

3. Технологическая часть

Введение

В данной части дипломного проекта рассматривается технологический процесс изготовления щелевого заряда из смесового твердого ракетного топлива, прочно скрепленного с корпусом РДТТ.

Смесевые твердые топлива являются ярко выраженными гетерогенными, многофазными взрывчатыми системами, представляющими собой смесь, как правило, неорганического окислителя, органического высокомолекулярного горючего-связующего и содержащие специальные добавки (энергетические, эксплуатационные, технологические). По своей структуре СТРТ – высоконаполненные (до 95%) композиционные материалы, в полимерной матрице которых равномерно распределены мелкодисперсные окислитель, металлическое (металлосодержащее) горючее и другие компоненты. Современные смесевые твердые ракетные топлива в качестве окислителя содержат перхлорат аммония (ПХА) NH_4ClO_4 .

3.1 Схема технологического процесса изготовления заряда из СТРТ

В конструкторской части дипломного проекта было выбрано топливо марки ARCIT-373D с известными характеристиками. Условная химическая формула и некоторые свойства СТРТ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства СТРТ

| Условная химическая формула | ΔH_{298} , кДж/кг | $\alpha \cdot 10^4$, 1/K | ρ , кг/м ³ | $\frac{C_p}{\text{Дж}}$, кг · К |
|--|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| $C_{9,574}H_{37,389}O_{21,189}N_{5,039}Cl_{6,468}Al_{7,734}$ | -1934 | 4 | 1770 | 1215 |

В данной работе представлена непрерывная технология изготовления заряда из смесового твердого топлива. Блок-схема технологических процессов изготовления СТРТ и заряда из СТРТ с необходимыми операциями

представлена на листе 1 технологической части. Рассмотрим основные операции, процессы, технологические аппараты применительно к производству зарядов из типового состава на основе инертного полимерного ГСВ.

Этот состав топлива, как и другие высокоэнергетические СТРТ крупногабаритных зарядов представляют собой высоконаполненную гетерогенную композицию, содержащую высокий процент твердого наполнителя различной химической природы, в том числе высокочувствительное взрывчатое вещество. В этой связи смешение топливной массы с целью обеспечения безопасности, необходимой воспроизводительности состава и свойств по всему объему заряда проводят в несколько приемов, предварительно получая частные смеси из нескольких компонентов, называемые полуфабрикатами.

Условно принципиальная схема изготовления зарядов СТРТ представлена на рис.1.

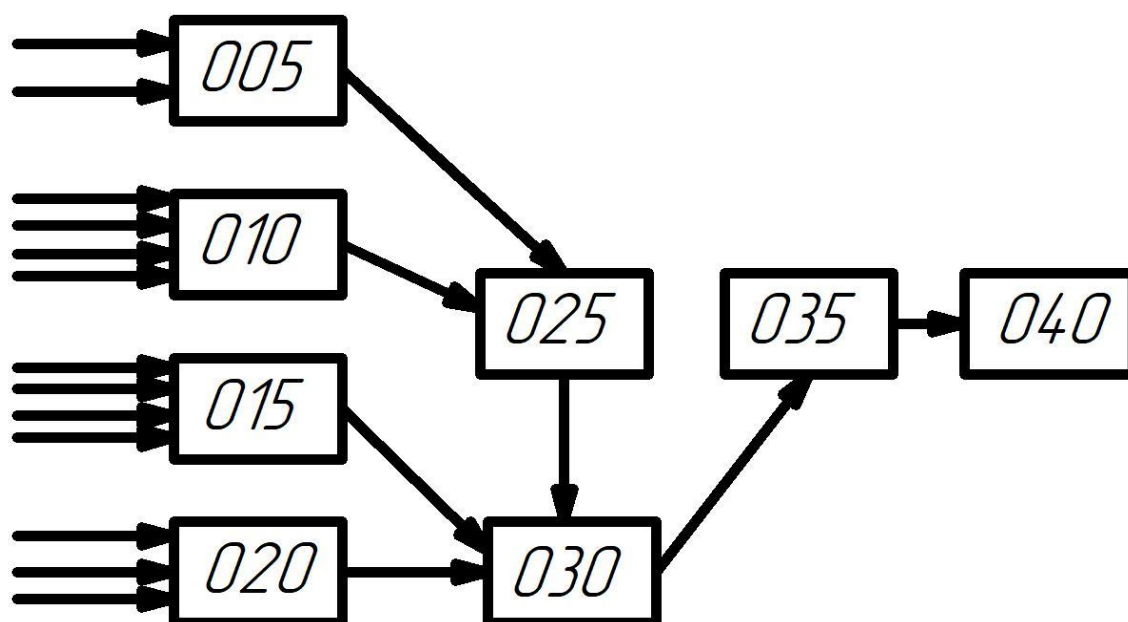


Рис. 1 – Схема изготовления зарядов СТРТ

Основные технологические операции изготовления заряда из СТРТ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технологические операции

| № | Наименование операции |
|-----|--|
| 005 | Приготовление РСПК |
| 010 | Приготовление ССД |
| 015 | Подготовка корпусов двигателей (пресс-форм) и формующей оснастки |
| 020 | Подготовка технологической оснастки |
| 025 | Смещение топливной массы |
| 030 | Заполнение корпуса двигателя |
| 035 | Отверждение и распрессовка зарядов |
| 040 | Окончательная обработка зарядов, контроль качества и укупорка |

3.2 Технологический процесс

Рассмотрим содержание основных операций на отдельных стадиях.

3.2.1 Операция 005. Приготовление рабочей смеси порошкообразных компонентов (РСПК)

Применительно к рассматриваемому составу в РСПК входят различные фракции перхлората аммония (ПХА), отличающиеся средним диаметром частиц и удельной поверхностью. Как правило, перхлорат аммония используют двух фракций: крупную и мелкую, причем $d_k/d_m = 7 - 10$.

В общем случае применение полифракционного наполнителя по сравнению с монофракционным позволяет улучшить реологические характеристики топливной массы при постоянной объемной доле наполнителя или увеличить объемную долю наполнителя при сохранении уровня реологических характеристик.

В рассматриваемом составе используют ПХА с $d_k = 200 - 300$ мкм и $d_m \leq 50$ мкм. Крупный ПХА поступает на производство зарядов готовым, а мелкий - получают непосредственно на производстве путем измельчения крупного до требуемой величины удельной поверхности перед началом изготовления топливной массы.

Содержание операции представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание операции 005

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|----------------------------------|--|-----------------------------|
| Операция 005. Приготовление РСПК | | |
| 01 | Загрузка в смеситель крупной фракции ПХА, созданием разряжения в смесителе | Смеситель С-5 |
| 02 | Измельчение крупной фракции ПХА до получения требуемых характеристик | Струйно – вихревая мельница |
| 03 | Дозирование вибро-шнековым дозатором | Вибро – шнековый дозатор |
| 04 | Загрузка мелкой фракции ПХА вакуумом в смеситель | Смеситель С-5 |

3.2.2 Операция 010. Приготовление смеси связующего с добавками (ССД)

В ССД вводят поливинилхлорид, ди-(2-этилгексил) адипинат, порошкообразный Al. Поливинилхлорид, ди-(2-этилгексил) адипинат и порошкообразным Al в начале смешивают в планетарном смесителе (СП).

Последующее смешение с добавками проводят в смесителе объемного типа С-5 или УСП-7, в которых отсутствуют механические мешалки, что обеспечивает безопасность проведения процесса.

Смесители СП и С-5 обогреваются водой с температурой $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание операции представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Содержание операции 010

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|---------------------------------|--|------------------------|
| Операция 010. Приготовление ССД | | |
| 01 | Подогрев поливинилхлорида в плавителе | Плавитель |
| 02 | Дозирования ДВП в СП | Дозатор |
| 03 | Смешение связующего | Планетарный смеситель |
| 04 | Загрузка вакуумом порошкообразного А1 в 8 приемов с перемешиванием | Планетарный смеситель |
| 05 | Перемешивание всей загруженной массы | Планетарный смеситель |
| 06 | Дозирование массы в смеситель | Смеситель С-5 |
| 07 | Загрузка добавок | Смеситель С-5 |
| 08 | Смешение ССД | Смеситель С-5 |
| 09 | Отбор и анализ пробы | - |

3.2.3 Операция 015. Подготовка корпусов двигателей и формующей оснастки

Цель операции подготовки корпусов двигателей - нанесение на его внутреннюю поверхность крепящего (клеящего) состава, обеспечивающего скрепление с зарядом топлива в процессе производства. На внутренней стороне силовой оболочки корпуса имеется защитно-крепящий резиновый слой на основе синтетических каучуков, обладающий достаточной эластичностью по сравнению с материалом силовой оболочки (например, полимерный композиционный материал). Его назначение - скомпенсировать внутренние напряжения, возникающие в заряде в результате полимеризационной и температурной усадки при отверждении.

Возможны следующие способы скрепления заряда с корпусом:

- тканевый с помощью крепящего состава, наносимого на тканевую подложку, которой дублирована резина крепящего слоя. Ткань (капроновая, асбестовая) обладает развитой поверхностью, что обеспечивает высокую прочность скрепления.
- бестканевый с использованием крепящего состава, наносимого на ЗКС или ТЗП;
- бестканевый и бесклеевый при котором топливо скрепляется с ТЗП с использованием вулканизирующих добавок, наносимых на ТЗП.

Наиболее отработанным является тканевый способ.

Основные требования к клеящему составу (КС):

- 1) высокие адгезионные свойства ($\sigma_{адг} \geq \sigma_{т}$), обеспечивающие когезионное (по топливу) разрушение адгезионного шва при нагрузках, превосходящих или равных прочности топлива при растяжении;
- 2) совместимость с полимерной основой ГСВ;
- 3) ограниченная совместимость с пластификатором топлива;

- 4) инертность по отношению к прилегающим слоям топлива и корпуса;
- 5) величина температуры стеклования меньше температуры нижней границы интервала эксплуатации РДТТ;
- 6) температурный коэффициент линейного расширения близок к коэффициенту топлива;
- 7) возможно меньшая плотность;
- 8) возможность совулканизации с ГСВ топлива;
- 9) основные механические характеристики КС (σ, ε) близки к механическим характеристикам топлива;
- 10) стабильность свойств;
- 11) минимальная токсичность, отсутствие легковоспламеняющихся жидкостей.

Основа клея - полимер с высокими адгезионными свойствами. На практике используют те же полимеры, которые входят в состав топлива или не содержащиеся в нем. В первом случае адгезионное взаимодействие объясняется преимущественно диффузионным механизмом, а во втором - образованием химических и дисперсионных связей на границе скрепления. При этом может реализоваться принцип взаимопроникающих сеток для несовместимых структурирующих систем.

В состав КС, как и в ГСВ топлив, входят компоненты системы отверждения, пластификаторы, растворители (разбавители) и другие технологические добавки. Метод нанесения клея зависит от его технологических свойств, прежде всего вязкости. Так высоковязкие составы наносят методом втирания шпателем, средневязкие - кистью, низковязкие - распылением. Оптимальный расход КС для корпусов крупногабаритных двигателей определяется исходя из условий обеспечения адгезионной прочности и полноты пропитки ткани, а также типа намотки корпусов и составляет ориентировочно 200-400 г/м². Низковязкие КС наносятся в

основном методом распыления с помощью специальных установок и, частично, кистью вручную.

Рассмотрим сущность основных операций применительно к типовому КС следующего состава:

- полимерная основа - наиритовая смесь (наирит и хлорнаирит - хлоропреновый каучук);
- система отверждения - сера, тиурам-Д, окись цинка;
- растворитель - смесь этилацетата и бензина.

Регламентируется срок и условия хранения подготовленного корпуса до заполнения топливной массой (~ 10-15 суток).

Содержание операции представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Содержание операции 015

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|---|--|------------------------|
| Операция 015. Подготовка корпуса двигателя и формующей оснастки | | |
| 01 | Входной контроль | - |
| 02 | Сушка горячим воздухом | - |
| 03 | Приготовление раствора полимера (~30 %) | - |
| 04 | Приготовление раствора отвердителя | - |
| 05 | Нанесение раствора полимера с помощью вручную 2-3 слоя, между слоями сушка | Кисть |
| 06 | Окончательная сушка | - |
| 07 | Нанесение раствора отвердителя и сушка | Кисть |

| | | |
|----|---|---|
| 08 | Сборка с техоснасткой, проверка на герметичность, заполнение сухим воздухом | - |
|----|---|---|

3.2.4 Операция 020. Подготовка технологической оснастки

В технологическую (формующую) оснастку входят следующие основные элементы: формующая игла, узел силового крепления иглы, узел ввода, система поддавливания и отсечки топливной массы после заполнения и другие. Сущность подготовки заключается в том, что элементы, соприкасающиеся с топливной массой после заполнения корпуса, покрывают антиадгезионным слоем с тем, чтобы после отверждения заряда эти формующие элементы можно было безопасно извлечь (распрессовать заряд). Как правило, для покрытия используют кремнийорганические (силиконовые) каучуки в виде раствора.

Содержание операции представлено в таблице 6.

Таблица 6 – Содержание операции 020

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|---|--|------------------------|
| Операция 020. Подготовка технологической оснастки | | |
| 01 | Входной контроль (осмотр, обмер) | - |
| 02 | Приготовление обезжиривающего раствора, обработка им элементов | - |
| 03 | Сушка | - |
| 04 | Приготовление грунта - 15% раствора силиконового каучука СКТ в бензине с катализатором отверждения | - |

| | | |
|----|--|--------|
| 05 | Протирка оснастки бензино-хладоновой смесью | Ветошь |
| 06 | Сушка | - |
| 07 | Нанесение грунта в несколько слоев с сушкой между слоями | Кисть |
| 08 | отверждение грунта при 80 – 100 °С | - |
| 09 | проверка сплошности грунта | - |
| 10 | приготовление 30% раствора покрытия- алюмосиликонового каучука в бензине с катализатором отверждения | - |
| 11 | пропитка оснастки спиртом | Ветошь |
| 12 | Сушка | - |
| 13 | нанесение раствора каучука | Кисть |
| 14 | отверждение покрытия при 15 – 35 °С | - |
| 15 | контроль сплошности покрытия | - |

3.2.5 Операция 025. Смешение топливной массы

Смешение - один из важнейших технологических процессов в производстве зарядов СТРТ. В результате его осуществления формируются реологические свойства топливной массы и выходные характеристики зарядов.

Цель смешения - равномерное распределение компонентов по объему, получение однородной по химическому составу массы, достижение стабильности ее характеристик.

Смешение - вероятностный процесс и с этих позиций его цель - превращение исходной системы, характеризующейся упорядоченным распределением ингредиентов, в систему с неупорядоченным, случайным распределением. С позиции структуры цель смешения - увеличение контакта между компонентами. Идеально перемешанная система, в которой поверхность контакта между дисперсионной средой и дисперсионной фазой равна поверхности всех частиц дисперсной среды. Способ смешения в производстве зарядов для МБР - периодический, т.к. в объемных (гравитационных) смесителях загрузка не более 5-7 т. массы.

Содержание операции представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Содержание операции 025

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|--|---|------------------------|
| Операция 025. Смешение топливной массы | | |
| 01 | Загрузка первой порции РСПК из контейнера смесителя | Смеситель С-5 |
| 02 | Загрузка ССД | Смеситель С-5 |
| 03 | Перемешивание | Смеситель С-5 |
| 04 | Порционная загрузка РСПК и перемешивание | Смеситель С-5 |
| 05 | Перемешивание всей композиции в начале под вакуумом, затем при атмосферном давлении | Смеситель С-5 |
| 06 | Контроль качества топливной массы | - |

Основные процессы при смешении:

перенос вещества, в основном конвективный, за счет деформаций сдвига, растяжения и сжатия; диффузия маловероятна из-за большого диаметра частиц и высокой вязкости системы;

- 1) диспергирование, разрушение коагуляционной структуры наполнителя;
- 2) образование граничного слоя связующего на частицах наполнителя (адсорбционно-сольватных оболочек);
- 3) механо-химические процессы - деструкция связующего, подизмельчение частиц наполнителя;
- 4) подотверждение массы вследствие химического структурирования ГСВ;
- 5) дегазация (деаэрация) массы вакуумированием – удаление газовых включений, так как они вызывают ухудшение реологических характеристик массы, пористость массы и заряда (источники: механический захват воздуха, испарение, адсорбция, химические реакции, окклюзия и др.).

При загрузке промежуточных смесей и перемешивании под вакуумом остаточное давление в смесителе $p_{\text{ост}} = 15 - 30$ мм.рт.ст., температура массы ~ 40 °С, температура воды в рубашке смесителя $15 - 30$ °С, температура воздуха в цехе $15 - 30$ °С и влажность $\varphi \leq 60\%$. Регламентируется время смешения и количество оборотов смесителя С-5. В общем случае на качество топливной массы влияют многие факторы, параметры процессов, в связи с чем они на стадии отработки техпроцесса применительно к конкретному заряду оптимизируются. Основными из них являются:

- порядок ввода компонентов в смеситель;
- температура массы и давление в смесителе;

- время и интенсивность смешения после каждой загрузки и после загрузки всех компонентов (промежуточных смесей);
- загрузка смесителя.

3.2.6 Операция 030. Заполнение корпусов двигателей

Пресс-форму с технологической оснасткой, подготовленные к заполнению, устанавливают в барокамере, находящейся в шахте на весах в вертикальном положении смеситель С-5, как правило, передвижной, с топливной массой устанавливают над бункером экструдера. А экструдер соединяют с корпусом специальным устройством. Время хранения топливной массы в С-5 после смешения до слива, а также промежутки между очередными сливами в одну пресс-форму регламентируется с учетом жизнеспособности массы- времени сохранения реологических характеристик на допустимом уровне.

Содержание операции представлено в таблице 8.

Таблица 8 – Содержание операции 030

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|--|---|------------------------|
| Операция 030. Заполнение корпуса двигателя | | |
| 01 | Вывод здания на температурно-влажностный режим ($t = 15 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi \leq 65\%$) | - |
| 02 | Подсоединение устройства дистанционного подключения прессформы | Барокамера |
| 03 | Опрессовка пресс-формы | Барокамера |
| 04 | Завоз смесителя с топливной массой | Смеситель С-5 |
| 05 | Перемешивание всей композиции в начале под вакуумом, затем при атмосферном давлении | Смеситель С-5 |

| | | |
|----|--|-----------|
| 06 | Проверка герметичности системы | - |
| 07 | Слив топливной массы в экструдер | Экструдер |
| 08 | Подача топливной массы с помощью экструдера | Экструдер |
| 09 | Отсоединение смесителя и экструдера от сборки | - |
| 10 | Окончательное взвешивание | Весы |
| 11 | отбор проб топливной смеси на анализ из горловины сливного устройства сборки | - |

При сливе топливной смеси не допускается проскока воздуха в корпус из смесителя, что может произойти в конце слива. Для предотвращения проскоков воздуха снижается темп слива путем регулирования остаточного давления.

Завершив подачу, отсекают топливную массу отсекателем от магистрали и устанавливают редукционный клапан. Извлекают пресс-форму из барокамеры, устанавливают на специальную платформу и транспортируют в термокамеру на отверждение.

3.2.7 Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда

На стадии производства обеспечиваются механические характеристики, геометрические размеры, плотность, равновесная температура и др. характеристики зарядов. Отверждение определяет эффективность всего технологического процесса, так как составляет около 80% общего времени изготовления зарядов СТРТ.

Отверждение - физико-химический процесс перехода топливной массы из вязкого или упруговязкого состояния в упругое (вязкоупругое) вследствие

структурирования, обусловленного прежде всего химическими реакциями между макромолекулами полимерной основы ГСВ и образованием физической структуры.

Одновременно со структурированием могут идти процессы разложения отдельных компонентов и деструкции, старение образовавшихся высокополимеров. Важная особенность процесса отверждения крупногабаритных зарядов - не стационарность, не изотермичность, наличие полимеризационной усадки. Тепловыделение при структурировании составляет 20 ... 30 Дж/кг, $\Delta T = 20 \dots 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, полимеризационная усадка достигает 5..10%.

Содержание операции представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Содержание операции 035

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|---|--|---|
| Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда | | |
| 01 | Подготовка полимеризационной кабины: вывод на режим температуры воздуха и воды 60 °С | - |
| 02 | Постановка заряда на отверждение, подсоединение датчиков | Датчики температуры, давления и деформации, шахта |
| 03 | Термостатирование заряда | Шахта |
| 04 | Ступенчатое охлаждение изделий | Шахта |
| 05 | Распрессовка | - |

С целью обеспечения безопасности ограничивают предельные усилия распрессовки, например, извлечение иглы- $1 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

3.2.8 Операция 040. Окончательная обработка заряда

Включает зачистку заряда, удаление остатков адгезионного покрытия, (концевые операции), сушку после зачистки. Производят обмер, взвешивание и другие операции по контролю качества: проверку монолитности- γ -дефектоскопом; наличие внутренних дефектов ультразвуковым дефектоскопом, радиографическим методом, бетатроном. После маркировки и окончательной технической приемки производят укупорку и отгрузку заряда (снаряженного корпуса двигателя).

Содержание операции представлено в таблице 10.

Таблица 10 – Содержание операции 040

| № | Содержание операции | Оборудование, оснастка |
|---|---|---|
| Операция 040. Окончательная обработка зарядов, контроль качества и укупорка | | |
| 01 | Удаление остатков адгезионного покрытия | - |
| 02 | Сушка | Датчики температуры, давления и деформации, шахта |
| 03 | Обмер, взвешивание | Весы |
| 04 | Проверку монолитности | γ -дефектоскопом |
| 05 | укупорку | - |
| 06 | Отгрузку снаряженного корпуса двигателя | - |

3.3 Расчет равновесной температуры полимеризации

В данной серии вариантов предложено рассчитать значения равновесной температуры при различных температуре полимеризации и давлении отсечки. Равновесной называется температура, при которой контактное давление на

границе заряд-корпус приближается к нулю, и система освобождается от напряжений.

Исходные данные:

Геометрические параметры заряда и корпуса:

Внутренний радиус заряда: $R_3^{\text{внутр}} = 230$ мм

Внешний радиус заряда: $R_3^{\text{внеш}} = 860$ мм

Внешний радиус корпуса: $R_{\text{КС}}^{\text{внеш}} = 900$ мм

Механические свойства материала корпуса:

Модуль Юнга: $E = 100$ ГПа

Коэффициент Пуассона: $\mu_x = 0,3$

Напряжение разрушения: $\sigma_{\text{вк}} = 2400$ МПа

Коэффициент запаса прочности: $K_K = 1,2$

Коэффициент термического расширения: $\alpha = 5 \cdot 10^{-6}$ 1/К

Остаточная деформация корпуса: $\varepsilon = 0,001$

Механические свойства топлива:

Модуль Юнга: $E_T = 20$ МПа

Коэффициент Пуассона топлива: $\mu_T = 0,45$

Напряжение разрушения топлива: $\sigma_{\text{вТ}} = 40$ МПа

Коэффициент запаса прочности: $K_T = 1,5$

Коэффициент термического расширения: $\alpha_T = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/К

Термическая усадка топлива: $\Delta_{\text{тус}} = 0,0005$

Сжимаемость топливной массы: $\beta_T = 0,5 \cdot 10^{-9}$ 1/Па

Давление отсечки: $p_{\text{отс}} = 15$ МПа

Температура полимеризации: $T_{\text{пол}} = 350 \text{ К}$

Механические свойства иглы:

Коэффициент термического расширения: $\alpha_{\text{и}} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$

Расчет безразмерных и размерных коэффициентов:

$$M = \frac{R_3^{\text{внеш}}}{R_3^{\text{внутр}}} = \frac{860}{230} = 3,74$$

$$N = \frac{R_{\text{КС}}^{\text{внеш}}}{R_3^{\text{внеш}}} = \frac{900}{860} = 1,05$$

$$\begin{aligned} A &= E^2 \cdot (N - 1) \cdot M^2 \cdot (3 \cdot \alpha_{\text{Т}} - 2 \cdot \alpha - \alpha) - (3 \cdot \alpha_{\text{Т}} - 2 \cdot \alpha_{\text{и}} - \alpha) = \\ &= (100 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,05 - 1) \cdot 3,74^2 \cdot (3 \cdot 4 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}) \\ &\quad - (3 \cdot 4 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 13 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}) = 7,2 \cdot 10^{18} \text{ Па/К} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= 2 \cdot E \cdot M^2 + 0,5 \cdot E \cdot [(M^2 - 1) \cdot (1 - 4 \cdot \mu_x) - (1 - M^{-2})] + E^2 \cdot \beta_{\text{Т}} \cdot \\ &\quad \cdot (N - 1) \cdot (M^2 - 1) = \\ &= 2 \cdot 100 \cdot 10^9 \cdot 3,74^2 + 0,5 \cdot 100 \cdot 10^9 \cdot \\ &\quad \cdot [(3,74^2 - 1) \cdot (1 - 4 \cdot 0,3) - (1 - 3,74^{-2})] + (100 \cdot 10^9)^2 \cdot 0,5 \cdot \\ &\quad \cdot 10^{-9} \cdot (1,05 - 1) \cdot (3,74^2 - 1) = 5,6 \cdot 10^{12} \text{ Па} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= E^2 \cdot (N - 1) \cdot [(\Delta_{\text{тус}} + \varepsilon) \cdot (M^2 - 1) + 2 \cdot M^2 \cdot \varepsilon] = \\ &= (100 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,05 - 1) \cdot \\ &\quad \cdot [(0,0005 + 0,001) \cdot (3,74^2 - 1) + 2 \cdot 3,74^2 \cdot 0,001] = 4,9 \cdot 10^{18} \text{ Па}^2 \end{aligned}$$

Расчет предельного давления полимеризации:

$$p_{\text{пол}}^{\text{пред}} = \frac{\sigma_{\text{вк}}}{K_{\text{К}}} \cdot \frac{R_{\text{КС}}^{\text{внеш}} - R_3^{\text{внеш}}}{R_{\text{КС}}^{\text{внеш}} + R_3^{\text{внеш}}} = \frac{2400 \cdot 10^6}{1,2} \cdot \frac{(900 - 860) \cdot 10^{-3}}{(900 + 860) \cdot 10^{-3}} = 45,4 \text{ МПа}$$

Расчет равновесной температуры:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{пол}} - \frac{B}{A} \cdot p_{\text{пол}}^{\text{пред}} = 350 - \frac{5,6 \cdot 10^{12}}{7,2 \cdot 10^{18}} \cdot 45,4 \cdot 10^6 = 314,2 \text{ К}$$

Расчет необходимой температуры заполнения:

$$T_{\text{зап}} = T_{\text{пол}} - \frac{C + B \cdot p_{\text{пол}}^{\text{пред}}}{A} + \frac{B \cdot p_{\text{отс}}}{A} =$$

$$= 350 - \frac{4,9 \cdot 10^{18} + 5,6 \cdot 10^{12} \cdot 45,4 \cdot 10^6}{7,2 \cdot 10^{18}} + \frac{5,6 \cdot 10^{12} \cdot 15 \cdot 10^6}{7,2 \cdot 10^{18}}$$

$$= 325,3 \text{ К}$$

Определение параметров заполнения с учетом тепловых потерь:

Средняя температура воздуха:

$$T_{\text{в}} = \frac{T_{\text{в1}} \cdot \tau_1 + T_{\text{в2}} \cdot \tau_2 + T_{\text{в3}} \cdot \tau_3}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} = \frac{293 \cdot 2 + 294 \cdot 1 + 295 \cdot 2}{2 + 1 + 1} = 294 \text{ К}$$

Перепад температуры:

$$\Delta T = T_{\text{зап}} - T_{\text{в}} = 325,3 - 294 = 31,3 \text{ К}$$

Начальная температура заполнения:

$$T_{\text{см}} = T_{\text{зап}} + \Delta T(\Delta T, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = 325,3 + 10 = 335,3 \text{ К}$$

Где $\Delta T(\Delta T, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$ определяется по рисунку 2.

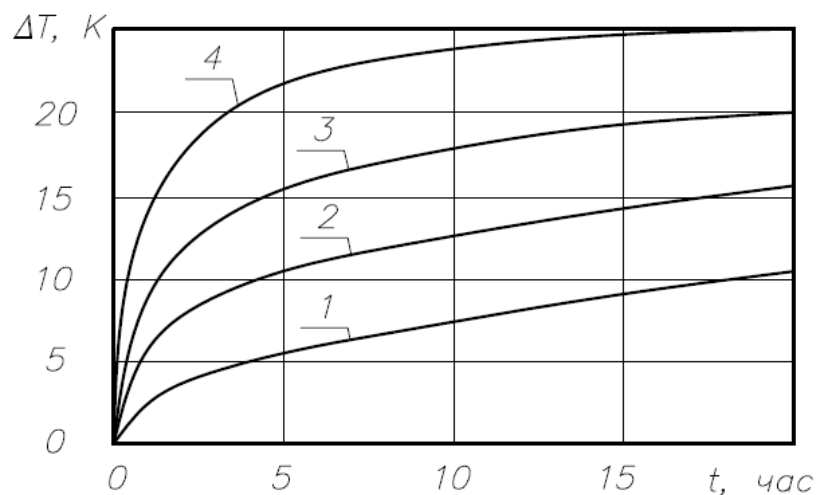


Рис. 2 – Зависимость потери температуры от времени полимеризации

для различных температурных перепадов:

1 – $T_{\text{зап}} - T_{\text{в}} = 20\text{К}$; 2 – $T_{\text{зап}} - T_{\text{в}} = 40\text{К}$; 3 – $T_{\text{зап}} - T_{\text{в}} = 60\text{К}$;

4 – $T_{\text{зап}} - T_{\text{в}} = 80\text{К}$;

Аналогичные расчеты проводятся для температур $T_{\text{пол}} = 375,400 \text{ К}$.
Результаты расчетов представлены в таблице в таблице 2.

Таблица 2 - Зависимость параметров от $T_{\text{пол}}$

| $T_{\text{пол}}, \text{ К}$ | $T_{\text{р}}, \text{ К}$ | $T_{\text{зап}}, \text{ К}$ | $\Delta T, \text{ К}$ | $T_{\text{см}}, \text{ К}$ |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 350 | 314,2 | 325,3 | 31,3 | 335,3 |
| 375 | 339,2 | 350,3 | 56,3 | 368,3 |
| 400 | 364,2 | 375,3 | 81,3 | 399,3 |

Графики зависимости характерных температур от температуры полимеризации заряда СТТ расположены на листе технологической части.

3.4 Расчет напряжения в месте стыка корпус – заряд при различной температуре

Далее проводится расчет зависимости напряжения в месте стыка заряда с корпусом при различной температуре полимеризации.

Напряжение в месте стыка заряд-корпус определяется по формуле:

$$\sigma_r(T) = \frac{E_m \cdot (M^2 - 1) \cdot (\alpha_{\ominus} - \alpha_m) \cdot (T - T_p)}{M^2 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_m) + 1}.$$

$$\sigma_r(T) = \frac{E_T \cdot (M^2 - 1) \cdot (\alpha - \alpha_T) \cdot (T - T_p)}{M^2 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + 1}$$

Согласно полученным данным графическим методом определяется диапазон рабочих температур, при которых модуль напряжения в месте стыка заряд-корпус не превышает допустимых значений (обычно в диапазоне 15...25 МПа).

$$\sigma_r(T) = \frac{E_T \cdot (M^2 - 1) \cdot (\alpha - \alpha_T) \cdot (T - T_p)}{M^2 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + 1}$$

$$= \frac{20 \cdot 10^8 \cdot (3,74^2 - 1) \cdot (5 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-4}) \cdot (200 - 314,2)}{3,74^2 \cdot (1 - 2 \cdot 0,45) + 1}$$

$$= 10,5 \text{ МПа}$$

Аналогичные расчеты проводятся при температурах $T = 250, 300 \text{ К}$ для температур полимеризации $T_{\text{пол}} = 375, 400 \text{ К}$ соответственно.

Графики зависимости напряжения в месте стыка корпус-заряд при различной температуре расположены на листе технологической части. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

| $T_{\text{пол}}, \text{К}$ $T, \text{К}$ | 350 | 375 | 400 |
|---|-------|-------|-------|
| 250 | 27,5 | 38,1 | 48,4 |
| 300 | 6,1 | 16,8 | 27,5 |
| 400 | -36,7 | -25,9 | -15,3 |