальная температура пластин одинакова и равна T_0 . В начальный момент времени рассматриваемая система тел помещается в среду с постоянной температурой $T_c > T_0$.

В ходе математического моделирования процесса теплообмена трехслойной системы были приняты следующие допущения: об отсутствии переноса теплоты в поперечном и продольном направлении; об отсутствии внутренних источников теплоты; теплообмен на границе (нагреваемой поверхности) покрытия происходит по закону Ньютона-Рихмана; с учетом геометрической симметрии покрытия и воздействия одного и того же теплоносителя позволительно рассмотреть теплообмен на половине покрытия;

в плоскости соприкосновения пластин действует граничное условие четвертого рода.

Принимая во внимание симметричность задачи, ось ординат совмещаем с осью симметрии системы, а начало координат и ось абсцисс располагаем, как показано на рис. 2.7.

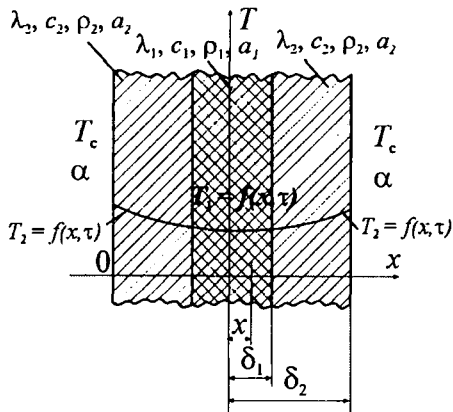


Рис. 2.7. Расчетная схема теплопереноса в трехслойной системе

Процесс теплопереноса в трехслойном симметричном гуммировочном покрытии или гуммированном изделии при предварительной термообработке (рис. 2.7) может быть описан дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \delta_1, \quad \tau > 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad \delta_1 \leq x \leq \delta, \quad (2.17)$$

$$\text{при начальном условии: } T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_0 = \text{const}; \quad (2.18)$$

и граничных условиях:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_c - T_2(x, \tau)] = 0 \quad \text{при } x = \delta; \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = 0 \quad (\text{условие симметрии}); \quad (2.20)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \quad \text{при } x = \delta_1; \quad (2.21)$$

$$T_1(x, \tau) = T_2(x, \tau) \text{ при } x = \delta_1, \quad (2.22)$$

где $\delta = \delta_1 + \delta_2$ - толщина половины эластомерной обкладки.

Решение задачи получено с помощью стандартных преобразований операционного метода:

$$\frac{T_1(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos\left(\mu_n K_a \frac{1}{2} \frac{x}{\delta_2}\right)}{\varphi_n(\mu_n)} \exp\left(-\mu_n^2 \text{Fo}_1 K_\delta^2 K_a\right); \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_2(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = & 1 - \sum_{n=1}^{\infty} 2 \left\{ \cos\left(\mu_n \frac{x - \delta_1}{\delta_2}\right) \cos\left(\mu_n K_a \frac{1}{2} K_\delta\right) - \right. \\ & \left. - K_\varepsilon \sin\left(\mu_n \frac{x - \delta_1}{\delta_2}\right) \cdot \sin\left(\mu_n K_a \frac{1}{2} K_\delta\right) \right\} \cdot \frac{1}{\varphi_n(\mu_n)} \exp\left(-\mu_n^2 \text{Fo}_2\right); \quad (2.24) \end{aligned}$$

где $\varphi_n(\mu_n) = \left\{ \left(1 + K_\varepsilon K_a \frac{1}{2} K_\delta + \frac{1 + K_\delta}{\text{Bi}} \right) \sin \mu_n + \frac{\mu_n}{\text{Bi}} (1 + K_\delta) \cos \mu_n \times \right.$
 $\times \left(1 + K_\varepsilon K_a \frac{1}{2} K_\delta \right) \left. \right\} \mu_n \cos \left(\mu_n K_a \frac{1}{2} K_\delta \right) + \left\{ \left(1 + K_\varepsilon^{-1} K_a \frac{1}{2} K_\delta + \right. \right.$
 $\left. \left. + \frac{1 + K_\delta}{\text{Bi}} \right) \cos \mu_n - \frac{\mu_n}{\text{Bi}} (1 + K_\delta) \cdot \left(1 + K_\varepsilon^{-1} K_a \frac{1}{2} K_\delta \right) \sin \mu_n \right\} \times$
 $\times \mu_n K_\varepsilon \sin \left(\mu_n K_a \frac{1}{2} K_\delta \right);$

$$K_a = \frac{a_2}{a_1}; \quad K_\delta = \frac{\delta_1}{\delta_2}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha}{\lambda_2} \delta; \quad \text{Fo}_1 = \frac{a_1 \tau}{\delta_1^2}; \quad \text{Fo}_2 = \frac{a_2 \tau}{\delta_2^2}.$$

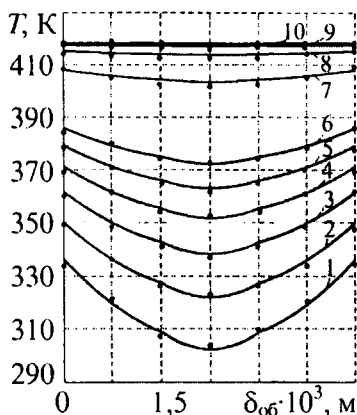
Числа μ_n определяются графически из следующего характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\mu}{\text{Bi}} (1 + K_\delta) \text{tg} \mu - K_\varepsilon \text{tg} \mu \cdot \text{tg} \left(\mu K_a \frac{1}{2} K_\delta \right) - K_\varepsilon \frac{\mu}{\text{Bi}} (1 + K_\delta) \times \\ \times \text{tg} \left(\mu K_a \frac{1}{2} K_\delta \right) = 0. \quad (2.25) \end{aligned}$$

На основе решений (2.23 – 2.24) построены кривые распределения температуры в резиноталлических объектах с покрытиями марок 1976

(СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) [Прил. 10] с помощью пакета программ Mathcad. В качестве примера на рис. 2.8 приведены температурные кривые в трехслойном покрытии марки 1976 (СКБ) + 1751 (СКБ) + 1976 (СКБ), которые сравнены с экспериментальными данными [170]. Отклонение аналитических расчетов от опытных данных составило 3 - 7 %.

Рис. 2.8. Кривые распределения температуры при предварительной обработке покрытия марки 1976 (СКБ) + 1751 (СКБ) + 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 1,5 + 1,5 + 1,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), время прогрева: 1 - 10 с, 2 - 20 с, 3 - 30 с, 4 - 40 с, 5 - 50 с, 6 - 60 с, 7 - 120 с, 8 - 180 с, 9 - 300 с, 10 - 600 с
(— - расчет, • - эксперимент)



Полученные результаты расчетов температуры в покрытиях марок 1976 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2566 (НК+СКБ), 1814 (СКБ) и др. позволяют сделать следующие выводы. Очевидно, что температурное поле в трехслойных эластомерных обкладках симметрично относительно оси симметрии обкладок. В начале процесса предварительной термообработки покрытий из-за малой теплопроводности эластомеров возникает значительный перепад температуры между поверхностью обкладки и её серединой. Причем на эбонитовых обкладках разность температур больше, так как теплопроводность эбонита существенно ниже теплопроводности резины. Наиболее высокая температура вычислена на внешних слоях обкладок из эбонита марок 1752, 1814 и на внутренних слоях из резины марок 1976, 2566. Установившийся режим при $\delta_{об} = 4,5$ мм наступает через 1300...1400 с.

Время установления теплового состояния, при котором температура во всех расчетных точках равна температуре среды, растет с увеличением толщины покрытия. На прогрев эбонитовых покрытий с увеличением толщины покрытия требуется увеличение времени прогрева.

Анализ температурных полей в трехслойных покрытиях при чередовании резиновых и эбонитовых слоев позволил сделать выводы о том, что температуры в резиновых, эбонитовых или в покрытиях с чередовани-

ем слоев различны. Наличие внутреннего слоя из другого материала приводит к более равномерному распределению температур при прогреве изделия. По сравнению с однослойным эбонитовым покрытием в трехслойном (с чередованием материалов) разность температур в середине и на поверхности покрытия гораздо меньше. По сравнению с однослойным резиновым покрытием в трехслойном (с чередованием материалов) наблюдается увеличение времени прогрева покрытия.

Таким образом, наличие внутреннего слоя из эластомера другой марки в покрытии позволит не только улучшить адгезию, но и благоприятно скажется на равномерности прогрева покрытия, позволит избежать перевулканизации поверхностных слоев изделия или недовулканизации внутренних, а, следовательно, улучшит качество готового продукта.

На основе полученной математической модели и температурных полей выявили зависимость времени прогрева эластомерного покрытия от теплофизических параметров гуммировочного покрытия (рис. 2.9), от толщин эластомерной обкладки (рис. 2.11) и металлической основы (рис. 2.12), построили кинетические кривые теплового режима предварительного прогрева эластомерного покрытия (рис. 2.10).

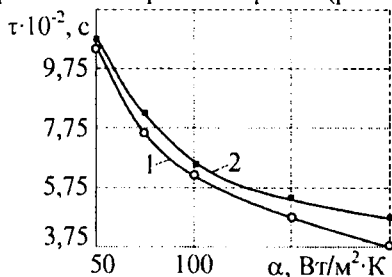


Рис. 2.9. Зависимость времени прогрева до $T_c = 418$ К покрытий от коэффициента теплоотдачи между внешней средой и поверхностью трехслойного покрытия марки: 1 – 1976 (СКБ); 2 – 1752 (НК+СКБ).

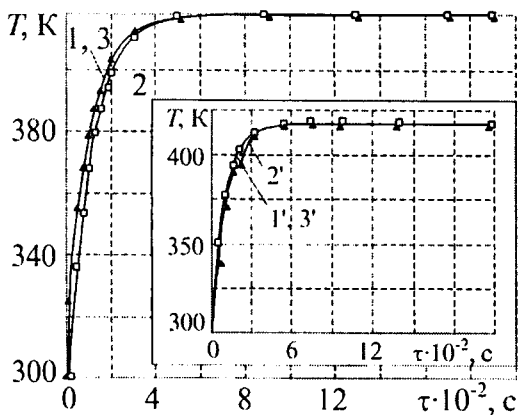


Рис. 2.10. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марок: 1, 2, 3 – три слоя 1752 (НК+СКБ); 1', 2', 3' – три слоя 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм и $T_c = 418$ К

Рис. 2.11. Зависимость времени прогрева до $T_c = 418$ К покрытия марки 1752 (НК+СКБ) от толщины покрытия

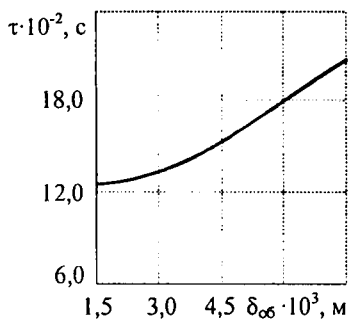
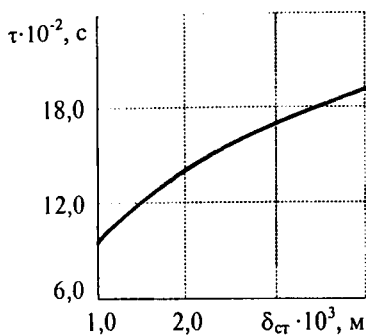


Рис. 2.12. Зависимость времени прогрева до $T_c = 423$ К покрытия марки 1752 (НК+СКБ) от толщины стальной основы

Очевидно, что при увеличении толщины гуммировочного покрытия возрастает продолжительность термообработки резинометаллического изделия.

Необходимо отметить, что наличие металлической основы влияет на распределение температур в резинометаллических изделиях. С увеличением толщины стального слоя произойдет увеличение времени вулканизации всего изделия в целом.

2.4. Математическое моделирование процесса теплопереноса при вулканизации многослойных гуммировочных покрытий и многослойных резинометаллических объектов

Процесс вулканизации обкладок гуммированных объектов – один из наиболее сложных тепловых процессов, протекающих в изменяющихся во времени тепловых потоках. По мере прогрева покрытий наблюдается значительный положительный тепловой эффект, величина которого увеличивается по мере присоединения серы.

Связывание серы сопровождается выделением теплоты, количество которой на начальных этапах пропорционально содержанию связанной серы, а позднее остается постоянным в результате преобладания внутримолекулярного присоединения серы. Правда, при вулканизации мягкой резины тепловой эффект мал и практического влияния на условия вулканизации не оказывает. При вулканизации эбонита, когда коэффициент вулканизации достигает значительной величины, происходит сильное тепловыделение (тепловой эффект составляет до $920 \cdot 10^3$ Дж/кг) и возможен перегрев и «горение» эбонита, которое состоит в бурном газовыделении и образовании губчатой массы. Начавшуюся экзотермическую реакцию невозможно остановить снижением температуры в реакционной камере, её можно лишь предупредить своевременным понижением температуры до начала значительного теплообразования.

При термообработке часто возникает необходимость определения нестационарного поля температур в многослойных резинометаллических объектах, где слои подложки не удастся свести к однослойной пластине. Эластомерные обкладки могут быть из различных материалов (эбонит, полуэбонит, резина), иметь разные теплофизические характеристики. Также иногда необходимо вводить в рассмотрение и соединяющие их клеевые слои.

С учетом вышесказанного уточним математическую модель с помощью введения источников тепловой энергии.

Процесс конвективного теплопереноса в многослойном гуммировочном покрытии или резинометаллическом изделии (рис. 2.13) при вулканизации или предварительной термообработке может быть описан системой дифференциальных уравнений (2.26) с начальным условием (2.27) и граничными условиями (2.28 – 2.31) (третья краевая задача в общем виде):

$$\frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i(x, \tau) \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + Q_i(x, \tau), \quad (2.26)$$

где $\delta_{i-1} < x < \delta_i$, $\delta_0 = 0$, $\delta_n = \delta$, $i = 1, 2, \dots, n$, $\tau > 0$,

$$T_i(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0 = const, \quad \delta_0 < x < \delta_n, \quad (2.27)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\delta_0, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 [T_1(\delta_0, \tau) - T_c] = 0, \quad (2.28)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(\delta_n, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_c - T_n(\delta_n, \tau)] = 0, \quad (2.29)$$

$$T_i(x, \tau) = T_{i+1}(x, \tau) \text{ и}$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, \tau)}{\partial x} \text{ при } x = \delta_i. \quad (2.30, 2.31)$$

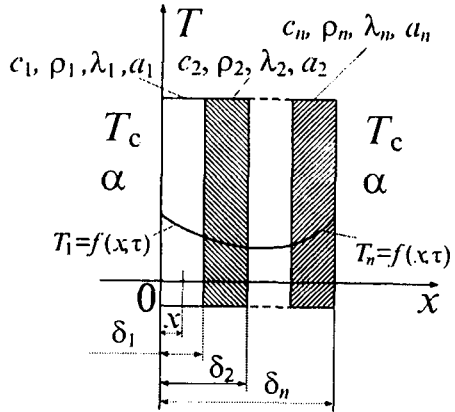


Рис. 2.13. Расчетная схема теплопереноса в многослойной системе

Решение краевой задачи (2.26 – 2.31) получено с помощью метода конечных интегральных преобразований:

$$T_i(x_i, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U(\mu_k, \tau) \cdot W_i(x_i, \mu_k)}{S_k}, \quad (2.32)$$

где $S_k = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} W_i^2(x_i, \mu_k) dx_i$;

$$W_i(x_i, \mu_k) = C1_i \cos \sqrt{\frac{\mu_k}{a_i}} x_i + C2_i \sin \sqrt{\frac{\mu_k}{a_i}} x_i$$
 - ядро интегрального преобразования,

в котором коэффициенты $C1_i$, $C2_i$ и собственные числа определяются из однородных граничных условий:

$$\lambda_1 \frac{dW_1(\delta_0, \mu)}{dx_1} - \alpha W_1(\delta_0, \mu) = 0;$$

$$\lambda_n \frac{dW_n(\delta_n, \mu)}{dx_n} + \alpha W_n(\delta_n, \mu) = 0;$$

$$W_{i-1}(x_{i-1}, \mu) = W_i(x_{i-1}, \mu);$$

$$\lambda_{i-1} \frac{dW_{i-1}(x_{i-1}, \mu)}{dx_{i-1}} = \lambda_i \frac{dW_i(x_{i-1}, \mu)}{dx_{i-1}};$$

$$U(\mu_k, \tau) = \exp(-\mu_k^2 \tau) \cdot \left(U(\mu_k, 0) + \int_0^\tau (G(\mu_k, \tau) + F(\mu_k, \tau)) \exp(\mu_k^2 \tau) d\tau \right),$$

где $U(\mu_k, 0) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i T_0}{a_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} W_i(x_i, \mu_k) dx_i$ - изображение начальных условий;

и; $G(\mu_k, \tau) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} Q_i(x_i, \tau) W_i(x_i, \mu_k) dx_i$ - изображение

функции источника теплоты;

$$F(\mu_k, \tau) = \frac{\alpha}{\lambda_n} W_n(\delta_n, \mu_k) T_c - \frac{\alpha}{\lambda_1} W_1(\delta_0, \mu_k) T_c.$$

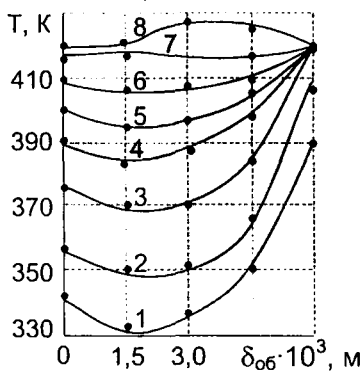


Рис. 2.14. Кривые распределения температуры в эбонитовом покрытии резинометаллического изделия марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{ст} = 2,0$ мм, $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К); время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 60 с, 3 – 120 с, 4 – 180 с, 5 – 240 с, 6 – 360 с, 7 – 720 с, 8 – 1800 с
(— - расчет, • - эксперимент)

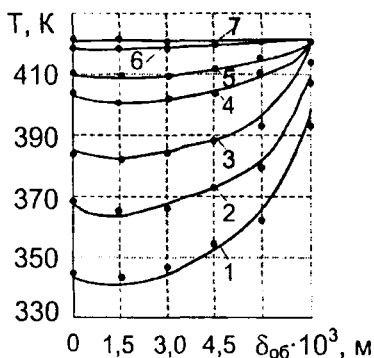


Рис. 2.15. Кривые распределения температуры в эластомерном покрытии резинометаллического изделия марки 1752 (НК+СКБ) + 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{ст} = 4,0$ мм, $\delta_{об} = 7,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К); время прогрева: 1 – 60 с, 2 – 180 с, 3 – 300 с, 4 – 480 с, 5 – 600 с, 6 – 720 с, 7 – 1700 с
(— - расчет, • - эксперимент)

На основе решений (2.32) построены кривые распределения температуры в резинометаллических объектах с покрытиями марок 1976 (СКБ),

4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. [Прил. 10] с помощью пакета программ Mathcad. В качестве примера на рис. 2.14 и 2.15 приведены температурные кривые в многослойных покрытиях марки 1752 (НК+СКБ) и 1752 (НК+СКБ) + 2566 (НК+СКБ), которые сравнены с экспериментальными данными [169, 170]. Отклонение расчетов от опытных данных составило до 5 %.

Таким образом, полученные соотношения (2.5), (2.14), (2.15), (2.23), (2.24), (2.32) позволяют аналитически описать распределение температуры практически во всех возможных случаях конструкций многослойного гуммированного изделия при предварительной термообработке и вулканизации. Приведенные графические зависимости свидетельствуют об адекватности полученных математических моделей экспериментальным данным.

Построенные модели использованы в дальнейшем для анализа влияния параметров теплопередачи на качество получаемых гуммировочных покрытий и создания инженерной методики расчета режимов нагрева.

2.5. Определение количества теплоты, выделенного внутренними источниками в процессе вулканизации

При расчете температурных полей возникает необходимость определения величины внутренних источников теплоты при вулканизации многослойных резиноталлических изделий.

Попытка количественного определения тепловых эффектов при вулканизации эластомерных покрытий была предпринята Блэйком, при этом он не учитывал коэффициент теплопроводности λ эластомеров [137].

Оберто разработал методику сравнения нагрева резиновых смесей при вулканизации в образцах-пластинах при наличии и отсутствии вулканизирующего агента, однако расчет им проведен недостаточно корректно.

Метод термографических балансов [137] основан на решении уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c\rho} \quad (2.33)$$

для одномерного потока в неограниченной пластине при симметричном ее нагреве.

Если $a = \lambda / (c\rho)$ - коэффициент температуропроводности, δ - полутолщина пластины, x - расстояние от «центра» (середины пластины), T_{Π} - температура поверхности, $T_{\text{Ц}}$ - температура в центре, то температура $T(x)$ на расстоянии x выражается формулой:

$$T(x) = T_{\text{Ц}} - (T_{\text{Ц}} - T_{\Pi}) \cdot \left(\frac{x}{\delta}\right)^2 \quad (2.34)$$

Отсюда следует, что для нахождения теплового эффекта q_v (количества теплоты в данный момент времени τ , выделенной за единицу времени при температуре T) достаточно измерить температуру $T(x)$ и разность температур на поверхности и в центре пластины

$$\Delta T = T_{\text{Ц}} - T_{\text{П}}, \quad (2.35)$$

как функцию времени τ и зная теплофизические характеристики материала $c\rho$ и λ .

Поскольку

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{2(T_{\text{Ц}} - T_{\text{П}})}{\delta^2} = \frac{2\Delta T}{\delta^2}, \quad (2.36)$$

а при $T_{\text{П}} = \text{const}$

$$\frac{\partial T_{\text{Ц}}}{\partial \tau} = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial \tau}, \quad (2.37)$$

то

$$q_v = c\rho \frac{\partial(\Delta T)}{\partial \tau} + \frac{2\lambda\Delta T}{\delta^2}. \quad (2.38)$$

Суммарное количество теплоты $q_{v\text{сумм}}$, выделенное за период вулканизации от τ_0 до τ_m при температуре $T(x, \tau)$ в единице объема, может быть рассчитано методом численного интегрирования:

$$q_{v\text{сумм}} = \int_{\tau_0}^{\tau_m} q_v d\tau. \quad (2.39)$$

В дальнейшем [137] метод расчета был упрощен, исходя из того обстоятельства, что реакция в тонкой пластине начинается по достижении значения температуры $T(x) = T_{\text{П}}$, а к окончанию реакции температура в пластине оказывается равной той же постоянной температуре термостата $T_{\text{П}}$. Это означает, что все выделенное в результате реакции тепло отведено за счет теплопроводности не аккумулируясь, т. е.

$$\int_{\tau_0}^{\tau_m} c\rho \frac{\partial T_{\text{ср}}}{\partial \tau} d\tau = 0,$$

где $T_{\text{ср}}$ - температура средняя по толщине пластины, откуда

$$q_{v\text{сумм}} \approx \frac{2\lambda}{\delta^2} \int_{\tau_0}^{\tau_m} \Delta T d\tau. \quad (2.40)$$

Для определения $q_{\text{сумм}}$ достаточно найти коэффициент теплопроводности λ и определить одну лишь дифференциальную термограмму $\Delta T - \tau$, не измеряя теплоемкости и не проводя записи простой термограммы $T - \tau$.

Как показали исследования [137], заметный эффект тепловыделения получается при содержании серы 8 - 10% весовых частей. Тепловые эффекты вулканизации зависят от температуры вулканизации. Тепловой эффект реакции вулканизации смеси на основе НК с двумя весовыми частями дифенилгуанидина и тремя весовыми частями серы составляет при 423К 9,96 Вт. Ускорители оказывают существенное влияние на скорость тепловыделений и величину теплового эффекта. В эбонитовых смесях выделяется при вулканизации до 256 Вт.

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

$$\Delta T = A\tau^B e^{-D\tau}, \quad (2.41)$$

где τ -время; ΔT -разность температур на внутренней и внешней поверхностях пластины, К.

Коэффициенты A , B и D получают при термографическом исследовании.

На рис. 2.16 и 2.17 показано изменение температуры в процессе вулканизации образцов с различным содержанием серы и тепловой эффект реакции вулканизации натурального каучука и СКС-30 в зависимости от содержания связанной серы.

Зависимость тепловых эффектов (суммарных) вулканизации натурального каучука от количества присоединенной серы в смеси, содержащей 30 вес. ч. исходной концентрации серы, приведена на рис. 2.18 [139]. На рис. 2.19 приведена кинетика тепловыделений в зависимости от температуры вулканизации.

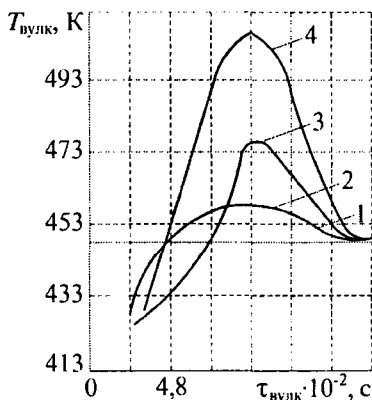


Рис.2.16. Изменение температуры в процессе вулканизации образцов с различным содержанием вулканизующего агента:

- 1 – без серы; 2 – 6% серы;
- 3 – 10% серы; 4 – 14% серы

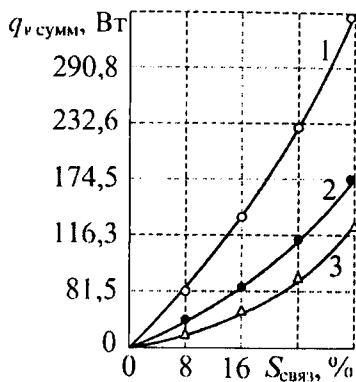


Рис. 2.17. Тепловой эффект реакции вулканизации $q_{v\text{ сумм}}$ НК и СКС-30 в зависимости от содержания связанной серы: 1 – для НК (Blacke J. T.); 2 – для НК (Jessup R. S.); 3 – для СКС-30

Рис. 2.18. Зависимость теплового эффекта вулканизации эластомерных покрытий на основе НК от содержания связанной серы, $T = 423 \text{ К}$

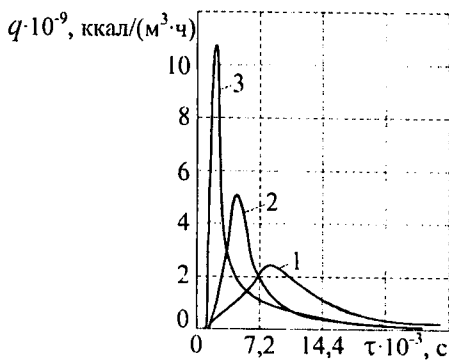
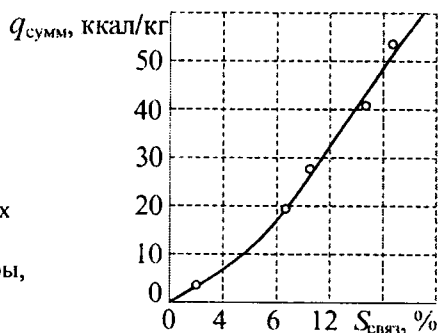


Рис. 2.19. Кинетика тепловыделений при вулканизации эластомерных покрытий на основе НК с 30 вес. ч. серы при температурах: 1 – 423 К; 2 – 433 К; 3 – 443 К; $q_{max} = 340800 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$; $\tau_{max} = 2160 \text{ с}$

Таким образом, в разработанных математических моделях процесса теплопереноса при предварительной термообработке и вулканизации многослойных гуммировочных покрытий и многослойных резинометаллических объектов, аналитически описывающих распределение температуры в любой момент термообработки эластомерного покрытия, а приведенный метод расчета тепловых эффектов при вулканизации гуммировочных покрытий позволяет рассчитать величину внутренних источников теплоты.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1. Массоперенос при вулканизации гуммировочных покрытий

Массообменные процессы, протекающие с участием агентов вулканизации, играют большую роль в технологии производства гуммировочных покрытий. Несмотря на большой объем проводимых исследований, которые в основном рассматривают химические реакции, происходящие при вулканизации, процесс переноса именно свободной серы изучен еще далеко недостаточно. Это объясняется трудностями экспериментального характера, связанными, в частности, с замером локальных концентраций в покрытии, которые могут резко отличаться по своим свойствам, аналитической неразрешенностью соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений переноса, неизотермичностью многих процессов, проблемой задания граничных условий.

Движущими силами процесса переноса вулканизирующего агента по толщине гуммировочных покрытий являются градиент температуры и градиент концентраций распределенного вещества при вулканизации.

При исследованиях вулканизации каучука физико-химическими методами (методом радиоактивных изотопов серы – меченых атомов и инфракрасной спектроскопии) [31] было установлено, что имеет место диффузия серы при хранении сырых резиновых смесей. Сера мигрирует из слоя в слой, что приводит к различным концентрациям вулканизирующего агента и к неоднородной вулканизации. Кроме того, наблюдалась диффузия серы по толщине гуммировочных покрытий при вулканизации. Причем миграция серы и повышенная её концентрация в отдельных слоях покрытий может служить причиной скорчинга («горения») покрытий, перевулканизации, появления трещин и других дефектов в обкладках.

Таким образом, анализируя экспериментальные и теоретические данные [31, 57, 60, 72, 131, 137, 170, 192, 251, 261], делаем вывод о том, что массоперенос агента вулканизации (в частности, серы) может оказать существенное влияние на качество гуммировочных покрытий.

Как известно, вулканизация – это процесс, при котором пластичный каучукоподобный материал (резиновая смесь) переходит в резиноподобное состояние. Этот процесс состоит в связывании между собой макромолекул каучука поперечными химическими связями с образованием единой пространственной сетки вулканизата и вступлении в реакцию с вулканизирующими агентами, ускорителями, активаторами, наполнителями.

Концентрация, природа, распределение связей в пространственной сетке вулканизата, а также энергия связей оказывают сильное влияние и определяют важнейшие физико-механические свойства вулканизата [14, 19, 43, 57, 63, 72, 73, 84, 85, 118, 137, 186]. Установлено, что в серных вулканизатах существуют следующие виды химических связей между молекулярными цепями пространственной сетки: моносльфидные $-C-S-C-$, дисульфидные $-C-S-S-C-$, полисульфидные $-C-S_x-C-$, углерод-углеродные $-C-C-$. Как правило, наилучшим комплексом физико-механических свойств обладают вулканизаты, содержащие одновременно поперечные связи различной химической природы.

В качестве вулканизирующих агентов в химической промышленности используются перекиси, окиси металлов, хиноны, хлорсодержащие соединения, но основным и широко используемым агентом по-прежнему остается сера. В сочетании с другими компонентами вулканизационной группы сера позволяет быстро и эффективно получить гуммировочные покрытия с требуемым набором и густотой поперечных связей, в максимальной степени соответствующих условиям эксплуатации резинометаллических изделий.

Растворенный в каучуке кислород обуславливает разрушение цепей и образовавшихся поперечных связей в течение всей вулканизации. Однако на начальном этапе преобладает структурирование, а по достижении оптимальной степени присоединения серы и структурирования начинают преобладать деструктивные процессы, приводящие к так называемой реверсии вулканизации (снижению прочности гуммировочных покрытий). С технической точки зрения, реверсия вулканизации или перевулканизация являются нежелательными процессами. Перевулканизованные резины менее прочны, имеют низкое сопротивление старению. Точно также недовулканизованные эластомеры обладают низкими эксплуатационными характеристиками. Вот почему так важно определение кинетики и степени вулканизации, изменение свойств гуммировочных покрытий с увеличением продолжительности их нагрева.

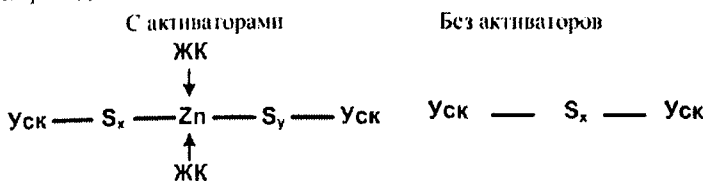
В процессе сшивания не вся сера присоединяется к каучуку, часть её остается в несвязанном (свободном) состоянии и может извлекаться экстрагированием с последующим количественным определением.

Связывание серы сопровождается выделением теплоты, количество которой на начальных этапах пропорционально содержанию связанной серы, а позднее остается постоянным в результате преобладания внутримолекулярного присоединения серы. Правда, при вулканизации мягкой рези-

ны тепловой эффект мал и практического влияния на условия вулканизации не оказывает.

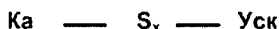
В процессе вулканизации гуммировочных покрытий происходит ряд последовательных и параллельных реакций, представляющих различные стадии вулканизации (рис. 3.1). Общая картина происходящих химических процессов усложняется структурированием и деструкцией каучука под влиянием различных факторов.

1. Взаимодействие серы, ускорителя и активаторов с образованием сульфидирующего комплекса – действительного агента вулканизации:



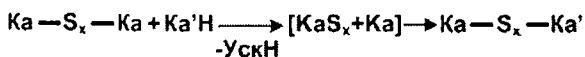
где Уск – ускоритель, ЖК – жирная кислота или её соль

2. Реакция сульфидирующего комплекса с каучуком, в результате которой возникают активные продукты присоединения, представляющие полисульфидные цепочки, которые заканчиваются остатком ускорителя:



где Ка – каучук

3. Взаимодействие активных продуктов присоединения между собой или с активными группами в макромолекуле каучука с образованием первичных поперечных связей:



4. Реакции перегруппировки и уменьшения степени сульфидности первичных поперечных связей завершение формирования вулканизационной структуры, стабильной в данных условиях вулканизации:

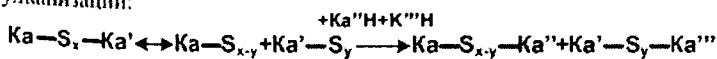


Рис. 3.1. Схема химических реакций, протекающих при вулканизации гуммировочных покрытий

Однако основное значение в процессе вулканизации имеет реакция присоединения серы к каучуку. Это подтверждается тем, что к моменту окончания присоединения серы наблюдается наибольшее изменение свойств каучука по сравнению с первоначальными физико-механическими свойствами (до вулканизации) [10, 42, 73, 103, 124, 130, 134, 136, 169].

При вулканизации серой наблюдается постепенное изменение различных физических и технических свойств каучука. Эти изменения происходят с разной скоростью: в начале вулканизации свойства меняются быстро, а затем медленно. Наиболее характерными являются следующие изменения свойств гуммировочных покрытий: резко повышается предел прочности при растяжении и эластичность обкладок, пластичность его при этом почти полностью исчезает; повышается температуро- и теплостойкость покрытий; покрытие теряет способность растворяться, оно только набухает в растворителях; понижается химическая активность обкладок.

Массоперенос серы, особенно в многослойных резиновых и эбонитовых обкладках, как самопроизвольный процесс переноса вещества в объекте, обуславливается неоднородностью распределения её концентраций по всему объему, а также разностью температур и давлений.

Под действием температуры в резиновой смеси происходит плавление серы, а затем сшивание с каучуком. От продолжительности вулканизации и степени поперечного сшивания зависят свойства гуммировочных покрытий.

Динамика процесса вулканизации эластомерных покрытий может быть прослежена по распределению и содержанию вулканизирующего агента, не вступившего в реакцию с каучуком. Зная распределение концентрации свободной серы в слоях покрытия в течение всего процесса структурирования каучука, можно варьировать параметры термообработки, а, следовательно, и разработать рациональный тепловой режим вулканизации.

3.2. Математическое моделирование процесса массопереноса в гуммировочных покрытиях при предварительной термообработке

Рассмотрим многослойное гуммировочное покрытие из эластомера одной марки. Учитывая, что механические и теплофизические свойства слоев гуммировочного покрытия не отличаются, можно свести его к однослойной системе [57, 123, 137, 140, 141].

В ходе математического моделирования процесса массообмена эластомерной заготовки были приняты следующие допущения: об отсутствии переноса вещества в поперечном и продольном направлении; об отсутствии внутренних источников массы; о пренебрежении термическим сопротивлением клеевых прослоек.

С учетом допущений, процесс массопереноса вулканизирующего агента в однослойном эластомерном покрытии при термообработке описывает-

ся дифференциальным уравнением (3.1) с начальным (3.2) и граничными условиями (3.3) – (3.4):

$$\frac{\partial C_S}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C_S}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 < x < \delta, \quad (3.1)$$

$$C_S(x, \tau) = \text{const} = C_0 \text{ при } \tau = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial C_S(0, \tau)}{\partial x} = h [C_S(0, \tau) - C_p], \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial C_S(\delta, \tau)}{\partial x} = -h [C_S(\delta, \tau) - C_p]. \quad (3.4)$$

Обозначения: $C_S(x, \tau)$ – текущая концентрация вулканизирующего агента в пластине, %; C_0 – начальная концентрация вулканизирующего агента в пластине, %; C_p – равновесная концентрация, соответствующая концентрации распределяемого вещества в ядре потока внешней фазы по обеим сторонам пластины концентрация вулканизирующего агента в пластине, %; $h = \beta / (A_p D)$; D – коэффициент диффузии, м²/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с; A_p – коэффициент распределения.

Задача (3.1 – 3.4) описывает процесс массопереноса вещества (вулканизирующего агента) в неограниченной пластине толщиной δ без внутреннего источника массы при равномерном начальном распределении концентрации C_0 и при граничных условиях третьего рода на поверхностях пластины.

Для решения задачи выпишем предварительно интегральное преобразование:

$$\bar{C}(\mu_n, \tau) = \int_0^{\delta} C(x, \tau) \psi_n(\mu_n, x) dx, \quad (3.5)$$

где $\psi_n(\mu_n, x)$ – ядро интегрального преобразования (3.5), $\bar{C}(\mu_n, \tau)$ – изображение искомой функции $C(x, \tau)$. Функция $\psi_n(\mu_n, x)$ выбрана с учетом геометрии рассматриваемого материала и типа граничных условий; её находят решением соответствующей однородной задачи на собственные значения и собственные функции для задачи (3.1 – 3.4).

Формула обращения для интегрального преобразования (3.5) имеет вид:

$$C(x, \tau) = \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(\mu_n, x)}{\mu_n^2 + h^2 \delta^2 + 2h\delta} \bar{C}(\mu_n, \tau), \quad (3.6)$$

изображение для производной

$$\int_0^{\delta} \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} \psi_n(\mu_n, x) dx = -\mu_n \left[\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} - hC(x, \tau) \right] \Big|_{x=0} + \frac{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}{2h\delta} \sin(\mu_n) \cdot \left[\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} + hC(x, \tau) \right] \Big|_{x=\delta}. \quad (3.7)$$

$$\text{Здесь } \psi_n(\mu_n, x) = \mu_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) + h\delta \sin\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right),$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{2\mu\delta} - \frac{h\delta}{2\mu}$.

На основе соотношений (3.5), (3.7) найдем решение задачи, затем преобразуем интеграл и улучшим решение.

Решение краевой задачи (3.1)-(3.4) получено с помощью стандартных преобразований метода конечных интегральных преобразований [98 - 101, 122, 206, 212, 233, 234], с последующей доработкой с целью улучшения сходимости рядов:

$$\frac{C(x, \tau) - C_0}{C_p - C_0} = 1 - 2\operatorname{Bi}_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n] \psi_n(\mu_n)}{\mu_n (\mu_n^2 + \operatorname{Bi}_m^2 + 2\operatorname{Bi}_m)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot \operatorname{Fo}_m) + C_p - 2h\delta \cdot C_p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\mu_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) + h\delta \sin\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \right) \cdot [1 - (-1)^n]}{\mu_n (\mu_n^2 + h^2 \delta^2 + 2h\delta)}, \quad (3.8)$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu^2 - \operatorname{Bi}_m^2}{2\mu \cdot \operatorname{Bi}_m}$;

$$\psi_n(\mu_n) = \mu_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) + \operatorname{Bi}_m \sin\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right);$$

$\operatorname{Bi}_m = \beta\delta / (DA_p)$ – критерий Био массообменный; $\operatorname{Fo}_m = D\tau/\delta^2$ – число Фурье массообменное.

На основе решения (3.8) построены графики распределения концентрации вулканизирующего агента в покрытиях марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. [Прил. 10] с помощью пакета программ Mathcad. В качестве примера на рис. 3.2 и 3.3 приведены концентрационные профили в эбонитовых покрытиях марок 1752 (НК+СКБ) и 1814 (СКБ), которые сравнены с экспериментальными данными (проведение и результаты эксперимента подробно изложены в п.4, пп. 4.3). Отклонение аналитических расчетов от опытных данных составило до 7%.

Рис. 3.2. Кривые распределения концентрации свободной серы в однослойном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с

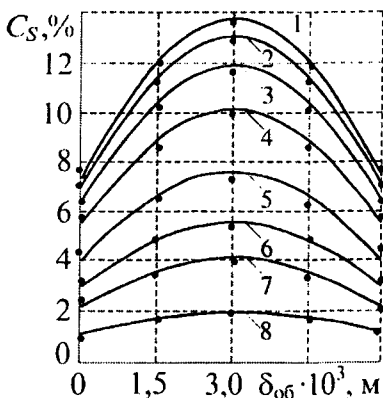
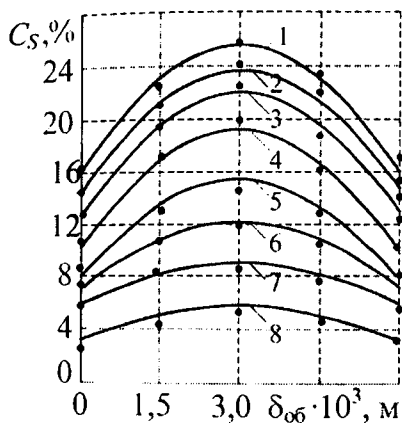


Рис. 3.3. Кривые распределения концентрации свободной серы в однослойном покрытии марки 1814 (СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с (— расчет, • - эксперимент)

Отличие результатов расчета от экспериментальных данных тем больше, чем меньше значения числа Фурье, что соответствует коротким режимам термообработки, мало используемым в промышленности. При увеличении продолжительности нагрева расчеты практически не отличаются от экспериментальных данных.

В результате расчетов выявлено, что количество вулканизирующего агента зависит от продолжительности вулканизации; распределение свободной серы в эластомерных покрытиях становится равномернее, постепенно уменьшаясь со временем, а количество связанной серы растет.

Таким образом, полученные соотношения (3.8) позволяют аналитически описать распределение вулканизирующего агента в эластомерном покрытии при предварительном прогреве. Полученную математическую мо-

дель массопереноса вулканизирующего агента в гуммированных покрытиях можно использовать для разработки рациональных тепловых режимов их термообработки.

3.3. Математическое моделирование процесса массопереноса в эластомерных покрытиях при вулканизации многослойных гуммированных объектов

Так как в резинометаллическом изделии процесс массопереноса вулканизирующего агента происходит только в эластомерном слое, то соответственно рассмотрим однослойную пластину при отсутствии потока вещества с левой поверхности (стенка металла).

Процесс массопереноса вулканизирующего агента в эластомерной обкладке резинометаллического полотна при термообработке описывается дифференциальным уравнением (3.9) с начальными (3.10), как и в предыдущем случае, но с несимметричными граничными условиями (3.11) – (3.12):

$$\frac{\partial C_S}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C_S}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \delta, \quad (3.9)$$

$$C_S(x, \tau) = const = C_0 \quad \text{при } \tau = 0, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial C_S(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial C_S(\delta, \tau)}{\partial x} = -h [C_S(\delta, \tau) - C_p]. \quad (3.12)$$

Решение краевой задачи (3.9) - (3.12) имеет вид:

$$C(x, \tau) = \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}{(\mu_n^2 + h^2 \delta^2) + h\delta} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right) \cdot \left[C_0 \frac{\mu_n}{\delta} \sin(\mu_n) \cdot \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right) - \frac{C_p \delta^2}{\mu_n^2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right)\right) + \frac{(-1)^{n+1} C_p h^2 \delta^2}{\sqrt{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}} \right], \quad (3.13)$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\text{ctg } \mu = \mu / (h\delta)$.

Решение приведенной краевой задачи со смешанными граничными условиями получено с помощью метода конечных интегральных преобразований с улучшенной сходимостью рядов. На основе решения (3.13) построены графики распределения концентрации вулканизирующего агента в покрытиях марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. с помощью пакета программ Mathcad. В качестве примера на рис. 3.4 и 3.5 приведены concentra-

ионные профили в резиноталлических изделиях с эластомерными покрытиями марок 1752 (НК+СКБ) и 1814 (СКБ), которые сравнены с экспериментальными данными. Отклонение аналитических расчетов от опытных данных составило до 7 %.

Рис. 3.4. Кривые распределения концентрации свободной серы в эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/м²·К, $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с

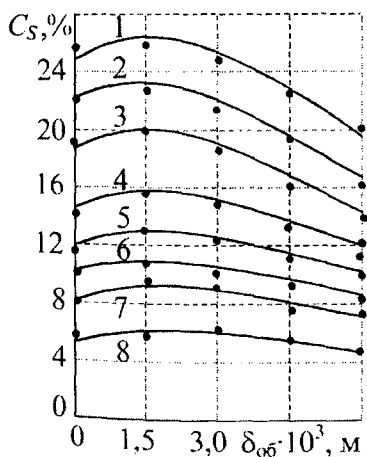
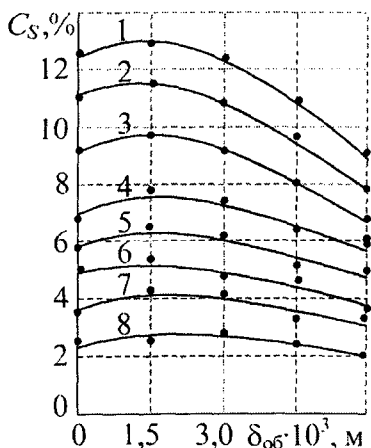


Рис. 3.5. Кривые распределения концентрации свободной серы в эбонитовом покрытии марки 1814 (СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/м²·К, $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с
(— - расчет, • - эксперимент)

Отличие расчетов от экспериментальных данных наблюдалось при малых значениях чисел Фурье, которые соответствуют коротким режимам термообработки, мало используемым в промышленности.

На рис. 3.6 представлены результаты расчетов содержания и распределения свободной серы по толщине покрытия при вулканизации с предварительной термообработкой. Очевидно, что предварительный нагрев гуммировочных покрытий позволяет не только сократить продолжительность вулканизации, но и обеспечить равномерную степень вулканизации покрытий, что улучшит качество резинометаллических изделий.

В результате расчетов выявлено, что количество вулканизирующего агента зависит от продолжительности вулканизации; распределение свободной серы в эластомерных покрытиях становится равномернее, постепенно уменьшаясь со временем, а количество связанной серы растет.

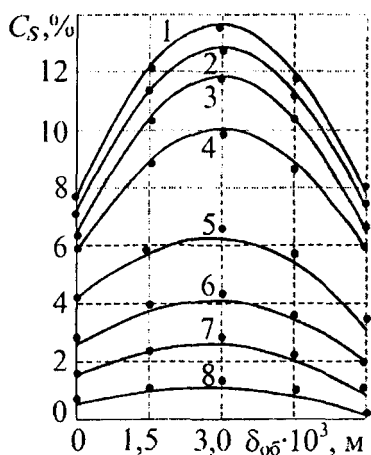


Рис. 3.6. Кривые распределения концентрации свободной серы в резинометаллическом изделии с покрытием 1752 (НК+СКБ) при вулканизации с предварительной термообработкой, $\delta_{об} = 6,0$ мм, $\delta_{ст} = 2,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\beta = 2,23 \cdot 10^{-4}$ м/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с (— расчет, • - эксперимент)

Таким образом, полученные соотношения (3.13) позволяют аналитически описать распределение вулканизирующего агента в эластомерном покрытии. Полученную математическую модель массопереноса вулканизирующего агента в резинометаллическом гуммированном объекте можно использовать для разработки рациональных тепловых режимов их термообработки.

3.4. Определение коэффициентов массопроводности гуммировочных покрытий

Все методы определения коэффициента массопроводности можно разбить на следующие группы:

– стационарные и нестационарные, в которых коэффициент массопроводности вычисляется по основному уравнению массопроводности

$$\vec{i} = -D \text{grad } C; \quad (3.14)$$

– стационарные и нестационарные, в которых коэффициент массопроводности определяется из решений дифференциального уравнения массопроводности.

1. Метод определения D коэффициента массопроводности из основного уравнения массопроводности. Из опыта, проводимого в стационарном или нестационарном режиме, находят для некоторого сечения образца плотность потока массы, а также замером локальных концентраций – функцию распределения её по координате $C = C(x)$: для нестационарного режима – в некоторый фиксированный момент времени τ , для стационарного – после наступления стационарного режима. Коэффициент массопроводности вычисляют из уравнения (3.14)

$$D = \frac{-i}{\frac{\partial C}{\partial x}} \quad (3.15)$$

при этом производную $\frac{\partial C}{\partial x}$ находят обычно графическим дифференциро-

ванием функции $C = C(x)$. Вычисляя D при различных значениях концентрации C , получают функцию $D=f(C)$. Опыт проводят, как правило, в изотермических условиях и поэтому найденная зависимость $D=f(C)$ представляет собой изотерму $D=f(C)$. Данный метод определения D является прямым, т.е. не содержит каких-либо дополнительных условий и допущений. Однако применение его в большой степени затруднено необходимостью замера локальных концентраций, что часто невыполнимо. Погрешность в нахождении D зависит от того, с какой точностью измерены величины i , C , x и погрешность дифференцирования функции $C = C(x)$.

2. Метод проницаемости позволяет определить концентрационную зависимость коэффициента массопроводности из опытов по проницаемости в стационарном режиме и основывается на следующих теоретических предпосылках. Исходя из основного уравнения массопроводности (3.14), разделением переменных для плоскопараллельной пластины толщиной 2δ и интегрированием получим:

$$i \int_0^{2\delta} dx = \int_{C_1}^{C_2} D(C) dC, \quad (3.16)$$

где C_1 и C_2 - концентрации распределяемого вещества в пластине около её поверхностей при $x=0$ и $x=2\delta$, кг/кг твердой фазы.

После интегрирования имеем:

$$2\delta i = \int_{C_1}^{C_2} D(C) dC. \quad (3.17)$$

Если с одной стороны пластины концентрация $C_1 = \text{const}$, то продифференцировав уравнение (3.17) по C_2 , получим:

$$D(C) = 2\delta \cdot \frac{di}{dC_2}. \quad (3.18)$$

Если из опытов известна функция $i = f(C_2)$, то дифференцируя её в соответствии с уравнением (3.18) получим концентрационную зависимость коэффициента массопроводности $D = D(C)$. Для получения зависимости $i = f(C_2)$ проводят серию опытов при одной и той же концентрации C_1 по одну сторону пластины, но при разных её значениях C_2 – по другую. В опытах регистрируют плотности потоков массы через пластины – в стационарном режиме. Метод не содержит каких-либо допущений и в основе своей является точным.

3. Метод Ермоленко-Журавлевой основан на анализе задачи массопроводности применительно к неограниченной пластине и допущении, что распределение концентрации в теле следует параболическому закону: ими получена следующая формула для расчета D :

$$D = \frac{1}{6} \cdot \frac{d\bar{C}}{d\tau} \cdot \frac{\delta^2 - \delta_1^2}{\bar{C}_1(\tau) - \bar{C}(\tau)}, \quad (3.19)$$

где 2δ – толщина пластины, м; $\bar{C}(\tau)$ – среднеобъемная концентрация в пластине в момент времени τ ; $\bar{C}_1(\tau)$ – среднеобъемная концентрация в центральной части пластины, толщиной $2\delta_1$; $\frac{d\bar{C}}{d\tau}$ – скорость изменения среднеобъемной концентрации в рассматриваемый момент времени.

Для расчета коэффициента массопроводности по данному методу требуется экспериментальное определение кривой кинетики всего образца и его центральной части. Сопоставление коэффициентов массопроводности, полученных прямым методом (расчет через градиенты концентраций по уравнению (3.15)) и по формуле Ермоленко-Журавлевой, хорошо согласуются.

4. Метод двух точек предложен П.П. Луциком, Е.А. Страшкевичем, М.Ф. Казанским [211] на основе приближенного решения дифференциального уравнения массопроводности при граничных условиях второго рода для одномерного массопереноса (неограниченная пластина, стержень с изолированной боковой поверхностью). Он требует замера локальных концентраций в двух точках тела. Коэффициент D рассчитывается по уравнению

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\bar{C}}{d\tau} \cdot \frac{x_2^2 - x_1^2}{C(x_1, \tau) - C(x_2, \tau)}, \quad (3.20)$$

где $C(x_1, \tau)$ и $C(x_2, \tau)$ - локальные концентрации в точках пластины с координатами x_1 и x_2 - в момент времени τ .

Результаты измерений по методу двух точек хорошо согласуются с данными других методов.

5. Зональный метод относится к группе методов нестационарного режима. В работе [211] изложен зональный способ расчета времени, необходимого для изменения концентрации распределяемого вещества в твердой фазе от \bar{C}_H до \bar{C}_K при наличии известной зависимости $D = f(C)_\tau$ (прямая задача).

При обратной постановке задачи полученное уравнение

$$\tau_i = \frac{\delta^2}{D_i \mu_i^2} \ln \frac{B}{\bar{E}_i}$$

позволяет найти зависимость коэффициента массопроводности от концентрации из кривой кинетики процесса $\bar{C} = f(\tau)$. Для этого последняя снимается во всем диапазоне изменения концентрации \bar{C} при условиях, исключающих внешнее диффузионное сопротивление, т.е. при $Bi_m \rightarrow \infty$. Весь интервал изменения концентрации в твердой фазе $\bar{C}_H - \bar{C}_K$ разбивается на m концентрационных зон, в каждой из которой коэффициент D_i принимается постоянным. Для каждой зоны из кривой кинетики определяется значение τ_i (время изменения концентрации от $\bar{C}_{H,i}$

до $\bar{C}_{K,i}$) и далее по уравнению $\tau_i = \frac{\delta^2}{D_i \mu_i^2} \ln \frac{B}{\bar{E}_i}$ рассчитывается значение D_i .

В частности для пластины и изолированного с боковой поверхности стержня расчетное уравнение имеет вид

$$D_i = \frac{4\delta^2}{\pi^2 \tau_i} \ln \frac{B}{\bar{E}_i}, \quad (3.21)$$

где $B = 0,8106$ при $i=1$ и $B=1$ при $i>1$;

$$\bar{E}_i = \frac{\bar{C}_{H,i} - C_p}{\bar{C}_{K,i} - C_p}.$$

Простота эксперимента делает его универсальным и дает возможность успешно использовать рассматриваемый метод при исследовании многих материалов.

3.5. Определение коэффициентов массоотдачи при конвективной вулканизации

Для изучения коэффициентов массоотдачи осуществляют режим $Bi_m \rightarrow 0$. Коэффициент массоотдачи в опыте определяется обычно из уравнения (3.22)

$$\beta = \frac{i}{\Delta C'_{c,cp}}, \quad (3.22)$$

где $\Delta C'_{c,cp}$ – средняя по поверхности массообмена разность концентраций ($C'_{c,n} - C'_c$); i – плотность потока массы. Регистрацию величины i ведут по изменению массы материала.

Метод приближенного расчета модифицированного коэффициента массоотдачи. Метод основан на допущении о том, что в период падающей скорости процесса вулканизации содержание материала и агента около поверхности раздела «твердое тело – среда» изменяются пропорционально, т.е. динамическая функция равновесия линейна: $C_n = A_{p,n} C'_{c,n} = A_{p,n} \rho_c C_{c,n}$. Для этого случая условие массообмена можно представить в виде

$$-D\rho_0 \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_n = \beta \rho_c \frac{(C_{c,n} - C_c)}{C_n - C_p} (C_n - C_p) = \beta^* (C_n - C_p), \quad (3.23)$$

где $(C_{c,n} - C_c)$ – перепад содержания агента в приграничном слое, кг/кг воздуха.

В соответствии с уравнением (3.23) модифицированный коэффициент массоотдачи β^* равен

$$\beta^* = \beta \frac{\rho_c (C_{c,n} - C_c)}{C_n - C_p}. \quad (3.24)$$

В период постоянной скорости вулканизации внутреннее диффузионное сопротивление пренебрежимо мало, и перепад концентраций по толщине материала незначителен, поэтому сначала можно принять $C_n \approx C_{кр}$ (затем величину C_n уточняют) и выразить критерий Bi_m соотношением

$$Bi_m = \frac{\beta^* \delta}{D\rho_0} = \frac{\beta \delta \rho_c (C_{c,n} - C_c)}{D\rho_0 (C_n - C_p)} \approx \frac{\beta \delta \rho_c (C_{c,n} - C_c)}{D\rho_0 (C_{кр} - C_p)}. \quad (3.25)$$

Коэффициент β^* по зависимости (3.25) определяется в следующей последовательности:

1) по известным критериальным уравнениям находят коэффициент массоотдачи β в начале вулканизации;

2) принимают $C_n \approx C_{кр}$, определяют по рекомендациям [211] значение $C_{кр}$, находят $C_{c,n}$ и по уравнению (3.25) вычисляют Bi_m ;

3) уточняют величину C_n ;

4) рассчитывают модифицированный коэффициент массоотдачи β^* по уравнению (3.24).

4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ПОКРЫТИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

4.1. Планирование и методика проведения экспериментов, основные влияющие факторы и их уровни

Процесс вулканизации эластомерных покрытий резинометаллических объектов является одним из наиболее сложных тепловых процессов, протекающих в изменяющихся во времени тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и нагреваемым объектом, зависящих от нестационарного распределенного поля температур в вулканизуемом объекте. При вулканизации в индукционный период происходит течение резиновых смесей и изменение границ между слоями резинометаллического изделия; при нагреве покрытий выделяется теплота вследствие экзотермичности реакции вулканизации; тепловые свойства отдельных слоев и элементов резинометаллического изделия могут быть различными и зависящими от температуры.

Кроме того, вулканизация является не только тепловым, но и массообменным и химическим процессом. Этот процесс происходит при повышенных температурах и состоит в связывании и взаимодействии между собой макромолекул каучука, серы, её соединений, перекисей, комплексных соединений. Общая картина происходящих химических процессов усложняется структурированием и деструкцией каучука под влиянием различных факторов. Однако основное значение в процессе вулканизации имеет реакция присоединения серы к каучуку. Это подтверждается тем, что к моменту окончания присоединения серы наблюдается наибольшее изменение свойств каучука по сравнению с первоначальными физико-механическими свойствами.

При вулканизации происходит массоперенос агента вулканизации, не вступившего в реакцию с каучуком, по толщине эластомерного покрытия. Перенос вещества обусловлен неоднородностью распределения серы по слоям, особенно в многослойных покрытиях на основе нескольких типов каучуков, а также более быстрым плавлением и вступлением в реакцию серы, лежащей в поверхностных слоях, и запаздыванием процессов во внутренних областях покрытий.

Как указано выше, выбор режима вулканизации эластомерных объектов должен основываться на анализе температурных полей и полей концентрации в резинометаллических изделиях и на объективной оценке результатов их воздействия на процесс вулканизации. Для проверки адекватности сформулированных математических моделей теплообмена (п.2) и массообмена (п.3) возникла необходимость проведения экспериментальных

исследований конвективной вулканизации гуммировочных покрытий рези-
нометаллических изделий.

С этой целью были проведены следующие эксперименты:

- 1) исследования кинетики распределения температуры по толщине гуммировочных покрытий;
- 2) исследования влияния вулканизационных структур на физико-химические, механические, прочностные и эластические свойства эластомерных гуммировочных покрытий;
- 3) исследования степени вулканизации и качества гуммировочных покрытий;
- 4) исследования диффузии агрессивных сред в гуммировочные покрытия, долговечности и работоспособности покрытий;
- 5) исследования набухания гуммировочных покрытий в агрессивных средах;
- 6) исследования прочности крепления эластомерных обкладок с металлом и между слоями эластомерных обкладок.

Объектами исследования являлись:

- 1) резиновые и эбонитовые покрытия марок - 2566 (НК+СКБ), 1976 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 1751 (СКБ), 1814 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК), 4476 (СКБ), ИРП-1390 (СКМС), ИРП-1025 (наирит), ИРП-1256 (БК), ИРП-1287 (СКФ), ДП-313, 51-1632 (СКЭПТ), 51-1627 (СКИ+наирит) и др.
- 2) адгезивы для крепления покрытий (клеи) марок - 2572, 4508, ПТ-201, термопеновый, Лейконат, 200 и др.
- 3) металлическая основа марок Ст. 3.

На процесс вулканизации обкладок в инертном зернистом теплоносителе влияет большое число факторов: температура термообработки, продолжительность вулканизации, толщина металлического слоя, толщина эластомерного слоя, состав и технологические свойства резиновых смесей, скорость оживающего агента и др. Проверить на опыте все возможные сочетания этих факторов практически невозможно из-за большого числа их сочетаний. В связи с этим при проведении экспериментов использовали методику рационального планирования эксперимента [38, 40, 153, 154, 170]. В качестве основных (первичных) факторов, влияющих на качество готовых обкладок, приняты температура обработки T , продолжительность термообработки t , толщина металлического слоя $\delta_{ст}$, толщина эластомерного покрытия $\delta_{об}$ (рис. 4.1).

Классическая методика планирования эксперимента применялась при изучении влияния скорости оживающего агента v и весовой загрузки m твердого инертного зернистого теплоносителя на показатели процесса вулканизации гуммировочных покрытий.

Т, К τ, с		413				418				423				428			
		1800	2700	3600	4500	1800	2700	3600	4500	1800	2700	3600	4500	1800	2700	3600	4500
1,5	1,0																
	2,0				■												
	3,0										■						
	4,0					■											
3,0	1,0						■										
	2,0																
	3,0	■															
	4,0																■
4,5	1,0			■													
	2,0																
	3,0							■									
	4,0									■							■
6,0	1,0																
	2,0						■										
	3,0																■
	4,0																

Рис. 4.1. Комбинированный квадрат для четырех вариантов четырех факторов влияния T , τ , $\delta_{об}$, $\delta_{ст}$

С помощью методики рационального планирования эксперимента были выбраны следующие уровни факторов, влияющих на качество эластомерных покрытий:

- 1) температура теплоносителя, T_c , К - 413, 418, 423, 428;
- 2) начальная температура эластомерной обкладки, T_0 , К - 293, 303, 313, 323;
- 3) толщина эластомерной обкладки, $\delta_{об}$, мм: 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 – эбонитовые покрытия (по 1,5 мм слой); 3,0; 4,5; 6,0; 7,5; 10,5; 13,5 – резиновые (по 1,5 мм слой) покрытия с эбонитовым подслоем в 1,5 мм; 3,0; 6,0; 9,0; 12,0 – эбонитовые покрытия (по 3,0 мм слой); 4,5; 7,5; 10,5; 13,5 – резиновые (по 3,0 мм слой) покрытия с эбонитовым подслоем в 1,5 мм; 6,0; 9,0; 12,0; 15,0 – резиновые (по 3,0 мм слой) покрытия с эбонитовым подслоем в 3,0 мм;
- 4) толщина металлической основы, $\delta_{ст}$, мм - 1,0; 2,0; 3,0; 4,0;
- 5) продолжительность вулканизации – при вулканизации в псевдооживленном слое инертного зернистого теплоносителя и методов простой конвекции: 1800, 2700, 3600, 4500 с для эбонита; 600, 1200, 1800, 2400 с для резины; при вулканизации в котле (общая продолжительность термообработки - 18000 с): 900 с (p от 0,24 МПа), 1200 с ($p=0,24$ МПа), 900 с (p от 0,24 до 0,39 МПа), 7200

с ($p=0,30$ МПа), 1800 с (p от 0,30 до 0,24 МПа), 600 с ($p=0,24$ МПа), 600 с (p от 0,24 до 0,20 МПа), 3600 с ($p=0,20$ МПа), 1800 с (p 0,20 до 0 МПа).

В необходимых случаях резины крепили к металлу через эбонитовый подслои.

Расчетно-экспериментальные исследования осуществлялись по классическим методам, на основе ГОСТов и СТ РФ [48 – 56, 144, 229]. Каждый эксперимент проводился в соответствии с методикой (рис. 4.2 – 4.4).

Перед проведением экспериментов по методикам, представленным на рис. 4.2 – 4.4, эластомерные обкладки соединялись с металлической основой или друг с другом методом горячего крепления [29, 32, 62, 74, 79, 170, 173, 194] в различных вулканизационных аппаратах [12, 58, 78, 96, 103, 147, 159, 196, 221]. Конвективная вулканизация эластомерных покрытий резинометаллических изделий проводилась в котле, в псевдооживленном инертном зернистом теплоносителе и методом простой конвекции.

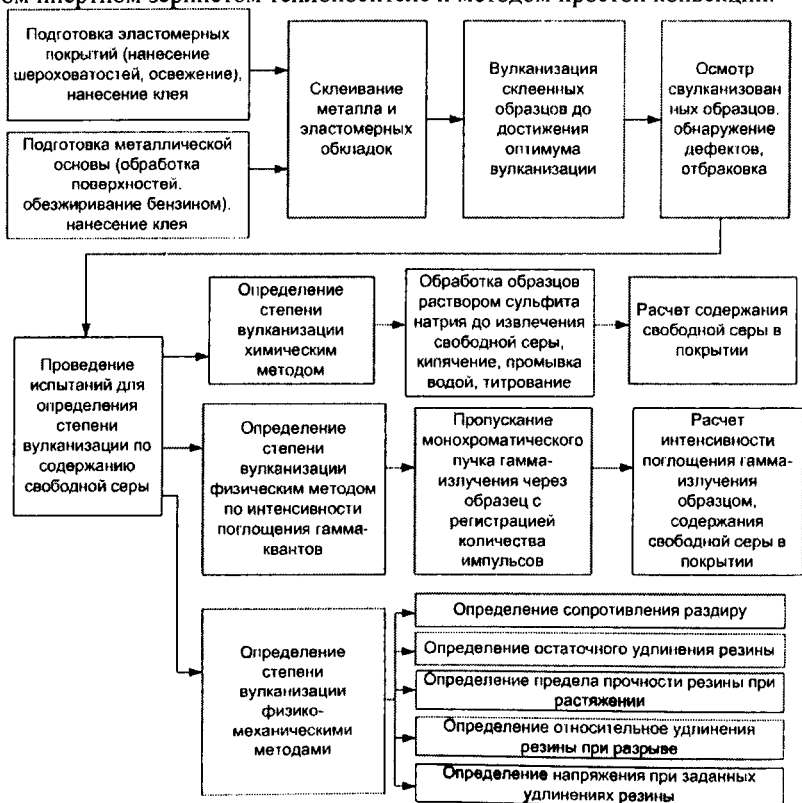


Рис. 4.2. Методика проведения экспериментов по определению степени вулканизации гуммировочных покрытий резинометаллических изделий



Рис. 4.3. Методика проведения экспериментов по исследованию химической стойкости гуммировочных покрытий в агрессивных средах



Рис. 4.4. Методика проведения экспериментов по определению прочности крепления гуммировочных покрытий

В котле гуммированные объекты вулканизовали под давлением ост-рого насыщенного пара по режиму, применяемому для гуммирования серийных аппаратов и деталей химических производств: подъем давления от 0,24 МПа в течение 900 с, вулканизация при $p=0,24$ МПа – 1200 с, подъем давления от 0,24 до 0,39 МПа – 900 с, вулканизация при $p=0,30$ МПа – 7200 с, снижение давления от 0,30 до 0,24 МПа – 1800 с, вулканизация при $p=0,24$ МПа – 600 с, снижение давления от 0,24 до 0,20 МПа – 600 с, охлаждение при $p=0,20$ МПа – 3600 с, снижение давления от 0,20 до 0 МПа – 1800 с. Максимальная температура вулканизации в котле 418 К, общая продолжительность термообработки – 18 000 с.

Вулканизация эластомерных обкладок в псевдоожигенном инертном зернистом теплоносителе и методом простой конвекции осуществлялась на установке периодического действия [170].

В качестве инертного зернистого теплоносителя использовались шлаковые шарики диаметром 0,5 ... 1,5 мм, плотностью 2800 кг/м³. Ожигающим агентом являлся горячий воздух. Инертный зернистый теплоноситель подбирался таким образом, чтобы в рабочих условиях он не вступал в реакцию с ингредиентами резины и клея и обеспечивал интенсивный перенос тепловой энергии от нагревателя к поверхности гуммировочного покрытия. Кроме того, при вулканизации эластомерных покрытий на металлических слоях нельзя допускать загрязнения поверхности металла и резиновой обкладки зернистым материалом [44]. Для этого использовались сыпучие материалы, удовлетворяющие таким требованиям, как дешевизна, доступность, высокая механическая прочность, термостойкость и др.

Для достижения максимальных коэффициентов теплоотдачи частицы должны иметь шарообразную форму, гладкую поверхность, значительную плотность.

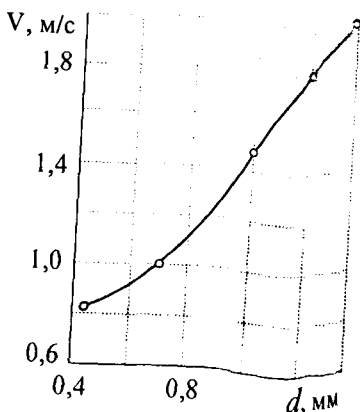
Оптимальная скорость воздуха газового потока $v_{\text{опт}}$ (рис. 4.5), которая наряду с размером твердых частиц инертного зернистого теплоносителя является важным фактором, влияющим на интенсивность теплообмена между поверхностью изделия и псевдоожигенным слоем, может быть найдена из уравнения: $Re_{\text{опт}}=0,12Ar^{0,58}$, ($500 < Ar < 183000$).

Для расчета максимальных коэффициентов теплоотдачи использовано уравнение:

$$\alpha_{\text{max}} = 1,23 \rho_{\text{ТВ}}^{0,22} \lambda_{\Gamma}^{0,67} d^{-0,34} \left[\frac{c_{\Gamma}^{0,33} \rho_{\Gamma}^{0,11}}{v_{\Gamma}^{0,11}} \right].$$

Кроме того, максимальный коэффициент теплоотдачи может быть найден из зависимости на рис. 4.6.

Рис. 4.5. Зависимость оптимальной скорости воздуха от размера частиц инертного теплоносителя



Вулканизация гуммировочных покрытий резинометаллических изделий методом простой конвекции проводилась в установке периодического действия [170], из реакционной камеры которой удалялся инертный зернистый теплоноситель.

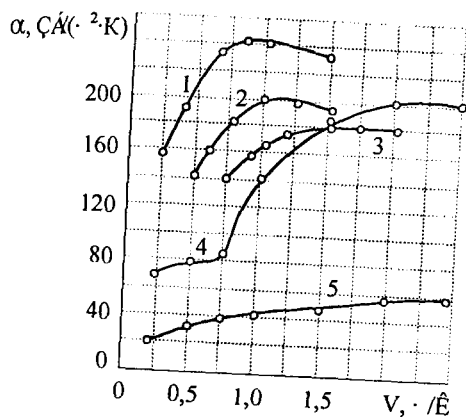


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха и размера частиц: 1, 2, 3, 4 – вулканизация в псевдоожигенном слое инертного зернистого теплоносителя; 5 – конвективная вулканизация; размер частиц, мм: 1 – 0,425; 2 – 0,7; 3 – 1,0; 4 – 1,4; $H_0 = 120$ мм

В процессе вулканизации образцов постоянно отслеживалась температура внутри покрытия. Изменение температуры по толщине эластомерной обкладки, в стальной слое и окружающей среде контролировались электронными потенциометрами типа КВТ. Измерение температур производилось с помощью хромель-копелевых термопар ХК. Расчет погрешности измерений термопарами из-за потерь теплоты через термопару теплоотводом, из-за охлаждения измеренного участка изделия и нагрева термопары проводили по методике [5, 106, 203, 224]. Продолжительность испы-

таний определяли временем достижения установившегося теплового состояния, когда температуры во всех контролируемых точках стабилизировались. Такое состояние соответствует тепловому равновесию резинометаллического образца и характеризует начало наиболее теплонапряженного режима вулканизуемых обкладок.

Термопары устанавливали перед вулканизацией обкладок между слоями, на стыках соседних слоев эластомеров и на стыке обкладок с металлическим слоем [170].

Подготовка поверхностей металла и эластомерной обкладки, покрытие изделий эластомерами во всех трех сериях эксперимента (в котле, в инертном зернистом теплоносителе, методом простой конвекции) одинаковы. Поверхность металла очищали от загрязнения и обезжиривали бензином БР-1, обрабатывали стальной дробью для полного удаления ржавчины и окалины и создания шероховатой поверхности с целью увеличения адгезии эластомерных материалов к металлу. Подготовку для гуммирования эластомера и покрытие им металла проводили традиционным промышленным способом [29, 32, 74, 88, 119, 148, 170].

Проверку качества резиновых и эбонитовых обкладок на отсутствие в них сквозных проколов, трещин, микропор и других дефектов проводили при помощи искрового индуктора [79, 88, 163, 170].

4.2. Влияние характера вулканизационных структур на физико-химические, механические, прочностные и эластические свойства гуммировочных покрытий

Для нахождения количественных характеристик прочностных свойств гуммировочных покрытий был применен физико-механический метод, который позволяет определять упруго-прочностные свойства при растяжении по показателям: прочность при растяжении (сопротивление разрыву), относительное удлинение при разрыве, напряжение при заданном удлинении.

Сущность метода заключается в растяжении образцов с постоянной скоростью до разрыва и измерении силы при заданных удлинениях и момент разрыва и удлинения образца в момент разрыва.

При вулканизации одних и тех же эластомерных покрытий разными системами образуются продукты с различным сопротивлением разрыву при одинаковом количестве эластически эффективных цепей (таблица, рис. 4.7, 4.8).

Более заметные различия наблюдаются в случае эластомерных покрытий на основе СКС, когда сопротивление разрыву меняется с 2 МПа для тиурамного эластомера СКС-30А до 52 МПа для эластомера СКС-30-1, содержащего 5% метакриловой кислоты. При этом «мгновенный» молекулярный

ный вес каучука в оптимальности прочности для серных вулканизаторов СКС-30А составляет 70200, а покрытий из СКС-30-1 – 52000.

Из приведенных данных следует, что в общем случае разрушающее напряжение при одинаковом содержании «активной» части сетки определяется характером вулканизационных структур. Последние по влиянию на прочность располагаются в следующий ряд: солевые связи $> -C-S_x-C- > -C-S-C- > -C-C-$, где $x > 1$ [14, 19, 43, 57, 63, 72, 73, 84, 85, 118, 137, 186]. Обычно сопротивление разрыву резин, полученных вулканизацией серой ускорителями, тем больше, чем меньше отношение сера : ускоритель.

Эта зависимость сохраняется при испытаниях до 373 К. При этом лишь наблюдается перемещение оптимальной густоты сетки в область большей густоты ($c \ 8 - 12 \cdot 10^{-5}$ до $24 \cdot 10^{-5}$ моль/мл).

Таблица

Сопротивление разрыву эластомерных покрытий марок 4849 (НК) при содержании различных типов поперечных связей

Состав вулканизирующей группы (в вес. ч.) и условия вулканизации	Тип поперечных связей	Концентрация эффективных цепей $1/M_c \cdot 10^5$ моль/мл	«Мгновенный» молекулярный вес M_{rT}	Сопротивление разрыву, МПа
ДФГ 1,0 Сера 2,0 Окись цинка 5,0 Стеариновая кислота 2,0	$-C-S_x-C-$	17,1 20,5	71200 70000	25,7 27,0
Сантокур 0,8 Сера 2,0 Окись цинка 5,0 Стеариновая кислота 2,0	$-C-S_x-C-$	20,5	18900	29,0

В вулканизатах, образованных одним типом связи, прочность определяется долей эластически эффективной части сетки [14, 72, 73, 84, 137, 186].

Описанная зависимость между характером вулканизационных структур и прочностными свойствами покрытий показывает, что гибкие и относительно легко перегруппировывающиеся связи типа солевых, комплексных и полисульфидных ($-C-S_x-C-$) обеспечивает более высокую статическую прочность эластомерной обкладки при нормальных условиях (температура и скорость деформации). Это положительное влияние относительно слабых легко перегруппировывающихся связей объясняется тем, что они способствуют диссипации местных перенапряжений и облегчают ориентацию главных цепей с образованием (в пределе) кристаллических областей. В то же время наличие более прочных связей ($-C-C-$, $-C-S-C-$) обеспечивают сохранение целостности сетки гуммировочного покрытия.

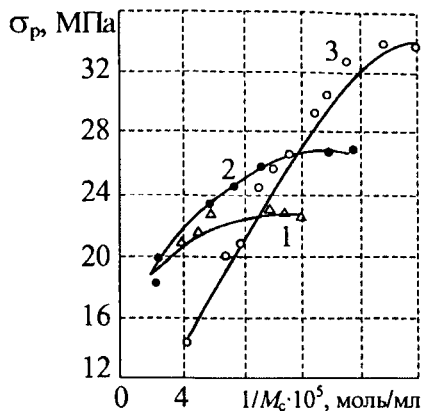


Рис. 4.7. Зависимость сопротивления разрыву от густоты сетки гуммировочных покрытий марок 4849 (НК) ($T = 293$ К):
 1 – МБТ + сера; 2 – ДФГ + сера;
 3 – сантокур + сера

Эффект перегруппировки показан [84, 85, 118, 186] в опытах релаксации напряжения солевых вулканизатов карбоксилатного каучука: при падении напряжения до 0 число цепей сетки и исходный молекулярный вес M_0 не менялись. В гуммировочных покрытиях, содержащих полисульфидные связи, в условиях многократных деформаций и релаксации напряжения при повышенных температурах наблюдается распад их и восстановление в виде узлов с тем же или меньшим содержанием атомов серы в связях. Выше было показано, что при комнатной температуре под действием многократных деформаций и больших сдвиговых деформаций наблюдаются реакции обмена полисульфидных связей.

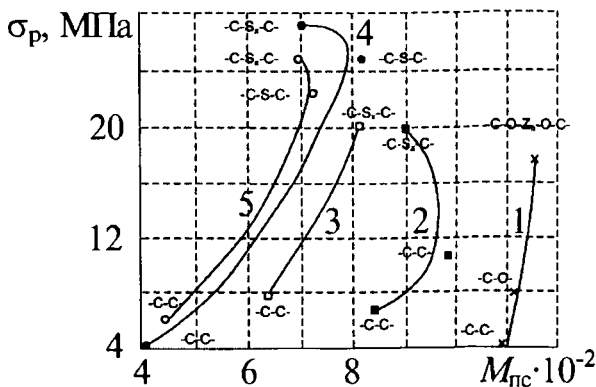


Рис. 4.8. Зависимость сопротивления разрыву от «мгновенного» молекулярного веса гуммировочных покрытий марок 4849 (НК): 1 – $1/M_c \cdot 10^5$ моль/мл – 2,2 – 2,8; 2 – 7,3 – 7,5; 3 – 11,3; 4 – 19 – 20; 5 – 16,5

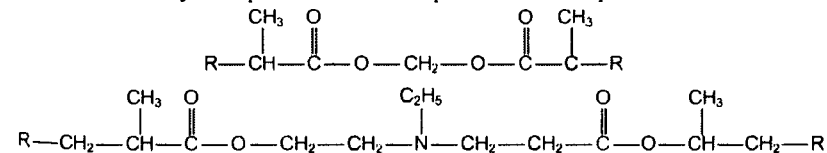
Наряду с прочностью (энергией), подвижностью и способностью поперечных связей к перегруппировкам существенное влияние на подвижность ближайших участков цепей должны оказывать структура и геометрия узлов. Ближайшие к вулканизационным узлам участки молекулярных цепей обладают меньшей подвижностью; они подобно концевым участкам цепей не входят в состав «активной» части сетки.

Согласно классическим представлениям химии взаимодействие между связями возможно только через одну σ -связь. Однако современной экспериментальной и теоретической химией установлены взаимодействия в структурах, размеры которых велики по сравнению с межатомными расстояниями в молекулах [14, 19, 73, 84, 85, 186]. Это взаимодействие обусловлено электронным обменом или делокализацией электронов между отдельными слабо связанными центрами.

Чем больше и жестче узлы, тем в большей степени уменьшается активная часть сетки вулканизата. Положительное влияние полисульфидных связей, возможно, объясняется не только их подвижностью и способностью к перегруппировкам, но и тем, что в этом случае вместо одного тетрафункционального узла образуются два трифункциональных узла, соединенных подвижной цепочкой $-S-S_x-S-$. Такие полисульфидные связи обладают малой термохимической устойчивостью, что снижает стабильность вулканизатов к длительным термомеханическим воздействиям.

Поэтому представляется, что сетки, образованные длинными и термохимически устойчивыми связями, должны обеспечить высокие прочностные характеристики и высокую долговечность резин. Такого рода сетки изучаются на примере бутадие-стирольного каучука, вулканизованного этиленгликоль-бис-метакрилатом и ди- и триметакрилатом триэтанолamina [43, 57, 73, 74].

В этом случае предполагается образование поперечных связей типа



где R — углеводородный радикал.

Полученные эластомерные покрытия характеризуются высокой устойчивостью узлов и цепей сетки и малой долей физической релаксации.

Анализируя графические зависимости, представленные на рис. 4.9, можно сделать вывод о том, что ненаполненные эластомеры с длинноцепочечными поперечными связями отличаются повышенными прочностью, модулями и относительным удлинением.

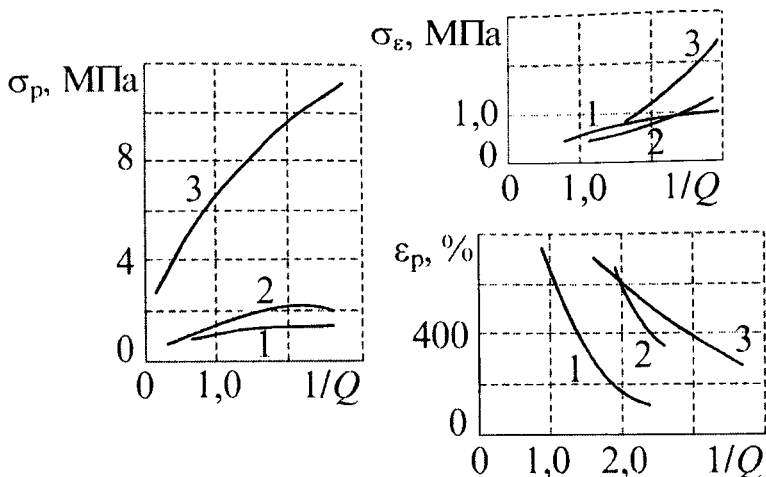


Рис. 4.9. Свойства гуммировочных покрытий марок 10670 (СКС-30АРК), полученных при вулканизации: 1 — перекисью дикумила; 2 — сантокурор и серой; 3 — этиленгликоль-бис-метакрилатом

Было установлено благоприятное влияние наличия в структуре эластомерного покрытия связей различных типов. Слабые и легко перегруппирующиеся связи способствуют диссипации локальных перенапряжений и облегчают ориентацию главных цепей с образованием (в пределе) кристаллических областей. Более прочные связи сохраняют целостность сетки вулканизата при больших значениях деформации и повышенных температурах. Правильность сформулированного положения была подтверждена сравнением прочности серных, радиационных и терморadiационных гуммировочных покрытий на основе натурального каучука, а также покрытий на основе бутадиеи-стирольного каучука, полученного при совместном действии окислов металлов и излучения.

Опыты показали, что серный вулканизат с оптимальной густотой сетки имел сопротивление разрыву 27 МПа, радиационный — 10 МПа, а терморadiационный — 34 МПа. При этом густота поперечных связей в оптимуме прочности увеличивалась приблизительно в 2 раза. Увеличению прочности терморadiационных вулканизатов способствует также повышение доли эластически эффективных цепей в сетке, поскольку при облучении в присутствии серы процессы деструкции протекают в меньшей степени, чем при облучении без серы.

На примере гуммировочных покрытий, содержащих полисульфидные связи, радиационных покрытий, содержащих связи $-S-S-$, и терморadiационных покрытий, содержащих связи $-S-S-$ и $-S-S_x-S-$ в различ-

ных соотношениях, установлена взаимосвязь структуры вулканизационной сетки и эластических свойств покрытий [43, 57, 73, 74].

В результате проведенных исследований выяснены условия образования структур различного типа, определяемые химическим составом и строением эластомера, составом вулканизирующей группы, методом и условиями вулканизации. Данные об устойчивости вулканизационных структур под влиянием нагревания, механического и термоокислительного воздействия определяют работоспособность резин в условиях эксплуатации. Таким образом, очевидна зависимость прочностных и эластических свойств вулканизатов и их устойчивости при термических, химических и механических воздействиях от состава и строения вулканизационных сеток.

На основании полученных данных могут быть сформулированы общие пути получения резин с желаемыми физико-химическими и техническими свойствами. Пределы их изменений для разных типов связей различны и определены на основании проведенных исследований, в соответствии с которыми можно рационально подходить к разработке рецептуры резин и к технологии получения конкретных резин. При этом необходимо учитывать требования, обусловленные режимом их работы.

Представляет интерес изменение физико-химических и механических свойств гуммировочных покрытий при прогреве в вулканизационных аппаратах конвективного типа. Объектами исследования являлись гуммировочные покрытия на основе СКИ-3 + СКМС-50РП.

При этом определяли нагрузку при разрыве P и относительную релаксацию напряжения Δt образцов, прогретых в течение разного времени при температуре 403 К. Величину Δt вычисляли как отношение вращающих моментов M''/M' (где M'' и M' – вращающие моменты, характеризующие напряжение сдвига в материале после деформирования на заданную величину при релаксации в течение заданного времени и в режиме знакопеременной деформации соответственно).

Структурные изменения покрытий оценивали по степени сшивания γ , активной доле сетки V_a , общему числу цепей $1/M_c$, числу активных цепей $1/M_c'$ и числу шитых цепей $1/M_{nc}$; образование сетки контролировали по равновесной степени набухания H эластомерных образцов, протекание химического процесса при вулканизации – по изменению содержания связанной серы $S_{связ}$.

Изменение исследуемых параметров гуммировочных покрытий на основе СКИ-3 + СКМС-50РП в процессе прогрева показано на рис. 4.10, также приведена кривая $M(\tau)$ кинетики ее вулканизации.

На кривой кинетики вулканизации гуммировочных покрытий можно выделить четыре области: область I (АБ), характеризующаяся постоянством момента сопротивления сдвигу M ; область II (БВ), в которой величина M резко возрастает.

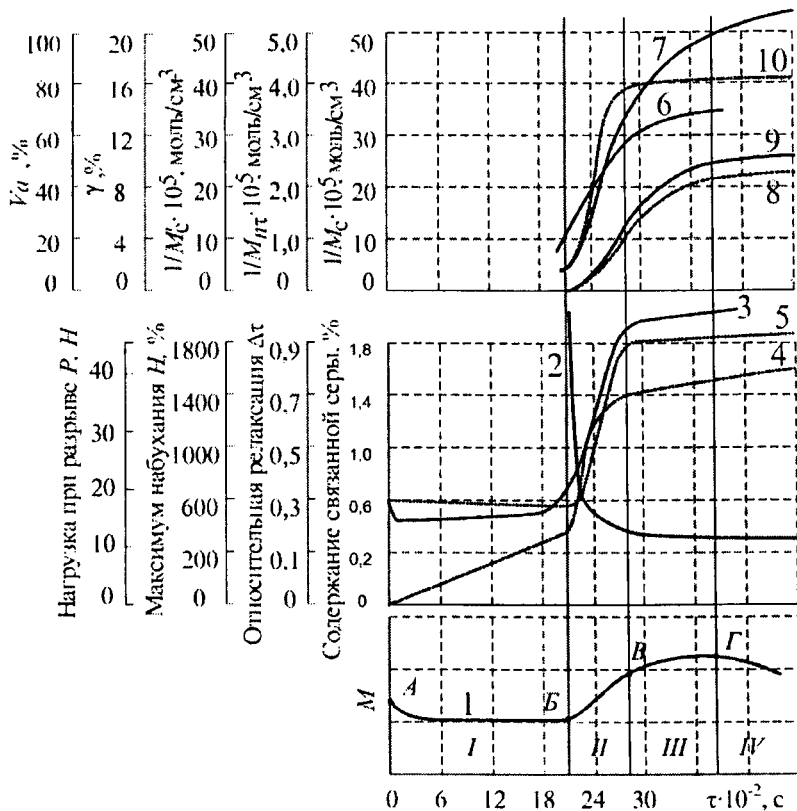


Рис. 4.10. Изменение изучаемых параметров гуммировочных покрытий марок 1626 (СКИ-3 + СКМС-50РП): 1- момент сопротивления сдвигу M ; 2 – максимум набухания H , %; 3 – нагрузка при разрыве P , МПа; 4 – содержание связанной серы $S_{\text{связ}}$, %; 5 – относительная релаксация напряжения Δt ; 6 – число сшитых цепей $1/M_{\text{пс}}$, моль/см³; 7 – степень сшивания γ , %; 8 – число активных цепей $1/M_c$, моль/см³; 9 – общее число цепей $1/M_c$, моль/см³; 10 – активная доля сетки V_a , %

Область III (ВГ), характеризующаяся уменьшением скорости изменения момента сопротивления сдвигу с достижением максимального его значения; область IV (за точкой Г), в которой наблюдается реверсия или плато вулканизации и реверсия.

Анализируя представленные данные, видно, что в области I возрастает лишь величина $S_{\text{связ}}$, значения Δt и P практически не изменяются, а

остальные параметры не могут быть определены; область II характеризуется чрезвычайно резким изменением всех без исключения параметров; в области III практически завершается изменение Δt , P , $S_{\text{связ}}$, H , V_a и продолжают возрастать величины $1/M_{\text{нт}}$, $1/M_c$, $1/M_s$, γ ; в области IV практически заканчивается изменение всех показателей.

Результаты испытания показывают, что в области II происходит основное изменение физического состояния материала с формированием пространственной сетки. В момент, соответствующий точке В (точка перегиба кривой), практически уже образуется вулканизат, на что указывает ярко выраженная высокоэластичность материала, характеризуемая параметрами Δt и V_a . В области III физическое состояние материала почти не изменяется, а лишь продолжается уплотнение пространственной сетки (возрастание величин $1/M_c$, $1/M_s$, γ). Таким образом, точка перегиба кривой кинетики вулканизации (точка В) разделяет участок БГ этой кривой на две характерные области (II и III), обычно рассматриваемые как одна стадия вулканизации.

Установленная закономерность позволяет в случае необходимости заканчивать процесс вулканизации изделий не в момент, соответствующий точке Г кривой $M(\tau)$, как это принято на практике, а значительно раньше.

4.3. Влияние степени вулканизации на качество гуммировочных покрытий

Одним из показателей качества гуммировочных покрытий является степень вулканизации покрытия.

Определение степени вулканизации обкладок проводили химическим способом [144, 229, 254], механическими испытаниями [208, 216] и с помощью интенсивности поглощения гамма-квантов [63, 155, 165, 170].

Химический метод. Для определения свободной серы в резинах использован сульфитный метод, основанный на обработке измельченной резины раствором сульфита натрия. После связывания избытка сульфита натрия формальдегидом образующийся тиосульфат натрия определяют иодометрически. Многочисленные усовершенствования метода привели к сокращению продолжительности определения, улучшению экстрагирования и устранению влияния на иодометрическое титрование серосодержащих ускорителей и продуктов их разложения.

Метод состоит в извлечении свободной серы раствором сульфита натрия и визуальном иодометрическом титровании образовавшегося тиосульфата. Мешающее влияние ускорителей устраняется адсорбцией их на активном угле.

Содержание свободной серы x (в %) вычисляют по формуле:

$$x=0,0032(V-V_0)K \cdot 100/g,$$

где 0,0032 – масса серы, соответствующая 1 мл точно 0,1 н. раствора иода, г; V , V_0 – объемы 0,1 н. раствора иода, израсходованного на титрование пробы и в холостом опыте, мл; K – поправочный коэффициент для приведения концентрации раствора иода к точно 0,1 н; g – навеска резины, г.

По результатам экспериментов были построены кинетические кривые изменения содержания свободной серы в гуммировочных покрытиях марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера исследования качества вулканизации гуммировочных покрытий на рис. 4.11 показано содержание агента вулканизации в эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) во время вулканизации.

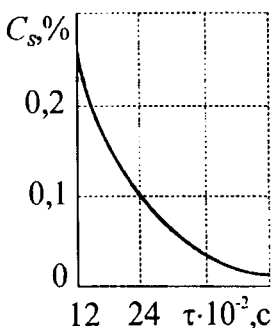


Рис. 4.11. Кинетические кривые изменения содержания свободной серы в покрытии из эбонита марки 1752 (НК+СКБ) при $T=428$ К, $\delta_{ст}=1,0$ мм

Содержание вулканизирующего агента постепенно уменьшается с увеличением времени прогрева эластомерного покрытия, подчиняясь экспоненциальному закону. Зная необходимую величину содержания серы для получения покрытий с заданными свойствами, эксплуатационными и качественными показателями, на основании построенных кинетических зависимостей можно определять продолжительность вулканизации. Полученные графические зависимости (рис. 4.11) целесообразно использовать при проектировании режимов вулканизации гуммировочных покрытий.

Физический метод. Для быстрого и более точного контроля степени вулканизации эластомерных обкладок проведен анализ качества обкладок по интенсивности поглощения гамма-излучения.

Для испытаний применялась малогабаритная установка [170, 243], состоящая из источника гамма-излучения, счетчика ВС-4, являющегося детектором излучения, пересчетного прибора ПС-20, двух кабелей, соеди-

няющих счетчик с пересчетным прибором. Испытуемое резинометаллическое изделие помещалось между источником и детектором излучения.

При определении степени вулканизации эластомерного покрытия по интенсивности поглощения излучения в первую очередь необходимо выбрать источник гамма-излучения, наилучшим образом удовлетворяющий требованиям метода, который обеспечивал бы наилучшую чувствительность и точность определения степени вулканизации и плотности твердого материала.

В качестве источника жесткого, почти монохроматического гамма-излучения с большим периодом полураспада использован радиоактивный изотоп кобальта ^{60}Co , который обеспечивает хорошую точность радиоизотопного метода определения степени вулканизации эластомерных обкладок.

В основе метода физического анализа по интенсивности поглощения обкладками гамма-излучения лежит зависимость эластомера от степени его вулканизации или от количества прореагировавшего агента вулканизации, содержащегося в эластомере. Гамма-кванты, проходя через эластомер, взаимодействуют с его электронами и ядрами атомов, поглощаются ими или отклоняются от первоначального направления, рассеиваются. Ослабление интенсивности монохроматического пучка гамма-излучения, проходящего через материал произвольной толщины, подчинено экспоненциальному закону:

$$I^* = I_0 \exp(-\mu \delta_{06}),$$

где I_0 – интенсивность излучения без поглощения покрытием; I^* – интенсивность излучения после прохождения через слой поглотителя; μ – линейный коэффициент ослабления, зависящий от структуры и плотности вулканизата; δ_{06} – толщина поглотителя.

Методика опыта. Определяли количество импульсов N_0 , зарегистрированных низковольтным газовым счетчиком; для исключения бета-излучения перед счетчиком помещали алюминиевый фильтр. Колебания числа импульсов гамма-излучения, поглощенных покрытием в единицу времени, учитывали при статистической обработке результатов измерений. Точность данного способа измерения определяли средним квадратичным отклонением σ по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (N_0 - N)^2}{n - 1}},$$

где N_0 – отдельный результат испытания; N – среднее арифметическое результатов испытания; n – общее число испытаний.

Относительная погрешность измерений гамма-квантов равна:

$$X = \sigma / N.$$

По результатам экспериментов были построены кинетические кривые зависимости параметров эластомерных обкладок от степени вулканизации резинометаллических объектов с покрытиями марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера на рис. 4.12 показано изменение интенсивности поглощения гамма-излучения, содержания свободной серы и сопротивления разрыву для гуммировочных покрытий марок 1752 и 1814.

Анализируя кривые на рис. 4.12, делаем вывод о том, что в начале вулканизации интенсивность поглощения гамма-излучения резко возрастает до определенного, далее почти не изменяющегося значения. Содержание свободной серы в начале процесса наоборот резко падает, оставаясь затем почти неизменным. Прямые линии для этих двух зависимостей означают, что основные физико-химические процессы вулканизации прошли, и наступил период динамического равновесия между структурированием и деструкцией в гуммировочных покрытиях. Физико-механические показатели, зависящие от количества прореагировавшего агента вулканизации, также в начале вулканизации резко меняются, а затем незначительно.

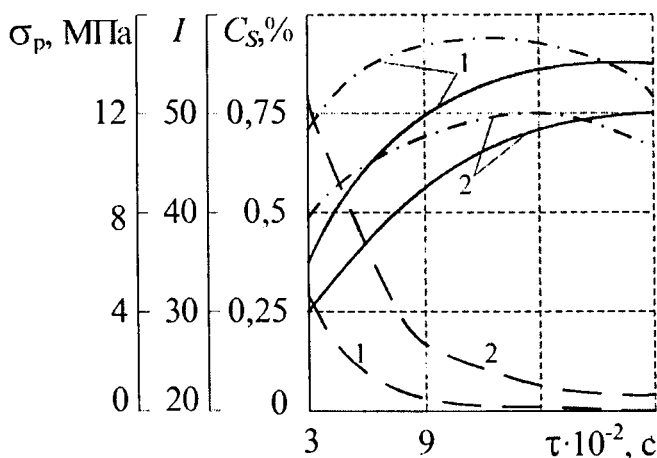


Рис. 4.12. Кинетические кривые зависимости параметров гуммировочных покрытий из эбонитов марок 1 – 1752 (НК+СКБ); 2 – 1814 (СКБ); $\delta_{об} = 4,5 \text{ мм}$; $\delta_{ст} = 1,0 \text{ мм}$; — — интенсивность поглощения гамма-излучения; - - - - содержание свободной серы; - · - · - сопротивление разрыву

Кривые $I = f(\tau)$ соответствуют кривым кинетики вулканизации по содержанию свободной серы, определенной химическим методом. Таким образом, по интенсивности поглощения гамма-излучения гуммировочным

покрытием можно судить не только о массе прореагировавшего агента вулканизации, но и о физико-механических показателях готового резинометаллического изделия.

Физико-механический метод. Для определения содержания и распределения по толщине гуммировочного покрытия не вступившего в реакцию агента вулканизации можно применять физико-механический метод, который позволяет находить прочность при растяжении (сопротивление разрыву), относительное удлинение при разрыве, относительное удлинение после разрыва, напряжение при заданном удлинении. Метод описан в предыдущем параграфе 4.2.

Проведены испытания на растяжение образцов гуммировочных покрытий марок ИРП-1214 (НК), 8ЛТИ (СКС-30), ИРП-1256 (БК) и др. Результаты испытаний представлены графическими зависимостями сопротивления разрыву (рис. 4.13), напряжения при заданном удлинении (рис. 4.14) и относительного удлинения при разрыве (рис. 4.15) от времени вулканизации обкладок на основе каучуков различных типов.

Анализ кинетических кривых показал, что прочность при разрыве с течением времени вулканизации сначала резко возрастает, затем постепенно понижается для покрытий на основе НК и СКС, в то время как сопротивление разрыву для обкладок из бутилкаучука остается постоянным. Величина напряжений при заданном удлинении в гуммировочных покрытиях растет с увеличением продолжительности вулканизации, а относительное удлинение при разрыве – падает.

Таким образом, изменение различных свойств в зависимости от степени вулканизации подчиняется следующим закономерностям: с увеличением времени прогрева эластомерных обкладок значения показателей прочности проходят через максимум, удлинение при разрыве – через минимум.

Поэтому понятие оптимума вулканизации весьма условно и применяют понятие технического оптимума – периода вулканизации, когда достигается наилучшая совокупность выбранных в данном случае свойств гуммировочных покрытий. Свойства выбираются в зависимости от назначения и условий эксплуатации покрытий и резинометаллических изделий.

Для проверки адекватности представленных в п.3 математических моделей массопереноса свободной серы в обкладках проведены экспериментальные исследования конвективной вулканизации гуммировочных покрытий резинометаллических изделий с помощью химического метода, описанного выше. Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 4.16 и 4.17.

Распределение вулканизирующего агента в гуммировочном покрытии при вулканизации без металла равномерно по слоям обкладки. Прогрев внешних слоев происходит быстрее, поэтому сера быстрее плавится и вступает в реакцию с каучуком и другими составляющими резиновой смеси.

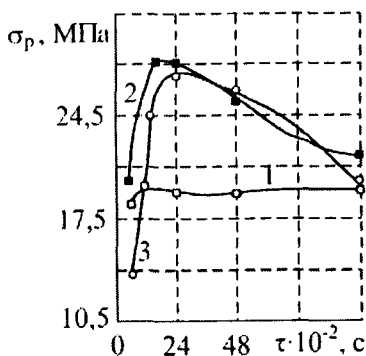


Рис. 4.13. Кинетическая зависимость сопротивления разрыву (пределу прочности при разрыве) от продолжительности вулканизации гуммировочных покрытий марок: 1 – ИРП-1256 (БК), $T = 423$ К; 2 – ИРП-1214 (НК), $T = 413$ К; 3 – 8ЛТИ (СКС-30), $T = 423$ К

Рис. 4.14. Кинетическая зависимость напряжения при удлинении 300% от продолжительности вулканизации гуммировочных покрытий марок: 1 – ИРП-1256 (БК), $T = 423$ К; 2 – ИРП-1214 (НК), $T = 413$ К; 3 – 8ЛТИ (СКС-30), $T = 423$ К

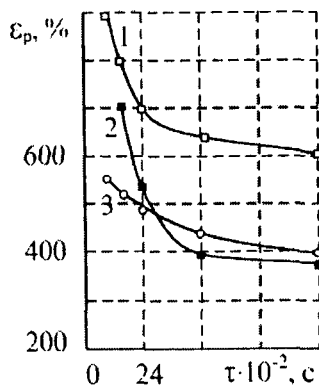
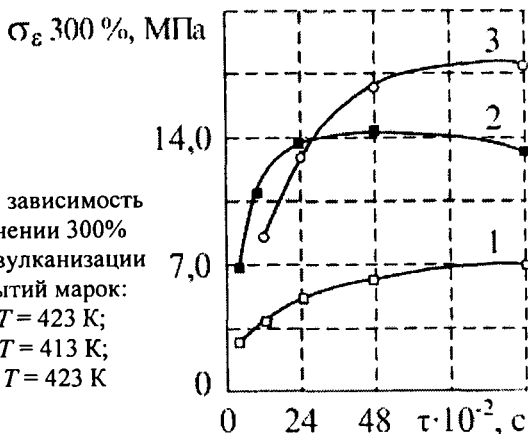


Рис. 4.15. Кинетическая зависимость относительного удлинения при разрыве от продолжительности вулканизации гуммировочных покрытий марок: 1 – ИРП-1256 (БК), $T = 423$ К; 2 – ИРП-1214 (НК), $T = 413$ К; 3 – 8ЛТИ (СКС-30), $T = 423$ К

Рис. 4.16. Кривые распределения концентрации свободной серы в эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с

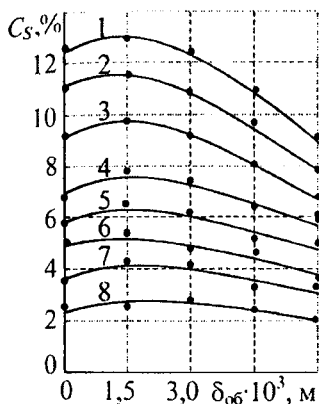
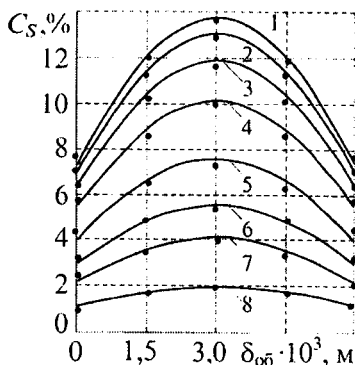


Рис. 4.17. Кривые распределения концентрации свободной серы в эбонитовом 1752 (НК+СКБ) покрытием резинометаллического изделия при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 200$ Вт/(м²·К), $D = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с; время прогрева: 1 – 30 с, 2 – 120 с, 3 – 300 с, 4 – 600 с; 5 – 1200 с; 6 – 1800 с; 7 – 2400 с; 8 – 3600 с

В результате указанных химических реакций содержание серы на внешних поверхностях меньше, чем внутри гуммировочного покрытия. По мере увеличения продолжительности вулканизации неравномерность распределения свободной серы сглаживается.

В гуммировочных покрытиях резинометаллических изделий после вулканизации также наблюдается неравномерное распределение и содержание свободной серы по толщине покрытия. Вследствие большего нагрева обкладки с внешней поверхности и отсутствии массопереноса веществ в месте крепления покрытия с металлом отмечена асимметрия полей концентрации. Экспериментальные данные и результаты математического моделирования согласуются между собой, хотя имеются отклонения в 3 - 7%.

Таким образом, определение полей концентрации позволит сократить продолжительность вулканизации, не допустить перевулканизации, ухудшения качества готовых изделий. Математические модели массопере-

носа свободной серы по толщине гуммировочных покрытий, подтвержденные экспериментально, можно положить в основу расчета тепловых режимов вулканизации.

4.4. Диффузия агрессивных сред в гуммировочные покрытия

Важными свойствами, характеризующими химическую стойкость гуммировочных покрытий в агрессивных средах, является глубина и скорость проникновения в них агрессивных жидкостей.

Был применен метод определения глубины проникновения агрессивных жидкостей (кислот) в эластомерные материалы с использованием люминесцентных индикаторов.

Люминесцентный метод анализа проницаемости кислот в гуммировочные покрытия [46, 47, 85, 87, 151] позволяет исследовать проникновение нелюминесцирующих агрессивных сред в эластомерные обкладки. С этой целью на эластомерный образец в процессе окрашивания наносят органические люминофоры пиразолинового ряда, которые под действием кислот, особенно серной и соляной, образуют соли, отличающиеся по окраске и цвету люминесценции от исходного материала.

Для получения наиболее точных результатов применяют люминофор красного свечения.

Исследуемый образец под действием указанного выше люминофора при облучении ультрафиолетовым светом имеет красное свечение. При просмотре под ультрафиолетовым светом срезов образцов после воздействия кислот красное свечение на всю глубину проникновения агрессивной жидкости в эластомерное покрытие переходит в интенсивно синее.

Образец гуммировочного покрытия вулканизованного резинометаллического изделия сначала помещается в агрессивную среду. Затем образец разрезается вдоль координаты диффузии и срез обрабатывается раствором люминесцентного индикатора. Достаточно нанести микроколичество индикатора на эластомер - $< 1 \cdot 10^{-6}$ г/см². На срезах появляется граница между окрашенной частью эластомерного покрытия, в которую проник индикатор, и неокрашенной. Изменение цвета происходит через 5 – 60 минут после нанесения индикатора на поверхность среза эластомерного покрытия.

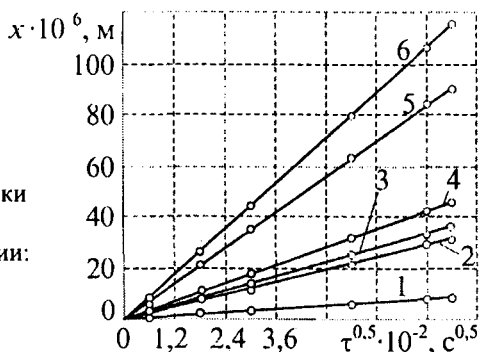
Глубина проникновения агрессивной среды в гуммировочное покрытие измеряется под микроскопом визуально с помощью окуляр-микрометра по ширине полоски с изменившимся светом люминесценции. Скорость проникновения определяется исходя из установленной глубины проникновения агрессивной жидкости за время выдержки в ней образца.

Кроме определения глубины и скорости проникновения агрессивной жидкости в гуммировочное покрытие, люминесцентный метод позволяет оценить диффузионные параметры (например, коэффициент диффузии) агрессивных сред с достаточной степенью точности.

Учитывая приведенные выше уравнения, построение кинетических зависимостей проникновения кислот в эластомерные материалы производилось в системе координат $x - \tau^{1/2}$.

На основе результатов эксперимента построены кривые проникновения кислот в резиноталлические объекты с гуммировочными покрытиями марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2256 (НК+СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера на рис. 4.18 – 4.21 приведены результаты исследования диффузии серной и соляной кислоты в эластомерное покрытие марки ИРП-1175 на основе СКН.

Рис. 4.18. Кинетическая зависимость проникновения в гуммировочное покрытие марки ИРП-1175 (СКН-18) серной кислоты различной концентрации: 1 – 15 %; 2 – 25 %; 3 – 35 %; 4 – 40 %; 5 – 60 %; 6 – 70 %; $T = 343 \text{ К}$



Диффузионные исследования проводились в условиях, наиболее характерных для исследуемого класса покрытий, а именно: для диффузии при постоянном погружении образцов покрытий непосредственно в кислоты (серная, соляная и др.) и для диапазона температур 293 – 373 К.

Характерной особенностью изучаемых систем является наличие резкой границы, отделяющей зону проникновения кислоты от исходного материала.

Положение границы достаточно стабильно во времени: после извлечения из среды и охлаждения на 303 – 313 К до комнатной температуры положение границы при хранении не менялось.

Анализ данных по кинетике движения границы проникновения кислот (рис. 4.18 – 4.21) показывает, что в исследованных системах «гуммировочное покрытие - кислота» независимо от температуры и концентрации агрессивной жидкости кинетическая зависимость глубины проникновения прямо пропорциональна времени диффузии, соответствует фиковскому закону и описывается классической зависимостью $x=f(\tau^{1/2})$. С увеличением концентрации агрессивной жидкости скорость проникновения диффузанта в покрытие увеличивается.

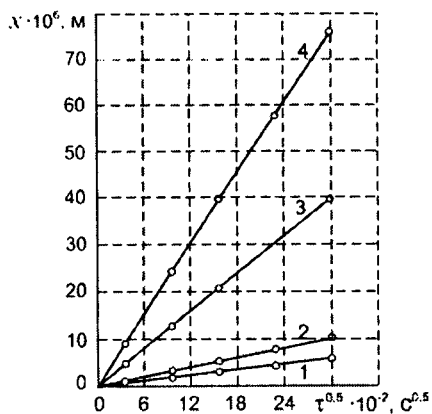


Рис. 4.19. Кинетическая зависимость проникновения в эластомерное покрытие марки ИРП-1175 (СКН-18) соляной кислоты различной концентрации: 1 - 2%; 2 - 6%; 3 - 15%; 4 - 20%; $T = 293 \text{ K}$

Рис. 4.20. Кинетическая зависимость проникновения в эластомерное покрытие марки ИРП-1175 (СКН-18) соляной кислоты различной концентрации: 1 - 5%; 2 - 10%; 3 - 15%; 4 - 20%; 5 - 25%; 6 - 30%; 7 - 33%; $T = 343 \text{ K}$

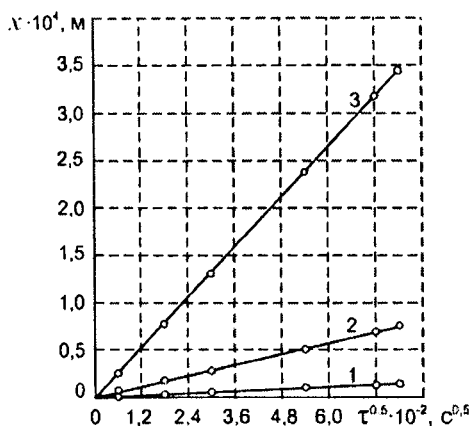
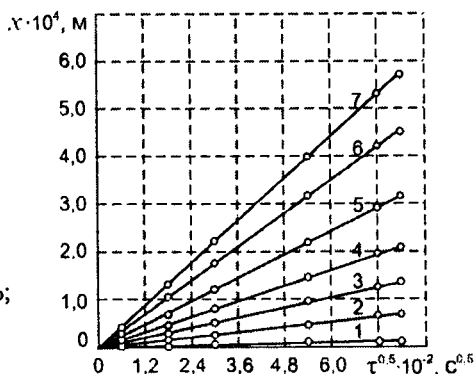


Рис. 4.21. Кинетическая зависимость проникновения 20 %-ной соляной кислоты в эластомерное покрытие марки ИРП-1175 (СКН-18) при температуре: 1 - 293 K; 2 - 343 K; 3 - 373 K

Исследования зависимости глубины проникновения кислот в эластомеры от температуры и концентрации агрессивной среды делятся на две группы.

1. Проникновение кислот в гуммировочные покрытия при различной концентрации при одних температурах диффузантов.

Рассмотрена кинетическая зависимость проникновения соляной, серной и других кислот различной концентрации (например, 5 % - 35 % - для соляной, 15 % - 70 % - для серной кислоты и др.) при одинаковых температурах (293 К, 343 К и др.).

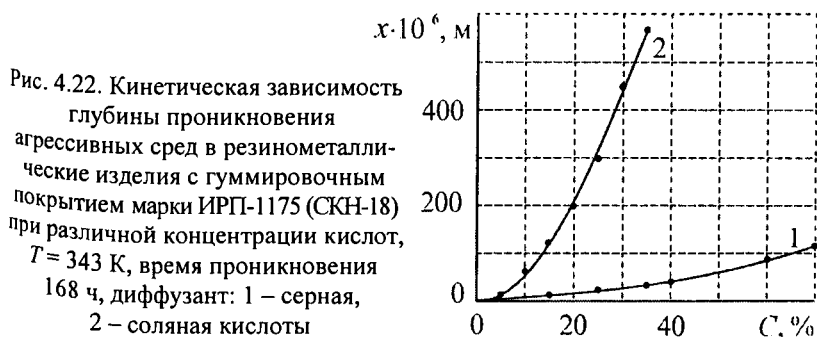
Результаты экспериментов представлены графическими зависимостями проникновения кислот в резиноталлические объекты с гуммировочными покрытиями марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2256 (НК+СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера на рис. 4.22 приведены кинетические зависимости диффузии серной и соляной кислот в эластомерное покрытие марки ИПП-1175 на основе СКН.

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод, что глубина проникновения кислоты в эластомерный материал прямо пропорционально зависит от концентрации раствора агрессивной среды. Кроме того, соляная кислота с увеличением концентрации диффундирует в эластомерный образец гораздо глубже и быстрее, чем серная, при одинаковых условиях реакции.

Замеры при эксперименте проводились через 24 ч, 72 ч, 168 ч, 336 ч, 504 ч, 672 ч и т.д.

2. Проникновение кислот в гуммировочные покрытия при одинаковой концентрации при разных температурах диффузантов.

Рассмотрена кинетическая зависимость проникновения соляной, серной и других кислот при концентрации 5 % - 70 % и температурах 293 К, 343 К и 373 К.



Результаты экспериментов представлены графическими зависимостями проникновения кислот в резинометаллические объекты с гуммировочными покрытиями марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2256 (НК+СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера на рис. 4.23 приведены кинетические зависимости диффузии соляной кислоты в эластомерное покрытие марки ИРП-1175 на основе СКН.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что глубина проникновения кислоты в материал прямо пропорционально зависит от температуры внешнего раствора агрессивной среды. Причем глубина проникновения постепенно увеличивается с возрастанием времени диффузии (рис. 4.23).

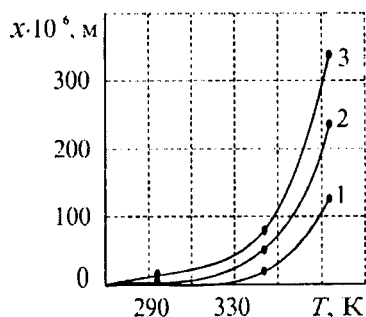


Рис. 4.23. Кинетическая зависимость проникновения соляной кислоты в резинометаллическое изделие с гуммировочным покрытием марки ИРП-1175 (СКН-18) при концентрации 20% и различных температурах и времени диффузии: 1 – 24 ч, 2 – 72 ч, 3 – 168 ч

Таким образом, процесс проникновения кислот в эластомеры характеризуется, с одной стороны, наличием резкой границы, отделяющей зону проникновения кислоты от исходного материала, а, с другой стороны, кинетика процесса во всех исследованных системах соответствует фиковскому закону диффузии вещества в эластомерное покрытие. Глубина проникновения кислот в эластомерное покрытие зависит от концентрации, температуры и времени диффузии в покрытие агрессивной среды.

Работоспособность и долговечность в агрессивных средах. На основе результатов исследований по глубине и скорости проникновения кислот в гуммировочные покрытия, возможно провести расчет долговечности покрытий в агрессивных средах с учетом влияния возрастающего напряжения на статическую усталость по принципу Бейли [35, 87, 162, 202].

Действие агрессивных сред на напряженные эластомерные покрытия ускоряет их разрушение, причем этот эффект наблюдается как при образовании трещин, так и при их отсутствии [85, 87, 202]. В обоих случаях процесс разрушения материала, очевидно, связан с постепенной потерей поверхностным слоем резины несущей способности. Если в поверхностном слое образуются трещины, то он не несет напряжения, которое распростра-

няется на уменьшенное сечение сплошной части образца [87, 202]. Если трещин не образуется, а происходит деструкция или набухание, то также можно принять (в последнем случае с некоторым приближением), что измененный слой не несет напряжения. В этих условиях процесс разрушения при постоянном начальном напряжении и воздействии агрессивной среды формально можно рассматривать как разрушение в отсутствие агрессивной среды (т.е. в воздухе), происходящее при непрерывно увеличивающемся среднем номинальном напряжении.

Проведен расчет долговечности (времени до разрыва) напряженного образца гуммировочного покрытия, находящегося в агрессивной среде, выявлены особенности разрушения в агрессивных средах и неравномерности в распределении напряжений.

При расчете по скорости диффузии агрессивной среды, вызывающей деструкцию либо набухание, или по скорости распространения фронта трещин рассчитывалась скорость уменьшения эффективной части поперечного сечения образца, т. е. зависимость действующего напряжения от времени; экспериментально определялась зависимость долговечности резины от напряжения в воздухе; использовался принцип Бейли [87, 202], заключающийся в том, что разрыв материала наступает, когда сумма относительных разрушений в нем становится равной 1.

Были взяты гуммировочные покрытия, разрушение которых в агрессивных средах определялось в основном процессами деструкции (бутилкаучук, СКФ-32 в азотной кислоте) или набухания (бутилкаучук в уксусной кислоте). Измерения проводили на приборе с фигурным рычагом типа «улитка» в условиях, когда уменьшение прилагаемого усилия компенсировало изменение поперечного сечения образца, связанное только с его удлинением. Параллельно измеряли под микроскопом границу проникновения жидкой агрессивной среды в эластомерные покрытия (рис. 4.24) по изменению окраски деградированного слоя [47, 87, 151].

В тех случаях, когда диффузия агрессивной среды сопровождалась набуханием, расчет диффузного слоя с каждой стороны образца (x) производился по формуле

$$x=e+c/2-d/2,$$

где c – толщина исходного образца; d – толщина образца после набухания; e – экспериментально определяемая толщина диффузного и набухшего слоя с одной стороны образца. Если набухание отсутствовало, то $c=d$ и, следовательно, $x=e$. Зависимость долговечности эластомерных покрытий от напряжения (при постоянном напряжении) в воздухе подчиняется уравнению [87, 202]: $\tau=B\sigma^{-n}$; для резиновых покрытий из СКФ-32 и бутилкаучука были определены значения параметров n и τ (при определенном σ) в воздухе, необходимые для расчета τ_d в агрессивной среде.

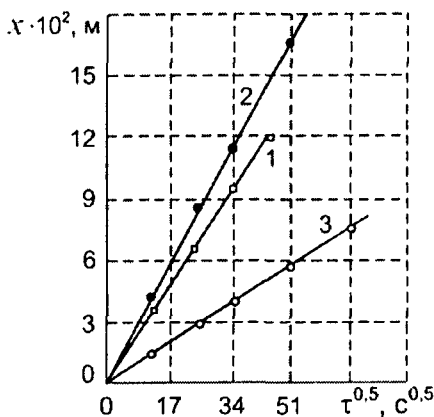


Рис. 4.24. Кинетические кривые глубины проникновения агрессивных сред в гуммировочные покрытия: 1 – ИРП-1256 (БК), диффузант – 30 %-ная уксусная кислота, $T = 318 \text{ K}$, $\sigma = 20 \text{ МПа}$; 2 – 51-1639 (БК), диффузант – 30 %-ная азотная кислота, $T = 323 \text{ K}$, $\sigma = 20 \text{ МПа}$; 3 – ИРП-1225 (СКФ), диффузант – 54 %-ная азотная кислота, $T = 333 \text{ K}$, $\sigma = 4 \text{ МПа}$

На рис. 4.24 приведены кинетические кривые глубины проникновения азотной и уксусной кислот в гуммировочные покрытия на основе фторкаучука и бутилкаучука.

Кривые диффузии хорошо описываются известным уравнением [47, 87, 151, 202]:

$$x = \frac{2D\alpha\tau}{\beta},$$

где D – коэффициент диффузии; α – концентрация среды; β – плотность реакционных центров; τ – время.

Так как глубина проникновения кислот в гуммировочные покрытия линейна во времени, то $2D\alpha/\beta = \text{const} = k$, т. е. $x^2 = k\tau$.

Полученные результаты используются для расчетов долговечности гуммировочных покрытий в агрессивных средах.

С учетом напряжения, изменяющегося во времени, по уравнению Бейли можно определить $\tau_a = \tau_{\text{раз}}$, где $\tau_{\text{раз}}$ – предельное время действия переменного напряжения, соответствующее долговечности образца (τ):

$$\int_0^{\tau_{\text{раз}}} \frac{d\tau'}{\tau(\sigma(\tau'))} = 1,$$

где $\tau(\sigma(\tau')) = B\sigma^{-n}$.

По результатам расчетов получено, что долговечность гуммировочного покрытия марки ИРП-1256 (БК) в 30 %-ной уксусной кислоте при температуре 318 К и напряжении в 20 МПа составляет $2,5 \cdot 10^2$ с (экспериментальное $\tau_a = 4,8 \cdot 10^2$ с); для покрытия 51-1639 (БК) в 30 %-ной азотной кислоте при температуре 323 К и напряжении в 20 МПа составляет $3,0 \cdot 10^3$ с (экспериментальное $\tau_a = 2,4 \cdot 10^3$ с); для покрытия ИРП-1225 (СКФ) в 54 %-

ной азотной кислоте при температуре 333 К и напряжении в 4 МПа составляет $1,3 \cdot 10^4$ с (экспериментальное $\tau_a = 4,2 \cdot 10^2$ с).

Из результатов исследования следует, что при разрушающем действии среды (БК в азотной кислоте), происходящем без образования трещин, разрушение идет под действием среднего номинального напряжения и расчетные данные совпадают с экспериментальными. При сильном набухании имеет место некоторое рассасывание местных перенапряжений и разрушение идет с меньшей скоростью, чем дает расчет (бутилкаучук в уксусной кислоте). Меньшие значения опытных данных для τ_a по сравнению с расчетом в случае разрушения резин из СКФ-32 в азотной кислоте могут служить косвенным свидетельством того, что и в этом случае в образце возникают дефекты, не обнаруживаемые визуально.

4.5. Химическая стойкость гуммировочных покрытий

Химическая стойкость, прочность крепления и прочие качественные показатели обкладок зависят от количества свободной серы и равномерности её распределения по слоям. Для сопоставления химической стойкости обкладок проведены эксперименты после конвективной вулканизации покрытий в котле, в псевдооживленном инертном зернистом теплоносителе и методом простой конвекции. Рассмотрена стойкость обкладок из эластомеров на основе каучуков НК и СКБ, СКБ, СКС, наирита, СКН, СКФ при температуре 293 К в 40 %-ной азотной, 50 %-ной уксусной, 60 %-ной серной, 33 %-ной соляной кислотах. Подготовка к испытаниям проводилась в соответствии со СТ РФ, испытания – экспрессным методом по Всероссийскому Единому Методу.

Химическую стойкость эластомеров оценивали по степени набухания образцов, по изменению внешнего вида и физико-механических показателей после набухания [41, 170, 237]. В необходимых случаях мягкую резину крепили к металлу через эбонитовый подслоя.

Испытание резины на набухание в жидкости заключается в определении веса испытываемого образца резины до и после набухания.

Весовой процент набухания H (в %) вычисляется по формуле:

$$H = (M_1 - M_0) 100 / M_0,$$

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

При испытании резины на набухание взвешивание производится с точностью до 0,001 г.

Результаты экспериментов представлены кинетическими зависимостями набухания в агрессивных средах гуммировочных покрытий марок 1976 (СКБ), 4476 (СКБ), ИРП-1025 (наирит), 1814 (СКБ), 1751 (СКБ), 1752 (НК+СКБ), 2256 (НК+СКБ), ИРП-1213 (НК), ИРП-1214 (НК) и др. В качестве примера на рис. 4.25 – 4.28 приведены кинетические кривые набухания

ния эбонитовых 1752 (НК+СКБ) и резиновых 2566 (НК+СКБ) покрытий в уксусной, соляной, серной и азотной кислотах после вулканизации в вулканизационном котле, в зернистом теплоносителе и методом простой конвекции. Исследования обкладок проведены только в тех средах, в которых они нормально работают.

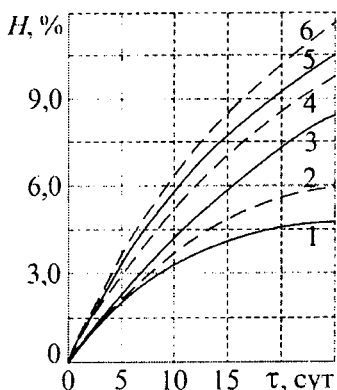


Рис. 4.25. Кинетические кривые набухания в 50 %-ной уксусной кислоте эбонитовых покрытий марки 1752 (НК+СКБ) после вулканизации: 1, 2 - в псевдооживленном зернистом теплоносителе, 3, 4 - методом простой конвекции при $T_c = 428 \text{ K}$, $\tau = 4500 \text{ с}$; 5, 6 - в котле при $T_c = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$; $\delta_{\text{ст}} = 4,0 \text{ мм}$, $\delta_{\text{об}} = 3,0 \text{ мм}$; — - учитывался массоперенос при вулканизации; - - - - не учитывался массоперенос при вулканизации

Экспериментально исследовались на химическую стойкость покрытия, вулканизация которых проводилась при учете процесса массопереноса агента вулканизации. Построенные кривые набухания гуммировочных покрытий с учетом процессов массопереноса агентов вулканизации обозначены на рис. 4.25 – 4.28 сплошными линиями. Химическая стойкость покрытий при вулканизации которых не учитывался массоперенос, взята с данных [166, 170, 175, 188] и обозначена на рис. 4.25 – 4.28 штриховыми линиями.

Рис. 4.26. Кинетические кривые набухания в 33%-ной соляной кислоте эбонитовых покрытий марки 1752 (НК+СКБ) после вулканизации: 1, 2 - в псевдооживленном зернистом теплоносителе, 3, 4 - методом простой конвекции при $T_c = 418 \text{ K}$, $\tau = 4500 \text{ с}$, 5, 6 - в котле при $T_c = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$; $\delta_{\text{ст}} = 3,0 \text{ мм}$, $\delta_{\text{об}} = 6,0 \text{ мм}$; — - учитывался массоперенос при вулканизации; - - - - не учитывался массоперенос при вулканизации

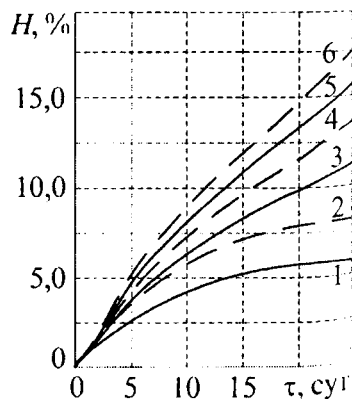
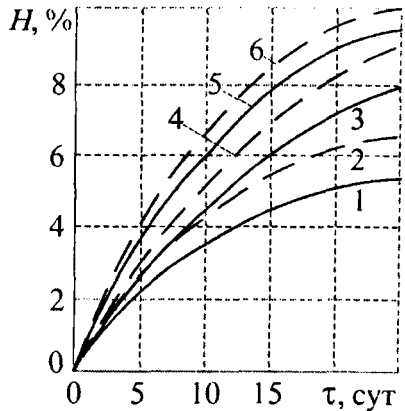


Рис. 4.27. Кинетические кривые набухания в 60 %-ной серной кислоте резиновых покрытий марки 2566 (НК+СКБ) после вулканизации: 1, 2 - в псевдоожигенном зернистом теплоносителе, 5, 6 - методом простой конвекции при $T_c = 423$ К, $\tau = 2400$ с, 3, 4 - в котле при $T_c = 418$ К, $\tau = 18000$ с; $\delta_{ст} = 3,0$ мм, $\delta_{об} = 3,0$ мм; — учитывался массоперенос при вулканизации; - - - не учитывался массоперенос при вулканизации



Важно отметить, что, сравнивая результаты экспериментов набухания в кислотах гуммировочных покрытий после вулканизации с учетом массопереноса свободной серы по слоям агента вулканизации и без него, качество покрытий различно. Обкладки, полученные при тепловых режимах прогрева с учетом миграции свободной серы во время вулканизации, меньше набухают в агрессивных средах, а, следовательно, их работоспособность и эксплуатационные показатели сохраняются дольше.

Таким образом, необходимо подчеркнуть, что химическая стойкость является откликом не только на распределение температуры в гуммировочных покрытиях, но и на распределение свободной серы.

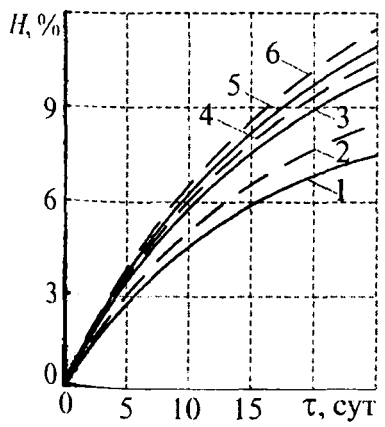


Рис. 4.28. Кинетические кривые набухания в 40 %-ной азотной кислоте резиновых покрытий марки 2566 (НК+СКБ) после вулканизации: 1, 2 - в псевдоожигенном зернистом теплоносителе, 5, 6 - методом простой конвекции при $T_c = 428$ К, $\tau = 2400$ с, 3, 4 - в котле при $T_c = 418$ К, $\tau = 18000$ с; $\delta_{ст} = 4,0$ мм, $\delta_{об} = 4,5$ мм; — учитывался массоперенос при вулканизации; - - - не учитывался массоперенос при вулканизации

Кроме того, на рис. 4.29 приведены кинетические кривые набухания гуммировочных покрытий не только в кислотах (фосфорной, серной), но и в воде, которая также является агрессивной средой.

Химическая стойкость гуммировочных покрытий в агрессивных жидкостях характеризуется не только набуханием, но и глубиной проникновения диффузанта в обкладку. В связи с этим на рис. 4.30 для сравнения приведены кинетические кривые изменения эксплуатационных свойств покрытий в процессе диффузии агрессивных сред в покрытие.

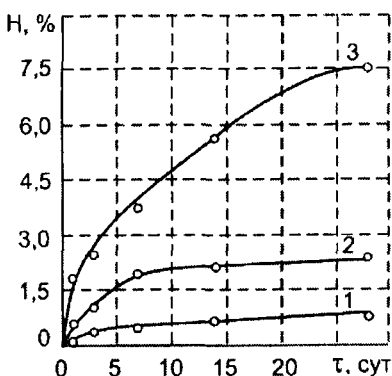
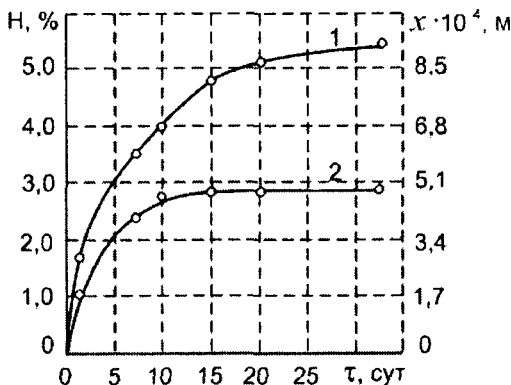


Рис. 4.29. Кинетика набухания гуммировочных покрытий марки ИРП-1175 (СКН-18) в агрессивных средах: 1 – 10 %-ная фосфорная кислота H_3PO_4 ; 2 – 15 %-ная серная кислота H_2SO_4 ; 3 – вода, $T = 293\text{ K}$

Рис. 4.30. Сравнительная кинетика изменения набухания (кривая 1) и глубины проникновения (кривая 2) 30 %-ной соляной кислоты в гуммировочное покрытие марки ИРП-1175 (СКН-18), $T = 358\text{ K}$

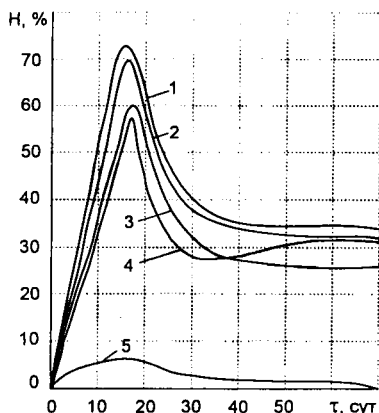


Можно отметить, что проникновение соляной кислоты в гуммировочное покрытие резко возрастает в течение 15 суток нахождения обкладки в агрессивной среде, а затем глубина проникновения кислоты становится постоянной ($\approx 0,0005\text{ м}$). В отличие от проницаемости, процесс набухания не останавливается во время проведения эксперимента, постоянно растет и достигает 5,5 %.

Кроме того, было проведено исследование химической стойкости отдельных слоев многослойных эластомерных покрытий марок 1751, 1752, 1390, 2023, 1976, 2566 и др. на основе каучуков различных типов. Резиновые слои крепились к металлу через эбонитовый подслоя. В качестве агрессивных сред были выбраны азотная, серная, соляная, уксусная, фосфорная и другие кислоты.

На рис. 4.31 отражены кинетические кривые набухания в уксусной кислоте резинового покрытия марки 2023 (1-4 слои) + 1751 (5 слой).

Рис. 4. 31. Кинетические кривые набухания слоев гуммировочного покрытия марки 1751 (СКБ) (1,5 мм) + 2023 (СКМС-30 АРКМ-15) (1,5 мм × 4) в 50 %-ной уксусной кислот ($\delta_{ст} = 2,0$ мм):
1 – 4 - резиновые слои;
5 – эбонитовый подслоя



Набухание многослойного покрытия (рис. 4.31) происходит следующим образом. Внешние резиновые слои резко набухают за 15 суток на величину 55 – 75 %, в то время как набухание внутреннего эбонитового слоя за 70 суток испытания не превышает 7 %. Химическая стойкость резины через 30 суток стабилизируется и составляет 28 – 39 %.

Такой характер диффузии агрессивных сред в эластомерные покрытия объясняется повышенной химической стойкостью эбонита к воздействию наиболее активных агрессивных сред, распределением температур по толщине покрытия в процессе вулканизации (внутренний слой меньше подвержен перевулканизации) и четырьмя слоями находящейся перед ним резины. Более низкая химическая стойкость внешних резиновых слоев (особенно 1-го и 2-го слоя) связана с деструкцией под действием высоких температур нагревающей среды.

Таким образом, основными факторами, определяющими химическую стойкость гуммировочных покрытий в агрессивных средах, несомненно, являются температура вулканизации и содержание и распределение вулканизирующего агента по толщине покрытия.

4.6. Адгезия гуммировочных покрытий

Прочность крепления эластомерных покрытий к металлу и эластомерных слоев между собой изучали по изменению параметров сопротивления отрыву, сдвигу, расслаиванию и отслаиванию [15, 16, 20, 27, 37, 42, 50, 55, 65, 67, 105, 108, 188, 207, 216, 241] и параллельно с определением степени вулканизации при тех же режимах термообработки по методике ВЕМ и по интенсивности поглощения гамма-квантов [170].

Определение прочности связи резины с металлом методом отрыва заключается в приложении усилия, необходимого для разрушения связи между склеенными поверхностями резины и металла путем растяжения металлического образца резины, основания которого приклеены к металлическому диску. Усилие, вызывающее отрыв, действует перпендикулярно поверхности отрыва.

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

$$\sigma_{отр} = \frac{F_{отр}}{S},$$

где $F_{отр}$ – нагрузка, при которой происходит отрыв, Н; S – площадь образца, м².

Определение прочности связи резины с металлом при сдвиге. Испытание резины на отрыв при сдвиге заключается в параллельном смещении одной металлической пластинки относительно другой, причем между ними находится привулканизованный к ним образец резины. Необходимое для отрыва резины от металла усилие служит характеристикой прочности связи резины с металлом при деформации сдвига.

Прочность связи резины с металлом σ_c выражается величиной нагрузки в МПа, необходимой для отрыва при сдвиге резиновой части образца от металлической поверхности, и вычисляется по формуле:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S},$$

где F_c – нагрузка, вызвавшая отрыв резины от металла при сдвиге, Н; S – площадь поверхности отрыва, м².

Определение прочности связи резины с металлом при отслаивании. Испытание резины на отслаивание от металла заключается в определении средней величины нагрузки, вызывающей отслаивание резиновой полоски определенных размеров от металлической поверхности.

Прочность связи резины с металлом при отслаивании $\sigma_{отсл}$ в Н/м вычисляется по формуле:

$$\sigma_{отсл} = \frac{F_{k1} + F_{k2} + \dots + F_{kn}}{b \cdot n},$$

где $F_{k1}, F_{k2}, \dots, F_{kn}$ – средняя нагрузка, при которой происходит расслаивание каждого образца в отдельности, Н; n – число испытанных образцов; b – ширина образца резины, м.

Определение прочности связи между слоями резины с резиной при расслаивании заключается в расслоении испытываемого образца на разрывной машине и в вычислении нагрузки в килограммах, отнесенной к средней ширине образца в сантиметрах.

Делением средней нагрузки на образец на среднюю ширину образца получают показатель сопротивления расслоения σ_p в Н/м:

$$\sigma_p = \frac{F_{cp}}{b},$$

где F_{cp} – нагрузка, подсчитанная как среднее арифметическое из 5 пар записанных максимальных и минимальных показателей по шкале, Н; b – ширина испытываемого образца, м.

Результаты экспериментов представлены кинетическими кривыми прочности связи эластомерных покрытий с металлом при отрыве, сдвиге и отслаивании и кривыми прочности связи слоев эластомерного покрытия при расслаивании после вулканизации резинометаллических изделий различными способами (в котле, методом простой конвекции, в псевдоожигенном инертном зернистом теплоносителе). Адгезия исследовалась в гуммировочных покрытиях марок 1976 (СКБ), 1814 (СКБ), 2566 (НК+СКБ), 1752 (НК+СКБ), 10931 (СКМС), ИРП-1025 (наирит), ИРП-1390 (СКМС-30РП), 51-1639 (бутилкаучук) и др. В качестве примеров приведены результаты исследований адгезии в покрытиях на рис. 4.32 - 4.35.

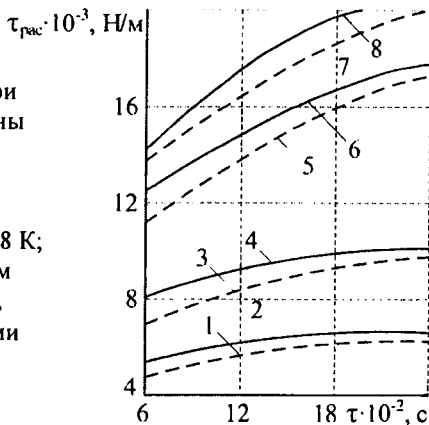


Рис. 4.32. Кривые прочности при расслаивании покрытия из резины марки 2566 (НК+СКБ) после вулканизации: кривые 1, 2, 3, 4 – методом простой конвекции, при $T_c = 418$ К, $T_c = 428$ К; 5, 6, 7, 8 – в инертном зернистом теплоносителе, при $T_c = 418$ К, $T_c = 428$ К; — — при вулканизации учитывался массоперенос; - - - - без учета процесса массопереноса

В экспериментальных исследованиях сравнивался учет процесса массопереноса при вулканизации. Сплошными линиями на графиках 4.32 - 4.35 обозначены прочности крепления покрытий после вулканизации, в течение

которой учитывался массоперенос; штриховыми линиями обозначены прочность крепления в покрытиях без учета массопереноса (данные [170]).

Зависимости прочности связи при расслаивании слоев покрытий из эластомеров марок 2566 (НК+СКБ) и др. от времени вулканизации при учете процесса массопереноса доказывает правильность взгляда на образование связи между слоями одного и того же эластомера как на диффузионный процесс тем, что прочность двух приведенных в контакт слоев эластомера всегда увеличивается со временем, причем прочность связи растет сначала быстро, а затем медленнее (рис. 4.32).

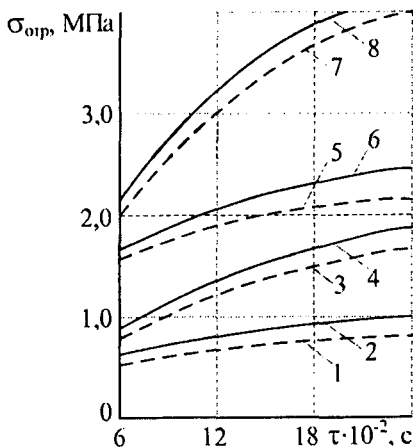
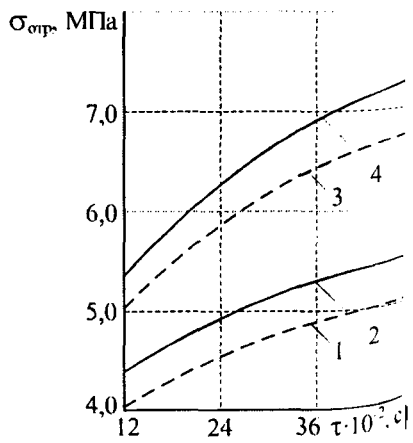


Рис. 4.33. Кинетические кривые нарастания прочности связи резины марки 2566 (НК+СКБ) (кривые 3, 4, 7, 8) и марки 1976 (СКБ) (кривые 1, 2, 5, 6) с металлом при отрыве после вулканизации:
1, 2, 5, 6 – методом простой конвекции, $T_c = 428$ К;
3, 4, 7, 8 – в инертном зернистом теплоносителе, $T_c = 428$ К; — при вулканизации учитывался массоперенос; - - - без учета процесса массопереноса

Рис. 4.34. Кинетические кривые нарастания прочности связи эбонитового покрытия марки 1752 (НК+СКБ) с металлом при отрыве после вулканизации в среде инертного зернистого теплоносителя:
1, 2 – $T_c = 413$ К;
3, 4 – $T_c = 428$ К;
— при вулканизации учитывался массоперенос;
- - - без учета процесса массопереноса



Испытания гуммировочных покрытий на прочность крепления к металлу при сдвиге представлены кинетическими зависимостями на рис. 4.35. Сравнивая результаты экспериментов по адгезии слоев гуммировочных покрытий после вулканизации с учетом массопереноса по слоям агента вулканизации и без него, установлено различное качество покрытий.

Обкладки, полученные при тепловых режимах прогрева с учетом миграции свободной серы во время вулканизации, имеют большую прочность крепления слоев эластомера, а, следовательно, их работоспособность и эксплуатационные показатели выше и лучше.

Следовательно, адгезия гуммировочных покрытий зависит не только от температуры и продолжительности вулканизации, но и от распределения свободной серы по толщине покрытий.

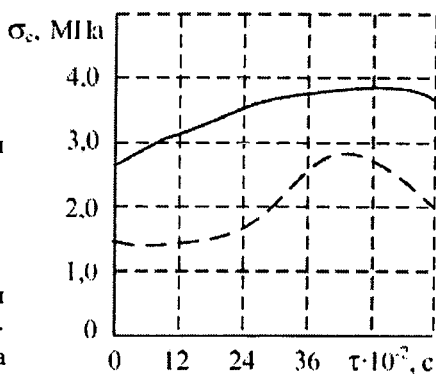


Рис. 4.35. Кинетические кривые нарастания прочности связи гуммировочного покрытия марки 51-1574 (СКИ-3 + СКМС-30РП) с металлом при сдвиге после вулканизации в среде инертного зернистого теплоносителя, $T_c = 418 \text{ К}$: — - при вулканизации учитывался массоперенос; - - - - без учета процесса массопереноса

Так как в результате вулканизации параллельно протекают процессы структурирования и деструкции в эластомере, то очевидно, что продолжительность вулканизации и количество и распределение свободной серы влияют на характер пространственной сетки вулканизата, а степень поперечного сшивания – на механические и физико-механические свойства эластомерного покрытия, прочность и химическую стойкость.

Таким образом, положительные результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показывают, что постоянный контроль температуры и учет массопереноса свободной серы по слоям покрытий, рассчитанные на основе полученных математических моделей, позволяет сократить время вулканизации и оптимизировать весь процесс термообработки, сохраняя качество гуммированных объектов на высоком уровне.

4.7. Определение коэффициентов диффузии агрессивных сред в гуммировочные покрытия

Перспективы использования гуммировочных материалов в химическом машиностроении тесным образом связаны с постоянным совершенствованием наших знаний о физико-механических свойствах и механизме разрушения этих материалов, критериях их работоспособности, а также с развитием методов прочностных расчетов конструкций. Расчету полей напряжений, необходимых для оценки прочности гуммированных аппаратов, должен предшествовать расчет полей концентрации жидких сред в гуммировочном покрытии, который сам по себе представляет сложную проблему.

Определение коэффициентов диффузии жидкостей в гуммировочные материалы по измерению электропроводности образцов. Коэффициент диффузии агрессивных жидкостей в эластомерные материалы обычно определяют по убыли веса образца, погруженного в эти жидкости. Однако этот метод применим лишь для тех эластомеров, которые не растворяются даже частично в этой жидкости [46, 47, 143, 202, 223, 246, 252, 256], иначе уменьшение веса образца из-за растворения искажает получаемые результаты. В таких случаях определить поглощаемость жидкости эластомером и коэффициент диффузии с помощью весовых измерений невозможно. Кроме того, для повышения надежности весовых измерений пользуются весьма массивными образцами. В соответствии со стандартом поглощение жидкости эластомерными материалами определяется на образцах размерами $120 \times 15 \times 10$ мм, что значительно увеличивает продолжительность опыта. Для полного насыщения образца требуется несколько дней, а для материалов с низкой проницаемостью – несколько месяцев.

Отмеченных недостатков не имеет метод определения поглощаемости и коэффициента диффузии жидкостей в эластомерные материалы, основанный на измерении электропроводности образцов в виде пленок или тонких пластинок [223, 252, 256]. Малая толщина образцов дает возможность сократить продолжительность опыта до нескольких минут или часов (время насыщения образца уменьшается пропорционально квадрату толщины образца). Убыль веса образца при погружении в жидкость в данном случае не препятствует нахождению искомых характеристик. По ходу опыта возможна регистрация измеряемых величин с помощью обычных самопишущих приборов для записи силы тока.

Рассматриваемый метод основан на том, что удельное объемное электросопротивление эластомеров падает с увеличением концентрации диффундирующей жидкости. По мере проникновения жидкости в образец ее концентрация в отдельных слоях возрастает, что обуславливает падение электросопротивления образца в целом. Зная зависимость силы тока, протекающего через образец, от времени [$I=f(\tau)$], а также характер сопротив-

ления полимера в зависимости от концентрации жидкости, легко рассчитать коэффициент диффузии. При движении тока по слоям с различной концентрацией перпендикулярно к плоскости образца общее сопротивление образца определяется, как сопротивление электроцепи с последовательно включенными сопротивлениями. Переходя к бесконечно малым толщинам слоев, получаем

$$R = \int_0^H r dx, \quad (4.1)$$

где r — удельное объемное сопротивление материала в точке образца с координатой x ; H — толщина образца.

Сила тока, протекающего через образец, определяется по закону Ома

$$I = \frac{v}{R} = \frac{v}{\int_0^H r dx}, \quad (4.2)$$

где v — падение напряжения в образце.

Аппроксимируем зависимость удельного объемного сопротивления отдельного элементарного слоя образца от концентрации линейной функцией вида:

$$r = r_0 - k(c - c_0), \quad (4.3)$$

где $k = (r_0 - r_H)/(c_H - c_0)$; c_0, r_0 — начальная концентрация жидкости в образце и соответствующее удельное объемное сопротивление; c_H, r_H — то же для состояния насыщения.

После подстановки в уравнение (4.3) и интегрирования получаем выражение для общего сопротивления образца:

$$R = r_0 H + k c_0 H - k \bar{c} H, \quad (4.4)$$

где \bar{c} — средняя интегральная концентрация жидкости в образце. В предположении $D = \text{const}$ [223].

$$\theta = \frac{\bar{c} - c_H}{c_0 - c_H} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (4.5)$$

$$\text{где } B_n = \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2}; \mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}; Fo = \frac{D\tau}{(H/2)^2}.$$

Если до опыта жидкость не попадала в образец, то $c_0 = 0$ и выражение (4.4) принимает вид:

$$R = r_H H \left[1 + \left(\frac{r_0}{r_H} - 1 \right) v \right]. \quad (4.6)$$

Соответственно для силы тока получаем

$$I = \frac{v}{r_H H} \cdot \frac{1}{1 + \zeta v}, \quad (4.7)$$

где $\zeta = \left(\frac{r_0}{r_H} - 1\right)$.

Зависимость функции $f = \frac{1}{1 + \zeta v}$ от Fo для различных отношений r_0/r_c показана на рис. 4.36.

Если в процессе диффузии образец не растворяется и не взаимодействует с диффундирующей жидкостью, коэффициент $k_0 = v/(r_c H)$ остается постоянным на протяжении всего опыта. Выражение (4.7) может быть записано в безразмерной форме:

$$\frac{I}{I_\infty} = \frac{1}{1 + \zeta v} = f, \quad (4.8)$$

где I_∞ - сила тока, протекающего через образец при полном насыщении ($Fo \rightarrow \infty, v \rightarrow 0$).

Это дает возможность при постановке опыта не измерять абсолютные значения v, r_c, r_H . При обработке результатов опыта достаточно построить зависимость $f = f_1(Fo)$.

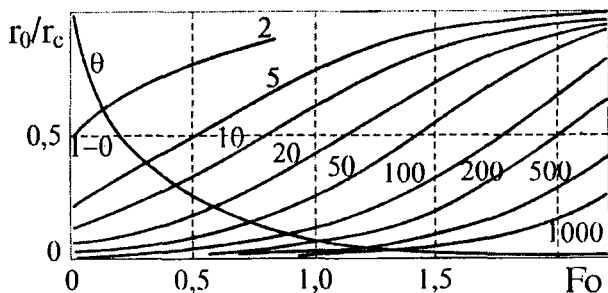


Рис. 4.36. Графики функции f для различных относительных сопротивлений

Для $Fo > 0,1$ с высокой степенью точности можно записать:

$$\bar{v} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D \tau}{4 R^2}}. \quad (4.9)$$

Из выражений (4.8) и (4.9) следует, что

$$\bar{v} = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{1}{f} - 1 \right) = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D \tau}{4 R^2}} \quad (4.10)$$

После логарифмирования:

$$\lg \left(\frac{1}{f} - 1 \right) = \lg \zeta + \lg \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4} \frac{\tau}{R^2} D. \quad (4.11)$$

Таким образом, чтобы определить коэффициент диффузии по данным измерения сопротивления образца в процессе его насыщения, следует построить в полулогарифмических координатах зависимость (4.11), положив для простоты

$$\lg \zeta = \lg \frac{8}{\pi^2} = 0.$$

Тангенс угла наклона прямолинейного участка зависимости (4.11) в безразмерных координатах при $Fo > 0,1$ является коэффициентом $-\frac{\pi^2 D}{4 R^2}$ равенства (4.11). Из этого условия находим D :

$$D = -\frac{4R^2}{\pi^2} \frac{d}{d\tau} \lg \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \quad (4.12)$$

Данный метод дает возможность измерять коэффициенты диффузии растворов кислот и щелочей в различные эластомерные материалы, включая те, по отношению к которым метод весовых измерений неприменим. Результаты измерения электросопротивления можно также использовать для количественной оценки стойкости эластомеров в агрессивных средах.

Весовой метод. Воздействие жидких сред вносит трудности в расчеты элементов резинометаллических конструкций, так как влияние сред, как правило, не ограничивается поверхностным воздействием, а имеет объемный характер. Жидкие среды могут интенсивно диффундировать во внутренние слои материалов, изменяя их химический состав, вызывая набухание. Скорости процессов диффузии внешних сред в гуммировочные покрытия весьма малы; поэтому изменение физико-механических свойств по объему конструкции имеет нестационарный характер и может продолжаться в течение всего срока её эксплуатации. Уравнения массопереноса не всегда линейны, если внешняя среда представляет собой раствор кислот или щелочей, то раствор и растворитель диффундируют вглубь эластомера отдельно, что затрудняет расчет. Даже при отсутствии химического взаимо-

действия жидкости с материалом массоперенос осложняется влиянием полей напряжений на характеристики массопереноса.

В работах [12, 13, 85 – 87, 145, 150, 198] было показано, что существенные изменения механизма разрушения эластомерных материалов при совместном действии жидкой среды и напряжения обусловлено адсорбционными и сорбционными процессами. Сочетание органических и неорганических компонентов материала создает условия для избирательного действия жидких сред диффундировать как в напряженный, так и в ненапряженный материал; критериями этой способности являются коэффициенты диффузии и проницаемости.

Для определения коэффициентов диффузии существует несколько методов [46, 47, 143, 202, 223, 246, 252, 256], большинство из которых требуют изготовления образцов в виде пленки толщиной в несколько десятков долей миллиметра, что делает их малоприменимыми при изучении диффузии молекул жидких сред в эластомерные связующие материалы, поэтому коэффициенты диффузии жидких сред для этих материалов чаще всего оценивают сорбционным методом по кинетике поглощения среды образцами, изготовленными в виде пластин толщиной более 1-2 мм.

Динамический сорбционный метод базируется на решении дифференциального уравнения диффузии Фика

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (4.13)$$

которое при выборе соответствующих начальных и граничных условий для случая плоского образца сводится к решению уравнения вида

$$Q_\tau / Q_\infty = 1 - (8 / \pi^2) e^{-\frac{\pi^2 D \tau}{4a^2}}, \quad (4.14)$$

где принимается во внимание только первый член сходящегося ряда и где Q_∞ - привес образца в равновесном состоянии; Q_τ - привес образца за время τ ; D - коэффициент диффузии, см²/ч; a - половина толщины образца, см.

Метод расчета D и Q_∞ основан на совместном решении уравнения для двух значений времени ($\tau_2=2\tau_1$) и не требует экспериментального определения равновесного поглощения Q_∞ , связанного со значительными затратами времени. Однако при сравнении кинетики сорбции, зафиксированной в опытах и рассчитанной по ускоренному методу, оказывается, что он дает несколько завышенные значения D .

Довольно точный метод вычисления коэффициента диффузии основан на использовании уравнения диффузии Фика для нестационарного потока при двухстороннем процессе, полученного путем интегрирования при

заданных начальных и граничных условиях уравнения (4.13) в следующем виде

$$Q_{\tau} = Q_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{4\pi^2 D \tau}{l^2}} \right), \quad (4.15)$$

где l — толщина образца. Здесь коэффициент диффузии определяется из выражения

$$D = \lambda l^2 / 14400 \pi^2, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (4.16)$$

где

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^n \left[\left(-\ln \frac{Q_{\infty} - Q_i}{Q_{\infty}} \right) \tau_i \right]}{\sum_{i=0}^n \tau_i^2}, \text{ л/ч}. \quad (4.17)$$

Из анализа формул (4.16) и (4.17) можно сделать вывод, что применение этого метода связано с определенными трудностями: с необходимостью экспериментального нахождения величины равновесного поглощения Q_{∞} , что, как указывалось ранее, требует весьма длительного времени, и необходимостью выполнения довольно громоздких вычислений, особенно при расчете параметра λ для больших значений τ .

Рассмотрен метод определения коэффициента диффузии D и величины равновесного поглощения Q_{∞} , который характеризуется удовлетворительной точностью. В основе метода положен способ решения уравнения (4.15) для двух значений $\tau_2 = 2\tau_1$:

$$Q_{\tau_1} = Q_{\infty} (1 - e^{-\lambda \tau_1}), \quad (4.18)$$

$$Q_{\tau_2} = Q_{\infty} (1 - e^{-2\lambda \tau_1})$$

где

$$\lambda = (4\pi^2 D / l^2), \quad (4.19)$$

Q_{τ_1} и Q_{τ_2} — величины поглощения жидкой среды соответственно за время τ_1 и τ_2 . Для решения системы уравнений введем обозначения:

$$e^{-\lambda \tau_1} = x, \quad e^{-2\lambda \tau_1} = x^2, \quad (4.20)$$

и перепишем выражения (4.18) в виде:

$$Q_{\tau_1} = Q_{\infty} (1 - x) \quad Q_{\tau_2} = Q_{\infty} (1 - x^2) \quad (4.21)$$

Взяв отношение уравнений (4.21) и проведя несложные преобразования, получим формулу для определения x :

$$\begin{aligned} Q_{\tau_1} / Q_{\tau_2} &= (1 - x^2 / 1 - x) = 1 + x, \\ x &= (Q_{\tau_2} / Q_{\tau_1}) - 1 \end{aligned} \quad (4.22)$$

откуда

Подставив выражение (4.22) в первое уравнение (4.20) и выполнив логарифмирование, найдем параметр λ :

$$e^{-\lambda\tau_1} = \frac{Q_{\tau_2}}{Q_{\tau_1}} - 1, \quad -\lambda\tau_1 = \ln\left(\frac{Q_{\tau_2}}{Q_{\tau_1}} - 1\right), \quad \lambda = -\frac{\ln[(Q_{\tau_2}/Q_{\tau_1}) - 1]}{\tau_1}. \quad (4.23)$$

В результате совместного решения (4.19) и (4.23) получим

$$D = -\frac{\ln[(Q_{\tau_2}/Q_{\tau_1}) - 1]l^2}{4\pi^2\tau_1}, \quad \text{см}^2/\text{ч}, \quad (4.24)$$

где величины Q_{τ_1} , Q_{τ_2} и τ_1 взяты из эксперимента, l - толщина образца.

Путем совместного решения уравнений (4.21) и (4.22) определим

$$Q_x = \frac{Q_{\tau_1}}{2 - (Q_{\tau_2}/Q_{\tau_1})} \quad (4.25)$$

или

$$Q_\infty = \frac{Q_{\tau_2}}{1 - [(Q_{\tau_2}/Q_{\tau_1}) - 1]^2}. \quad (4.26)$$

Таким образом, рассмотренный выше метод позволяет с достаточной для практических целей точностью определить величины коэффициента диффузии D и равновесного поглощения Q_∞ жидких сред для плоских образцов из эластомерного материала толщиной от двух и более миллиметров, а также не требует значительных затрат времени при экспериментальном определении Q_∞ . Из анализа уравнений (4.24), (4.25), (4.26) вытекает, что этот метод дает удовлетворительные результаты при соблюдении неравенства $1 < Q_{\tau_1}/Q_{\tau_2} < 2$; если же $Q_{\tau_1} = Q_{\tau_2}$, достигается полное насыщение материала жидкой средой и дальнейшее поглощение не происходит, а при $Q_{\tau_1} = 2Q_{\tau_2}$, кривая поглощения не может быть аппроксимирована экспоненциальным законом, что находится в противоречии с теорией диффузии.

5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1. Постановка задачи

Инженерный расчет строится на базе приведенных в п.2 и п.3 решений задач массопереноса и теплопереноса с учетом физических свойств металлической основы и эластомерного покрытия, а также на основе экспериментальных данных в работах [162, 170, 174, 177, 193].

1. Исходными данными для расчета являются: a – ширина реакционной камеры вулканизационного аппарата; b – высота реакционной камеры; $\delta_{ап}$ – толщина стенки корпуса реакционной камеры; $\delta_{из}$ – толщина слоя изоляции реакционной камеры вулканизационного аппарата.

2. Данные по материалам, используемым в многослойном резино-металлическом изделии: $\rho_{ст}$, $\rho_{об}$, $\rho_{кл}$, $\rho_{из}$ – соответственно плотности материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции; $c_{ст}$, $c_{об}$, $c_{кл}$, $c_{из}$ – соответственно теплоемкости материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции; $\lambda_{ст}$, $\lambda_{об}$, $\lambda_{кл}$, $\lambda_{из}$ – соответственно теплопроводности материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции; $a_{ст}$, $a_{об}$, $a_{кл}$, $a_{из}$ – соответственно температуропроводности материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции; T_c , T_0 , $T_{ст}$, $T_{об}$, $T_{кл}$, $T_{из}$ – соответственно температуры окружающей среды, начальная, материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции; q – тепловая мощность внутренних источников теплоты.

3. Данные по теплообмену: α – коэффициент теплоотдачи; A , $A_{ап}$, $A_{ст}$, $A_{об}$, $A_{кл}$, $A_{из}$ – соответственно площади теплоотдающей поверхности, поверхности аппарата реакционной камеры, материала стальной подложки, эластомерной обкладки, клеевых швов, теплоизоляции.

Инженерная методика расчета тепловых режимов термообработки эластомерных покрытий гуммированного изделия включает следующие этапы:

- 1) определение количества теплоты, расходуемой в процессе предварительного нагрева и вулканизации гуммировочного покрытия;
- 2) определение количества вулканизационного агента (свободной серы), распределенного по толщине гуммировочного покрытия;
- 3) определение времени нагрева и вулканизации материала;
- 4) определение температуры, требующейся для достижения заданного количества свободной серы в эластомерном покрытии.

5.2. Количество теплоты, расходуемой в процессе предварительного нагрева и вулканизации

Тепловой расчет необходим для определения мощности нагревателей в вулканизационных аппаратах конвективного типа. Суммарный расход теплоты на обогрев аппарата рассчитываем исходя из теплового баланса согласно выражению:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{об}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{ап}} + Q_{\text{из}} + Q_{\text{проч}}, \quad (5.1)$$

где $Q_{\text{расх}}$ - суммарный расход теплоты на обогрев аппарата, Вт;
 $Q_{\text{об}}$ - тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев эластомерной обкладки гуммированного изделия, Вт;
 $Q_{\text{ст}}$ - тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев стальной подложки гуммированного изделия, Вт;
 $Q_{\text{кл}}$ - тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев клеевых швов гуммированного изделия, Вт;
 $Q_{\text{ап}}$ - тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев стенок вулканизационного аппарата, Вт;
 $Q_{\text{из}}$ - тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев слоя теплоизоляции, Вт;
 $Q_{\text{проч}}$ - прочие потери теплоты, не поддающиеся расчету, составляющие примерно 3 - 5 % от всех потерь теплоты.

Тепловые потери на нагревание эластомерной обкладки составляют:

$$Q_{\text{об}} = m_{\text{об}} c_{\text{об}} (T_{\text{с}} - T_{0\text{об}}), \quad (5.2)$$

где $m_{\text{об}}$ - масса эластомерной обкладки, находящейся на вулканизации в реакционной камере, кг/час; $c_{\text{об}}$ - теплоемкость эластомерной обкладки, Дж/(кг·К); $T_{\text{с}}$ и $T_{0\text{об}}$ - температура греющей среды и начальная температура эластомерной обкладки при поступлении в реакционную камеру, К.

Тепловые потери на нагревание стальной подложки составляют:

$$Q_{\text{ст}} = m_{\text{ст}} c_{\text{ст}} (T_{\text{с}} - T_{0\text{ст}}), \quad (5.3)$$

где $m_{\text{ст}}$ - масса стальной подложки, находящейся в реакционной камере, кг/час; $c_{\text{ст}}$ - теплоемкость стальной подложки, Дж/(кг·К); $T_{\text{с}}$ и $T_{0\text{ст}}$ - температура греющей среды и начальная температура стальной подложки при поступлении в реакционную камеру, К.

Тепловые потери на нагревание клеевых швов составляют:

$$Q_{\text{кл}} = m_{\text{кл}} c_{\text{кл}} (T_{\text{с}} - T_{0\text{кл}}), \quad (5.4)$$

где $m_{\text{кл}}$ - масса клеевых швов гуммированного изделия, находящегося на вулканизации в реакционной камере, кг/час; $c_{\text{кл}}$ - теплоемкость клеевых швов.

швов, Дж/(кг·К); T_c и $T_{0\text{кл}}$ – температура греющей среды и начальная температура клеевых швов при поступлении гуммированного изделия в реакционную камеру, К.

Тепловые потери на нагревание стенок реакционной камеры составляют:

$$Q_{\text{ап}} = m_{\text{ап}} c_{\text{ап}} (T_c - T_{0\text{ап}}), \quad (5.5)$$

где $m_{\text{ап}}$ – масса стенок реакционной камеры, кг/час; $c_{\text{ап}}$ – теплоемкость стенок камеры, Дж/(кг·К); T_c и $T_{0\text{ап}}$ – температура греющей среды и начальная температура стенок реакционной камеры, К.

5.3. Количество вулканизирующего агента в гуммировочных покрытиях

В работах [170, 174, 186, 188, 190] были проведены эксперименты по определению степени вулканизации эластомерных покрытий. Динамика процесса вулканизации обкладок прослежена по содержанию свободной серы. Первые испытания по оценке степени вулканизации обкладок проводились экспрессным методом по Всесоюзному Единому Методу [170].

Уровни факторов, влияющих на качество эластомерных покрытий, следующие: температура – 413, 418, 423, 428 К; продолжительность вулканизации – 1800, 2700, 3600, 4500 с для эбонитовых и 600, 1200, 1800, 2400 с для резиновых обкладок; толщина стальных подложек – 1, 2, 3, 4 мм; толщина эластомерных обкладок – 1,5; 3; 4,5; 6 мм (для резин, толщина каландрованного слоя которых 1,5 мм, например, марки 2566 и эбонитов марок 1814, 1752), и 4,5; 7,5; 10,5; 13,5 мм (для резин, толщина каландрованного слоя которых 3 мм, например, марки 1976 и 1390). В необходимых случаях резины крепили к металлу через эбонит. Определение степени вулканизации обкладок проводили химическим способом [136, 151, 170], механическими испытаниями и с помощью интенсивности поглощения гамма-квантов [48-56, 170, 174]. В качестве примера приведены результаты эксперимента по определению распределения свободной серы по слоям покрытий на основе эбонита марок 1814 (рис. 5.1), 1752 (рис. 5.2) при различных способах вулканизации покрытий.

Резиновые обкладки марок 2566 и 1976 крепили к стальному слою через подслои из эбонита толщиной 1,5 мм. Проведены три серии испытаний: в вулканизационном котле, в принудительном потоке воздуха (метод простой конвекции) и в псевдооживленном слое инертного зернистого теплоносителя. Изменения содержания и распределения свободной серы по слоям в пятислойных обкладках эбонит 1814 на основе СКБ + резина 1976 на основе НК + СКБ и эбонит 1814 на основе СКБ + резина 2566 на основе СКБ при различных способах вулканизации приведены на рис. 5.3 и 5.4, $\delta_{\text{ст}} = 1,0$ мм.

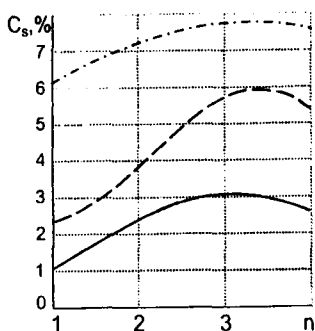


Рис. 5.1. Кривые распределения свободной серы по слоям покрытия из эбонита 1814 на основе СКБ после термообработки в инертном зернистом теплоносителе при $T = 428 \text{ K}$, $\tau = 3600 \text{ с}$ (— линии), методом простой конвекции при $T = 428 \text{ K}$, $\tau = 3600 \text{ с}$ (- · - · - · линии), в вулканизационном котле при $T = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$ (— · — · — · линии), стальная основа находится справа

Рис. 5.2. Кривые распределения свободной серы по слоям покрытия из эбонита марки 1752 на основе НК+СКБ после термообработки в инертном зернистом теплоносителе при $T = 428 \text{ K}$, $\tau = 3600 \text{ с}$ (— линии), методом простой конвекции при $T = 428 \text{ K}$, $\tau = 3600 \text{ с}$ (- · - · - · линии), в вулканизационном котле при $T = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$ (— · — · — · линии), стальная основа находится справа

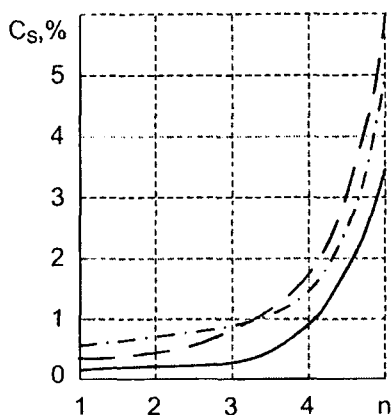
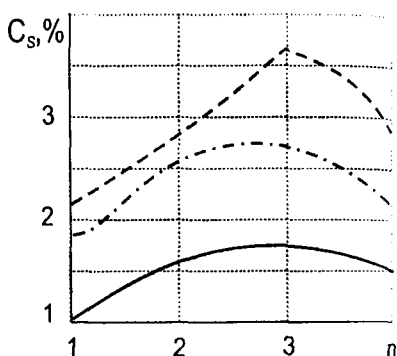
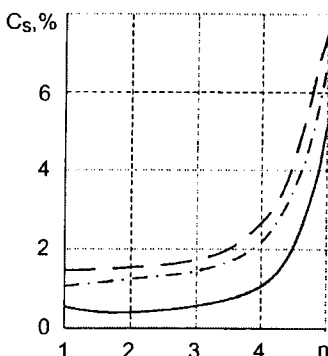


Рис. 5.3. Содержание свободной серы по слоям покрытий марки 1814 (СКБ) (1,5 мм) + 2566 (НК+СКБ) (1,5 мм × 4) после термообработки инертном зернистом теплоносителе при $T = 423 \text{ K}$, $\tau = 2400 \text{ с}$ (— линии), методом простой конвекции при $T = 423 \text{ K}$, $\tau = 2400 \text{ с}$ (- · - · - · линии). в вулканизационном котле при $T = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$ (— · — · — · линии)
 $\delta_{\text{ст}} = 1 \text{ мм}$

Рис. 5.4. Содержание свободной серы по слоям покрытий марки 1814 (СКБ) (1,5 мм) + 1976 (НК+СКБ) (1,5 мм × 4) после термообработки инертном зернистом теплоносителе при $T = 423 \text{ K}$, $\tau = 2400 \text{ с}$ (— линии), методом простой конвекции при $T = 423 \text{ K}$, $\tau = 2400 \text{ с}$ (- - - - - линии), в вулканизационном котле при $T = 418 \text{ K}$, $\tau = 18000 \text{ с}$ (······ линии) $\delta_{\text{ст}} = 1 \text{ мм}$



Для быстрого и более точного контроля степени вулканизации эластомерных обкладок проведен анализ качества обкладок по интенсивности поглощения гамма-излучения. В работе [170] использован в качестве источника жесткого, почти монохроматического гамма-излучения с большим периодом полураспада радиоактивный изотоп кобальта ^{60}Co , который обеспечивает хорошую точность радионуклидного метода определения степени вулканизации эластомерных обкладок.

На основании экспериментальных данных установлено оптимальное содержание свободной серы по слоям эластомерных покрытий. При вулканизации в инертном зернистом теплоносителе это количество составляет: 1752 (НК+СКБ) – 1 - 2 % ; 1814 (СКБ) – 0,5 - 3 % ; 2566 (НК+СКБ) – 0,1 - 1 % ; 1976 (СКБ) – 0,5 - 1,2 %. При вулканизации в котле: 1752 (НК+СКБ) – 1,7 - 2,7 % ; 1814 (СКБ) – 6 - 8 % ; 2566 (НК+СКБ) – 0,5 - 2 % ; 1976 (СКБ) – 1,0 - 2,3 %. При вулканизации методом простой конвекции: 1752 (НК+СКБ) – 2,1 - 4,7 % ; 1814 (СКБ) – 2 - 6,2 % ; 2566 (НК+СКБ) – 0,3 - 2,2 % ; 1976 (СКБ) – 1,0 - 2,5 %.

5.4. Время нагрева и вулканизации материала

Для расчета времени вулканизации при условии, что известно содержание свободной серы в эластомерном покрытии, можно воспользоваться формулой (3.13), где описывается процесс массопереноса серы в эластомерном слое резинометаллического изделия:

$$C(x, \tau) = \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}{(\mu_n^2 + h^2 \delta^2) + h\delta} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right) \cdot \left[C_0 \frac{\mu_n}{\delta} \sin(\mu_n) \cdot \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right) - \frac{C_p \delta^2}{\mu_n^2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right)\right) + \frac{(-1)^{n+1} C_p h^2 \delta^2}{\sqrt{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}} \right], \quad (5.6)$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\text{ctg } \mu = \mu / (h\delta)$.

При известном значении содержания вулканизирующего агента в эластомерном покрытии решаем обратную задачу нахождения времени нагрева покрытия, необходимого для достижения заданного уровня свободной серы в нем.

Ю.Р. Осиповым [170] была получена зависимость для определения содержания свободной серы

$$C_S = A \cdot \exp[-(BT + Ct)] \cdot \delta_{об}^m \cdot \delta_{ст}^n, \quad (5.7)$$

где A – коэффициент скорости связывания агента вулканизации; B, C, m, n – экспериментальные коэффициенты.

Задавая количество агента вулканизации C_S в покрытии и приравнивая правые части выражений (5.6) и (5.7), мы получим возможность связать процессы тепло- и массопереноса.

5.5. Определение температуры, требующейся для достижения заданного количества свободной серы в эластомерном покрытии

Полученные значения времени нагрева эластомерного покрытия следует использовать для определения температуры вулканизации. Построение температурных полей осуществляется для различных гуммированных изделий с помощью математических моделей теплопереноса, приведенных в п.2. Сформулированы четыре крайних задачи теплопереноса в резинометаллических изделиях, указаны решения (2.5, 2.14, 2.15, 2.23, 2.24, 2.32).

При термообработке обкладок из эбонитов наблюдали повышение температуры внутри обкладок выше температуры окружающей среды, 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 при вулканизации выделяется до $920 \cdot 10^3$ Дж/кг каучука. Результаты экспериментов по вулканизации эластомерных покрытий 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.

Суммарное количество теплоты $Q_{\text{сумм}}$, выделенное за период вулканизации от τ_0 до τ_m при температуре $T(x, \tau)$ в единице объема, может быть рассчитано методом численного интегрирования:

$$Q_{\text{сумм}} \approx \frac{2\lambda}{\delta^2} \int_{\tau_0}^{\tau_m} \Delta T d\tau. \quad (5.7)$$

Таким образом, приведенная инженерная методика позволяет рассчитывать для различных способов вулканизации оптимальный тепловой режим термообработки эластомерных покрытий на металле, при котором получают гуммированные изделия с наилучшими качественными и эксплуатационными характеристиками – химической стойкостью, прочностью крепления и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аваев, А.А. Обобщенная математическая модель нестационарной теплопроводности в пластине при граничных условиях III рода/ А.А. Аваев// Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы IV международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 29 – 31.
2. Аваев, А.А. Решение уравнения теплопроводности для случая линейной зависимости коэффициента теплоотдачи от времени/ А.А. Аваев // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы II международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000. С. 169 – 172.
3. Аваев, А.А. Расчет нестационарного температурного поля неограниченной пластины при наличии движущегося источника тепла/ А.А. Аваев // Энергосбережение в теплоэнергетических системах: материалы международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2001. С. 57 – 59.
4. Агранович, З.С. Дифракция электромагнитных волн на плоских металлических решетках. / З.С. Агранович, В.А. Марченко, В.П. Шестопапов. // ЖТФ. 1962. Т.32. №4. – С. 381-390.
5. Алиев, Г.М. Измерительная техника; учебное пособие для технических ВУ-Зов/ Г.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 382 с.
6. Алфутов, Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов/ Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.
7. Бабенко, Ю.И. Теплообмен: Метод расчета тепловых и диффузионных потоков/ Ю.И. Бабенко. - Л.: Химия, 1986 г. - 144с.
8. Бабенкова, Л.И. Математическое моделирование и исследование процессов теплообмена в движущихся средах применительно к нагревательным устройствам и аппаратам: Автореф. канд. техн. наук: 05.14.05 / Л.И. Бабенкова / Куйбышевский политехн. ин-т. – Казань, 1979. – 20 с.
9. Бабушка, И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений. / И.Бабушка, Э.Витасек, М.Прагер. - М.: Мир, 1969. - 368 с.
10. Баденков, П.Ф. Состояние и перспективы развития процессов вулканизации шин. / П.Ф. Баденков. - М.: Химия, 1973. - 68 с.
11. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. Том I. Основы теории процессов химической технологии. / Д.А. Баранов, А.В. Вязьмин. – М: Логос, 2000. – 480 с.
12. Бартнев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. / Г.М. Бартнев. - М.: Химия, 1984. - 280 с.
13. Бартнев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластических материалов/ Г.М. Бартнев, Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1964. – 388 с.
14. Бартнев, Г.М. Структура и релаксационные свойства полимеров. / Г.М. Бартнев. - М.: Химия, 1979. - 228 с.
15. Басин, В.Е. Адгезионная прочность/ В.Е. Басин. – М.: Химия, 1982. – 208 с.
16. Басин, В.Е. Основы адгезии полимеров. / В.Е. Басин, А.А. Берлин. - М.: Химия, 1974. - 391 с.

17. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технологии. / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. - Л.: Химия, 1968. – 823 с.
18. Башкатов, Т.В. Технология синтетических каучуков. / Т.В. Башкатов, Я.Л. Жигалин. - Л.: Химия, 1987. - 360 с.
19. Белозеров, Н.В. Технология резины. / Н.В. Белозеров. – М.: Химия, 1979. – 472 с.
20. Белый, В.А. Адгезия полимеров к металлам. / В.А. Белый, Н.М. Егоренков, Ю.Ю.Плескачевский. - Минск.: Наука и техника, 1971.-266 с.
21. Белый, В.А. Полимерные покрытия. / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск.: Наука и техника, 1976. – 416 с.
22. Беляев, Н.М. Методы нестационарной теплопроводности. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. - М.: Высшая школа, 1978. - 328с.
23. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности/ Н.М. Беляев, А.Л. Рядно. М.: Высш. шк., 1982. – Ч.1. – 327с., Ч.2. – 304 с.
24. Беляев, Н.М. Основы теплопередачи. / Н.М. Беляев. - Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. - 343 с.
25. Берг, Б.В. Теплотехника: учебник для вузов. / Б.В. Берг, О.К. Витт – М: Энергия, 1991. – 224 с.
26. Берд, С. Явление переноса/ С. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайфут. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
27. Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров/ А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М.: Химия, 1974. – 391 с.
28. Беррер, Р. Диффузия в твердых телах: Пер. с англ. / Р. Беррер. – М.:Издательский центр «Издательство «ИЛ», 1948. – 475 с.
29. Бирюков, И.В. Технология гуммирования химической аппаратуры. / И.В. Бирюков. - М.: Химия, 1967. - 200 с.
30. Битюков, В.К. Математическая постановка задачи исследования теплообменных процессов в диффузионно-проницаемой подложке/ В.К. Битюков, Т.В. Гладких., Л.М. Сырицын // Материалы XXXV отчет науч. конф. за 1996 год: В 2 ч/ Воронеж гос. технол. акад. – Воронеж, 1997. – Ч.1. – 171 с.
31. Блох, Г.А. Органические ускорители вулканизации и вулканизирующие системы для эластомеров. / Г.А. Блох. – Л.: Химия, 1978. – 240 с.
32. Богатов, Л.Г. Гуммирование химической аппаратуры/ Л.Г. Богатов. А.С. Булатов, Н.К. Глобин. – М.: Химия, 1977. – 208 с.
33. Бровкин, Л.А. Инженерный расчет нагрева многослойной пластины при граничных условиях 1-го рода/ Л.А. Бровкин, Л.А. Гузов // Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика. 1985. №5. С. 94 – 97.
34. Булавин, П.Е. Решение неоднородного уравнения теплопроводности для многослойных тел/ П.Е. Булавин, В.М. Кашеев // ИФЖ. 1964. Т.8. №6. С. 754 – 760.
35. Бунин, А.А. Анализ статистических данных о надежности и долговечности химической аппаратуры. / А.А. Бунин //Химическое и нефтяное машиностроение, 1971, N 3. - С.30.

36. Бухина, М.Ф. Техническая физика эластомеров. / М.Ф. Бухина. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
37. Вакула, В.Л. Физическая химия адгезии полимеров/ В.Л. Вакула, Л.М. Притыкин. – М.: Химия, 1984. – 222 с.
38. Веденянин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных/ Г.В. Веденянин. – М.: Наука, 1981. – 215 с.
39. Видин, Ю.В. Теплопроводность многослойного плоского тела в стадии регулярного режима/ Ю.В. Видин, Ю.А. Пшеничнов // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1973. №4. С. 148 – 151.
40. Воробьев, В.Я. Теория и эксперименты/В.Я. Воробьев, А.Н. Елсуков. – Минск, 1980. – 158 с.
41. Воробьева, Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов. / Г.Я. Воробьева. – М.: Химия, 1981. - 295 с.
42. Воюцкий, С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров/ С.С. Воюцкий.– М.: Гостехиздат, 1960. – 244 с.
43. Вулканизация эластомеров /Под ред. Г. Аллигера, И. Сьетуна. М.: Химия, 1967. - 428 с.
44. Гельперин, Н.И. Основы техники псевдооживления. / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
45. Глебов, С.Г. Математическое программирование в задачах химической технологии: учебное пособие. / С.Г. Глебов, А.И. Мубаракوف. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – 79 с.
46. Головин, В.А. Процессы массопереноса высокоагрессивных сред в реактопластах и разработка многослойных полимерных противокоррозионных покрытий: Автореф. докт. техн. наук: 05.17.14 / В.А. Головин / Госуд. Академия Нефти и Газа им. И.М. Губкина. – М., 1996. – 33 с.
47. Головин, В.А. Процессы массопереноса высокоагрессивных сред в реактопластах и разработка многослойных полимерных противокоррозионных покрытий: Дис. докт. техн. наук: 05.17.14/ В.А. Головин / Госуд. Академия Нефти и Газа им. И.М. Губкина. – М., 1996. – 358 с.
48. ГОСТ 6768 - 75. Резина и прорезиненная ткань. Метод определения прочности связи между слоями при расслоении. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 7 с.
49. ГОСТ 2199 - 78. Клей резиновый. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 18 с.
50. ГОСТ 209-75. Резина и клей. Методы определения прочности связи с металлом при отрыве. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 15 с.
51. ГОСТ 261-75. Резина. Методы определения усталостной выносливости при многократном растяжении. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 25 с.
52. ГОСТ 262-93. Резина. Определение сопротивления раздиру. – М.: Изд-во Стандартов, 1995. – 15 с.
53. ГОСТ 263-75. Резина. Метод определения твердости по Шору. – М.: Изд-во Стандартов, 1995. – 7 с.
54. ГОСТ 269-66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 15 с.

55. ГОСТ 411-77. Резина и клей. Методы определения прочности связи с металлом при отслаивании. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 13 с.
56. ГОСТ 12535-92. Смеси резиновые. Методы определения вулканизационных характеристик. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 14 с.
57. Гофман, В. Вулканизация и вулканизирующие агенты. / В. Гофман. - М.: Химия, 1971. -228 с.
58. Гоц, В.Л. Оборудование цехов полимерных покрытий /В.Л. Гоц. М.: Машиностроение, 1980. – 279 с.
59. Грачева, Н.И. Роль процессов массопереноса ингредиентов резиновых смесей при формировании адгезионных соединений: автореф. дис. канд. хим. наук: 05.17.13. / Н.И. Грачева. – М., 1984. – 22 с.
60. Грачева, Н.И. Совершенствование рецептур резиновых смесей с учетом миграции ингредиентов/ Н.И. Грачева, А.Е. Корнев, Е.Э. Потапов, И.Л. Шмурак. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. – 52 с. – (Производство шин. Тем. обзор).
61. Грожан, Е.М. Резины и эбониты в антикоррозийной технике/ Е.М. Грожан.– М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1976. – 56 с.
62. Гузеев, А.П. Гуммирование изделий из металлов. / А.П. Гузеев. - М.: Химия, 1987.- 95с.
63. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров/ В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Высшая школа,1966. – 313 с.
64. Данилин, Н.С. Неразрушающий контроль качества продукции. / Н.С. Данилин. - М.: Издательство стандартов, 1976. – 240 с.
65. Дебройн, Н. Адгезия/ Н. Дебройн, Р. Гувинк. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 580 с.
66. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация тепломассобменных процессов в химической технологии./ Н.Д. Демиденко. - М.: Наука, 1991. - 240 с.
67. Дерягин, Б.В. Адгезия / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 12 с.
68. Дильман, В.В. Методы модельных уравнений и аналогий / В.В. Дильман, А.Д. Полянин. – М.: Химия, 1988. – 304 с.
69. Дильман, В.В. Одномерная задача нестационарной конвективной диффузии. / В.В. Дильман. – М.: ИФЖ, 1962. Т.5, № 10. – С. 86 -88.
70. Диткин, В.А. Операционное исчисление. / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: Физматгиз, 1975. – 407 с.
71. Диткин, В.А. Справочник по операционному исчислению. / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: Физматгиз, 1965. – 466 с.
72. Догадкин, Б.И. Химия эластомеров. / Б.И. Догадкин, А.А. Донцов, В.А. Шершнев – М.: Химия, 1981. – 374 с.
73. Донцов, А.А. Процессы структурирования эластомера. / А.А. Донцов. - М.: Химия, 1978. – 287 с.
74. Дринберг, А.Я. Технология неметаллических покрытий / А.Я. Дринберг, Е.С. Гуричев, А.В. Тихомиров. – Л.: Гос. научн.-техн. изд. хим. лит., 1957. – 536 с.

75. Дубницкий, В.И. Исследование влажности изоляции подземных теплопроводов/ В. И. Дубницкий // Известия ВТИ. – 1952. – № 10. – С. 50 – 53.
76. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах./ Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 248с.
77. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Л.: Энергоатомиздат, 1974. - 264 с.
78. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химических технологий: Учебник для вузов. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты /В.И. Дытнерский. - 2 - е. изд. 13 2 - Х кн.– М.: Химия, 1995. – 368 с.
79. Жеребков, О.К. Крепление резин к металлам. / О.К. Жеребков - М.: Химия, 1972. – 240 с.
80. Жук, И.П. К расчету температурного поля в многослойной стенке/ И.П. Жук // ИФЖ. 1962. № 10. С. 100 – 103.
81. Зайцев, В.Ф. Справочник по дифференциальным уравнениям с частными производными. Точные решения/ В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин. – М.: Международная программа образования, 1996. – 512 с.
82. Зарубин, В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности/ В.С.Зарубин. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
83. Зарубин, В.С. Нестационарная теплопроводность в многослойной пластине/ В.С. Зарубин, Я.Г. Осадчий // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. 1978. № 3. С. 76 – 82.
84. Зубов, П.И. Структура и свойства полимерных покрытий./ П.И. Зубов, Л.А. Сухарева. – М.: Химия, 1982 г. - 256с.
85. Зуев, Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред./ Ю.С. Зуев. - М.: Химия, 1972. – 229 с.
86. Зуев, Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации./ Ю.С. Зуев. - М.: Химия, 1982. – 280 с.
87. Зуев, Ю.С. Роль диффузии агрессивной среды при разрушении напряженных резин. / Ю.С. Зуев, И.И. Гольберг, А.З. Борщевская // Механика полимеров. – 1967, №4. – С. 708 – 712.
88. Иванова, В.Н. Технология резиновых технических изделий: учебник для техникумов/ В.Н. Иванова, Л.А. Алешунина. – Л.: Химия, Ленинград. отделение, 1988. – 288 с.
89. Иоссель, Ю.А. Эффективные приближенные решения двух смешанных задач стационарной теплопроводности при условии конвективного теплообмена/ Ю.А. Иоссель, Р.А. Павловский // ИФЖ. 1970. Т. 19. № 4. С. 729 – 736.
90. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник для вузов/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
91. Калиткин, Н.М. Численные методы. / Н.М. Калиткин. – М.: Наука, 1978.
92. Канторович, Л.В. Приближенные методы высшего анализа. / Л.В. Канторович, В.И. Крылов. – Л.: Физматгиз, 1962. – 707 с.
93. Каргин, В.А. Краткие очерки по физикохимии полимеров/ В.А. Каргин, Г.Л. Слонимский. – М.: Химия, 1967. – 231 с.

94. Кардашов, Д.А. Синтетические клеи/ Д.А. Кардашов. – М.: Химия, 1968. – 592 с.
95. Кардашов, Д.А. Полимерные клеи. Создание и применение/ Д.А. Кардашов, А.П. Петрова. – М.: Химия, 1983. – 256 с.
96. Карпов, В.Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности. / В.Н. Карпов. - М.: Химия, 1987. – 338 с.
97. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел/ Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
98. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел/ Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 1979. – 415 с.
99. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел/ Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
100. Карташов, Э.М. Метод интегральных преобразований в аналитической теории теплопроводности твердых тел/ Э.М. Карташов // Изв. РАН. Энергетика. 1993. № 2. С. 99 – 127.
101. Карташов, Э.М. Расчеты температурных полей в твердых телах на основе улучшенной сходимости рядов Фурье – Ханкеля/ Э.М. Карташов // Изв. РАН. Энергетика. – 1993. – № 3. – С. 106 – 125.
102. Касаткин, А.Г. Основные процессы химической технологии. / А.Г. Касаткин. – М.:Химия, 1973. – 750 с.
103. Каспаров, М.Н. Вулканизация резиновых изделий, новые виды оборудования и расчеты процесса. / М.Н. Каспаров, С.Е. Шаховец. - Л.: ЛДНТП, 1990. - 20 с.
104. Кафаров, В.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем / В.В. Кафаров, В.П.Мешалкин, Л.В.Гурьев.-М.:Энергоатомиздат,1988.-191 с.
105. Качанов, Л.М. Разрушение композитных материалов путем расслоения/ Л.М. Качанов. // Механика полимеров. 1976. – № 5. – С. 918 – 922.
106. Кашарский, Б.Д. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы: справочник. / Б.Д. Кашарский. – Л.:Машиностроение, 1976. - 484 с.
107. Кейгл, Ч. Клеевые соединения: пер. с англ./ Ч. Кейгл ; под ред. Д.А. Кардашова.– М.: Мир, 1971. – 295 с.
108. Кинлок, Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология: пер. с англ./ Э. Кинлок. – М: Мир,1991. – 484 с.
109. Киреев, В.П. Численные методы в примерах и задачах. / В.П. Киреев, А.В. Пантелеев. – М.: Высш. шк., 2006. – 480 с.
110. Коган, М.Г. Решение нелинейных задач теории теплопроводности методом Канторовича. / М.Г. Коган. // ИФЖ. – 1967. – Т.12. – №1. – С. 72-81.
111. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. / Л.А.Коздоба. - М.: Наука, 1975.- 227с.
112. Коздоба, Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. - Киев: Наукова думка, 1977.- 136 с.

113. Коновалов, В.И. К вопросу о нагреве материалов в среде перегретого пара/ В.И. Коновалов, М.Е. Уланов, В.Н.Соколов // Труды МИХМа. –Вып. 46. С. 89–93.
114. Коновалов, В.И. О возможности использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатанова. // Вестник ТГТУ. – 1995. – Т. 1-2. – С. 75-90.
115. Корнев, Б.Г. Задачи теории теплопроводности и термоупругости./ Б.Г. Корнев. – М.: Наука, 1980 г. - 400с.
116. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров/ Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
117. Котляр, Я.М. Методы и задачи тепломассообмена/ Я.М. Котляр, В.Д. Совершенный, В.Д. Стриженов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
118. Кошелев, Ф.Ф. Общая технология резины/ Ф.Ф. Кошелев, А.Е. Корнев, А.М. Буканов. – М.: Химия, 1978. – 528 с.
119. Кравцов, В.Г. Современное состояние и тенденции развития устройств для нанесения клея на изделия в резинотехнической промышленности/ В.Г. Кравцов, А.П. Шиленко, Н.И.Зайцева. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. – 44 с.
120. Кроу, К. Математическое моделирование химических производств. / К. Кроу. - М.: Мир, 1973. – 392 с.
121. Кудинов, А.А. Теплообмен в многослойных конструкциях. / А.А. Кудинов, В.А. Кудинов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. – 136 с.
122. Кудинов, В.А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций/ В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников. – М.: Высшая школа, 2005. – 430 с.
123. Кузьмин, М.П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена/ М.П. Кузьмин. – М.: Энергия, 1974. – 416 с.
124. Кузьминский, А.А. Физико-химические основы получения, переработки и применения эластомеров. / А.А. Кузьминский, С.М. Кавун, В.П. Кирпичев. – М.: Химия, 1976. – 368 с.
125. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена/ С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.
126. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие/ С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
127. Лабунцов, Д.А. Процессы теплообмена с периодической интенсивностью./ Д.А. Лабунцов, Ю.Б. Зудин. – М.: Энергоатомиздат, 1984 г.- 72 с.
128. Лапшенков, Г.И. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности/ Г.И. Лапшенков, Л.М. Полоцкий. – М.: Химия, 1988. – 287 с.
129. Леонтьев, А.И. Теория тепломассопереноса/ А.И. Леонтьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1997. – 683 с.
130. Лепетов, В.А. Расчеты и конструирование резиновых изделий. / В.А. Лепетов, Л.Н. Юрцев. - Л.: Химия, 1977. – 408 с.

131. Лепетов, П.Л. Резинотехнические изделия/ П.Л. Лепетов.— Л.: Химия, 1976. — 440 с.
132. Лотарев, В.Я. Температурные поля и напряжения в телах конечных размеров: Автореф. канд. техн. наук: 05.13.16 / В.Я. Лотарев / Тульский гос. ун-т. — Тула, 2000. — 19 с.
133. Лукомская, А.И. Автоматическое управление технологическими процессами в резиновой промышленности/ А.И. Лукомская, В.Г. Пороцкий. — М.: Химия, 1984. — 160 с.
134. Лукомская, А.И. Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин. / А.И. Лукомская, В.Ф. Евстратов. — М.: Химия, 1975. — 360 с.
135. Лукомская, А.И. Оценка кинетики неизотермической вулканизации. / А.И. Лукомская, В.И. Сапрыкин. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. — 66 с.
136. Лукомская, А.И. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий /А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеперша. — М.: Химия, 1978. — 280 с.
137. Лукомская, А.И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий/ А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеперша. — М.: Химия, 1984. — 160 с.
138. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики/ А.В. Лыков. — Минск: АН БССР, 1961. — 519 с.
139. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
140. Лыков, А.В. Теория теплопроводности/ А.В. Лыков. — М.: Издательство технико-теоретической литературы 1968. — 392 с.
141. Лыков, А.В. Теория тепло - и массопереноса/ А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. — М. - Л.: ГЭИ, 1963. — 543 с.
142. Любов, Б.Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах/ Б.Я. Любов. — М.: Наука, 1981. — 294 с.
143. Малкин, А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерений/ А.Я. Малкин, Л.Е. Чалых. — М.: Химия, 1979. — 304 с.
144. Малышев, А.И. Анализ резин / А.И. Малышев, А.С. Помогайбо. — М.: Химия, 1977. — 232 с.
145. Манин, В.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации./В.Н.Манин,А.Н.Громов.-Л.:Химия,1980.-248 с.
146. Маслов, В.П. Математическое моделирование процессов теплообмена. Эволюция диссипативных структур/ В.П. Маслов, В.Г. Данилов, К.А. Волосов. — М.: Наука, 1987. — 352 с.
147. Машины и аппараты резинового производства / Под ред. А.М. Барскова. — М.: Химия, 1975. — 600 с.
148. Михалев, И.И. Технология склеивания металлов/ И.И. Михалев, З.Н. Колобова, В.П. Батизат. — М.: Машиностроение, 1965. — 161 с.
149. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, Н.М. Михеев. — М.Энергия, 1977. — 343 с.
150. Михлин, С.Г. Вариационные методы в математической физике. / С.Г. Михлин. — М.: Наука, 1970. — 510 с.

151. Моисеев, Ю.В. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах. / Ю.В. Моисеев, Г.Е. Зайков. – М.: Химия, 1979. – 287 с.
152. Мотовиловец, И.А. Теплопроводность пластин и тел вращения. / И.А. Мотовиловец. – Киев: Наук.думка, 1969. – 325 с.
153. Налимов, В.В. Теория эксперимента/ В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
154. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов/ В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
155. Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении: сб. науч. тр. / Науч. ред. Н.В. Химченко. - М.: НИИХиммаш, 1989. - 63 с.
156. Нестеренко, А.В Тепло- и массообмен при испарении жидкости со свободной поверхности / А. В. Нестеренко // ЖТФ. –1954. – Т.24. –№4. – С. 729 – 741.
157. Николаев, Н.И. Диффузия в мембранах. / Н.И. Николаев. – М.: Химия, 1980. – 232 с.
158. Новиченок, Л.Н. Теплофизические свойства полимеров/ Л.Н. Новиченок, З.П. Шульман. – Минск: Наука и техника, 1971. – 115 с.
159. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности: учеб. пособие для вузов/ Н.Г. Бекин, Н.Д. Захаров, Г.К. Пеунков и др. – Л.: Химия, 1995. – 504 с.
160. Осипов, Ю.Р. Автоматизация технологических процессов гуммировочных производств/ Ю.Р. Осипов, С.Ю. Загребин. – М.: Классик Прим, 2004. – 275 с.
161. 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: -М.: Академия наук о Земле, 1997. - С. 57-59.
162. Осипов, Ю.Р. Исследование работоспособности композиционных эластомерных материалов. /Ю.Р. Осипов, Л.И. Огородов // Работоспособность строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. - Казань: КХТИ, 1984. -С. 16-18.
163. Осипов, Ю.Р. Исследование структуры клеевых швов и слоев обкладок резинометаллических объектов. / Ю.Р. Осипов, В.А. Румянцев. Деп. в ЦИТИХимнефтемаш 15.11.1982, № 901-82. -14 с.
164. Осипов, Ю.Р. К вопросу о надежности эластомерных защитных покрытий/ Ю.Р. Осипов, М.А. Гордеев. – М., 1983. 10с. Деп. в ЦИТИХимнефтемаш 26. 06 83, № 1011.
165. Осипов, Ю.Р. Неразрушающий способ определения степени вулканизации обкладок резинометаллических изделий. / Ю.Р. Осипов, А.А. Аваев //Заводская лаборатория. – 1979. – № 3. – С. 242-243.
166. 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.
167. Осипов, Ю.Р. Производство гуммированных объектов на автоматизированной поточной линии/ Ю.Р. Осипов, В.В. Чебыкин, С.В. Красиков // Резино-

- вая промышленность. Сер. Сырье, материалы, технология: Матер. Восьмой науч.- практич. конф. – М.: НИИШП, 2001. – С. 35 – 38.
168. 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" М.: НИЦ Инженер, 1998. – С. 357-360.
169. Осипов, Ю.Р. Режимы вулканизации и прогнозирование свойств гуммировочных покрытий/ Ю.Р. Осипов. – Вологда: ВоПИ, 1992. – 204 с.
170. Осипов, Ю.Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов/ Ю.Р. Осипов. – М.: Машиностроение, 1995. – 232 с.
171. Осипов, Ю.Р. Улучшение качественных показателей гуммировочных покрытий с помощью адаптивной системы оптимального управления процессом/ Ю.Р. Осипов, С.Ю. Загребин // Конструкции из композиционных материалов. – М.: ФГУП "ВИМИ", 2004. – Выпуск 3. С. 20 – 30.
172. Осипов, С.Ю. Математическая модель тепловых и диффузионных процессов при термообработке полимерных материалов / С.Ю. Осипов, В.В. Павлов, С.В. Иванова, Т.А. Рожина // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Экология и здоровье: проблемы и перспективы социально-экологической реабилитации территорий, профилактики заболеваемости и устойчивого развития «Человек-Природа-Бизнес»»- М: ВИМИ, 2004.-С. 182-184.
173. Осипов, С.Ю. Совершенствование технологии нанесения и теплового процесса вулканизации гуммировочных покрытий на автоматизированной поточной линии/ С.Ю. Осипов, В.В. Павлов, Ю.Р. Осипов, С.Ю. Загребин. С.В. Иванова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Экология и здоровье: проблемы и перспективы социально-экологической реабилитации территорий, профилактики заболеваемости и устойчивого развития «Человек-Природа-Бизнес»»- М: ВИМИ, 2004.-С. 184-186.
174. Осипов, Ю.Р. Структура и прочность горячего крепления эластомерных покрытий к металлу / Ю.Р. Осипов. – Вологда: ВоПИ, 1994. – 110 с.
175. Осипов, Ю.Р. Оценка влияния тепломассообменных процессов и периода послевулканизационного жидкостного охлаждения на формирование свойств гуммировочного покрытия/ Ю.Р. Осипов, В.В. Павлов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – №5 (55). – С. 58-59.
176. Осипов, Ю.Р. Решение краевой задачи нестационарной теплопроводности при предварительной обработке многослойных эластомерных покрытий/ Ю.Р. Осипов, О.А. Панфилова, С.Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. Вып. 3. – М: ВИМИ, 2006. – С. 58-69.
177. Осипов, Ю.Р. Математическое моделирование процесса массопереноса вулканизирующего агента при вулканизации гуммировочного многослойного покрытия/ Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Конструкции из композиционных материалов. Вып. 4. – М: ВИМИ, 2007. – С. 37-47.

178. Осипов, Ю.Р. Физико-математический анализ тепловых режимов термообработки гуммировочных изделий/ Ю.Р. Осипов, Т.А. Рожина, О.А. Панфилова // Техника и технология. – М.: Спутник Плюс, 2005. – №3 (9). – С. 51-54.
179. Осипов, Ю.Р. Исследования изготовления гуммированных объектов методами пластической деформации/ Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Деформация и разрушение материалов. – М.: Наука и технологии, 2006. №5. – С. 34-38.
180. Осипов, Ю.Р. Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения при изготовлении гуммированных объектов/ Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Вестник ЧГУ. – 2007. – № 3. – С. 61-68.
181. Осипов, Ю.Р. Об управляемости теплообменом в процессе гуммирования / Ю.Р. Осипов, А.А. Моисеев, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы IV международной науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С. 293-297.
182. Осипов, Ю.Р. Исследование процесса массопереноса при сушке адгезивного покрытия на эластомерном полотне / Ю.Р. Осипов, С.В. Иванова, О.А. Панфилова // Современная наука и образование в решении проблем экономики Европейского Севера: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Архангельск: АГТУ, 2004. – С. 355-358.
183. Осипов, Ю.Р. Моделирование и расчет массопереноса в системе «гуммировочное покрытие - адгезив» / Ю.Р. Осипов, С.В. Иванова, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Информационные технологии в производственных, социальных и экономических процессах: материалы IV междунар. науч. конф. – Череповец: ЧГУ, 2004. – С. 110-112.
184. Осипов, Ю.Р. Краевые задачи массообмена в стержнях и пластинах из эластомерных материалов / Ю.Р. Осипов, О.А. Панфилова // Математическое моделирование и краевые задачи: материалы II всероссийской науч. конф. – Самара: 2005. – С. 78-81.
185. Осипов, Ю.Р. О контроле физических свойств пространственно-структурированных полимерных систем / Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Череповец: ЧГУ, 2005. – С. 115-120.
186. Осипов, Ю.Р. Кинетика вулканизации и структурные изменения гуммировочных резиновых смесей / Ю.Р. Осипов, В.И. Юшманова, О.А. Панфилова // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы междунар. науч.-техн. конф. Т.1 – Вологда: ВоГТУ, 2005. – С. 109-111.
187. Осипов, Ю.Р. Моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке гуммировочных покрытий / Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова, И.О. Осташов // Вестник ЧГУ: Череповец, 2008. – № 4. – С. 126 – 132.
188. Осипов, Ю.Р. Расчетно-экспериментальное исследование процессов конвективной термообработки рулонных и листовых материалов / Ю.Р. Осипов

- пов, В.В. Чебыкин, С.Ю. Осипов, О.А. Панфилова // Современная наука и образование в решении проблем экономики Европейского Севера: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Архангельск: АГТУ, 2005. – С. 53-58.
189. Осипов, Ю.Р. Математическое моделирование теплообмена при производстве гуммировочных листовых заготовок / Ю.Р. Осипов, О.А. Панфилова // Материалы и технологии XXI века: материалы III междунар. науч. конф. – Пенза, 2005. – С. 155-158.
190. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учеб. пособие для вузов/ В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
191. Павлов, К.Ф. Примеры и расчеты по курсу ПАХП: учеб. пособие для ВУЗов/ К.Ф Павлов., П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 1981. – 560 с.
192. Панфилова, О.А. Исследование массопереноса в процессе конвективной термообработки гуммировочного покрытия / О.А. Панфилова, Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов // Вестник ЧГУ: Череповец, 2008. – № 4. – С. 132 – 138.
193. Панфилова, О.А. Расчет температурных полей в резинометаллическом объекте при термообработке его гуммировочного покрытия / О.А. Панфилова, Ю.Р. Осипов, С.Ю. Осипов // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: IV междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2008. – С. 49-51.
194. Пенкин, Н.С. Гуммированные детали машин/ Н.С. Пенкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 200 с.
195. Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел/ А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 351 с.
196. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. / А.Н. Плановский, П.Н. Николаев. – М.: Химия, 1987.- 496 с.
197. 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.
198. Полякова, Л.М. Стойкость резин и эбонитов в агрессивных средах: тем.обзор. / Л.М. Полякова, Л.Г. Фомина, Ю.С. Зуев. –М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. – 108 с.
199. Полянин, А.Д. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса/ А.Д. Полянин, А.В. Вязьмин, А.И. Журов, Д.А. Казенин. – М.: Факториал, 1998. – 367 с.
200. Попов, В.М. Теплообмен через соединения на клеях/ В.М. Попов. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.
201. Попырин, Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. / Л.С.Попырин. - М.:Энергия,1978.- 416 с.
202. Прогнозирование работоспособности монолитных химически стойких облицовок: обз. информация. Серия «Противокоррозионная защита». – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – 33 с.
203. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник / под ред. Черенкова В.В. - Л.: Машиностроение, 1987. - 846 с.

204. Рагулин, В.В. Производство резинотехнических изделий: учебник для проф.-техн. училищ/ В.В. Рагулин. – М.: Высш. школа, 1980. – 165 с.
205. Радченко, И.А. Оценка экономической эффективности внедрения противокоррозионных разработок в химической промышленности: Автореф. дис. канд. экон. наук:08.00.05/Моск. ин-т управления.- М., 1991. - 18 с.
206. Райченко, А.И. Математическая теория диффузии в приложениях А.И. Райченко. – Киев.: Наукова думка, 1981. – 396 с.
207. РТМ 2151-138-80. Устройства для нанесения покрытий. Область применения. Расчет толщины и погрешности толщины покрытия. – М.: МИН-ХИМнефтемаш, 1981. – 20 с.
208. Резниковский, М.М. Механические испытания каучука и резины. / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская. – М.: Химия, 1986. – 500 с.
209. Рейтлингер, С.А. Проницаемость полимерных материалов/ С.А. Рейтлингер. – М.: Химия, 1974. – 270 с.
210. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии (Системы с твердой фазой)/ П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская, В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1980. – 248 с.
211. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой/ С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
212. Рудобашта, С.П. Диффузия в химико-технологических процессах/ С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. – М.: Химия, 1993. – 209 с.
213. Румшский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента/ Л.З. Румшский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
214. Самарский, А.А. Математические модели, аналитические и численные методы в теории переноса/ А.А. Самарский. – Минск: ИТМО, 1982. – 174 с.
215. Самарский, А.А. Численные методы решения задач диффузии и конвекции./ А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
216. Санжаровский, А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий/ А.Т. Санжаровский.. – М.: Наука, 1974. – 115 с.
217. Сафрончик, В.И. Защита от коррозии строительных конструкций и технологического оборудования. / В.И. Сафрончик. - Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1988. - 255 с.
218. 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.
219. Сергеев, Г.Т. Исследование внешнего тепло- и массопереноса при испарении жидкости капиллярно-пористым телом / Г.Т. Сергеев // ИФЖ. –1961. – Т.4. –№5. – С. 33 – 37.
220. Синтетический каучук: справочник/ Под ред. И.В. Гармонова. – Л: Химия, 1983. – 559 с.
221. Скачков, А.С. Оборудование предприятий резиновой промышленности/ А.С. Скачков, С.Б. Левин. – М.: Высшая школа, 1971. – 218 с.

222. Справочник по клеям/ Под ред. Г.В. Мовсисяна. – Л.: Химия, 1980. – 304 с.
223. Степанов, Р.Д. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах/ Р.Д. Степанов, О.Ф. Шленский. – М.: Машиностроение, 1981. – 136с.
224. Сурикова, Е.И. Погрешности приборов и измерений/ Е.И. Сурикова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун -та, 1975. – 160 с.
225. Тагер, А.А. Физикохимия полимеров: 3-е изд/ А.А. Тагер. – М.: Химия, 1978. – 246 с.
226. Тамарина, А.М. Фрактография сталей, сплавов и гуммированных покрытий. / А.М. Тамарина, Ю.Р. Осипов. - Вологда, ВНКЦ РАН, 1999. - 415 с.
227. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ.ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
228. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: Справочник /Под ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наук.думка, 1994. - 244 с.
229. Технический анализ и контроль производства синтетических каучуков. / Г.А. Белова, Н.А. Исакова, В.С. Фихтипольц, Е.Д. Панкратова. - Л.: Химия, 1987. - 184 с.
230. Технология резиновых изделий: учеб. пособие для вузов. / Ю.О. Аверко-Антонович, Р.Я. Омелеченко, Н.А. Охотин, Ю.Р. Эбич; под ред. П.А. Кирпичникова. - Л.: Химия, 1991. - 352 с.
231. Точилова, Т.Г. Теплофизические характеристики резинометаллических систем. / Т.Г. Точилова, А.И. Лукомская. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1984. - 52 с.
232. Третьяченко, Г.Н. Тепловое и напряженное состояние многослойных покрытий / Г.Н. Третьяченко, В.Г. Барило // Пробл. прочности. – 1993. – № 1. – С. 41-49.
233. Туголуков, Е.Н. Математическое моделирование термонагруженных процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств: Автореф. докт. техн. наук: 05.17.08, 05.13.18 / Е.Н. Туголуков / Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – 20 с.
234. Туголуков, Е.Н. Математическое моделирование термонагруженных процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств: Дис. докт. техн. наук: 05.17.08, 05.13.18 / Е.Н. Туголуков / Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – 460 с.
235. Тынный, А.Н. Прочность и разрушение полимеров под воздействием жидких сред. / А.Н. Тынный. – Киев: Наукова думка, 1975. – 206 с.
236. 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.
237. Устинова, Т.А. Испытание резин в физически агрессивных средах. / Т.А. Устинова. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – 92 с.
238. Федюкин, Д.Л. Технические и технологические свойства резины. / Д.Л. Федюкин, Ф.А. Махлис. – М.: Химия, 1985. - 236 с.
239. Фокин, М.И. Защитные покрытия в химической промышленности /М.И. Фокин, Ю.В. Емельянов – М.:Химия, 1981. – 304 с.

240. Франк-Каменецкий, Д.Л. Диффузия и теплопередача в химической кинетике/ Д.Л. Франк-Каменецкий. – М.: Паука, 1967. – 691 с.
241. Фрейдин, А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений / А.С. Фрейдин. – М.: Химия, 1971. – 256 с.
242. Харчевников, В.М. Вулканизация резиновых изделий. / В.М. Харчевников, Е.Н. Корчемкин. – Л.: Химия, 1984. – 96 с.
243. Химченко, И.В. Неразрушающий контроль в химической промышленности / И.В. Химченко, В.А. Бобров. – М.: Машиностроение, 1978. – 350 с.
244. Цой, П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса/ П.В. Цой. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 412 с.
245. Цой, П.В. Методы решения отдельных задач тепломассопереноса/ П.В. Цой. – М.: Энергия, 1971. – 382 с.
246. Чалых, А.Е. Диффузия в полимерных системах/ А.Е. Чалых. – М.: Химия, 1987. – 312 с.
247. Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности/ А.Г. Шашков, Г.М. Волохов, Т.Н. Абраменко, В.П. Козлов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
248. Шварц, А.Г. Оптимизация, контроль и управление качеством резин: обзор. / А.Г. Шварц. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. - 77 с.
249. 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.
250. Шевяков, А.А. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. / А.А. Шевяков, Р.В. Яковлева. - М.: Машиностроение, 1968.- 320 с.
251. Шеин, В.С. Основные процессы резинового производства. / В.С. Шеин, Ю.Ф. Шутилин, А.П. Гриб. - Л.:Химия, 1988. – 160 с.
252. Шленский, О.Ф. Определение коэффициентов диффузии жидкостей в полимерные материалы/ О.Ф. Шленский, Н.Н. Хованская, В.В. Лаврентьев// Пластические массы. – 1966. – №5. – С. 52–54.
253. Шорин, С.Н. Теплопередача/ С.Н. Шорин. – М: Высшая школа, 1964. – 490 с.
254. Щербаков, М.А. Химический метод анализа резин. / М.А. Щербаков. - М.: Госхимиздат, 1977. - 241 с.
255. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена. / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
256. Юрьев, С.В. О методе определения коэффициентов диффузии среды в полимерные материалы / С.В. Юрьев, В.В. Лушик // ФХММ. – 1974. – Т.10. – №1. – С 54–56.
257. Acetta A. Calculation of temperature and extent of reaction during the vulcanization of powdered rubber // Rubber chemistry and technology. – 1994. – V.59. – №4. P.678-701.
258. Descarsiu, M. Electrowarme. Theory and practice / M. Descarsiu. – W. Verlag, 1974. – 36 p.

259. Douglas, J. On the numerical integration of implicit methods / J. Douglas // J. Soc. Indust. and Appl. Math., 1993. – V.3., №1. P. 42-46.
260. Foster, R.L. Radiant energy for drying paper webs / R.L. Foster // Tappi J., 1966. – V. 49, №1. P. 118 – 122.
261. Grank, J. The Mathematics of Diffusion. / J. Grank. – Oxford: Clarendon, 1975/ - IX. – 414 p.
262. Griffiths, D.F. Numerical analysis. / D.F.Griffiths, G.A.Watson. – Longman Scientific & Technical. – 1986.
263. Halpin, J.C. The Laminate analogy for two-and-three dimensional composite materials / J.C. Halpin, K. Jerine, J.M. Whitney // Composite Materials, 1971. – V. 5, №1. P. 36 – 49.
264. Holman, J. P. Experiments on individual droplet heat transfer rates [Текст] / J. P. Holman, P. E. Jenkins, F. G. Sullivan. — Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1972 v. 15. - P. 1489—1495.
265. Jones, P.L. Electromagnetic wave energy in drying processes / P.L. Jones // Drying, 1992. – P. 114 – 136.
266. Keey, R.B. Drying principles and practice / R.B. Keey – New York, Pergamon Press, 1972. – 358 p.
267. Lienhard, John, H. IV. A heat transfer textbook: 3rd edition. / John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. – Phlogiston press: Cambridge Massachusetts, 2003. – 762 c.
268. Pallazzolo, S. Improved heat transfer in dryers through the use of spoiler bars / S. Pallazzolo // Tappi J., 1984. – V. 67, №9. P. 76 – 80.
269. Parkinson, D. Reinforcement of rubbers / D. Parkinson – London: Lakeman a Co., 1975. – 102 p.
270. Peckover, R.S. The modeling of some melting problems / R.S. Peckover // Res. Notes Math. 1983. – V. 78. P. 248 – 262.
271. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. Применение гуммировочных обкладок в химических производствах

Характеристика рабочей среды	Концентрация %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Раствор хлористого натрия	Произв-ная	303	1206/30	7
Газообразный хлористый водород	Произв-ная	303-313	1206/30	3-7
Жидкий хлористый водород	Произв-ная	303-313	1206/30	7
Фосфорная кислота	Произв-ная	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 (производство альдегида)	-	363	1206/30	7-8 месяцев
Рассол + влажный хлор (электролиз щелочей)	-	353	D 9/25i + D 9/25к	1,5
Белильный раствор (хранение) 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	1206/30 или D 9/25i + D 9/25к	5-7 месяцев

Характеристика рабочей среды	Концентрация %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
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 (аппаратура для очистки ацетилена и для приготовления белильных растворов) хлор	0,5 г/л	288-308	1206/30	7
Раствор едкого натра + газообразный хлор (инжекторы для белильного раствора) NaCl хлор	8-10 100	288-308	1206/30	3-4 месяца
Раствор гипохлорита натрия (колонна для ацетилена) хлор	0,1-0,5 г/л	288-308	1206/30	>7
Ацетилен с примесью хлора (газопровод для очистки ацетилена) хлор	20-30 мг/м ³	288-308	1206/30	>5
Насыщенный раствор (приготовление раствора солей) NaCl хлор	250-300 г/л 1 г/л	363	1206/30	2-3 (НК с диатоми-тами 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

Характеристика рабочей среды	Концентрация %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Раствор фосфата натрия	8-30	до 373	1206/30	1
Водный раствор бутандиола в присутствии небольшого количества муравьиной кислоты (производство катализатора)	33-36 рН 2-6	288-291	1206/30	Не ограничен
Слабощелочная суспензия синил β-нафтиламина	рН 2-6	293	1206/30	>7
Чистая вода (водонапорные резервуары)	-	298-303	V141P ₂	>7
Раствор поваренной соли	Произв-ная	291-293	1206/30	>7
Раствор хлористого кальция (цистерны, насосы)	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	Концентрация	291-293	1206/30	>5
Раствор персульфата калия	5	253	1206/30	>7
Водная фталевая кислота	Произв-ная	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	-			
Фосфорная кислота (производство альдоля)	18-24 (объемн.)	303-323	1206/30	>8
Фосфорная кислота (производство альдоля)	70-80	303		
Фосфорная кислота (производство альдоля)	75-80	313-318		
3 %- ные водные растворы эмульгаторов, мыла	рН = 5, 12-13	293	1206/30	>7
Резервуары емкостью 160 м ³	Конденсационная вода	293	V141P ₂	>5
Трубопроводы диаметром 150 мм	5	293	1206/30	>5
Циркуляционная вода (трубопроводы и фильтры)	-	291-293	1206/30	>8

Характеристика рабочей среды	Концентрация %	Температура, К	Марка обкладок	Срок службы, годы
Растворы поваренной соли (напорные резервуары, трубопроводы и насосы)	Концентрированные	291-293	1206/30	>8
Уксусная кислота (цистерны, напорные баки, трубопроводы и насосы)	16	291-293	1206/30	>8
Латекс (валки для лентоотливочной машины)	Произв-ная	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)	Произв-ная	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
Водный раствор соляная кислота	4	283-1288	1206/30	4-5 месяцев
этиленхлоргидрин	4			

П.2. Резины, полуэбониты и эбониты, скрепленные с металлом, стойкие в агрессивных средах

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировочного материала)
	среда	кон-ция, %, не более	Темпер-ра, К, не выше	
Резины				
$\frac{1976 - M, 4476}{СКБ, СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Азотная кислота	5	293	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслоя эбонита 1814 (2566)
$\frac{343}{СКМС}$	Азотная кислота	10	303	Клей лейконат с последующим прессованием в пресс-форме (343)
$\frac{1976 - M, 4476}{СКБ, СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	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)
$\frac{1976 - M, 4476}{СКБ, СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серная кислота	70	343	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслоя эбонита 1814 (2566)
$\frac{1976 - M, 4476}{СКБ, СКБ};$ $\frac{2566}{НК + СКБ}$	Серная кислота	Любая	293	Подслой полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслоя эбонита 1814 (2566)
$\frac{ИПР - 1025}{Наирит}$	Серная кислота	36	343	Клей лейконат с последующим прессованием (ИРП-1025)
$\frac{4849}{НК}$	Фосф-ная кислота	Любая	343	Подслой эбонита 1814 (4849)
$\frac{8 - ЛТИ}{СКС}$	Фосф-ная кислота	80	338	Клей лейконат с последующим прессованием (8-ЛТИ)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировочного материала)
	среда	кон-ция, %, не более	Темпер-ра, К, не выше	
$\frac{1976 - M}{СКБ}, \frac{4476}{СКБ}, \frac{2566}{НК + СКБ}$	Фтористо-водородная кислота	Любая	343	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566)
$\frac{1976 - M}{СКБ}, \frac{4476}{СКБ}, \frac{2566}{НК + СКБ}$	Серный ангидрид	2	313	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566)
$\frac{1976 - M}{СКБ}, \frac{4476}{СКБ}, \frac{2566}{НК + СКБ}, \frac{4860}{НК + СКБ}, \frac{4860}{НК + нагр}$	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)
$\frac{1976 - M}{СКБ}, \frac{4476}{СКБ}, \frac{2566}{НК + СКБ}, \frac{4849}{НК}$	Белильная известь, известковое молоко	Любая	338	Подслои полуэбонита 1751 (1976-М; 4476); подслои эбонита 1814 (2566; 4849)
Полуэбониты				
$\frac{1751}{СКБ}, \frac{1751.6}{СКМС}, \frac{2169}{СКБ}$	Азотная кислота	15	293	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6; 2169)
$\frac{1752}{СКБ+НК}, \frac{1752.5}{СКМС+СКИ}$	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)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировочного материала)
	среда	кон-ция, %, не более	Тем- пер-ра, К, не выше	
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}$	Соляная кислота	36	343	Клей 2572 (1751), подслои полуэбонита 1751 (1751.6)
$\frac{1751}{СКБ}$	Соляная кислота	Любая	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}; \frac{2169}{СКБ}$	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)
$\frac{1751}{СКБ}; \frac{1751.6}{СКМС}; \frac{2169}{СКБ};$ $\frac{1752}{СКВ}; \frac{1752.5}{СКМС+СКИ}$	Раствор ZnCl ₂	50	338	Клей 2572 (1751); подслои полуэбонита 1751 (1751.6; 2169); 1752; 1752.5)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор диметилди- тнокрбана натрия	20	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1751}{СКБ}$	Раствор железотри- лонового комплекса	3	293	Клей 2572 (1751)
$\frac{1752}{СКВ+НК}$	Раствор осадител. ванны произв-ва вискозного шелка		323	Подслои полуэбонита 1751 (1752)
$\frac{1752}{СКВ+НК};$ $\frac{1752.5}{СКМС+СКИ}$	Раствор осадител. ванны штапельн. про- изводства: 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 персульфа- та калия	2	293	Клей 2572 (1751)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировочно- го материала)
	среда	кон-ция, %, не более	Тем- пер-ра, К, не выше	
<u>1751</u> СКБ	Раствор ронгалита с сульфа-том железа	1,5	293	Клей 2572 (1751)
<u>1751</u> , <u>1751.6</u> , <u>2169</u> СКБ, СКМС, СКБ <u>1752</u> СКВ + НК, <u>1752.5</u> СКМС + СКИ	Белильная известь; известко- вое молоко	Любая	338	Клей 2572 (1751); подслоу полуэбонита 1751 (1751.6; 2169; 1752; 1752.6)
<u>1751</u> СКБ	Водяной пар, насы- щенный капельками H_3PO_4 с 32% P_2O_5 ; H_2SiFe_6 ; HF		343	Клей 2572 (1751)
<u>1751</u> , <u>1751.6</u> СКБ, СКМС	Газообраз- ный хлор сухой и влажный	98	331	Клей 2572 (1751); подслоу полуэбонита 1751 (1751.6)
<u>1751</u> СКБ	Гипохло- рит NaOH (4-5%); своб. хлор Cl (12%)	-	308	Клей 2572 (1751)
Эбониты				
<u>2109</u> , <u>1726</u> СКБ, НК	Азотная кислота	15	293	Клей 2572 (2109; 1726)
<u>2109</u> , <u>1726</u> СКБ, НК	Серная кислота	70	293	Клей 2572 (2109; 1726)
<u>1726</u> НК	Серная кислота	Любая	343	Подслоу полуэбонита 1751 (1726)
<u>2109</u> СКБ	Соляная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)
<u>1726</u> НК	Соляная кислота	Любая	343	Клей 2572 (1726)
<u>2109</u> СКБ	Соляная кислота	36	343	Клей 2572 (2109)
<u>2109</u> СКБ	Уксусная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)

Марка каучук	Характеристика агрессивной среды			Способ крепления (марка гуммировочного материала)
	среда	кон-ция, %, не более	Темпер-ра, К, не выше	
$\frac{1726}{\text{НК}}$	Уксусная кислота	Любая	343	Подслой полуэбонита 1751 (1726)
$\frac{2109}{\text{СКБ}}$; $\frac{1726}{\text{НК}}$	Фосфорная кислота	Любая	343	Клей 2572 (2109); подслоя полуэбонита 1751 (1726)
$\frac{6024}{\text{НК}}$	Фтористоводородная кислота	50	313	Подслой полуэбонита 1751 (6024; 1726)
$\frac{1726}{\text{НК}}$	Фтористоводородная кислота	50	323 (кратковремен. до 343)	Подслой полуэбонита 1751 (6024; 1726)
$\frac{2109}{\text{СКБ}}$	Фтористоводородная кислота	Любая	293	Клей 2572 (2109)
$\frac{2109}{\text{СКБ}}$; $\frac{1726}{\text{НК}}$	Едкий натр; едкое кали	Любая	343	Подслой полуэбонита 1751 (1726); клей 2572 (2109)
$\frac{\text{ИПР}-1394}{\text{СКИ}}$	Раствор NaCl	31	343	Подслой полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{2109}{\text{СКБ}}$; $\frac{1726}{\text{НК}}$; $\frac{6024}{\text{НК}}$ $\frac{\text{ИПР}-1394}{\text{СКИ}}$	Раствор ZnCl ₂	50	338	Клей 2572 (2109); подслоя полуэбонита 1751 (1726; 6024); подслоя полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{2109}{\text{СКБ}}$; $\frac{1726}{\text{НК}}$; $\frac{6024}{\text{НК}}$ $\frac{\text{ИПР}-1394}{\text{СКИ}}$	Белильная известь; известковое молоко	Любая	338	Клей 2572 (2109); подслоя полуэбонита 1751 (1726; 6024); подслоя полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)
$\frac{\text{ИПР}-1213}{\text{НК}}$; $\frac{\text{ИПР}-1394}{\text{СКИ}}$	Газообраз. хлор сухой и влажный	98	от 298 до 353К	Подслой полуэбонита ИРИ-1212 (ИРП-1213); подслоя полуэбонита ИРП-1395 (ИРП-1394)

П.3. 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, применяем. для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (под-слой + промех. слой + + основн. покрытие)	общая	
Послойное гуммирование в два приема						
Аппарат, работающий под наливом и под давлением при температуре до 343К	-	-	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 373К	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
	1751	4849	1726	1,5+3,0 +1,5	6,0	2572 и 4508
	1751	1976-М	1752	1,5+3,0 +1,5	6,0	2572 и 4508
	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Аппарат, работающий под напряжением электрического тока	1751 или 1751.6	-	1752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	2572
Аппарат, работающий в средах производства искусственных волокон	1751 или 1751.6	-	1752 или 1752.5	1,5+4,5	6,0	2572
	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
	1751	-	1976-М	3,0+3,0	6,0	2572 и 4508
Аппарат, работающий в среде влажного и сухого хлора при температуре от 293 до 371 К	ИПР-1212	-	ИПР-1211	1,5+4,5	6,0	2572
	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, применяем. для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (под- слой + промеж. слой + +основн. покрытие)	общая	
Центрифуги	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Колена, тройники, отводы, вентили	-	-	1751 или 1751.6	6,0	6,0	2572
Ванны, баки, вентиля- ционные трубы, рабо- тающие при темпера- туре не выше 333К	-	-	829 или 2566	6,0	6,0	2572 и 4508
	1814	-		1,5+3,0	4,5	
Аппарат и деталь, работающие в сре- дах 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 сре- дах 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, работаю- щий в условиях аб- разивного износа	1751	-	1976-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	-	1976-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 сре- дах производства двуокиси титана	1751 или 1751.6	-	51-1574	1,5+(от 4,5 до 10,5)	6,0- 12	2572

Аппарат или деталь и их назначение	Марка резины, полуэбонита или эбонита			Толщина покрытия, мм		Марка клея, применяем. для склеивания слоев при дублировании
	для подслоя	для промежуточного слоя	для основного покрытия	каждого слоя (под-слой + промеж. слой + основн. покрытие)	общая	
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
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-М	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
	1814	-	829 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

П.4. Коэффициенты диффузии D и энергии активации диффузии E_D твердых низкомолекулярных веществ в эластомерах (348 К)

Эластомер	Сера	
	Коэффициент диффузии $D \cdot 10^7$, $\text{см}^2/\text{с}$	Энергия активации диффузии E_D , кДж/моль
Полибутадиен	12,7	23,5
Полиизопрен	5,0	31,7
СКЭПТ	2,1	38,6
БК	0,22	48,2
Полихлоропрен	0,91	46,1
СКС-18	3,90	34,4
СКС-30	1,90	38,1
СКС-50	0,81	46,9
СКН-18	2,10	38,1
СКН-26	1,80	38,6
СКН-40	1,35	40,2

П.5. Рецептура и свойства применяемых в работе резиновых и эбонитовых смесей и клеев

Резиновая смесь 1976

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
СКБ	100,0	53,76
Сера	3,0	1,61
Фактис темный	10,0	5,38
Масло вазелиновое	10,0	5,38
Известь пушонка	3,0	1,61
Сажа ламповая	60,0	32,26
Итого	186	100

Плотность смеси – $1,14 \text{ г/см}^3$.

Предел прочности при растяжении – 60 кгс/см^2 .

Относительное удлинение – не более 225%.

Остаточное удлинение – не более 20%.

Твердость (ГОСТ 263-53) – 56.

Истирание – $600 \text{ см}^3/\text{квт.ч}$.

Резиновая смесь 2566

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	70,0	50,05
СКБ	30,0	21,45
Сера	2,5	1,79
Каптакс	0,35	0,25
Окись цинка	5,0	3,58
Стеарин технический	1,0	0,72
Неозон Д	1,0	0,72
Рубракс	5,0	3,58
Сажа ламповая	25,0	17,86
Итого	139,85	100

Плотность смеси – 1,04 г/см³.

Предел прочности при растяжении – 150 кгс/см².

Относительное удлинение – не более 600%.

Остаточное удлинение – не более 35%.

Твердость (ГОСТ 263-53) – 36.

Истирание – 400 см³/квт.ч.

Резиновая смесь 4476

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
СКБ	100,0	52,36
Сера	5,0	2,62
Фенил-β-нафтиламин	1,0	0,52
Рубракс	5,0	2,62
Полидиены	12,0	6,28
Актинап	8,0	4,19
Сажа ламповая	60,0	31,41
Итого	191	100

Плотность смеси – 1,15 г/см³.

Предел прочности при растяжении – 55 кгс/см².

Относительное удлинение – не более 150%.

Остаточное удлинение – не более 15%.

Твердость (ГОСТ 263-53) – 52.

Резиновая смесь ИРП-1025

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Хлоропреновый каучук	100,0	51,80
Окись цинка	2,0	1,04
Окись магния	5,0	2,59
Фенил-β-нафтиламин	1,0	0,52
Масло машинное	5,0	2,59
Сажа ламповая	40,0	20,73
Сажа белая	40,0	20,73
Итого	193	100

Плотность смеси – 1,48 г/см³.

Предел прочности при растяжении – 240 кгс/см².

Относительное удлинение – не более 364%.

Остаточное удлинение – не более 8%.

Твердость (ГОСТ 263-53) – 74.

Истирание – 423 см³/квт.ч.

Эбонитовая смесь 1752

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	36,6	16,88
СКБ	63,4	29,25
Сера	30,0	13,84
Дифенилгуанидин	1,2	0,55
Олеиновая кислота	1,0	0,46
Рубракс	10,0	4,61
Тальк	74,6	34,41
Итого	216,9	100

Плотность смеси – 1,34 г/см³.

Соппротивление изгибу – 470 кгс/см².

Твердость (ГОСТ 263-53) – 92-98.

Теплостойкость по Мартенсу (ГОСТ 272-41) – 318-325 К.

Эбонитовая смесь 1814

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
СКБ	100,0	38,04
Сера	65,7	25,0
Дифенилгуанидин	2,0	0,76
Масло льняное	6,0	2,28
Известь пушонка	26,3	10,0
Тальк	28,9	10,99
Отходы ткани	31,0	11,79
Сажа ламповая	3,0	1,14
Итого	262,9	100

Плотность смеси – 1,35 г/см³.

Сопротивление изгибу – 500-650 кгс/см².

Теплостойкость по Мартенсу (ГОСТ 272-41) – 323-348 К.

Эбонитовая смесь 1751

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
СКБ	100,0	45,0
Сера	30,0	13,5
Дифенилгуанидин	1,22	0,54
Рубракс	10,0	4,5
Актинап	6,0	2,7
Тальк	75,0	33,75
Итого	222,22	100

Плотность смеси – 1,35 г/см³.

Сопротивление изгибу – 500-650 кгс/см².

Теплостойкость по Мартенсу (ГОСТ 272-41) – 323-348 К.

Эбонитовая смесь ИРП-1213

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	100,0	30,39
Сера	40,0	12,16
Дифенилгуанидин	3,0	0,91
Окись магния	6,0	1,82
Тальк	150,0	45,59
Сажа ламповая	30,0	9,11
Итого	329,0	100

Плотность смеси – 1,35 г/см³.

Сопротивление изгибу – 500-650 кгс/см².

Теплостойкость по Мартенсу (ГОСТ 272-41) – 323-348 К.

Эбонитовая смесь ИРП-1214

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	100,0	27,86
Сера	40,0	11,14
Дифенилгуанидин	3,0	0,83
Окись магния	6,0	1,67
Тальк	150,0	41,78
Графит серебристый	40,0	11,14
Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Сажа газовая	20,0	5,57
Итого	359,0	100

Плотность смеси – 1,35 г/см³.

Сопротивление изгибу – 500-650 кгс/см².

Теплостойкость по Мартенсу (ГОСТ 272-41) – 323-348 К.

Клеевая смесь 2572

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	100,0	41,23
Сера	38,68	15,94
Глет свинцовый	4,14	1,70
Канифоль	1,0	0,40
Редоксайд	21,17	8,73
Мел	79,56	32,80
Итого	242,55	100

Клеевая смесь 4508

Наименование ингредиентов	Весовые части	Весовые проценты
Натуральный каучук	100,0	90,98
Сера	3,96	3,60
Окись магния	4,95	4,5
Альдоль- α -нафталин	1,0	0,92
Итого	109,9	100

**П.6. Область применения гуммировочных обкладок
и состав рабочих сред**

Состав рабочей среды; концентрация, %; температура, К	Марки обкладок	Наименование объекта
Хлорный анолит – 353	1751 1751+2566	Трубопроводы и аппаратура
Поваренная соль (рассол) 300 г/л 333-353	1751 2566	Коммуникации, хранилища
Поваренная соль 310 г/л 373	Д-III	Трубопроводы
Щелочь 100 г/л 343	2566+диабазовая плитка	Колонна абгазов
Соляная кислота 35-36 368-373	Д-10+метлахская плитка	Колонна Гаспаряна
Соляная кислота 34-35 293	Д-10+футеровка плит- кой	Хранилище
Соляная кислота техническая 34-35 293-298	Д-10	Железнодорожные цистерны
Абгазная соляная кислота 34-35 до 253	1814+1976+2566	Железнодорожные цистерны
Абгазная соляная кислота 25-30 323	2566+диабазовая плитка	Аппараты абсорбции хлористого водорода
Абгазная соляная кислота 27,5-29 293	2566+диабазовая плитка	Хранилища
Катализатор солянокислый – 298-303	Д-10	Баки
Ингибированная соляная кислота 25-28 293	2566	Хранилища
Хлористый водород Производственная 333-343	Д-10 Д-10+ОП-3	Коллектор

Состав рабочей среды; концентрация, %; температура, К	Марки обкладок	Наименование объекта
Хлоргаз 98 313-323	Д-10	Коллектор
Парообразная $H_2SO_4 + SO_2$ — 303-313	Д-10+кирпич	Электрофилтры на упарке H_2SO_4
Карбид кальция — 353-373	Д-10	Карбидные передвижные и стационарные бункеры
Уксусная кислота 96 333-353	Д-10	Аппаратура
Электролит ($NaCl$, активный хлор, хлорат, газообразный хлор) — 343-353	1752	Ртутные ванны (корпусы)
Хлоргаз влажный 94-95 343-353	1752	Крышки к ртутным ваннам
Парообразный этиловый спирт Производственная 373	Д-10+футеровка графитом	Газоход при отпарке спирта-сырца, содержащего разбавленную серную кислоту
$NaOH$ (100-140 г/л) Гипохлорит (следы) $NaOCl_2$ ($He > 0,6$ г/л) Na_2CO_3 ($He > 0,8$ г/л) $NaCl$ (170-210 г/л) 363-373	1751-1752	Трубопроводы
Реакционный газ: винилхлорид (80-90%), хлористый водород (10-20%) 323-353	1751-1752	Трубопроводы
Гипохлорит натрия с содержанием свободного хлора 0,8-1 г/л 293-313	2566	Колонны очистки ацетилена
Гипохлорит натрия 0,8-1 г/л 293	2566+метлахская плитка	Хранилища, Аппараты по приготовлению гипохлорита

Состав рабочей среды; концентрация, %; температура, К	Марки обкладок	Наименование объекта
Гипохлорит натрия с активным хлором 0,8-1 г/л 293-298	1814+1976 1751	Трубопроводы, Запорная арматура
Хлор влажный 98 343-363	Д-10 1751	Коллектор, трубопроводы
Отработанная H ₂ SO ₄ (30%) Аммиак (концентрированный) 383	2566+кислотоупорный кирпич на арозамите 5	Нейтрализаторы
Обесхлоренный анолит: NaCl (260 г/л) NaOH (0,3 г/л) активный хлор (0,1 г/л) 343	1751	Трубопроводы, вентили
NaOH 750 г/л 353	1751	Трубопроводы
Рассол (NaCl) 310 г/л 325	1751	Трубопроводы, вентили
Соляная кислота (0,1 г/л) NaCl (260 г/л) NaOH (до 0,1 г/л) активный хлор (0,5-0,1 г/л) 343-378 (давление до 1,5 ат)	1751+1752+2 слоя диабазовой плитки	Дехлораторы
Абгазная соляная кислота 34-35 от 253 до 293	1814+1976	Железнодорожные цистерны
Хлористый водород (60%) Ацетилен (40%) от 273 до 323	1751	Смесители
Хлористый винил (70%) Хлористый водород (15%) Ацетилен + примеси переменного состава (5%) 353	1976	Коммуникации реакционной смеси
Абгазная соляная кислота с примесью хлорвинила 27-30 293-303	2566+диабазовая плитка	Сборники соляной кислоты

Состав рабочей среды; концентрация, %; температура, К	Марки обкладок	Наименование объекта
Соляная кислота 27,5-32 от 243 до 323	2566+диабазовая плитка	Хранилища
Хлористый водород влажный 85-94 от 238 до 313	1976	Коллектор
Соляная кислота (2%), Хлор (2%) 293	2566	Циклоны
Соляная кислота 20-35 308	Д-10	Емкости, трубопроводы
Маточник: бисульфат аммония (40%), серная кислота (40%), органические примеси (до 3%), соляная кислота (29-30%) 353	829+2 слоя диабазо- вой плитки	Сборники
Укрепленный маточник: бисульфат аммония (40%), серная кислота (70%), метакриловая кислота + ацетон + эфиры (до 3%) 343	1751+диабазовая плитка или диабазовая замазка	Аппараты
Гипохлорит кальция 14-15 323	829	Крышки к аппаратам
Серная кислота 1 353	829+2 слоя диабазо- вой плитки на диаба- зовой замазке	Аппараты

П.7. Тепловые характеристики ненаполненных вулканизатов

Каучу- ки	Тепловые характери- стики	Температура, К					
		293	313	333	353	373	393
НК	λ	0,133	0,133	0,137	0,137	0,137	0,137
	$ср \cdot 10^{-2}$	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	5,0
	$a \cdot 10^3$	0,310	0,300	0,288	0,281	0,274	0,264
СКБ	λ	0,162	0,162	0,166	0,166	0,166	0,166
	$ср \cdot 10^{-2}$	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2
	$a \cdot 10^3$	0,349	0,346	0,338	0,331	0,324	0,317

**П.8. Тепловые характеристики смесей марок
1976, 2566, 1814, 1752, 2572**

Марка смеси	Дозировка ламповой сажи вес. ч.	Тепловые характеристики					
		λ		$ср$		$a \cdot 10^3$	$a \cdot 10^7$
		ккал/м.ч.град	Вт/м.град	ккал/м ³ град	кДж/м ³ град	м ² /ч	м ² /с
1976	60	0,272	0,316	4,6	19,2	0,590	1,64
2566	25	0,188	0,219	4,4	18,4	0,428	1,19
1814	30	0,168	0,196	4,6	19,2	0,366	1,02
1752	—	0,151	0,176	4,5	18,8	0,336	0,934
2572	—	0,133	0,155	4,3	18,0	0,310	0,861

П.9. Типовая форма расчета температурного поля в однослойном эластомерном покрытии в Mathcad

Задача. Требуется определить температуру в любой точке однослойной эластомерной пластины толщиной δ и в любой момент времени τ при нагревании в среде с температурой T_c . Начальная температура пластины T_0 . Теплофизические параметры пластины - λ, c, ρ, a . Коэффициент теплообмена от среды к поверхности пластины α .

Алгоритм построения температурного поля в покрытии.

1. В системе Mathcad ввести переменные δ, λ, a и присвоить им значения.
2. Задать коэффициент Био с помощью формулы $Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \delta$, найти его значение.
3. Задать число Фурье как функцию времени, построить её график.

$$Fo(\tau) := a \cdot \frac{\tau}{\delta^2}$$

Определить, до какого момента времени τ число Фурье считать малым ($0,0001 < Fo < 1$), а с какого – большим ($Fo > 1$). Для этого нужно вычислить, при каком значении τ число Фурье будет равно $Fo = 1$.

4. Для нахождения корней μ_n характеристического уравнения $\text{ctg } \mu = \frac{\mu}{Bi}$ задать функцию $F(\mu)$, построить её график.

Точное значение корней можно найти с помощью специальной функции $\text{root}(f(x), x, a, b)$, где $f(x)$ – выражение равное нулю, x – аргумент, (a, b) – интервал поиска корней функции $f(x)$. Интервал поиска (a, b) можно определять на графике построенной ранее функции $F(\mu)$.

5. Зная значения критерия Био и числа Фурье проанализировать, сколькими корнями можно ограничиться при решении.
6. Задать коэффициенты $A_n = \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)}$ как функцию переменной μ , вычислить их значения для различных корней.
7. Задать избыточную температуру как функцию двух переменных

$$\theta(x, \tau) := 1 - A(\mu l) \cdot \cos\left(\mu l \cdot \frac{x}{\delta}\right) \cdot e^{-\mu l^2 \cdot Fo(\tau)}, \text{ затем задать функ-}$$

цию температуры $T(x, \tau) := T_0 + (T_c - T_0) \cdot \theta(x, \tau)$ и построить её график.

П.10. Графики температурных полей гуммировочных покрытий

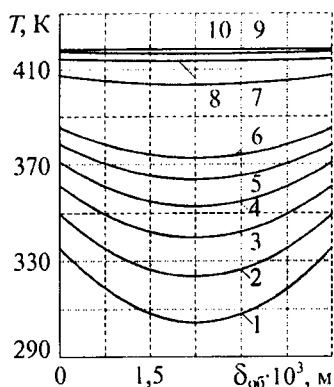


Рис. 1. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 4,5 \text{ мм}$, $T_c = 418 \text{ K}$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $\lambda_{об} = 0,316 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha = 100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 420 с

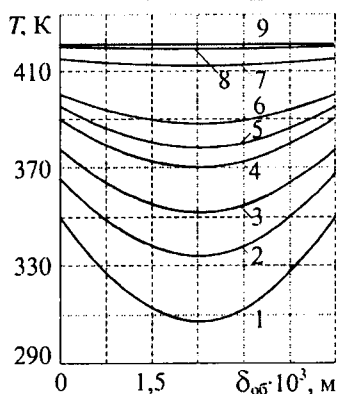


Рис. 2. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 4,5 \text{ мм}$, $T_c = 418 \text{ K}$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $\lambda_{об} = 0,316 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha = 150 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 300 с

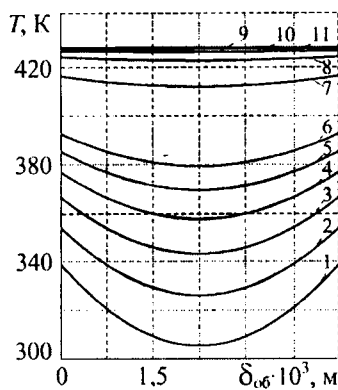


Рис. 3. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 4,5 \text{ мм}$, $T_c = 428 \text{ K}$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $\lambda_{об} = 0,316 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha = 100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

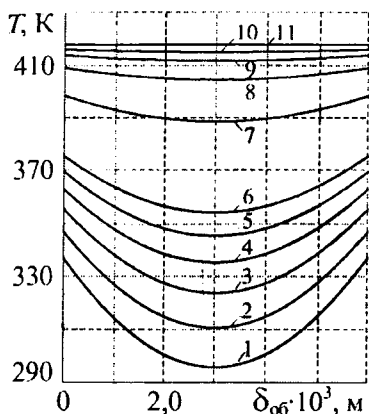


Рис. 4. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{об} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 100$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

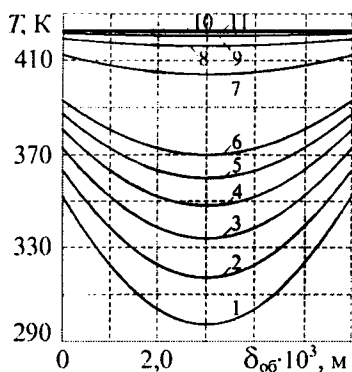


Рис. 5. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 423$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{об} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 150$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

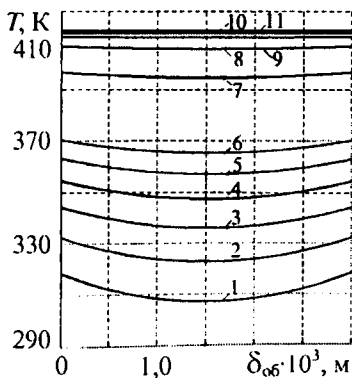


Рис. 6. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 3,0$ мм, $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{об} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{об} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 50$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

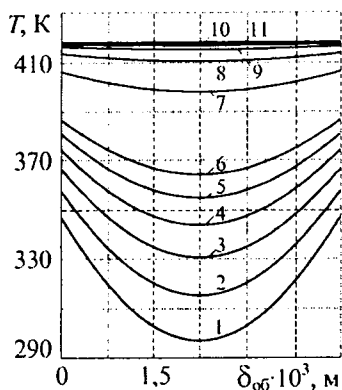


Рис. 7. Кривые распределения температуры в однослойном эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 100$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

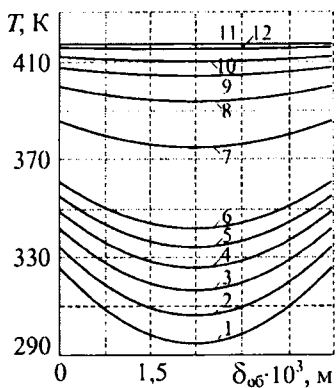


Рис. 8. Кривые распределения температуры в однослойном эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 50$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 420 с, 12 – 600 с

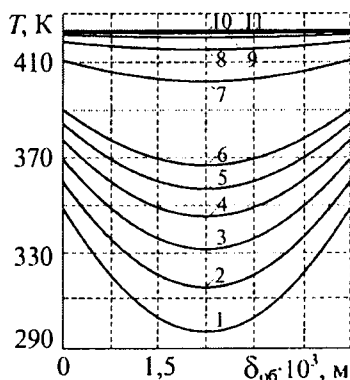


Рис. 9. Кривые распределения температуры в однослойном эбонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 423$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 100$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 420 с

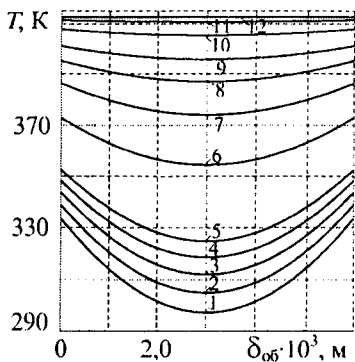


Рис. 10. Кривые распределения температуры в однослойном збонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 6,0$ мм, $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 50$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 20 с, 2 – 30 с, 3 – 40 с, 4 – 50 с, 5 – 60 с, 6 – 120 с, 7 – 180 с, 8 – 240 с, 9 – 300 с, 10 – 420 с, 11 – 600 с, 12 – 950 с

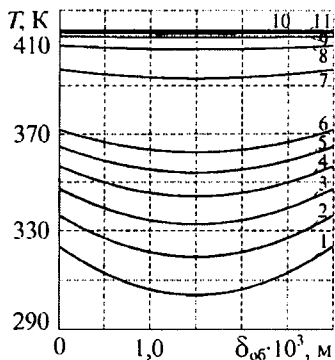


Рис. 11. Кривые распределения температуры в однослойном збонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 3,0$ мм, $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 50$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 420 с

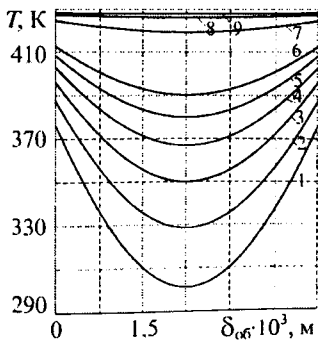


Рис. 12. Кривые распределения температуры в однослойном збонитовом покрытии марки 1752 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 428$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{06} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 200$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 300 с

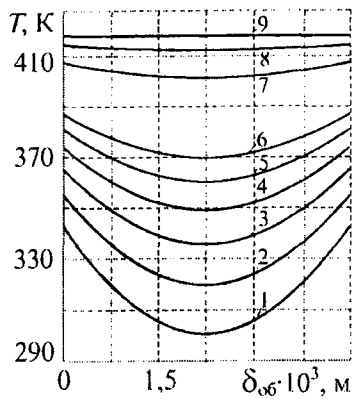


Рис. 13. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 100$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с

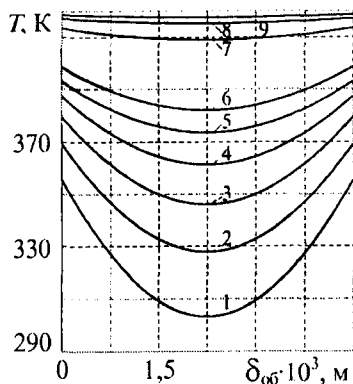


Рис. 14. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 150$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 120 с, 5 – 180 с, 6 – 240 с, 7 – 300 с, 8 – 420 с, 9 – 600 с

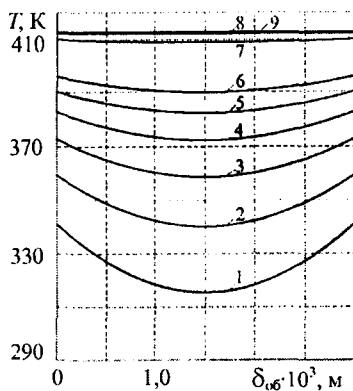


Рис. 15. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 3,0$ мм, $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 100$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с

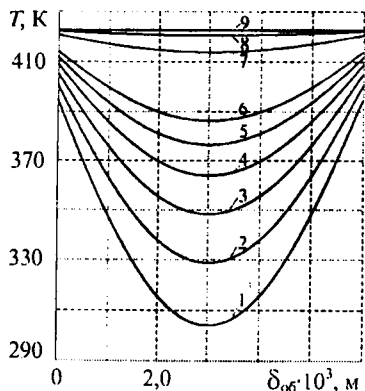


Рис. 16. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 6,0$ мм, $T_c = 423$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 150$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с

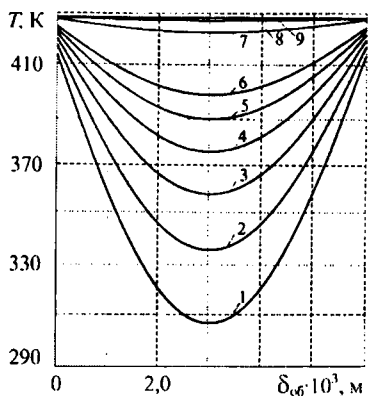


Рис. 17. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 6,0$ мм, $T_c = 428$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 200$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с

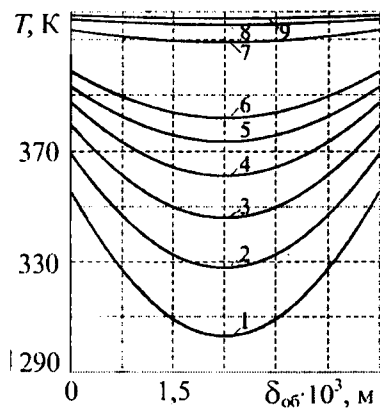


Рис. 18. Кривые распределения температуры в однослойном резиновом покрытии марки 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{06} = 4,5$ мм, $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\lambda_{06} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{06} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha = 200$ Вт/м²·К и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 420 с

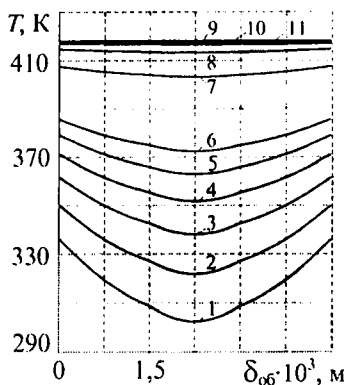


Рис. 19. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) + два слоя 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,176$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

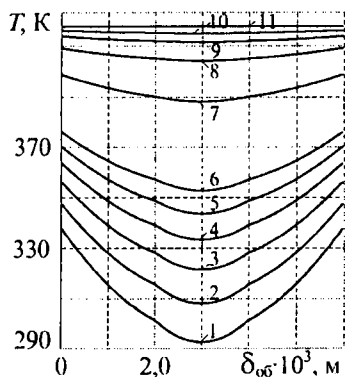


Рис. 20. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) + два слоя 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 6,0$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,176$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

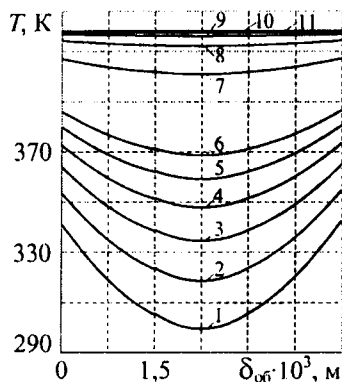


Рис. 21. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки 1752 (НК+СКБ) + два слоя 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,176$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 0,219$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 1,19 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240 с, 10 – 300 с, 11 – 600 с

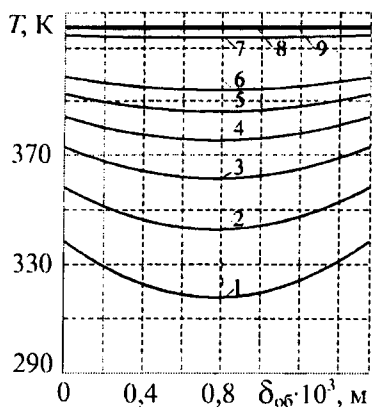


Рис. 22. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки два слоя 1976 (СКБ) + клей 2572 при $\delta_{об} = 3,1$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,155$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,861 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 300 с.

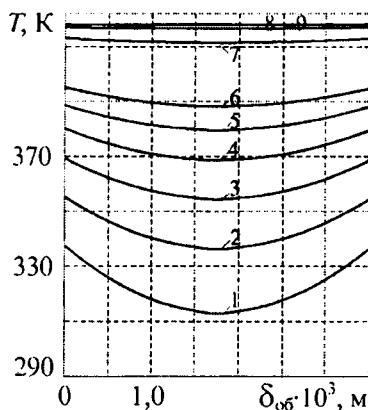


Рис. 23. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки два слоя 1976 (СКБ) + клей 2572 при $\delta_{об} = 3,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,155$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,861 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 0,316$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 1,64 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 300 с

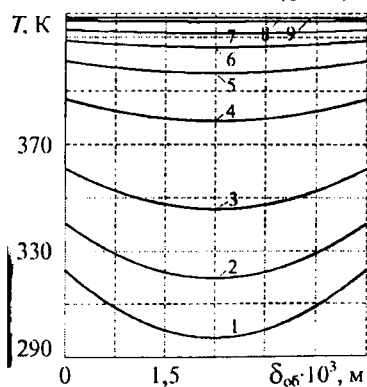


Рис. 24. Кривые распределения температуры в трехслойном эластомерном покрытии марки два слоя 2566 (НК+СКБ) при $\delta_{об} = 4,5$ мм, $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 50$ Вт/м²·К, $\lambda_{об} = 0,176$ Вт/м²·град, $a_{об} = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, при различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 120 с, 5 – 180 с, 6 – 240 с, 7 – 300 с, 8 – 420 с, 9 – 600 с

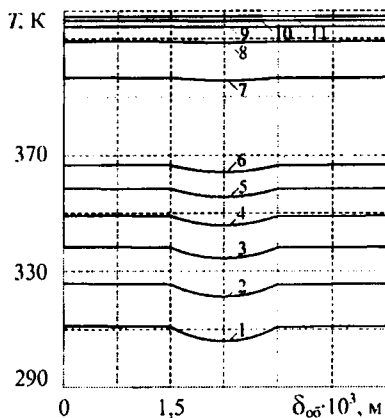


Рис. 25. Кривые распределения температуры в трехслойном резинометаллическом изделии с покрытием марки 1752 (НК+СКБ) (1,5+1,5+1,5 мм) при $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda_2 = 0,176$ Вт/м²·град, $a_2 = 0,934 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{1,3} = 50,2$ Вт/м²·град, $a_{1,3} = 14,04 \cdot 10^{-6}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 180 с, 9 – 240, 10 – 300 с, 11 – 600 с

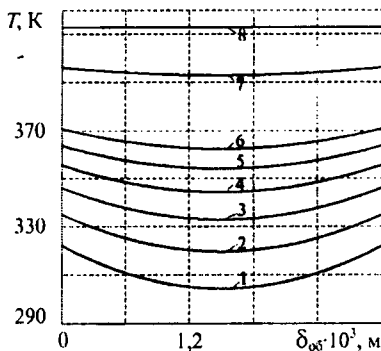


Рис. 26. Кривые распределения температуры в трехслойном резинометаллическом изделии с покрытием марки 1814 (СКБ) (1,0×3 мм) при $T_c = 413$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 50$ Вт/м²·К, $\lambda = 0,196$ Вт/м²·град, $a = 1,02 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 20 с, 3 – 30 с, 4 – 40 с, 5 – 50 с, 6 – 60 с, 7 – 120 с, 8 – 600 с

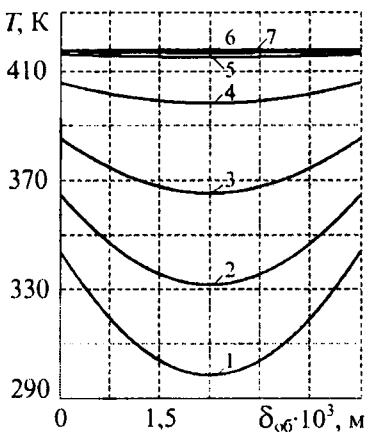


Рис. 27. Кривые распределения температуры в трехслойном резинометаллическом изделии с покрытием марки 1814 (СКБ) (1,5×3 мм) при $T_c = 418$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda = 0,196$ Вт/м²·град, $a = 1,02 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 120 с, 5 – 240 с, 6 – 300 с, 7 – 600 с

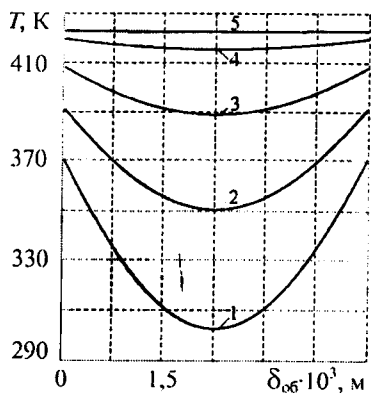


Рис. 28. Кривые распределения температуры в трехслойном резинометаллическом изделии с покрытием марки 1814 (СКБ) ($1,5 \times 3$ мм) при $T_c = 423$ К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 100$ Вт/м²·К, $\lambda = 0,196$ Вт/м²·град, $a = 1,02 \cdot 10^{-7}$ м²/с и различном времени прогрева: 1 – 10 с, 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 120 с, 5 – 240 с

Научное издание

Осипов Юрий Романович
Осипов Сергей Юрьевич
Панфилова Ольга Александровна

**Тепломассоперенос при термообработке
многослойных систем с эластомерными покрытиями**

Монография

Редактор И.Т. Куликова

Подписано в печать 5.09.2012. Формат 60 × 90/16
Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.-п.л. 9,7. Тираж 300 экз. Заказ № 341

Отпечатано: РИО, ВоГТУ 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15