

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

На правах рукописи

**ХАРИНОВА Юлия Юрьевна**

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК  
МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации  
(в науке и технике)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Уразбахтин Ф.А.

Ижевск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения и сокращения.....	4
Введение.....	16
<b>ГЛАВА I АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ КАЧЕСТВА.....</b>	<b>22</b>
1.1 История развития стеклопластиков и общие положения.....	22
1.2 Методы получения изделий из стеклопластика.....	30
1.3 Технологическая схема изготовления стеклопластиковых корпусных деталей методом намотки.....	38
1.4 Формулировка проблемы и обоснование подхода к исследованию.....	45
1.5 Выводы по ГЛАВЕ I.....	46
<b>ГЛАВА II СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ.....</b>	<b>48</b>
2.1 Структурная схема технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки».....	48
2.2 Функционирование технической системы.....	54
2.3 Алгоритм методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковой оболочки.....	65
2.4 Выводы по главе II.....	74
<b>ГЛАВА III ПАРАМЕТРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ.....</b>	<b>76</b>
3.1 Методы и средства измерения параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки».....	76
3.2 Параметры управления технической системой.....	92
3.3 Выводы по ГЛАВЕ III.....	95
<b>ГЛАВА IV КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ.....</b>	<b>96</b>

4.1	Оценки процесса пропитки.....	96
4.2	Количественные характеристики процесса намотки.....	105
4.3	Показатели процесса отверждения.....	116
4.4	Выводы по ГЛАВЕ IV.....	123
	<b>ГЛАВА V РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ.....</b>	<b>124</b>
5.1	Параметры изготовления оболочки корпуса для головной части баллистической ракеты методом намотки.....	124
5.2	Определение параметров технической системы для создания высококачественной оболочки .....	127
5.3.	Оптимизация параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки».....	159
5.3.1	Поиск параметров технической системы для изготовления высокопрочной оболочки.....	159
5.3.2	Определение параметров системы для получения экономичной оболочки.....	166
5.3.3	Поиск параметров технической системы для получения оболочки с минимальной массой.....	170
5.4	Выводы по ГЛАВЕ V.....	175
	Заключение .....	177
	Список литературы.....	179
	Приложение А.....	190
	Приложение Б.....	191

## Условные обозначения и сокращения

### 1. Процесс пропитки

$M_c$  - масса связующего, приходящаяся на единицу площади поверхности пропитываемого наполнителя;

$M^*_c$  - требуемая масса связующего для качественной пропитки, которая установлена технологическим процессом;

$M_a$  - масса армирующего материала, используемого для создания композиционного материала, которая приходится на единицу площади;

$K_n$  - коэффициент технологических потерь;

$\nu_\tau$  - предельное значение вязкости связующего, при которой поры армирующей основы полностью заполняются связующим;

$T_n$  - начальная температура связующего, при которой происходит полная пропитка наполнителя;

$T_\kappa$  - конечная температура связующего, при которой происходит полная пропитка наполнителя;

$T_\tau$  - текущая температура связующего;

$T_n$  - температура, при которой связующее достигнет предельной минимальной вязкости;

$\nu_n$  - предельная минимальная вязкость связующего;

$T_0$  - базовая температура, при которой вязкость связующего  $\nu_0$ ;

$\nu_0$  - базовая вязкость связующего;

$T_{nl}$  - температура полимеризации;

$\tau_{nl}$  - продолжительность полимеризации;

$\tau_{np}$  - длительность процесса пропитки наполнителя;

$O_n$  - объемная пористость наполнителя;

$\gamma_n$  - плотность стекловолоконных нитей;

$\gamma_{cm}$  - плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно;

$O_n^H$  - номинальная объемная пористость наполнителя;

$\Delta_{1.1}$  - допуск на изменение значения объемной пористости наполнителя;

$d_e$  - диаметр элементарных волокон наполнителя;

$d_e^H$  - диаметр волокна, установленный техническими требованиями;

$\Delta_{1.2}$  - допуск на изменение значения диаметра волокна, установленного техническими требованиями;

$T_M$  - линейная плотность стеклонити;

$T_M^H$  - нормативная линейная плотность стеклонити;

$\Delta_{1.3}$  - допуск на изменение значения нормативной линейной плотности стеклонити;

$\rho_n$  - поверхностная плотность наполнителя;

$\rho_n^H$  - нормативная поверхностная плотность наполнителя;

$\Delta_{1.4}$  - допуск на изменение значения нормативной поверхностной плотности наполнителя;

$P_k$  - предельное значение капиллярного давления;

$P_{кф}$  - капиллярное давление в межволоконном пространстве;

$\sigma_{ж.ф}$  - напряжение натяжения поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии;

$\theta_{см.ф}$  - угол смачивания полиэфирной смолы в жидком состоянии;

$d_{кан}$  - диаметр межволоконного капилляра;

$K_D$  - коэффициент проницаемости связующего;

$K_{изв}$  - коэффициент извилистости капилляра,  $K_{изв} = 1,21 \dots 1,25$ ;

$V_e$  - объемное содержание волокон в нити;

$K_D^H$  - нормативный коэффициент проницаемости связующего;

$\Delta_{1.5}$  - допуск на изменение значения нормативного коэффициента проницаемости связующего;

$u_{кан}$  - скорость движения связующего вдоль капилляра;

$\sum P_D$  - суммарное давление, создаваемое связующим в капилляре;

$\nu_\tau$  - коэффициент вязкости связующего;

$d$  - толщина нитей;

$\Delta P_{вн}$  - внешнее избыточное давление;

$u_{кап}^н$  - нормативная скорость движения связующего вдоль капилляра;

$\Delta_{1.6}$  - допуск на изменение значения нормативной скорости движения связующего вдоль капилляра;

$h_{max}$  - требуемая максимальная глубина проникновения связующего в поры наполнителя;

$S_{уд}$  - площадь поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой;

$\sigma_{жт}$  - поверхностное натяжение на границе «жидкость-тело»;

$j$ - удельный вес материала связующего;

$g$  – ускорение свободного падения;

$h_n$  - средняя глубина пор связующего;

$h_\tau$  - фактическая глубина проникновения связующего в поры наполнителя;

$\tau_l$  – продолжительность контакта наполнителя с армирующей основой;

$V$ - скорость поступления связующего на поверхность основы;

$L$  - длина области контакта;

$B$  - ширина пасм нитей;

$r_{эф}$  - эффективный радиус пор в наполнителе;

$\tau_1$  - продолжительность пропитки связующим;

$\tau_n$  - необходимая продолжительность пропитки;

$\sigma_{т.п.}$  - поверхностное натяжение на границе «твердая фаза-пар»;

$\sigma_{ж.п.}$  - поверхностное натяжение на границе «жидкость – пар»;

$Q_n$  - расход связующего, установленный технологическим процессом;

$\Delta_{1.7}$  - допуск на изменение значения расхода связующего, установленного технологическим процессом;

$Q$  - фактический расход связующего;

$M_m$  - поверхностная масса стекловолоконного наполнителя;

$V_1$  - скорость протяжки ленты армирующей основы;

$q$  - относительная толщина наноса связующего на поверхность основы.

## 2. Процесс намотки

$Ra$  - шероховатость наружной поверхности оправки;

$Ra_{дон}$  - допустимая шероховатость наружной поверхности оправки;

$\Delta_{2.1}$  - допуск на изменение значения допустимой шероховатости наружной поверхности оправки;

$L_0$  - длина оболочки;

$\delta_0$  - толщина стенки оболочки;

$D_{0min}$  - минимальный диаметр оболочки;

$D_{0max}$  - максимальный диаметр оболочки;

$D_{0min}^H$  - нормативный минимальный диаметр оболочки;

$\Delta_{2.2}$  - допуск на изменение нормативного минимального диаметра оболочки;

$D_{0max}^H$  - нормативный максимальный диаметр оболочки;

$\Delta_{2.3}$  - допуск на изменение значения нормативного максимального диаметра оболочки;

$L_H$  - нормативная длина оболочки;

$\Delta_{2.4}$  - допуск на изменение значения нормативной длины оболочки;

$K_{обж}$  - коэффициент обезжиривания поверхности оправки;

$K_{обж}^H$  - установленный нормативный коэффициент обезжиривания оправки;

$\Delta_{2.5}$  - допуск на изменение значения установленного нормативного коэффициента обезжиривания оправки;

$m_\delta$  - масса смазки или клея;

$\delta_{00}$  - толщина смазки или клея;

$K_n$  - коэффициент сплошности нанесения смазки или клея;

$m_\delta^H$  - нормативное значение массы смазки или клея;

$\Delta_{2.6}$  - допуск на изменение нормативного значения массы смазки или клея;

$\delta_{00}^H$  - нормативное значение толщины смазки или клея;

$\Delta_{2.7}$  - допуск на изменение нормативного значения толщины смазки или клея;

- $K_n^H$  - нормативное значение коэффициента сплошности нанесения смазки или клея;
- $\Delta_{2.8}$  - допуск на изменение нормативного значения коэффициента сплошности нанесения смазки или клея;
- $S$  - площадь боковой поверхности оправки;
- $S_1$  - площадь оправки, покрытая смазкой или клеем;
- $\rho_{00}$  - плотность смазочного материала;
- $S_2$  - площадь поверхности оправки, непокрытая смазкой или клеем;
- $T_{опр}$  - температура на поверхности оправки;
- $T_{опр}^H$  - нормативная температура на поверхности оправки;
- $\Delta_{2.9}$  - допуск на изменение нормативной температуры на поверхности оправки;
- $\tau_{наз}$  - действительная продолжительность температурного режима намотки;
- $\tau_{наз}^H$  - нормативная продолжительность температурного режима намотки;
- $\Delta_{2.10}$  - допуск на изменение значения нормативной продолжительности температурного режима намотки;
- $\psi$  - биение оправки;
- $\Delta_{2.11}$  - допуск на изменение значения биения оправки;
- $\sigma_a$  - предел прочности армирующей основы;
- $\sigma_{ac}$  - предел прочности стеклопластика;
- $H_0$  - коэффициент объемной плотности;
- $e$  - технологический зазор, который устанавливается при укладке стекловолоконного жгута;
- $m$  - относительная величина технологического зазора;
- $\mu$  - характеристика сплющивания нитей;
- $d_1$  - толщина жгута;
- $d_2$  - ширина жгута;
- $a$  - количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки;
- $n$  - количество нитей в жгуте;



$\alpha$  - угол армирования (намотки);

$\psi_1$  - коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте;

$\xi$  - коэффициент упаковки волокон в нити;

$\sigma_b^{\Delta x}$  - предел прочности на разрыв стекловолокон армирующего материала при разрывной длине  $\Delta x$ ;

$\Delta x$  - разрывная длина армирующего материала;

$\sigma_b^{\min}$  - минимальный предел прочности стекловолокон при конкретной разрывной длине;

$\sigma_c$  - предел прочности материала связующего;

$d$  - средний диаметр стекловолоконной нити;

$\gamma_1$  - объемная масса стекловолоконной нити;

$\Delta_{2.12}$  - допустимая разность между пределом прочности армирующей основы и стеклопластика;

$\lambda$  - текстурный критерий;

$\nu$  - анизотропный критерий;

$\Pi$  - критерий удельной прочности армирующего волокна в жгуте;

$\delta_m$  - толщина текстурного слоя, приходящаяся на базовую толщину 10 мм;

$a_{1s}$  - количество стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлении 1;

$a_{2s}$  - количество стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлении 2;

$\lambda_n$  - нормативный текстурный критерий;

$\Delta_{2.13}$  - допуск на изменение значения нормативного текстурного критерия;

$\nu_n$  - нормативный анизотропный критерий;

$\Delta_{2.14}$  - допуск на изменение значения нормативного анизотропного критерия;

$\Pi_n$  - нормативный критерий удельной прочности армирующего волокна в жгуте;

$\Delta_{2.15}$  - допуск на изменение значения нормативного критерия удельной прочности армирующего волокна в жгуте;

$r$  - усредненный радиус пор;

$t_n$  - ширина поры;

$l_n$  - длина поры;

$r_{min}$  - минимальный радиус поры для предельной вязкости жидкого связующего;

$K$  - коэффициент капиллярности;

$K_n$  - нормативный коэффициент капиллярности;

$\Delta_{2.15}$  - допуск на изменение нормативного коэффициента капиллярности;

$G_{an}$  - масса стекловолоконных жгутов, находящихся на складе;

$L''_n$  - длина стекловолоконных жгутов, находящихся на складе;

$\Delta_{2.16}$  - допуск на изменение значения длины стекловолоконных жгутов, находящихся на складе;

$L_{n1}$  - необходимая для намотки длина стекложгута;

$G_a$  - необходимая для намотки масса стекложгута;

$D_{0cp}$  - средний диаметр оболочки;

$H_n$  - критерий компоновки структуры стеклонити;

$d_n$  - текущий диаметр стекловолоконной нити;

$d_3$  - максимальный диаметр стекловолоконной нити;

$d_4$  - минимальный диаметр стекловолоконной нити;

$d_5$  - средний диаметр стекловолоконной нити;

$\sigma_{ac}$  - предел прочности связующего после полимеризации;

$\sigma_c^{TV}$  - предел прочности связующего после полимеризации по техническим условиям;

$\Delta_{2.17}$  - допуск на изменение предела прочности связующего после полимеризации по техническим условиям;

$E$  - отношение предела прочности связующего к пределу прочности стеклопластика;

$E_n$  - отношение предела прочности связующего по техническим условиям к пределу прочности стеклопластика;

$\Delta_{2.18}$  - технический допуск на изменение отношения предела прочности связующего по техническим условиям к пределу прочности стеклопластика;

$\nu_{св}$  - вязкость связующего;

$(\nu_{cv})_{nпред}$  - предельная вязкость связующего, при которой происходит полное заполнение пор и пустот в армирующей основе;

$G_{cv}$  - количество связующего, необходимого для создания оболочки;

$H_g$  - коэффициент весовой плотности стеклопластика;

$\gamma_c$  - плотность стеклопластика;

$G_{cv}^n$  - масса связующего, находящегося на складе предприятия, принятая в расчете на одно изделие;

$\lambda_a$  - половина угла в вершине конической оболочки;

$k_m$  - коэффициент трения между стекловолокнистыми нитями и арматурой (или оправкой);

$b_n$  - фактическая ширина жгута;

$b_{nпред}$  - предельная ширина жгута;

$D$  - наружный диаметр стеклопластиковой конической оболочки;

$Z$  - общее количество слоев одинакового направления в создаваемой оболочке;

$S_H$  - шаг намотки;

$e_n$  - нормативный технологический зазор;

$\sigma_c^c$  - предел прочности стеклопластика на сжатие;

$\sigma_p^c$  - предел прочности стеклопластика на растяжение;

$\sigma_c^{TY}$  - предел прочности на сжатие, установленный техническими требованиями;

$\sigma_p^{TY}$  - предел прочности на растяжение, установленный техническими требованиями;

$\psi_2$  - угол обхвата оправки;

$F_n$  - площадь поперечного сечения жгута;

$T$  - натяжение технологической ленты;

$\varphi$  - угол наклона наматываемого стекложгута к поверхности оправки;

$T_{об}$  - усилие, непосредственно создаваемое технологическим оборудованием;

$\psi_{2н}$  - нормативное значение угла обхвата;

$\Delta_{2.19}$  - допуск на изменение значения нормативного угла обхвата;

$N$  - погонное усилие стекложгута на формуемую поверхность;  
 $r_0$  - текущий радиус конической оболочки;  
 $\sigma_{co}$  - напряжение на поверхности оправки;  
 $\sigma_{про}$  - пределы прочности материалов оправки;  
 $\tau$  - машинное время формования оболочки;  
 $m_l$  - количество одновременно формуемых деталей;  
 $n_{ш}$  - угловая скорость вращения шпинделя намоточного станка;  
 $S_{ш}$  - подача ленты;  
 $\delta_{опр}$  - толщина стенки оправки;  
 $\tau_n$  - нормативное значение машинного времени формования оболочки;  
 $\Delta_{2.20}$  - допуск на изменение нормативного значения машинного времени формования оболочки.

### 3. Процесс отверждения.

$u_{наг}$  - действительная скорость нагрева оболочки;  
 $u_{наг}^н$  - установленная скорость нагрева оболочки;  
 $\Delta_{3.1}$  - допуск на изменение установленной скорости нагрева оболочки;  
 $T_{жс}$  - фактическая температура желатинизации смолы;  
 $T_{жс}^н$  - нормативная температура желатинизации смолы;  
 $\Delta_{3.2}$  - допуск на изменение нормативной температуры желатинизации смолы;  
 $P_{вак}$  - давление вакуума при отверждении оболочки;  
 $P_{вак}^н$  - нормативное давление вакуума при отверждении оболочки;  
 $\Delta_{3.3}$  - допуск на изменение значения давления вакуума при отверждении оболочки;  
 $\tau_6$  - длительность желатинизации смолы;  
 $\tau_6^н$  - нормативная длительность желатинизации смолы;  
 $\Delta_{3.4}$  - допуск на изменение значения нормативной длительности желатинизации смолы;  
 $\Delta t(x)_{max}$  - установленная максимально допустимая разница температур соприкасающихся слоев;

$\Delta t(x)$  - действительная максимальная разница температур соприкасающихся слоев;

$\Delta_{3.5}$  - допуск на изменение значения установленной максимально допустимой разницы температур соприкасающихся слоев;

$T_{н1}$  - начальная температура материала на момент начала режима отверждения;

$T_{н1}^H$  - требуемая начальная температура материала на момент начала режима отверждения;

$\Delta_{3.6}$  - допуск на изменение значения требуемой начальной температуры материала на момент начала режима отверждения;

$P_n^M$  - парциальное давление материала;

$P_n^c$  - парциальное давление среды;

$\Delta_{3.7}$  - допуск на изменение значения создаваемого парциального давления в материале;

$u_{наг2}$  - скорость нагрева до температуры затвердевания;

$u_{наг2}^H$  - нормативная скорость нагрева до температуры затвердевания;

$\Delta_{3.8}$  - допуск на изменение значения нормативной скорости нагрева до температуры затвердевания;

$T_{зам}$  - температура затвердевания;

$T_{зам}^H$  - температура отвердевания смолы, определенная экспериментально и зафиксированная в технологическом процессе;

$\Delta_{3.9}$  - допуск на изменение значения температуры отвердевания смолы, определенной экспериментально и зафиксированной в технологическом процессе;

$P_{отв}$  - давление отверждения;

$P_{отв}^H$  - нормативное давление отверждения;

$\Delta_{3.10}$  - допуск на изменение значения нормативного давления отверждения;

$\tau_{выд}$  - продолжительность выдержки при отверждении;

$\tau_{выд}^H$  - нормативная продолжительность выдержки, установленная технологическим процессом;

$\Delta_{3.11}$  - допуск на изменение значения нормативной продолжительности выдержки, установленной технологическим процессом;

$l_{ул}$  - линейная усадка материала;

$V_{об}$  - относительная объемная усадка материала;

$l_{ул}^n$  - установленная технологическим процессом отверждения линейная усадка материала;

$\Delta_{3.12}$  - допуск на изменение значения установленной технологическим процессом отверждения линейной усадки материала;

$V_{уб}^n$  - установленная технологическим процессом отверждения объемная усадка материала;

$\Delta_{3.13}$  - допуск на изменение значения установленной технологическим процессом отверждения объемной усадки материала;

$\sigma_n$  - внутренние напряжения в материале после термообработки;

$U_{отв}$  - скорость влагоотведения;

$U_{отв1}$  - скорость влагоотведения с наружной стороны оболочки;

$U_{отв2}$  - скорость влагоотведения с внутренней стороны оболочки;

$W_{0ф}$  - влагосодержание материала;

$W_{0min}$  - минимальное влагосодержание материала;

$W_{ц}$  - влагосодержание центральных слоев оболочки;

$W_{п}$  - влагосодержание на поверхности оболочки;

$\Delta_{3.14}$  - допустимая разница между влагосодержаниями центральных слоев и слоев на поверхности оболочки;

$G_0$  - вес стеклопластиковой оболочки до сушки;

$G_1$  - вес стеклопластиковой оболочки после сушки;

$\Delta_{3.15}$  - допустимая разница между весом стеклопластиковой оболочки до и после сушки;

$i_n$  - интенсивность отверждения;

$N_c$  - скорость сушки;

$i_n^u$  – установленное технологическим процессом значение интенсивности отверждения;

$\Delta_{3.16}$  - допуск на изменение значения интенсивности отверждения;

$N_c^u$  – установленное технологическим процессом значение скорости отверждения;

$\Delta_{3.17}$  - допуск на изменение значения скорости отверждения;

$u_{omn}$  - скорость отпуска;

$u_{omn}^u$  - установленная скорость отпуска.

$\Delta_{3.18}$  - допуск на изменение значения скорости отпуска;

$T_{omn}$  - температура отпуска;

$T_{omn}^u$  - установленная температура отпуска;

$\Delta_{3.19}$  - допуск на изменение значения температуры отпуска;

$\sigma_{пред}$  - предельное значение внутренних термоупругих напряжений;

$\Delta_{3.20}$  - допуск на изменение значения внутренних термоупругих напряжений;

$\sigma_r$  - радиальные термоупругие напряжения;

$\sigma_\theta$  - осевые термоупругие напряжения;

$\sigma_{экв}$  - эквивалентные термоупругие напряжения;

$D_{жс}$  – цилиндрическая жесткость оболочки;

$\alpha_{оп}$  - температурный коэффициент линейного расширения оправки;

$\alpha_\theta$  - температурный коэффициент линейного расширения слоев композиционного материала;

$k_{ан}$  – коэффициент анизотропии;

$\gamma_{под}$  – коэффициент податливости оправки;

$\Delta T_{omn}$  - разница между предельной температурой и температурой отпуска,

$E_\theta$  - модуль Юнга;

$\mu_1$  - коэффициент Пуассона;

$\gamma_{r\theta}$  - коэффициент податливости материала.

## Введение

Интенсивное развитие техники приводит к необходимости использования материалов, обладающих достаточной прочностью, надежностью и функциональностью. В тоже время они должны быть недорогими и технологичными.

К таким материалам относятся композиционные материалы, среди которых наибольшее применение находят стеклопластики. Они обладают низкой плотностью и теплопроводностью, и, в то же время, значительной прочностью и влагостойкостью.

С этих позиций применение стеклопластиков в технике особенно актуально. Здесь, в общей сложности на их долю приходится до 20 % всех применяемых материалов. Из стеклопластиков изготавливают баллоны под давлением, корпусные цилиндрические и конические оболочки.

В связи с жесткими требованиями, предъявляемыми к изделиям, все детали и сборочные единицы должны обладать достаточной работоспособностью и иметь приемлемые значения характеристик надежности. Необходимый уровень проявления свойств стеклопластика устанавливается на этапе изготовления.

Процесс изготовления стеклопластиковых деталей является многофакторным и многопараметричным. Он подвержен в наибольшей степени критическим ситуациям, связанным со сбоем оборудования, действием неучтенных заблаговременно внешних факторов, качеством поставок, а также влиянием человеческого фактора.

Развитие таких ситуаций обычно приводит к образованию многочисленных дефектов и, в конечном итоге, к снижению качества оболочек.

Решением этой проблемы является разработка методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковых оболочек, использование которой на этапе проектирования изделий позволит сократить затраты на их отработку, производство и эксплуатацию.

Для построения методики, процесс изготовления стеклопластика необходимо представить в виде сложной технической системы, а ее



исследование проводить с помощью методов системного анализа (экспертных оценок и дерева целей), позволяющих выявлять связи и закономерности функционирования и развития таких систем.

**Область исследования:** Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами паспорта специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике):

п.10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах;

п.11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем.

**Объектом исследования** является процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки, **предметом исследования** - проблемные (критические) ситуации, возникающие при его реализации.

#### **Цель работы:**

Разработка методики прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки, позволяющей в практическом применении сократить затраты на отработку, производство и эксплуатацию продукции при сохранении необходимого уровня проявления свойств.

Для этого необходимо решить следующие **задачи**:

- исследование сложной технической системы и выявление взаимосвязей между ее элементами для разработки количественных оценок, определяющих состояние процесса изготовления стеклопластиковой оболочки, построение алгоритма прогнозирования качества намотки и соответствующей математической модели;
- выбор критериальных показателей и чувствительных параметров процесса изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки;
- разработка выражений частных критериальных показателей, построение функций обобщенных критериев;
- моделирование процесса изготовления стеклопластиковой оболочки с целью определения технологических параметров, обеспечивающих создание качественной оболочки с точки зрения следующих критериев оптимизации:

максимальной прочности и экономичности, минимальной массы, а так же максимального обобщенного критерия.

**Методы исследования:** Для решения поставленных задач использованы аппараты: математического моделирования, теорий систем и системного анализа, оптимизации и математической статистики, а также прикладных методов восстановления зависимостей термодинамики, механики, материаловедения и проектирования летательных аппаратов.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем.

1. Определены структурная и функциональная схемы технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки», выявлены связи между элементами и найден набор параметров, характеризующих их состояние. Построен алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек и соответствующая математическая модель.
2. Предложены критериальные показатели оптимизации параметров функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки». Найдены управляющие параметры, варьирование которыми позволяет эффективно изменять состояние системы.
3. Разработаны 73 частных критериальных показателя, представляющих собой специальные функции состояния (показатели критичности), которые в совокупности составляют два обобщенных минимаксных показателя (интегрированный и качественный). Их применение позволяет свести многокритериальную задачу прогнозирования качества процесса производства стеклопластиковых оболочек к однокритериальной и учесть более 150 различных по физической природе параметров.
4. Построены новые математические модели намотки, которые являются основой методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковых оболочек и средством интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при производстве.

**Достоверность** результатов подтверждена данными, полученными путем экспериментальных исследований и сравнением с результатами испытаний в производственных условиях.

Разработанная методика и соответствующие математические модели апробированы и внедрены на ОА «Воткинский завод» (г. Воткинск), что документально подтверждается актом внедрения.

**Практическое значение.** Использование разработанной методики прогнозирования качества создания деталей из стеклопластика, изготавливаемых методом намотки позволяет практически снизить количество брака при изготовлении на 20 %, более чем на 40% сократить длительность отработки новых композиционных изделий и осуществлять адаптацию процесса изготовления к изменяющимся условиям производства.

Полученные результаты исследования являются основой для интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в процессе создания качественных оболочек из стеклопластика, дополняя существующие эмпирические данные специальными количественными оценками.

Материалы исследования используются в учебном процессе Воткинского филиала ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова» кафедры «Ракетостроение» при изучении студентами специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» курсов «Теплозащитные покрытия», «Материаловедение», «Изготовление деталей и узлов летательных аппаратов», «Производство летальных аппаратов», «Составление технологических процессов и подбор оборудования», «Теория поиска и принятия решений».

Предложенные математические модели могут быть представлены в виде программного комплекса с удобным интерфейсом, адаптированного под любую операционную систему, так как их реализация не требует применения вычислительных средств с особыми характеристиками.

**На защиту выносятся:**

1. Алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек, основанный на выявлении и количественной оценке критических ситуаций, а так же структура математической модели и принцип ранжирования критериальных показателей.
2. Критериальные показатели оптимизации параметров функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» и ее управляющие параметры.
3. Выражения 73 критериальных показателей (показателей критичности) и двух обобщенных минимаксных критериев, позволяющих оптимизировать технологические режимы для получения оболочки с удовлетворительным качеством одновременно по всем свойствам.
4. Результаты моделирования процесса изготовления стеклопластиковой оболочки и их использование в производстве.

**Апробация работы:** Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры «Ракетостроение» Воткинского филиала Ижевского государственного технического университета им. М.Т.Калашникова (2012-2017 г), г. Воткинск;
- на XXIX и XL Научно-технических конференциях на базе АО «Воткинский завод» (2013, 2014 г.) г. Воткинск;
- на конференции «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке-2013» ФГБОУ ВПО ИжГТУ, 2013 г., г. Ижевск;
- на XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». КВВКУ, 2011 г., г. Казань;
- на Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», МАИ, 2012 г, г. Москва;

- на II Межрегиональной научно-практической конференции «Социально-экономическое развитие моногородов: традиции и инновации», 2016 г, г. Воткинск.

**Личный вклад соискателя:**

Математические модели, методики, результаты численных и экспериментальных исследований, их анализ и интерпретация, представленные в диссертации, получены автором лично. Автором также произведена адаптация алгоритма прогнозирования качества, основанного на теории критических состояний, применительно к изготовлению стеклопластиковых оболочек методом намотки: введение новых процедур, разработка и апробация функции эффективности с целью подтверждения достоверности.

Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены в ходе активного обсуждения с научным руководителем Уразбахтиным Ф.А.

# **ГЛАВА I АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ КАЧЕСТВА**

## **1.2 История развития стеклопластиков и общие положения**

Развитие ракетной техники, а также повышение требований к энергоемкости, экономичности и экологичности создаваемых изделий сопровождается разработкой принципиально новых материалов [94].

При эксплуатации многие изделия подвергаются значительным статическим, динамическим и тепловым нагрузкам. Для успешного выполнения ими своего назначения, необходимо чтобы материалы несущих элементов конструкций были достаточно прочными.

До 30-х годов XX века такими материалами считались стали и сплавы. Однако повышение энергетических и летных характеристик аппаратов сопровождается увеличением нагрузок на несущий корпус. Применение традиционных материалов становилось затруднительным, так как для обеспечения необходимой прочности изделия требовалась все большая масса, что недопустимо в изделиях летной техники.

Таким образом, возникла объективная необходимость создания принципиально нового конструкционного материала, обладающего низкой плотностью, но в тоже время, повышенными механическими характеристиками.

В 40-х годах XX века подходящим материалом, отвечающим указанным требованиям, оказался стеклопластик. Его компонентами являются армирующие стеклянные волокна и синтетические связующие.

Использование высокопрочных стеклянных волокон в армирующей основе позволяет получить прочные и жесткие стеклопластики. В то же время, связующее придает такому материалу монолитность и равномерное распределение усилий между волокнами.

Первые разработки отечественных ученых по созданию стекловолокон появились в начале 1930-х годов, а стеклянной ваты - в 1938-1939 гг. [17].

Стекловолоконное волокно первоначально производилось путём вытягивания нитей из размягчённых стеклянных штабиков.

В конце 30-х годов прошлого столетия на заводе в Биллимбаево (Россия) из стекловолокна стали получать стеклянную вату, стеклоткань и нетканые материалы, которые используются в качестве армирующей основы и для современных стеклопластиков.

С 1946 г. стекловолоконные материалы интенсивно используются в авиационной и электротехнической промышленности. Во "Всесоюзном научно-исследовательском институте стеклянного волокна" были разработаны технологические процессы и оборудование для изготовления новых видов стекловолокон.

В годы второй мировой войны было начато производство супертонкого волокна (толщиной менее 1 мкм). В 1952 г. начались работы по получению таких волокон из базальта, сырьем для которого являлся вулканический дальневосточный пепел, а также продукты вулканических пород с Кавказа и Крыма [96].

В середине 50-х годов XX века в США началось применение композитов в виде стеклопластика в авиастроении. Первые армированные стеклянными волокнами пластики были созданы в 1943 г. в лаборатории конструкций и материалов Райт – Патерсоновской военно-воздушной базы. Ими была доказана возможность использования высокопрочных композиций, состоящих из полиэфирных смол и армированного стекловолокна в создании ракетно-космической техники. В авиастроении эти материалы стали применяться в сэндвичевых конструкциях. Например, задняя часть обшивки фюзеляжа двухместного учебного самолета «Вальти-ВТ-15» была усилена стеклопластиком.

Эта часть фюзеляжа изготавливались из базальтового волокна и облицовывалась тонким слоем стекловолокнистого композиционного материала, состоящего из пяти слоев стеклоткани толщиной 0,76 мм, пропитанной полиэфирным связующим. Массовая доля связующего в нем составляла

42...45%. Формование материала происходило в стальной матрице, на которую предварительно наносился слой антиадгезионной прослойки - целлофана.

Непосредственными испытаниями такого фюзеляжа установлено, что стеклопластик обладает более высокими значениями механических характеристик, чем у традиционных материалов и его использование, в итоге, позволило на 50% повысить прочность сэндвичевых конструкций по сравнению с металлическими сплавами или деревом [44].

В СССР были развернуты исследования в направлении создания стеклопластиков. Для этого была создана лаборатория стекловолокнистых анизотропных материалов. Однако создаваемые ею материалы были чрезмерно дорогими и использовались, в основном, в оборонной промышленности.

Для создания стеклопластиков ныне используются следующие армирующие материалы и связующие [26, 36]:

- **стекловуаль.** Используется для создания наружных слоев, с целью обеспечения необходимой структуры на поверхности готового изделия из стеклопластика. Она применяется для производства стеклопластиковых труб и емкостей и содержит химически стойкую полиэфирную смолу, позволяющую успешно сопротивляться агрессивной среде.

- **декоративная стекловуаль.** Применяется для создания декоративного слоя. Позволяет создавать на поверхности стеклопластика рисунки, имитирующие текстуру различных пород дерева, мрамора и т.д.

- **стекломат.** Это нетканое полотно, состоящее из кусков стекловолокон или непрерывного жгута длиной 25-50мм. Волокна имеют преимущественно случайное распределение в горизонтальной плоскости. Они связаны между собой полимерным связующим в виде порошка или эмульсий. Плотность стекломатов составляет 0,229...0,916 кг/м<sup>3</sup>. Такие маты достаточно упруги при сравнительной разреженности структуры. Благодаря механическому переплетению они не требуют дополнительной связи для создания необходимой прочности.



- **стекловолокно** - волокно, формируемое из стекла различными методами. Оно не бьётся и не ломается, но легко гнётся без разрушения.

Стекловолокна по механическим характеристикам превосходят все другие распространенные конструкционные материалы. Так, прочность неповрежденных волокон из Е-стекла равна в среднем 3,65 ГПа. Они имеют довольно высокий модуль Юнга (5-11 ГПа) и превосходят по этой характеристике армируемые ими полимеры.

- **стеклоровинг** - это непрерывная пряжа, которая изготавливается из некручёных нитей стекловолокна. Механические характеристики стеклоровинга определяются количеством элементарных нитей и их диаметром. Заметим, что использование при изготовлении стеклопластика этого материала существенно удешевляет и упрощает изготовление изделий.

- **стеклосетка** - это материал ячеистой структуры, полученный переплетением стеклянных нитей или стеклоровингов под прямым углом. В нем нити скрепляют лазерной или ультразвуковой сваркой или химическим путем. Изготовление стеклосетки с заданным размером ячеек происходит из люмоборосиликатной (бесщелочной) стеклонити, которая пропитывается полимерным составом. В зависимости от плотности, размера ячейки и вида пропитки стеклосетки имеют различное назначение.

- **стеклоткань** является полотняным материалом из стеклонитей, полученных в процессе ткацкого производства путем переплетения взаимно перпендикулярных продольных и поперечных стеклянных волокон диаметром 3-100 мкм [96].

- **эпоксидные смолы** - это низкомолекулярные полимеры, способные переходить из термопластичного в термореактивное состояние. Они обладают способностью склеивать армирующую основу [47].

В настоящее время созданы смолы, не выделяющие при отверждении фенол. Обладая крайне малой усадкой, они создают химически стойкие слои, обладающие низким водопоглощением. Эпоксидные смолы имеют низкую вязкость и установленную длительность отверждения.

- **полиэфирные смолы** применяются только со стекловолокном. Они являются экономичными, обладают высоким уровнем фильтрации воды, но сильной усадкой и высоким содержанием вредных веществ.

Кроме того, полиэфирные смолы обладают низкой по сравнению с эпоксидными смолами адгезией и пластичностью. Стеклопластики с полиэфирной смолой склонны к образованию микротрещин и формированию слабого вторичного клеевого соединения;

- **винилэфирные смолы** считаются гибридными, так как содержат в своем составе эпоксидные молекулы. Они обладают умеренной усадкой при отверждении и повышенной прочностью. Наличие винилэфирной смолы исключает образование в стеклопластике микротрещин и способствует повышению адгезии к поверхности. Эти смолы по характеристикам лучше полиэфирных, но их адгезия к разнородным и ранее отвержденным поверхностям оказывается крайне низкой. Именно это является причиной отслоений наружного слоя стеклопластика от наполнителя. Поскольку винилэфирные смолы обладают низкой адгезией к кевлару и углеволокну, то в них вводятся в специальные добавки [88].

Винилэфирные смолы характеризуются высокой стойкостью к влагопоглощению, механической прочностью и температурой термической деформации ( $790^{\circ}\text{C}$ ), но малой усадкой из-за низкого содержания стирола (порядка 35%).

- **акриловые смолы** используются при инъекции смолы в закрытую матрицу, при выполнении процесса вакуумного и холодного формования. Получаемые при этом стеклопластики обладают хорошими механическими свойствами, из-за присущей смоле низкой вязкости. Она обеспечивает пропитывание армирующего наполнителя и позволяют достичь хорошую ударную вязкость создаваемого стеклопластика. Из-за низкой вязкости акриловые смолы используются при создании смесей с огнестойкими наполнителями (например, тригидратом алюминия).

Из-за сочетания высокопрочной армирующей основы и эластичного связующего удастся получать материалы с различными физико-механическими характеристиками. Это привело к распространению использования стеклопластиков в ракетно-космической и авиационной технике, а также и в других областях промышленности [97].

*В автомобилестроении* это бампера, пороги, спойлеры, накладки, решётки, дефлекторы, крыши, двери, кресла, а так же крупные детали корпуса или даже цельные корпуса. Из стеклопластика изготавливаются и более мелкие авто-детали - рули, держатели для стёкол, ручки, панели управления. Первый автомобиль «Шевроле Корветт» был изготовлен из стеклопластика компанией General Motors в 1953 году.

*Судостроение.* Стеклопластик применяется в изготовлении лодок, катеров, яхт, катамаранов и других водных транспортных средств. Из него делают мелкие детали и небольшие изделия, например, вёсла или трапы, а так же крупные части корпуса. Специально для больших яхт изготавливают стеклопластиковую мебель.

*Нефтегазовая отрасль.* Стойкость к атмосферным и агрессивным химическим средам позволяет использовать стеклопластик при производстве запорной арматуры и трубопроводов.

*Строительство.* Стеклопластиковые изделия имеют высокие электроизоляционные свойства. Они радиопрозрачны и устойчивы к агрессивным средам. Этот материал не подвергается коррозии, на нем не образуется раковин, вследствие этого, он находит широкое применение как в несущих конструкциях, так и во внутреннем интерьере, декорациях, облицовке.

Из-за стойкости к агрессивным средам стеклопластики нашли применение в *коммунальном хозяйстве*. Стеклопластиковые трубы, крупногабаритные ёмкости различного назначения и технические колодцы, используемые в прокладке канализаций и установки систем очистки сточных вод постепенно вытесняют железные аналоги.

*Товары народного потребления.* Стеклопластик используется при изготовлении как больших бытовых изделий - столов, стульев, так и мелких - расчёсок и шариковых ручек. Стеклопластиковые панели используются в холодильниках, микроволновых печах, стиральных машинах.

*Электротехника и энергетика.* Выпуск стеклопластиковых изделий здесь обусловлен главным образом превосходными прочностными и диэлектрическими свойствами этого материала. В устройствах передачи электроэнергии стеклопластик используется в качестве изолятора.

Из стеклопластика различных модификаций изготавливаются мелкие детали *приборов, оборудования и инструмента.*

Широкое распространение стеклопластики получили благодаря уникальному набору свойств - это малый удельный вес, электро- и тепло-изоляционные свойства, коррозионная стойкость и прочность [28]. В таблице 1.1.1 приведены основные характеристики стеклопластика по сравнению с другими материалами [30, 31].

Таблица 1.1.1 - Сравнительные характеристики различных материалов.

<b>Физико-механические характеристики</b>	<b>Стеклопластик</b>	<b>ПВХ</b>	<b>Сталь</b>	<b>Алюминий</b>
Плотность т/м	1,6 - 2,0	1,4	7,8	2,7
Разрушающее напряжение при сжатии - растяжении, МПа	410 - 1180	41 - 48	410 - 480	80 - 430
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	690 - 1240	80 - 110	400	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21 - 41	2,8	210	70
Модуль упругости при изгибе, ГПа	27	41	210	70
Коэффициент линейного расширения $10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$	5 - 14	57 - 75	11 - 14	22 - 23
Коэффициент теплопроводности Вт/(м $\cdot$ °C)	0,3 - 0,33	0,2	46	140 - 190
Коррозионная стойкость	Отличная	Отличная	Плохая	Средняя

Из этих данных видно, что стеклопластик по многим параметрам превосходит такие распространенные в ракетостроении материалы, как алюминий, сталь, поливинилхлорид. По отдельным параметрам он может

превосходить стали и сплавы: например, ПВХ обладают меньшим коэффициентом теплопроводности и низкой плотностью, в то время как алюминий – более высоким модулем упругости и относительно низким весом, а вольфрам – высокой термостойкостью. Тем не менее, получение необходимого комплекса эксплуатационных свойств и высокой технологичности и экономичности удастся достичь только в стеклопластиках.

К сожалению, стеклопластики обладают и *недостатками*.

Из-за структурной неоднородности и недостаточной стабильности технологии изготовления имеет место рассеяние механических, электрических и многих других показателей стеклопластиков.

Кроме того, они очень чувствительны к режиму эксплуатации. Так, например, модуль упругости и предел прочности стеклопластиков повышаются при увеличении скорости деформирования.

Направленное размещение стеклянных волокон в плоскости армирования и слоистость структуры создает анизотропию механических и теплофизических свойств. Например, прочность однонаправленного стеклопластика при растяжении в направлении армирования на порядок выше прочности в перпендикулярном направлении.

Из-за слоистой структуры, стеклопластики слабо сопротивляются межслойному сдвигу и поперечному отрыву. Поэтому при изгибе, стеклопластик может разрушиться не от достижения нормальными напряжениями (растягивающих или сжимающих) предельных значений, а из-за того, что касательные напряжения превысят сопротивление материала межслойному сдвигу.

Недостатком стеклопластиков является низкая трещиностойкость. Это вызвано высоким значением коэффициента интенсивности напряжений в условиях плоской деформации в вершине трещин.

Тем не менее, стеклопластики являются перспективным конструкционным материалом. Как показала практика, количественными характеристиками стеклопластиков можно управлять путем изменения соотношений и марок

наполнителя и связующего, а также их макроструктуры. Это делает стеклопластики объектом исследования и открывает неограниченные перспективы синтеза новых материалов на основе стекловолокон. Но производство стеклопластика требует длительной и дорогостоящей технологической подготовки и наличия специального оборудования и оснастки.

Рассмотрим основные технологические методы изготовления стеклопластиков.

## 1.2 Методы получения изделий из стеклопластика

В настоящее время находят применение следующие методы изготовления деталей из стеклопластика (Рисунок 1.2.1):



Рисунок 1.2.1 – Методы изготовления стеклопластиковых деталей.

Условно их можно классифицировать по степени автоматизации.

«Не автоматизированным» методом являются ручное формование. Для него характерно использование минимального количества оснастки и оборудования. В «автоматизированных» методах используются специализированное оборудование

или установки. К таким методам можно отнести вакуумную инфузию, инъекцию, пултрузию, SMC и намотку [10, 27, 51, 62].

### 1. Ручное формование.

В этом методе на матрицу, покрытую пленкой, наносится защитно-декоративный слой – гелькоут. Он создает наружную поверхность детали, защищает ее от ультрафиолетового облучения и воздействия химически активных сред и воды. После высыхания гелькоута, на его поверхность укладывается предварительно раскроенный армирующий наполнитель в виде матов из рубленой стеклопряди или ровинговой ткани и пропитывается смолой, предварительно смешанной с катализирующими добавками, затем, при помощи мягкого валика или кисти, стекломат или стеклоткань пропитывается связующим. После этого производится прикатка еще не отвержденного стеклопластика жестким валиком для удаления пузырьков воздуха из материала. (Рисунок 1.2.2).

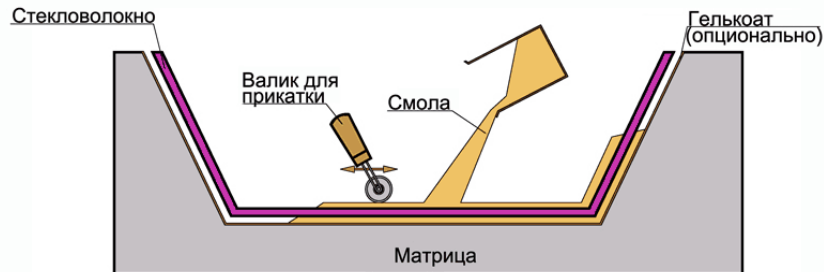


Рисунок 1.2.2 – Схема изготовления стеклопластика методом ручного формования.

После отверждения стеклопластика, готовое изделие извлекается из формы и подвергается механической обработке: обрезке облоя - излишка стеклопластика или отвержденной полиэфирной смолы по краям изделия; высверливанию отверстий в соответствии с требованиями технологического процесса и т. д.

Этот метод формования, основан на использовании заранее подготовленных матов или тканей. Им достигается высокая равномерность распределения материала, что делает его достаточно прочным. В методе имеется возможность контроля технологических показателей качества изделия.

Он является экономичным из-за низкой стоимости оснастки для изготовления стеклопластика и оборудования (распылитель, валики, кисти).

Недостатками метода являются: использование ручного труда при изготовлении изделия; необходимость предварительного раскроя стеклоткани, (стекломата или другого стеклянного материала); подготовка смеси из полиэфирной смола и отвердителя; сильная зависимость качества изделия от мастерства исполнителя; значительные затраты времени на изготовление одного изделия; низкая степень обрачиваемости оснастки.

2. *Напыление.* Этим методом создаются крупные детали и корпуса ракетной техники. Нанесение гелькоута и стеклопластика проводится на специальном оборудовании. Здесь нет необходимости предварительного раскроя стеклоткани или стекломата, а так же приготовления смеси полиэфирной смолы и отвердителя, что позволяет существенно сократить долю ручного труда при производстве изделия из стеклопластика (Рисунок 1.2.3).

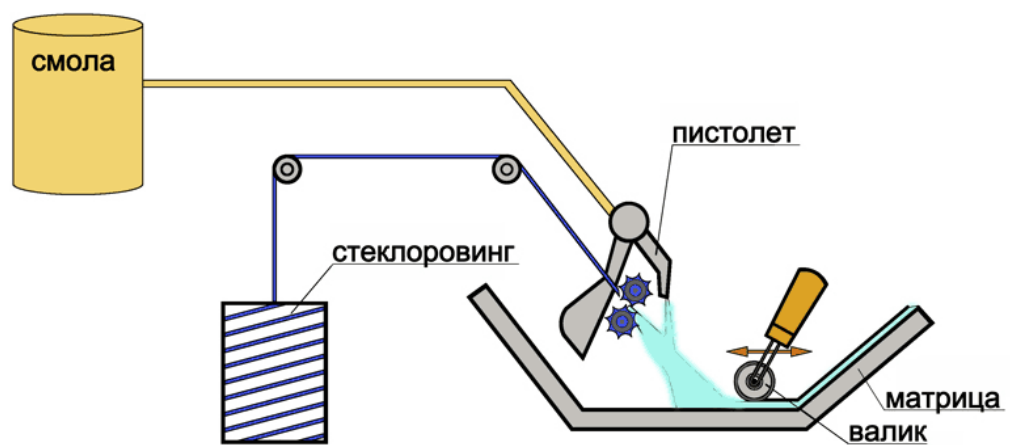


Рисунок 1.2.3 – Схема изготовления стеклопластиков методом напыления.

Современное оборудование для производства стеклопластика напылением в автоматическом режиме позволяет проводить жёсткую дозацию полиэфирной смолы и отвердителя, рубку ровинга на части заданных размеров. При использовании этого метода существенно сокращаются отходы полиэфирной смолы. После рубки части стекловолокна попадают в струю полиэфирной смолы, исходящую из распылительного пистолета. При этом стекловолокно пропитывается ею во время переноса на матрицу. На долю



ручного труда приходится только само нанесение и уплотнение стеклопластика в матрице прикаточным валиком.

Затем проводится отверждение и механическая обработка стеклопластика.

Достоинством метода напыления является отсутствие технологической операции предварительного раскроя стекломата и подготовки смеси из полиэфирной смолы с отвердителем. Здесь достигается высокая скорость производства стеклопластика и упрощение контроля качества изделий.

К недостаткам метода относятся: сильная зависимость от квалификации исполнителя на качество конечного изделия; низкая степень оборачиваемости оснастки; необходимость использования дорогостоящего специализированного оборудования.

3. *Метод RTM (Инъекции)*. В этом методе армирующий материал укладывается на матрицу в виде заранее заготовленных выкроек. Затем устанавливается пуансон, который прижимается к матрице при помощи прижимов, и смола подается в полость формы под давлением.

Иногда, для облегчения пропитывания используется вакуум, который создается во внутренней полости формы. После пропитки смолой начинается процесс отверждения (Рисунок 1.2.4).

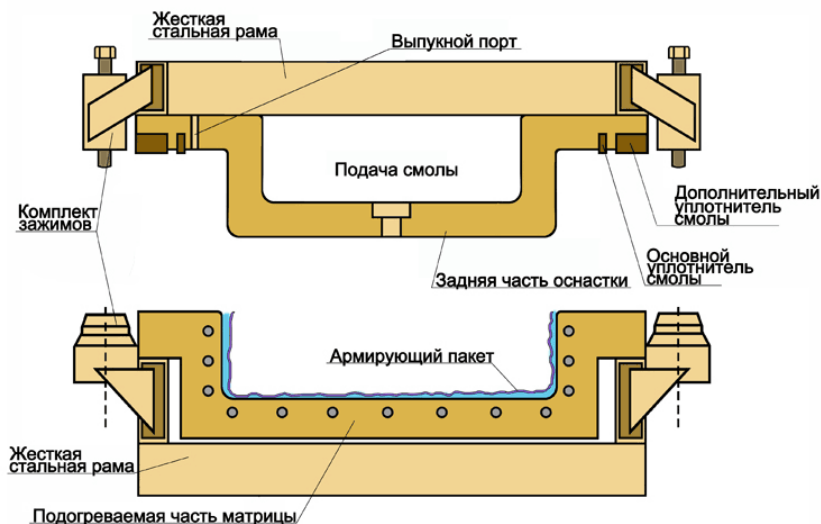


Рисунок 1.2.4 – Схема изготовления стеклопластика методом RTM

Основными достоинствами метода являются: получение стеклопластика с максимальным содержанием армирующего материала и минимальным

количеством пустот; минимальное количество выбросов вредных веществ в окружающую среду. Здесь удастся проводить одновременное обслуживание нескольких аппаратов, производящих инъекцию. При этом, удастся получить глянцевую поверхность изделия без дополнительной механической обработки при минимальном количестве отходов.

К недостаткам можно отнести: дороговизна и сложность технологического оборудования.

4. *Вакуумная инфузия.* В этом методе создается с помощью вакуумной пленки или мешка рабочая полость. Воздух в ней разряжается, происходит всасывание смолы и пропитка ею наполнителя (Рисунок 1.2.5).

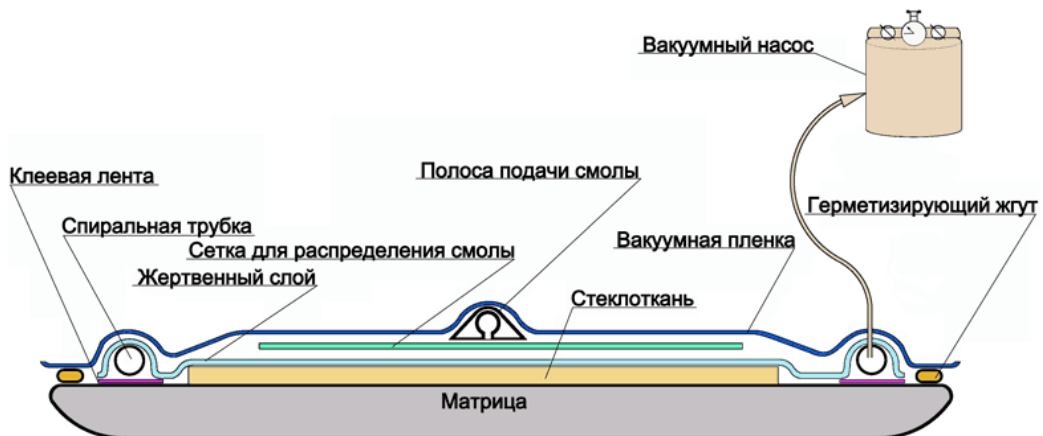


Рисунок 1.2.5 – Схема изготовления стеклопластика методом вакуумной инфузии

При изготовлении стеклопластиков этим методом достигаются:

- максимальное процентное содержание стекловолокна, минимальное количество пустот;
- расчетные значения физико-механических характеристик стеклопластика из-за твердого начального состояния полимера и высоких температур отверждения;
- относительно низкая стоимость процесса изготовления деталей из стеклопластика;
- минимальное количество вредных выбросов в окружающую среду.

К основным недостаткам можно отнести следующие:

- ограниченная номенклатура создаваемых изделий;

- сложное оборудование и оснастка;
- повышенные требования к оборудованию и инструменту, связанные с температуростойкостью.

5. *Пултрузия.* Этим методом получают профили из стеклопластика путем протягивания стеклянного волокна, пропитанного смолой, через фильеру. Температура формообразующей фильеры достигает значения  $150^{\circ}\text{C}$ . Для пропитки армирующего материала используется полиэфирная смола. Получаемый армированный стеклопластиковый профиль имеет конфигурацию, повторяющую форму фильеры (Рисунок 1.2.6).

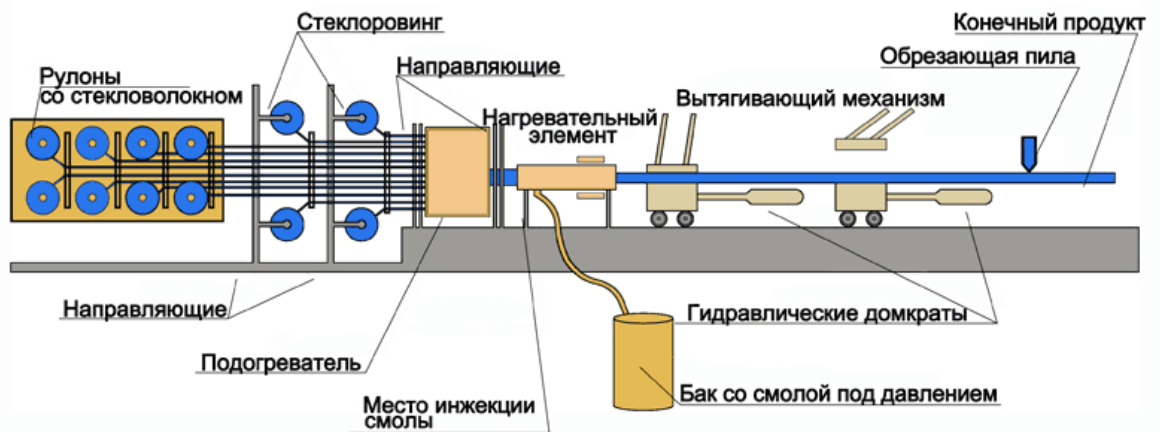


Рисунок 1.2.6 – Схема изготовления стеклопластика методом пултрузии

Метод пултрузии позволяет получить изделия из стеклопластика с любым простым профилем: стеклопластиковый стержень, труба, уголок, пластина, швеллер, короб.

Преимуществами метода являются: высокая скорость изготовления арматуры; автоматизированное управление содержанием смолы в стеклопластике; низкая стоимость материалов; получение хороших структурных свойств стеклопластиков за счет жесткого ориентирования направления волокон и высокого содержания стекломатериала.

Недостатками считаются ограниченная номенклатура изделий и дорогостоящее оборудование.

6. *Метод SMC (сендвич-панели).* В этом методе предварительно раскроенные материалы с различными свойствами укладывается в форму. Затем

форма смыкаются на 2-3 минуты. Прессование производится при высокой температуре (120-160 °С) (Рисунок 1.2.7)

Сендвич-панели являются листовым материалом, основными компонентами которого являются смола, армирующие волокна, наполнители. Они используются для изготовления крупногабаритных корпусных деталей и отделочных работ.

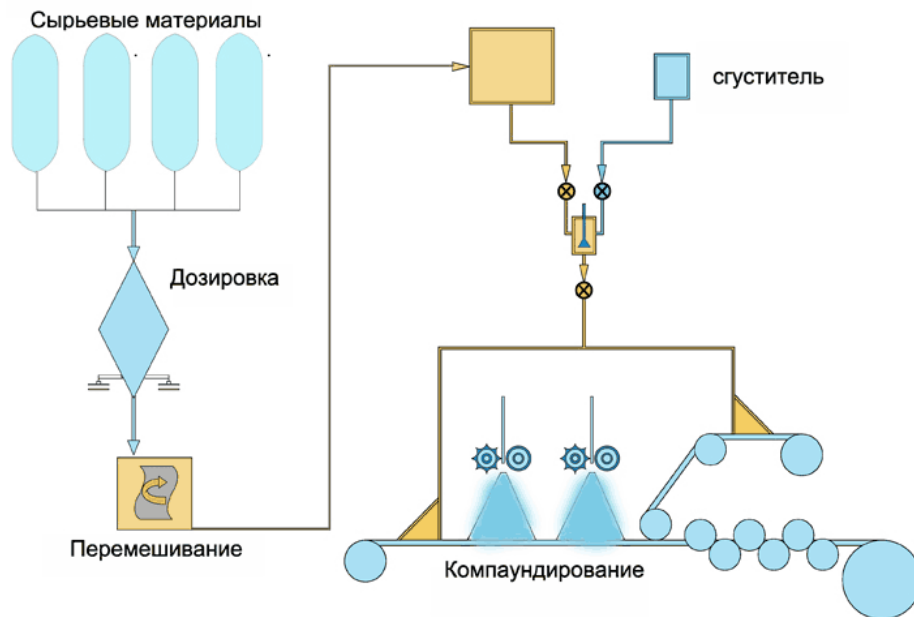


Рисунок 1.2.7 – Схема изготовления стеклопластика методом SMC.

Этот метод почти не находит применения в ракетной технике. Тем не менее, одним из его важнейших преимуществ является гибкость в выборе технологического процесса переработки панелей в готовое изделие. Наряду с прямым и трансфертным прессованием в стальных обогреваемых пресс-формах, этот материал может также создаваться прямым литьем на специальных машинах, аналогично термопластическим материалам. При этом достигается высокая производительность метода, за счёт существенного уменьшения продолжительности отверждения детали.

7. *Намотка.* Этот метод применяется при необходимости создания из стеклопластика тел вращения. (Рисунок 1.2.8)

Намотку принято разделять на «мокрую» и «сухую».

Сущность «мокрого» метода состоит в намотке стекложгута, пропитанного жидким связующим, на предварительно установленную вращающуюся оправку. Ориентация намотки жгута на поверхности оправки достигается согласованием скоростей перемещения раскладчика (устройства для равномерной раскладки лент или нитей) и вращения оправки. Относительное содержание компонентов в системе «смола – стекловолокно» по массе регулируется отжимными валиками.

В "сухом" методе на оправку наматывается предварительно пропитанный наполнителем и высушенный препрег.

В «мокрой» намотке используется связующее из полиэфирных и эпоксидных смол, а в сухой – смолы на фенольной основе. Обязательным является последующее отверждение намотанного стеклопластика на оправке. Повышение плотности материала достигается с помощью вакуумного или надувного мешков. Термообработка связующего проводится в специальных камерах, и путем подогрева нагревателями, размещенными на самой оправке.

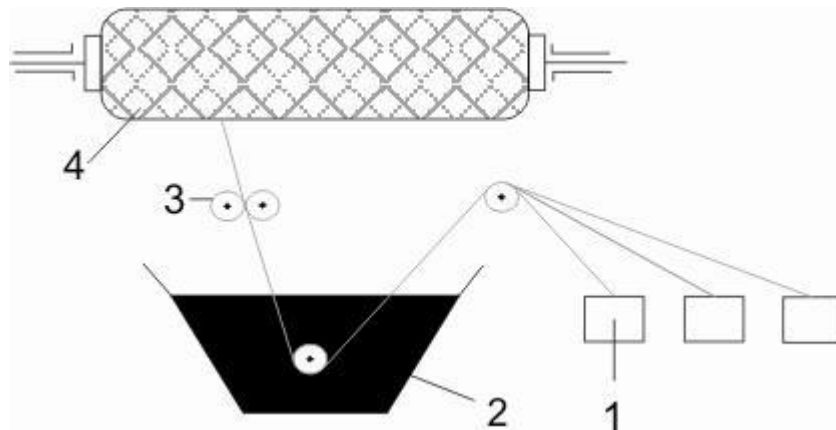


Рисунок 1.2 .8– Схема изготовления стеклопластика методом «мокрой» намотки:

1- стекложгут, 2- пропиточная ванна, 3- отжимные валки, 4-оправка

Основными преимуществами метода намотки являются: высокая скорость изготовления деталей и заготовок; возможность регулирования соотношения смолы и стекловолокна; обеспечение хороших структурных свойств, за счет однонаправленности волокон и высокого содержания стекломатериала.

Основными недостатками являются: ограниченная номенклатура изделий; дорогостоящее оборудование; значительные затраты на оснастку для больших изделий; получение рельефной лицевой поверхности.

Все эти методы создания изделий из стеклопластика являются эффективными и надежными для определенных типов производств и номенклатуры изделий.

Однако, каждый из них обладает своими недостатками. Общими среди них являются: высокая стоимость оснастки и оборудования; большая доля ручного труда и зависимость качества изделия от квалификации исполнителя.

Из всех перечисленных методов, при создании ракетной техники наибольшее применение находит метод изготовления стеклопластиковых деталей намоткой. Им изготавливаются несущие корпуса ракет и баллоны питателей. Поскольку эти детали являются ответственными несущими элементами конструкции, то наличие в них дефектов, обусловленных технологией изготовления недопустимо.

Рассмотрим технологический процесс изготовления стеклопластиковых деталей ракетной техники методом намотки подробнее.

### **1.3 Технологическая схема изготовления стеклопластиковых корпусных деталей методом намотки**

В цикле изготовления деталей из стеклопластика намоткой можно выделить следующие этапы:

1) получение стекловолокна; 2) изготовление стекложгута; 3) пропитка стекложгута связующим; 4) намотка стекложгута на оправку; 5) режим отверждения оболочки; 6) механическая обработка оболочки.

*Получение стекловолокна* предполагает подготовку сырья и получение силикатного расплава, а также переработку расплава в волокно и его намотку на катушки (Рисунок 1.3.1) [44].

В качестве сырья для производства стекловолокна могут использоваться промышленные отходы, попутные продукты производства, горные породы и др.

К сырью предъявляют следующие требования: наличие определенного химического состава, при котором достигается стойкость материала к воздействию влаги и температуры; низкая температура получения расплава; способность образовывать силикатные расплавы, имеющие заданные характеристики.

Выполнение этих требований достигается составлением соответствующей смеси (шихты), включающей не менее двух компонентов, из которой получают силикатный расплав.

Для получения силикатного расплава, подготовленная смесь подвергается плавлению в специальных печах. В зависимости от типа сырья, видов топлива и объемов производства применяются шахтные (вагранки), ваннные, шахтно-ваннные, электродуговые печи и шлакоприемники.

Полученный силикатный расплав перерабатывается в стекловолокно.

Известно три основных способа переработки расплава в волокно: дутьевой, центробежный и комбинированный. Все они основаны на расщеплении струи расплава, вытекающего из печи, на тончайшие струйки и их вытягивании в волокна.

Вне зависимости от способа получения, волокна подвергаются интенсивному механическому растяжению. После закалки в подфильерном холодильнике их собирают в нить и помещают в зону, в которой на волокно наносится покрытие – замасливатель, повышающий компактность волокон. Затем, на высокоскоростных намоточных устройствах, элементарные волокна собираются в пряжу, представляющую комплексную нить [44].

Для *изготовления стекложгута* стекловолоконная пряжа, намотанная на шпулярники, проходя через намоточную машину, скручивается в жгуты необходимой толщины (Рисунок 1.3.1) Обычно стекложгут включает в себя от 10 до 60 комплексных нитей.

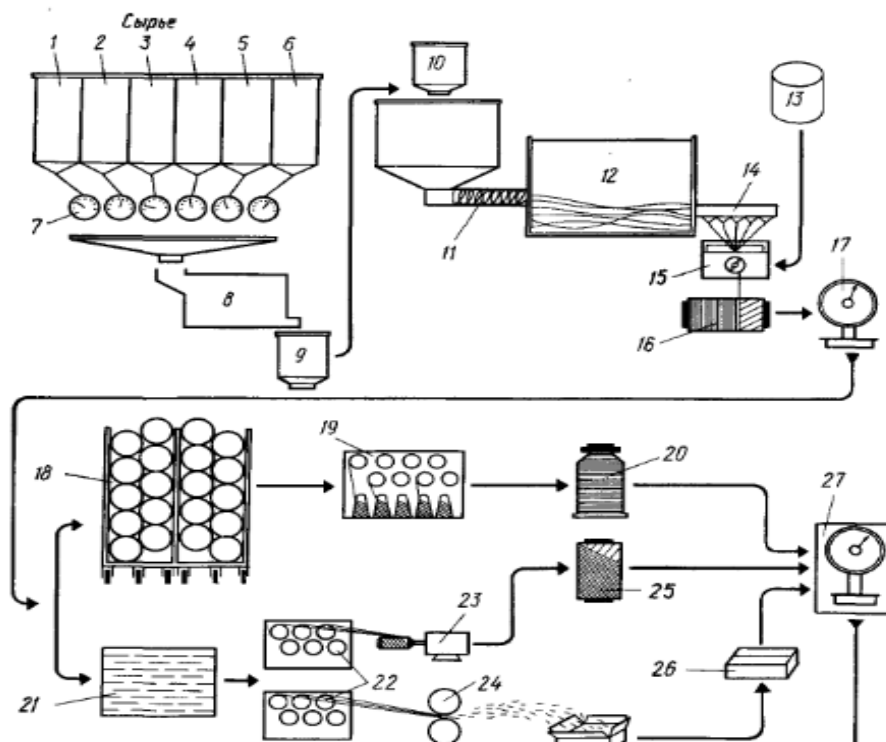


Рисунок 1.3.1 – Схема получения стекловолокна и стекложгута.

1 – глина; 2 – известняк; 3- уголь; 4 – кварцевый песок; 5 – флюорит; 6- борная кислота; 7- автоматические дозаторы; 8- смеситель; 9, 10 – бункера; 11 – шнековый питатель; 12 – ванна; 13 – секции приготовления замасливателя; 14 – платиновые фильеры; 15 – замасливатель; 16 –намоточное устройство; 17, 27 – контрольные посты; 18 – камера кондиционирования волокна; 19 – крутильные машины; 20 – участок отделки и упаковки пряжи; 21 – участок термообработки; 22 – шпулярники; 23 – намоточная машина для жгута; 24 – резальная машина; 25 – стекложгут; 26 – упаковка.

На рисунке 1.3.1 представлена схема одностадийного получения стекловолокна. Подготовленное природное сырье состоит из глины, известняка, угля, кварцевого песка, флюорита и борной кислоты (1,2,3,4,5,6). С помощью специальных дозаторов - 7 эти компоненты поступают в смеситель - 8, в котором перемешиваются до состояния однородной мелкодисперсной массы. Эта масса поступает в бункеры - 9 и 10, откуда при помощи шнекового питателя - 11 перемещается в ванну - 12.



В автоматических платиновых фильерах с электронагревателем - 14 сырье расплавляется и смачивается замасливателем - 15, поступающим из секции его приготовления - 13. Полученное волокно наматывается на барабаны на высокоскоростном намоточном устройстве - 16. Готовые барабаны проходят контроль и взвешивание на контрольных постах - 17 и 27 с целью обнаружения дефектов.

Затем, стекловолокно подвергается кондиционированию в камере - 18, скручивается в пряжу на крутильных машинах - 19 и поступает на участок отделки и упаковки пряжи - 20 или же на термообработку в камеру - 21, проходит через шпулярники - 22 и скручивается в жгут - 24 на намоточной машине - 23. Стекложгут может быть порезан на куски определенной длины на резальной машине - 24 или использован для намотки стеклопластиковых тел вращения.

Для обеспечения адгезии между витками и обеспечения равномерности свойств стеклопластика, стекложгут подвергается *пропитке связующим*.

В производстве намоточных полуфабрикатов на основе жидких связующих применение нашли два основных способа пропитки [66, 68]:

- 1) погружение и непрерывное протягивание жгута через пропиточную ванну с жидким раствором связующего (Рисунок 1.3.2 -II);
- 2) пропитка однонаправленных наполнителей с помощью контактного ролика, находящегося в жидком связующем (Рисунок 1.3.2 -I).

Поступающий жгут - 2 проходит через гребенку - 1 и проходя через ролик - 3, пропитывается связующим.

После пропитки волокнистого наполнителя происходит обжатие и отжим подвижными роликами - 4. Этим регулируется содержание связующего в композиционном материале на требуемом уровне. Далее, жгут поступает на намоточную машину.

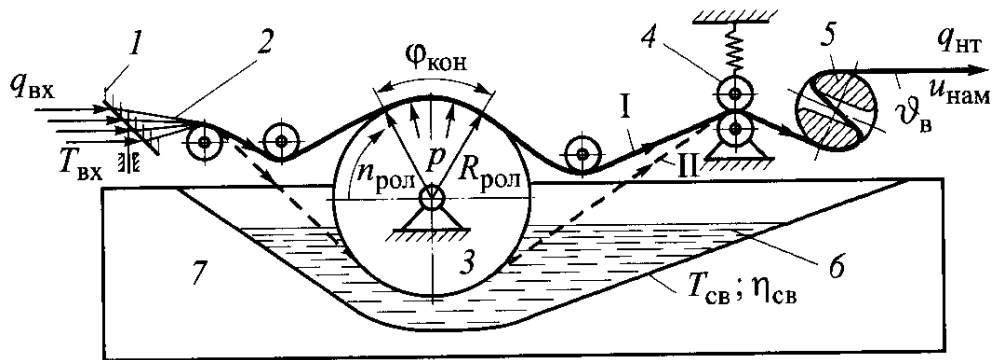


Рисунок 1.3.2 – Способы пропитки армирующего материала. I - с помощью контактного ролика, находящегося в жидком связующем; II - через пропиточную ванну с жидким раствором связующего. 1- гребенка; 2- нить, жгут; 3- ролик; 4- отжимные ролики; 5- натяжитель ленты; 6- связующее, раствор; 7- пропиточная ванна.

*Процесс намотки стекложгута на оправку* является ответственным этапом создания заготовок, так как именно он определяет геометрические параметры и эксплуатационные свойства стеклопластика [2].

В общем случае намотка проводится следующим образом:

На специальное намоточное оборудование устанавливается оправка, предварительно прогретая до определенной температуры. Затем вручную укладываются продольные слои. На подготовленную оправку укладываются кольцевые слои. Механизм укладки размещается на каретке, которая перемещается относительно вращающейся оправки, обеспечивая требуемую плотность укладки. Концы стекложгута в процессе намотки склеиваются специальным клеем.

К технологическому оборудованию для намотки предъявляются следующие требования: возможность автоматизации для достижения приемлемой точности и качества формирования детали, обеспечение стабильности свойств получаемых деталей; экономичность в эксплуатации; обеспечение контроля и возможность корректировки параметров процесса изготовления деталей; высокая производительность изготовления деталей [81].

В качестве намоточного оборудования используются специальные намоточные станки. По конструктивному исполнению их можно разделить на следующие типы:

- токарный или шлифовальный (используются для прерывной намотки нитями, жгутами и лентами деталей различной формы);
- кабельный (применяются при непрерывной намотке труб);
- специальный (производят намотку деталей конкретного вида: тора, шара или колена) [81].

Наиболее часто применяют станки токарного типа. При их использовании, перед намоткой вручную производится укладка продольных слоев и создается их натяжение [81].

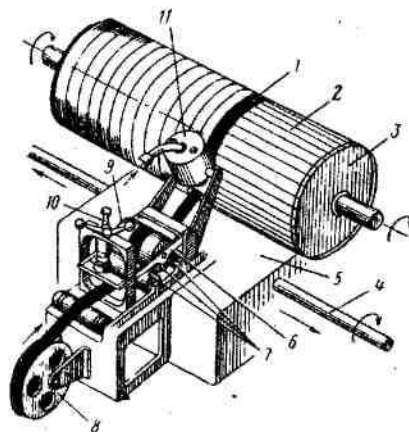


Рисунок 1.3.3 - Схема намоточной машины (НМ) на базе токарного станка:

- 1- кольцевой слой; 2 - продольный слой; 3 - оправка; 4 - ходовой винт каретки;  
 5 - каретка; 6 - рычажная подвеска; 7 — ролики; 8 — кассета со жгутом;  
 9 - прижимной ролик; 10 - штурвал ручной регулировки усилия прижима;  
 11—подогрев

На рисунке 1.3.3 представлена схема намоточной машины на базе токарного станка. На оправку укладывается лента кольцевыми слоями - 1. Механизм укладки размещается на каретке - 5, которая перемещается относительно вращающейся оправки, обеспечивая требуемую плотность укладки. Исходным материалом является стекложгут, предварительно пропитанный, подсушенный и собранный в кассету - 8. Из кассеты он поступает в натяжное устройство, состоящее из системы роликов - 7, один из которых размещен на рычажной

подвеске - б. Усилие на плече меняется с помощью специального подпружиненного устройства - 10. Вытягиваемая с определенным усилием ровница, после обдувки горячим воздухом из устройства - 11 с целью размягчения связующего, наматывается на оправку [81].

После намотки, на оправку с намотанным стекложгутом одевается резиновый мешок, во внутренней полости которого создается вакуум. Эта операция производится с целью улучшения пропитываемости армирующей основы связующим и отвода газообразных продуктов полимеризации.

Созданная оболочка затем подвергается *отверждению*.

В результате выполнения этого процесса происходит превращение жидких реакционноспособных олигомеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры [16, 28, 33].

Созданные методом намотки детали и оболочки подвергают конвекционному отверждению, которое считается наиболее экономичным и технологичным.

Этот процесс состоит из трех этапов: а) превращение жидкой смолы в гелеобразную; б) затвердевание гелеобразной смолы и приобретение ею прочности, достаточной для снятия изделия с оправки и его транспортировки; в) полное отверждение при котором смола достигает проектной прочности и приобретает требуемые физические и химические свойства [45, 46].

Для реализации процесса отверждения используют автоклавы или конвекционные печи необходимой мощности. В случае использования печи необходимо применение дополнительной оснастки в виде специальной пресс-формы, в рабочую полость которой будет подводиться избыточное давление.

После проведения отверждения и выдержки, оболочка извлекается из автоклава и направляется на механическую обработку.

*Механическая обработка* является финальным этапом изготовления деталей методом намотки. При назначении режимов резания следует особое внимание уделять скорости и направлению резания. Обработка против направления намотки может вызвать расслоение материала. Окончательная обработка деталей

проводится на токарных, фрезерных и сверлильных станках до полного соответствия требованиям конструкторской документации.

#### **1.4 Формулировка проблемы и обоснование подхода к исследованию**

В результате анализа технологий изготовления стеклопластиковых оболочек, установлено, что процесс производства композитных изделий зависит от большого количества различных по физической природе параметров. При этом в случае изменения любого из них вне установленного диапазона значений происходит изменение интенсивности проявления свойств материала и снижение качества детали.

Как правило, качество детали оценивается по нескольким критериям, среди которых для ракетной техники основными принимают отсутствие дефектов, соответствие размеров чертежу, получение значений массы и прочности в установленных пределах.

Замечено, что все эти критерии в первую очередь зависят от процесса производства оболочки, а в данном случае – формообразования методом намотки. При этом, в процессе намотки возникает множество критических ситуаций, которые приводят к образованию различных дефектов и снижению качества изделия. Например, критическая ситуация – увеличение вязкости связующего из-за снижения его температуры приводит к образованию внутренних расслоений. Наличие таких дефектов делает использование оболочки невозможным, т.е. она отправляется в брак. При этом, следует учитывать высокую стоимость изделия из-за дорогостоящих компонентов и очень длительной отработки технологии.

В то же время, использование на этапе проектирования оболочки методики прогнозирования качества, основанной на количественных оценках процесса производства, позволило бы значительно сократить количество брака и длительность отработки новых изделий.

Это делает необходимым проведение данного исследования.

Ранее неоднократно предпринимались попытки создания математических моделей изготовления стеклопластиковых оболочек, методик прогнозирования их качества и управления производством [1, 5, 13, 25, 34, 37, 42, 49, 55, 56, 59, 64, 89]. Результаты исследований отражены в работах нескольких выдающихся ученых, среди которых Образцов И.Ф., Канович М.З., Трофимова Н.Н., Арсентьева С.Н., Криканов А.А., Васильев В.В. и др.

Однако, в этих исследованиях, как и во многих других, процесс изготовления стеклопластиков не рассматривается как техническая система, а модели строятся на основе известных математических зависимостей и в них используется ограниченное количество параметров. Кроме того, при рассмотрении качества изготовления использовался обычно всего лишь один критерий (например прочности или масса) без учета влияния других факторов и возникновения критичностей.

В следствие этого, применение традиционных математических моделей не позволяет достаточно точно оценивать качество выполнения процесса изготовления оболочки.

Для повышения качества стеклопластиковых изделий необходимо учитывать одновременно множество параметров, отслеживать возникновение критических ситуаций и прогнозировать с их учетом изменение свойств оболочек.

При этом требуется разработка одного обобщенного критерия, который включает в себя все известные свойства.

Единственным методом исследования позволяющим это сделать является системный анализ.

## **1.5 Выводы по ГЛАВЕ I**

Анализ объекта исследования позволил установить следующее:

1. Процесс создания стеклопластиковых оболочек является многопараметричным и многофакторным процессом. В ходе его реализации возникают критические ситуации и развиваются предельные состояния, которые негативно влияют на качество оболочек.

2. Назрела необходимость в создании математической модели, позволяющей учитывать действие максимального количества факторов, отслеживать и количественно оценивать возникновение предельных состояний и управлять качеством процесса изготовления стеклопластиковых оболочек.
3. Для создания модели необходимо применение такого метода исследования, который позволяет изучать взаимодействие процессов и элементов изготовления стеклопластиков методом намотки, а так же разрабатывать методы и алгоритмы прогнозирования качества создаваемых оболочек. Таким методом является системный анализ.

## **ГЛАВА II СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ**

### **2.1 Структурная схема технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки»**

Процесс создания оболочки является сложным и многофакторным, его необходимо рассматривать как техническую систему, обладающую всеми признаками сложных систем: [3,15,22, 39,65, 76, 92].

1. Система делится на конечное число подсистем, а каждая подсистема в свою очередь, на конечное количество более простых подсистем и т.д. до получения простейших элементов системы. В нашем случае, она представляет из четырех основных элементов (оборудование, оснастка, наполнитель и связующее).

В свою очередь, элементы технической системы представляют собой комплексы подсистем низшего порядка (Рисунок 2.1.1). Например, подсистема «оборудование» состоит из элементов «токарный станок» и «пропиточное устройство», «печь».

Таким образом, вся система может быть представлена в виде конечного множества простейших элементов.

2. Все элементы сложной системы взаимодействуют между собой и с внешней средой (Рисунок 2.2.4). Так, связующее взаимодействует с наполнителем, образуя полимерную композицию, токарный станок передает оправке необходимую скорость вращения, оправка придает наполнителю и связующему необходимую форму и т.д. [24].

3. Свойства сложных систем определяются как свойствами отдельных элементов, так и характером их взаимодействия. В нашем случае, характеристики связующего и наполнителя в значительной степени влияют на физические характеристики оболочки, а взаимодействие свойств связующего и наполнителя в процессе пропитки определяет степень анизотропии всего стеклопластика [54].



4. Выполнение основной функции системы достигается выполнением функций ее основными элементами. В нашей технической системе это тоже имеет место. Например, невыполнение токарным станком функции создания крутящего момента приведет к невозможности выполнения процесса намотки.

5. Сложная система не является стационарной. Происходящие в ней изменения временные, т.е. зависят от фактора времени -  $t$ . Например, связующее, в качестве которого выступает полиэфирная смола, в процессе временного формообразования оболочки из стеклопластика переходит из жидкого в твердое состояние.

6. Система является нелинейной. Иными словами, небольшое возмущающее воздействие может оказывать значительный эффект на результат функционирования системы, в то время как большой воздействующий импульс может оказаться нерезультативным. Для рассматриваемого объекта это можно проиллюстрировать на следующем примере: при значительном падении температуры отверждения стеклопластика его свойства не изменятся (в случае увеличения времени выдержки), но даже при небольшом изменении угла намотки (менее 0,5 градуса) интенсивность проявления прочностных свойств станет отличной от расчетной.

7. Система чрезвычайно зависима от первоначальных условий (свойства готового стеклопластика значительно зависят от каждого из параметров наполнителя и связующего), что указывает на ее склонность к катастрофам (отличительная черта систем, находящихся на кромке хаоса)

Наличие всех этих признаков является доказательством возможности представления процесса в виде технической системы - «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки», которая состоит из конечного множества элементов, обладающих индивидуальными свойствами и особенностями [57].

При формировании технической системы, примем следующие допущения:

1) используемое намоточное оборудование аттестовано и проходит необходимое сервисное обслуживание;

- 2) ошибки в конструкторской и технологической документации исключены;
- 3) подвод различных видов энергии к намоточному оборудованию происходит без сбоев;
- 4) процесс намотки проводится достаточно квалифицированным рабочим персоналом;
- 5) материалы, используемые для намотки, обладают характеристиками, которые определены опытным путем [4].

Структура технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» схематично представлена на рисунке. 2.1.1.

В ней **внешними возмущающими факторами Z** являются конечное одномерное множество компонентов

$$\bar{Z} = \{\bar{z}_1, \bar{z}_2 \dots \bar{z}_n\} \quad (2.1)$$

где  $\bar{z}_n = \{z_{i,1}, z_{i,2} \dots z_{i,m}\}$ ;  $i$ - количество компонентов;  $m$  – количество факторов в компоненте.

Каждый компонент, в свою очередь, является вектором.

К внешним возмущающим факторам отнесены характеристики окружающей среды, составляющее вектор -  $\bar{z}_1$ . Компонентами вектора являются температура -  $z_{1,1}$ , влажность -  $z_{1,2}$  и давление -  $z_{1,3}$  окружающего воздуха, его запыленность -  $z_{1,4}$ . Факторы, характеризующие состояние оборудования, составляют вектор -  $\bar{z}_2$ , включающий в себя степень износа оборудования -  $z_{2,1}$  и его мощность -  $z_{2,2}$ . Третьим вектором -  $\bar{z}_3$  внешних возмущающих факторов являются экономические и производственные возможности производства: количество смен -  $z_{3,1}$ , время простоя -  $z_{3,2}$ , количество оборудования -  $z_{3,3}$ .

Такие факторы косвенно влияют на функционирование системы, и, как правило, являются неизменяемыми в рассматриваемый период времени.

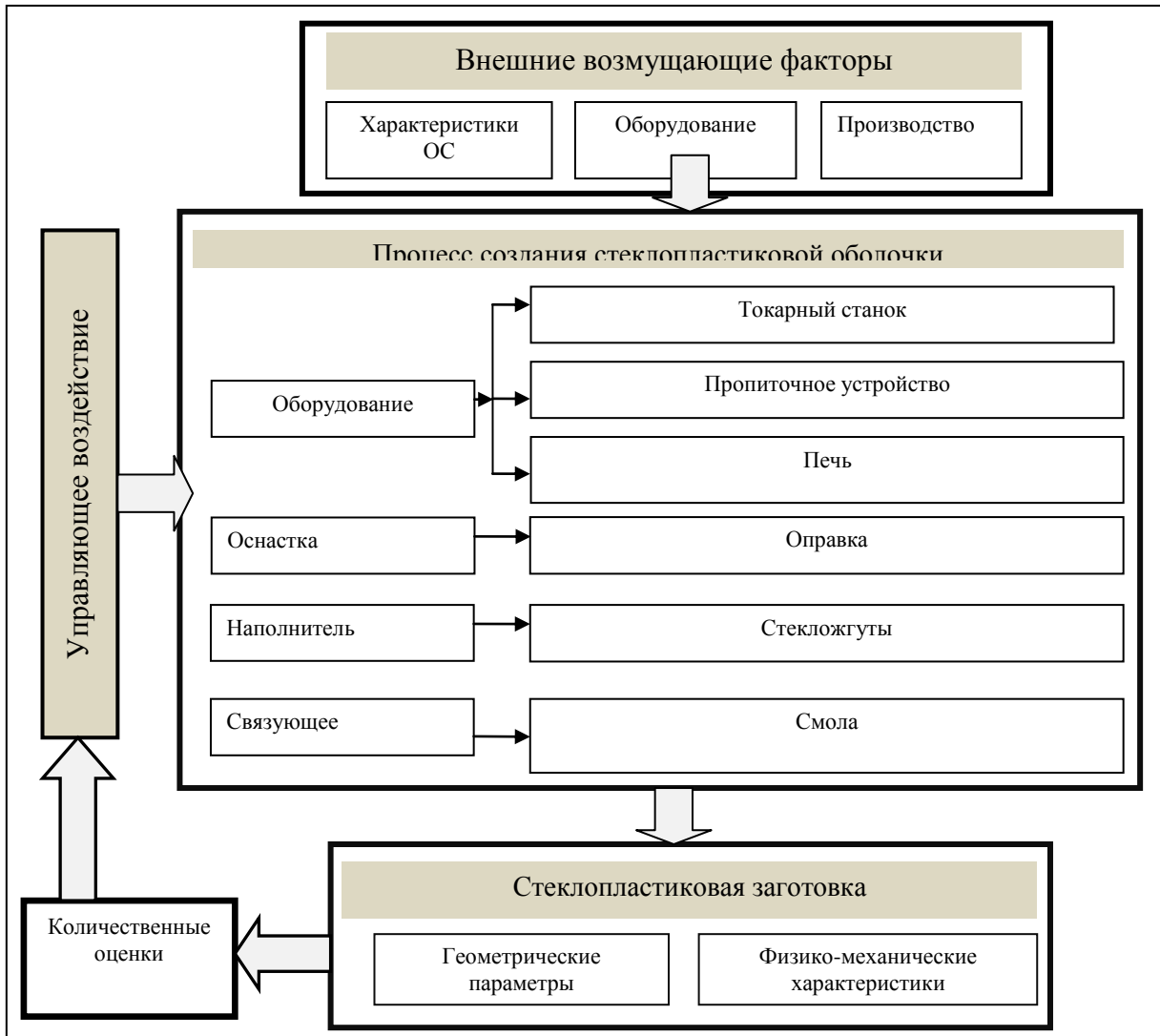


Рисунок 2.1.1 – Структурная схема сложной технической системы «Процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки»

Техническая система «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки», на основе принятой технологии, состоит из следующих элементов:

1) *Оборудование*. В этом элементе объединено все технологическое оборудование, используемое для создания оболочки. Сюда входит токарный станок, обеспечивающий вращение оправки с заданной угловой скоростью, установка для дополнительной пропитки связующим стекложгутов и сушильная камера для отверждения стеклопластика.

2) *Оснастка*. К ней отнесены: оправки для придания необходимой формы неотвержденному стеклопластику, шпулярники для установки катушек и сами

катушки или барабаны, на которые наматывается стекложгут на заводе-изготовителе.

3) *Наполнитель*. Этот элемент определяет свойства материала стеклопластика, образующего его армирующую основу – стекложгуты. За счет этого элемента получают основные физико-механические характеристики создаваемой оболочки.

4) *Связующее* – содержит свойства материала стеклопластика, обеспечивающие сцепление стекложгутов и монолитность оболочки. В данной работе – полиэфирная смола.

Заметим, при отсутствии хотя бы одного из этих элементов, процесс намотки становится невозможным. Это является доказательством цельности системы. В ней оборудование, представляющее собой токарный станок, обеспечивает движение оснастки в виде оправки. Оправка придает форму будущей оболочке. Наполнитель обеспечивает прочностные свойства оболочки, а связующее - делает ее материал монолитным.

**Управляющее воздействие** представляется в системе вектором

$$\bar{G} = \{\bar{g}_1, \bar{g}_2 \dots \bar{g}_n\} \quad (2.2)$$

где  $n$ - количество управляющих воздействий.

Управляющее воздействие позволяет варьировать интенсивностями проявления свойств системы. Эти воздействия действуют в отдельные моменты времени. Например, управляющим воздействием можно считать изменение скорости вращения шпинделя станка.

Этот вектор позволяет варьировать режимами намотки, температурой отверждения оболочки, углом намотки и скоростью движения каретки.

Заметим, что начало функционирования системы происходит с момента действия определенного управляющего воздействия - в данном случае, с момента запуска оборудования. Управление реализуется путем перемещения регуляторов режимов намотки до необходимых значений и заправкой пропиточного

устройства жидким связующим, фиксацией первых витков стекложгута, пропущенного через валки и каретку на оправке.

**Результатом реализации процесса намотки** является создание оболочки из стеклопластика. Этот результат представляется в виде набора характеристик, полученных в результате последовательных превращений связующего и армирующей основы, а так же показателей, оценивающих качество отдельных операций процесса производства.

Значения геометрических и физических характеристик оболочки достигаются при соблюдении технологических режимов с учетом особенностей всех остальных элементов. Например, выполнение требований к шероховатости оболочки достигаются в результате применения оснастки, имеющей шероховатость наружной поверхности не выше требуемой внутренней поверхности оболочки.

Каждый из элементов технической системы обладает собственными свойствами, проявление которых может быть оценено количественно. Эти оценки назовем **показателями элементов подсистемы**. Они зависят от **параметров технической системы**.

Параметры системы делятся на две группы: внутренние и внешние.

Внутренние параметры описывают воздействие одного элемента технической системы на другой. Внешние параметры отражают воздействия факторов внешней среды.

Внутренние параметры можно классифицировать, исходя из принадлежности к какому либо элементу - оснастке и оборудованию, наполнителю и связующему.

Например, параметрами элемента - «связующее» можно считать условную вязкость, время желатинизации, температуру полимеризации и т.д.

В свою очередь, внутренние параметры делятся на изменяемые и неизменяемые.

К изменяемым можно отнести параметры, значения которых варьируются в некоторых пределах (температуры режима, давление, степень обжатия валками и

др.) с помощью *управляющего воздействия*. Такие параметры назовем режимными. Они определяют технологические режимы изготовления оболочки.

Неизменяемые параметры – это параметры, которые в процессе намотки не изменяют своих значений. К ним относятся, в первую очередь, геометрические параметры детали и параметры окружающей среды.

Все параметры можно классифицировать по важности на особо ответственные, ответственные и нейтральные.

Считается что, изменение значения особо ответственного параметра ведет к необратимым изменениям в системе, и, как следствие, к нерасчетным выходным характеристикам детали. При действии нейтрального параметра, изменения в системе может не происходить.

Однако, изменение значений сразу нескольких нейтральных параметров может оказать существенное влияние на выходные характеристики оболочки. Например, при изменении параметра - угол намотки, произойдет изменение всех механических характеристик оболочки. В то же время, изменение нейтрального параметра - давление окружающей среды практически не влияет на работу системы и результат ее функционирования. Это обстоятельство еще раз подтверждает нелинейность системы.

В совокупности, элементы системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки» отражают суть технологического процесса.

## **2.2 Функционирование технической системы**

В ходе функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» происходит образование из стекложгутов и полиэфирной смолы стеклопластика, имеющего геометрическую форму в виде осесимметричной усеченной конической оболочки.

При этом, наполнитель в виде стеклянных жгутов, состоящих из набора скрученных стеклянных нитей, проходя через пропиточное устройство, обволакивается связующим и при помощи токарного станка наматывается на

оправку, образуя оболочку с заданной геометрией и механическими свойствами после отверждения.

Такая технология изготовления стеклопластиковых оболочек выполняется на оборудовании, режимами работы которого можно управлять путем совершения определенных действий. Это достигается за счет соответствующего управляющего воздействия.

Управляющее воздействие на техническую систему передается через органы управления оборудования (станка, печи или пропиточного устройства): коробку передач станка, терморегулятор и т. д.

Результатом этого воздействия является изменение параметров функционирования как отдельных элементов, так и всей системы в целом.

Оболочка характеризуется максимальным и минимальным диаметрами-  $D_{max}$  и  $D_{min}$ , толщиной -  $\delta$  и длиной -  $l_0$  (Рисунок 2.2.1) [12]. При изменении скоростей вращения шпинделя станка и движения каретки, угла намотки, а также времени намотки, все значения параметров оболочки изменяются.

Кроме геометрических параметров, оболочка из стеклопластика должна обладать необходимыми значениями физико-механических параметров: пределами прочности на растяжение и сжатие, коэффициентом анизотропии, твердостью, которые находятся в установленных диапазонах. Выполнение этого требования достигается при изменении режимов работы (через органы управления) пропиточного устройства (в части изменения скорости подачи жгута), его натяжения и межвалкового зазора, а так же температуры печи при отверждении стеклопластика и оптимизации соотношения наполнителя и связующего в стеклопластике.

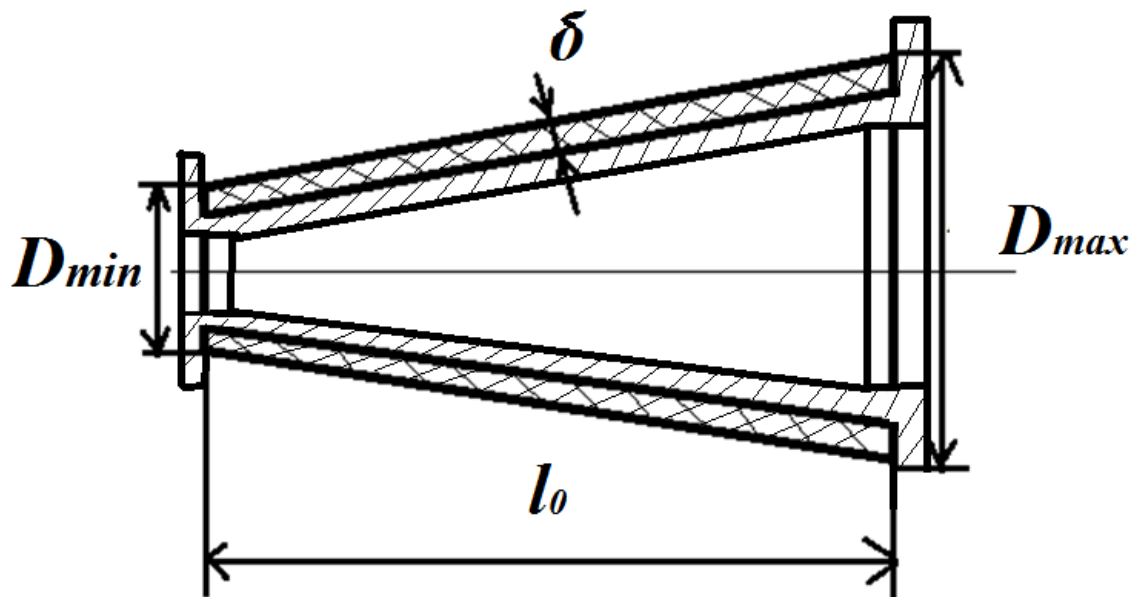


Рисунок 2.2.1 – Эскиз конической стеклопластиковой оболочки

Таким образом, параметры процесса функционирования системы могут изменяться с помощью управляющего воздействия.

В целом, процесс функционирования системы состоит из набора целенаправленных действий, совершаемых каждым элементом технической системы.

Эти действия могут быть сложными (т.е. состоять из совокупности простых действий) и простыми (считается, что дальнейшее деление на действия является невозможным). Каждое простое действие обычно описывается в виде отдельной функции. Совокупность таких действий для каждого элемента представляет процесс функционирования этого элемента.

В нашем случае, для элементов технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки» имеются следующие функциональные схемы.

Функционирование элемента «Оборудование» начинается с подключения его к сети электропитания. Затем происходят настройки режимов работы станка и пропиточного устройства и коррекция натяжения стекложгута. Перед выполнением процесса отверждения оболочки, производится установка режима отверждения на пульте управления печью.



После настройки начинается активная фаза функционирования оборудования (Рисунок 2.2.2). Электропривод станка приводит в движение шпиндель и установленную на него оправку. Привод пропиточного устройства протягивает стекловолоконные жгуты через ванну со связующим и отжимные валки к нитеукладчику. Нитеукладчик приводит в движение каретку, которая совершает возвратно-поступательные движения вдоль оправки. В случае обрыва жгута или превышения необходимого количества слоев стекложгута оборудование отключается. При необходимости, после перенастройки оно может быть включено вновь.

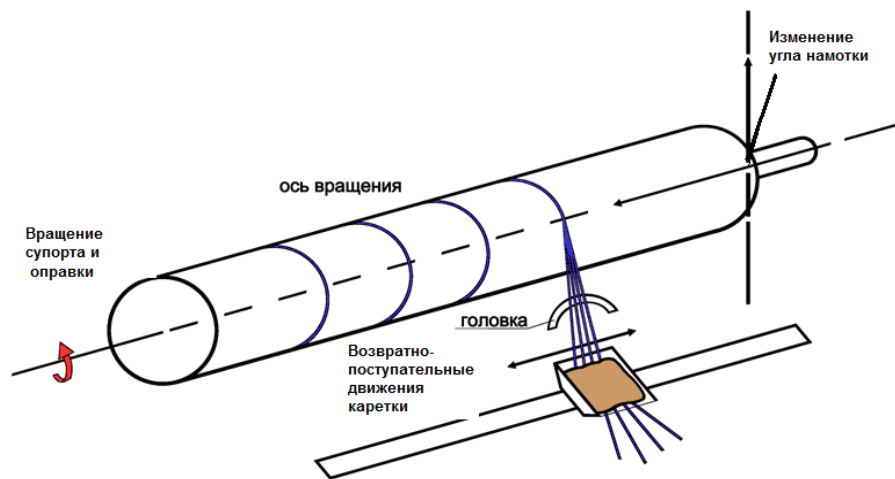


Рисунок 2.2.2 - Схема передачи движения оборудованием

После намотки, оболочка направляется в печь для отверждения (Рисунок 2.2.3). Во внутренней полости оболочки создается пониженное, а в самой печи – избыточное давление, воздух рабочего объема печи нагревается до установленной температуры [18]. По истечении расчетного времени отверждения нагревательные элементы отключаются, давление «сравливается». Печь отключается от источника питания.

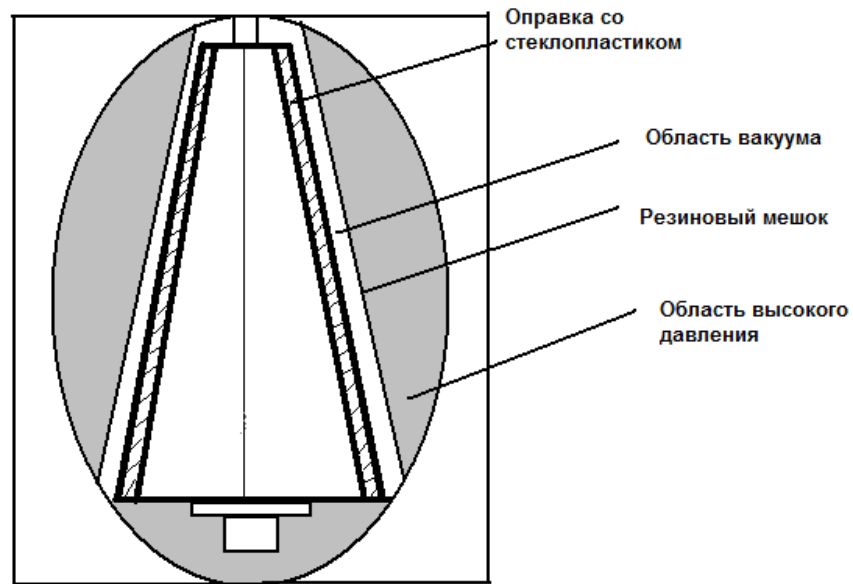


Рисунок 2.2.3 – Схема оболочки на режиме отверждения

Функциональная схема элемента «Оборудование» представляется в следующем виде (Рисунок 2.2.4).

Элемент «оснастка» состоит из подэлементов: оправка для намотки, шпулярники и катушки.

Функцией оправки является передача своей формы и размеров неотвержденному стеклопластику и обеспечение ее сохранности до полной полимеризации связующего, катушек – фиксация стекложгута в пространстве, шпулярников – фиксация положения катушек в положении, обеспечивающем равномерное поступление стекложгута.

Функционирование оснастки начинается с момента установки оправки на намоточный станок и происходит параллельно функционированию оборудования.

Кроме оправки, в состав оснастки могут входить различные приспособления в виде подставок, ступеней, конструкций для транспортировки оправки по участкам цеха и ключей. Такая оснастка осуществляет технологическую поддержку процесса и носит вспомогательную функцию.

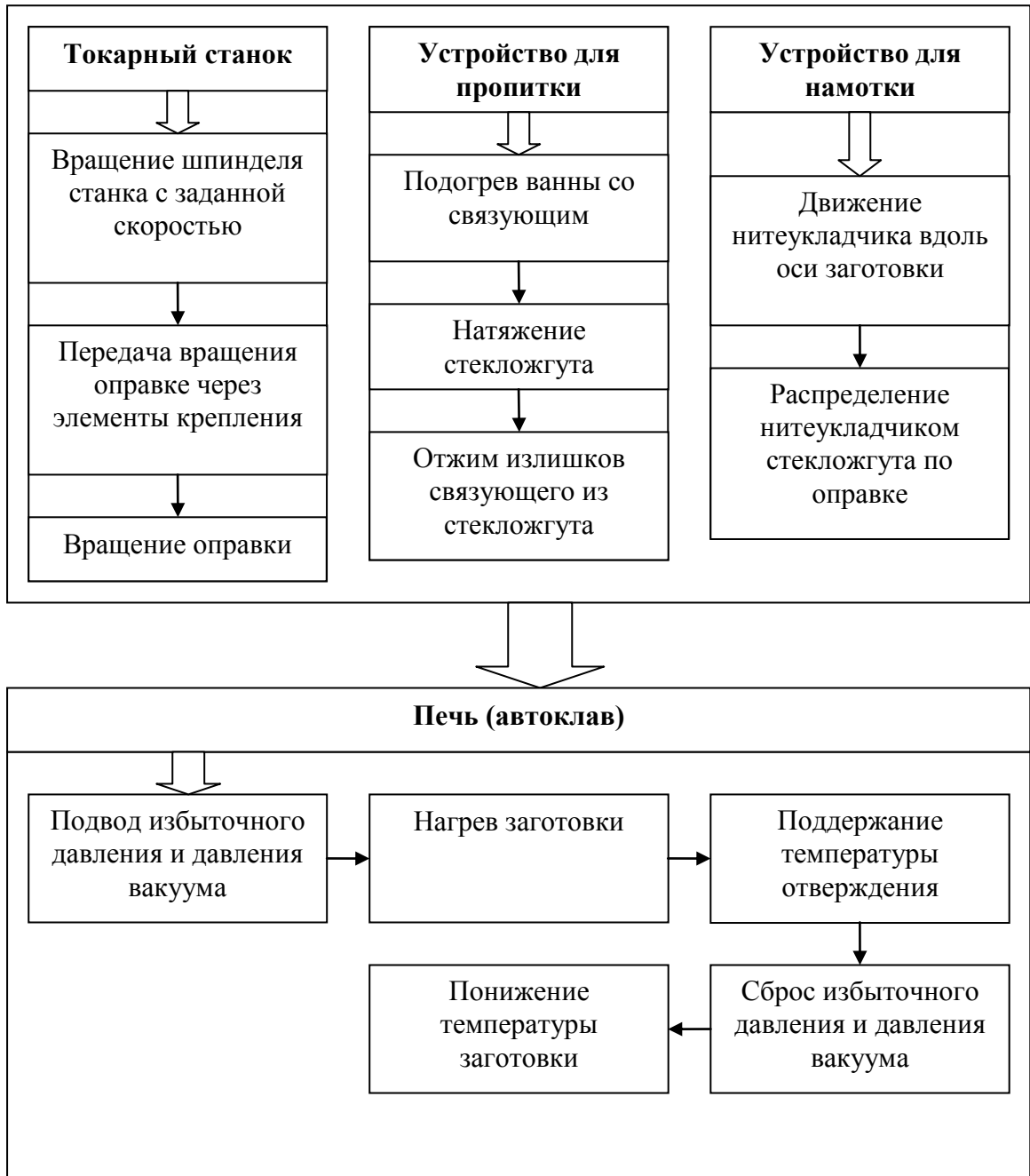


Рисунок 2.2.4 - Функциональная схема элемента «Оборудование»

Функциональная схема элемента «оснастка» представляется на рисунке 2.2.5.

Элемент «Связующее» начинает свое функционирование в рамках технической системы с момента заполнения ванны. В процессе протяжки стекложгута, связующее пропитывает его, обеспечивая межслойную адгезию. При

нагреве в печи и под действием давления, связующее равномерно распределяется в толще оболочки и отверждается, придавая материалу монолитность.

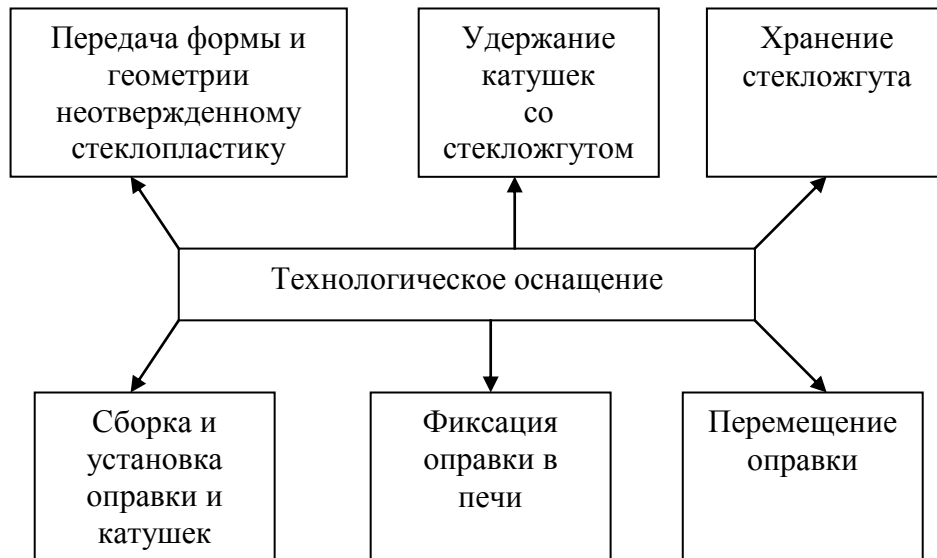


Рисунок 2.2.5 - Функциональная схема элемента «Оснастка»

Функциональная схема элемента «Связующее» дана на рисунке 2.2.6.

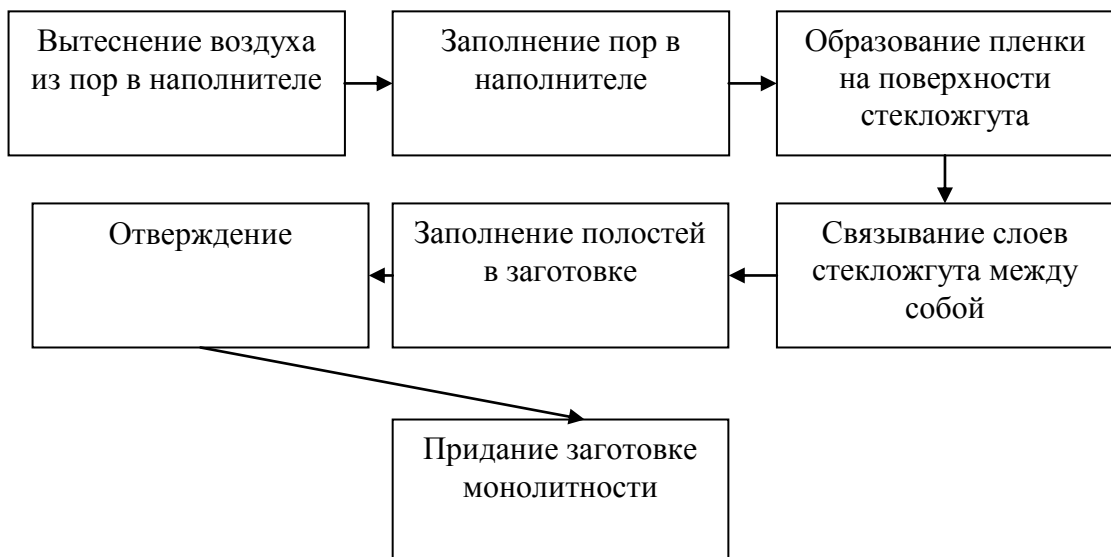


Рисунок 2.2.6 - Функциональная схема элемента «Связующее»

Элемент «Наполнитель» обеспечивает необходимые значения физико-механических характеристик оболочки, оценивающих прочность, устойчивость, жесткость. Выполнение этой функции зависит от параметров материала стекложгута.

Функционирование элемента начинается с момента установки катушек со стекложгутом на шпулярники. Стекложгут пропитывается связующим и наматывается на оправку, формируя армирующую основу при помощи токарного станка и распределительной каретки.

Схема его функционирования приведена на рисунке 2.2.7

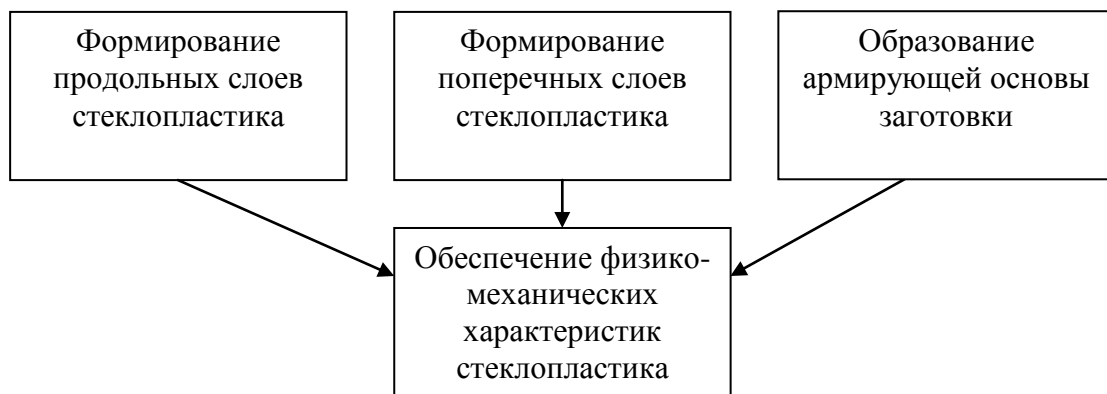


Рисунок 2.2.7 - Функциональная схема элемента «Наполнитель»

Подводя итог, можно сказать, что каждый из элементов системы выполняя свою функцию, обеспечивает совместно достижение поставленной цели – получение качественной стеклопластиковой оболочки. Укрупненная схема процесса получения стеклопластиковых оболочек методом намотки представляется на рисунке 2.2.8

Элементы системы не могут выполнять своих функций и общая цель их функционирования не может быть достигнута, если не будут обеспечены связи между ними. Эти связи по своей природе могут иметь физический или химический характер и осуществляться путем контакта или излучением в какой либо среде.

Связь (1) между внешними факторами -  $Z$  и оборудованием (Рисунок 2.2.9) является физической и реализуется в первую очередь, за счет подвода необходимых видов энергии (сжатого воздуха, электроэнергии). При отсутствии возможности предприятия обеспечить бесперебойное электроснабжение, работа оборудования будет нестабильной или вовсе прекращена.



Рисунок 2.2.8 – Функциональная схема технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки»

Связь (2) между внешними факторами  $Z$  и оснасткой (Рисунок 2.2.9) оценивается через параметры окружающей среды и экономические возможности производства. В случае отсутствия необходимых средств на проведение ремонта и своевременную замену оснастки, не будет обеспечено требуемое качество оболочки, а скачки температуры окружающего воздуха могут привести к короблению оправок.

Связи (3,4) между внешними факторами  $Z$ , наполнителем и связующим (Рисунок 2.2.9) так же во многом зависят от экономического состояния

предприятия и параметров окружающей среды. Для получения оболочки с установленными характеристиками необходимо своевременное поступление качественных материалов в необходимых объемах и обеспечение условий их хранения согласно нормативной документации.

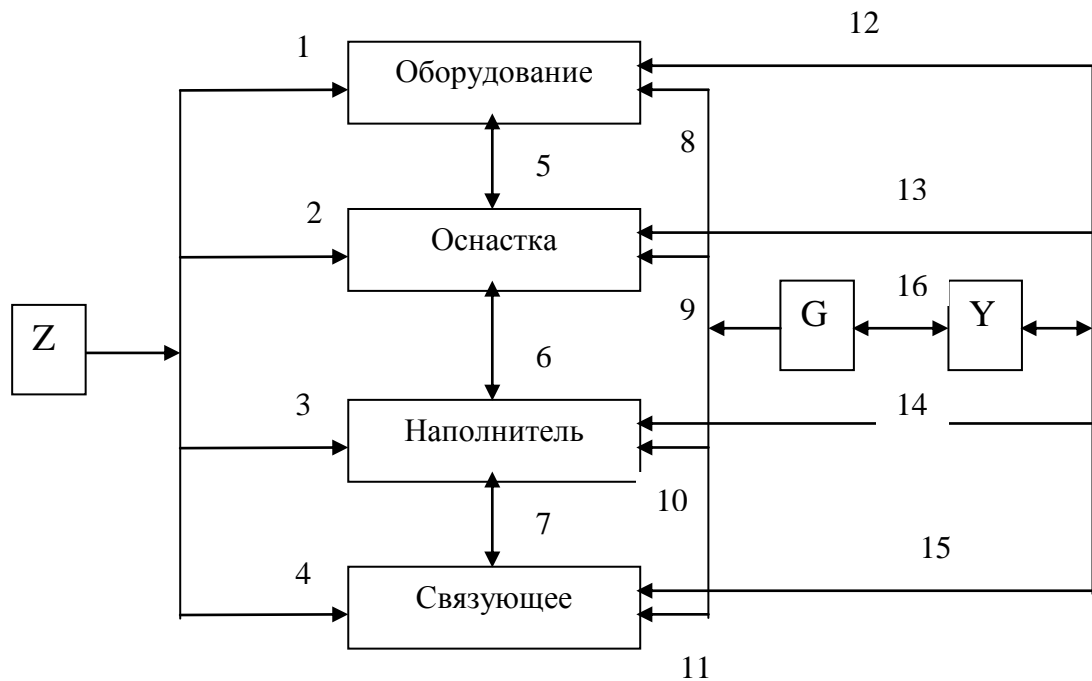


Рисунок 2.2.9 – Связи между элементами технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки»

Оборудование и оснастка связаны между собой физически (5) посредством элементов крепления (Рисунок 2.2.9). Такая связь характеризуется жесткостью системы Станок – Приспособление – Инструмент - Деталь (СПИД). Кроме того, для определенного типа оборудования требуется и определенный тип оснастки. Это требование определяется массовыми и геометрическими характеристиками оправок.

Связи (6,7) между оснасткой и применяемыми материалами (Рисунок 2.2.9) происходят путем непосредственного контакта через слой антиадгезионной смазки или клея.

Связь (8) между оборудованием и управляющим воздействием (Рисунок 2.2.9) прослеживается наиболее четко. Именно через органы управления

технологического оборудования осуществляется функция управления режимами намотки.

Связь (9) между оснасткой и управляющим воздействием (Рисунок 2.2.9) является косвенной и определяется режимами работы оборудования, на которые эта оснастка установлена. Так, изменение режима термообработки может привести к изменению линейных размеров оправки. То же самое касается и связей между управляющим воздействием и наполнителем и связующим - (10,11) (Рисунок 2.2.9).

Между технологическим оборудованием и оболочкой прослеживается связь (12), основанная на особенностях габаритно-массовых характеристик оболочки и ее геометрической формы. В нашем случае, оболочка представляет собой крупногабаритную заготовку в виде усеченного конуса, т.е. тело вращения. Такой тип оболочек возможно изготовить только на специальных намоточных станках или токарных станках, модернизированных под намотку.

Связь (13) между оснасткой и оболочкой (Рисунок 2.2.9) происходит через поверхность соприкосновения между наружной поверхностью оправки и внутренней поверхностью оболочки. При этом, параметры внутренней поверхности оболочки имеют те же значения, что и параметры поверхности оправки.

Наполнитель и связующее связаны (14,15) с технологической оснасткой (Рисунок 2.2.9) путем непосредственного контакта. При этом, некоторые параметры оснастки (такие как ее температура), влияют на параметры этих материалов. Например, при недостаточном прогреве оправки, температура связующего на первых витках падает, что приводит к уменьшению его вязкости.

Связь (16) между управляющим воздействием и оболочкой (Рисунок 2.2.9) не является физической и происходит через параметры стеклопластиковой оболочки при желании пользователя изменить режимы намотки.

Указанные связи между элементами технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» оцениваются набором общих параметров. Например, одним из таких параметров связи между оборудованием и



оболочкой является максимальный диаметр оболочки-  $D_{max}$ . Именно с нерасчетным изменением таких параметров и связано возникновение большинства предельных состояний.

### 2.3 Алгоритм методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковой оболочки

Для достижения цели функционирования – создания качественной стеклопластиковой оболочки, каждый из параметров системы должен находиться в установленном интервале значений.

Считаем, что в случае, когда значение хотя бы одного из параметров не находится в установленном интервале, возникает *предельное состояние*, которое начинается с *критической ситуации*. Следствием развития критических ситуаций, как правило, становятся необратимые изменения свойств стеклопластиковой оболочки. Это обстоятельство делает необходимым их отслеживание и учет.

На сегодняшний день, какой-либо методики прогнозирования свойств стеклопластика, позволяющей учитывать и количественно оценивать возникновение таких ситуаций нами не найдено. Между тем, ее наличие и использование существенно сократит затраты на проектирование и производство продукции из стеклопластиков.

Для прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки необходимо построение математической модели, в которой внутренние и внешние параметры взаимосвязаны [6]. Основу построения моделей составляют следующие принципы (допущения) [19, 23].

**1. Принцип информационной достаточности.** Считается, что при полном отсутствии информации об исследуемой системе построение ее модели невозможно. В то же время, при наличии полной информации о системе предполагается, что создание модели лишено смысла.

**2. Принцип осуществимости.** Создаваемая модель обеспечивает достижение поставленной цели исследования за конечное время, что отражается показателями эффективности.

**3. Принцип множественности моделей.** Создаваемая модель отражает в первую очередь, те свойства реальной системы (или явления), которые, по мнению исследователя, влияют на выбранный показатель эффективности. При использовании такой модели познаются лишь отдельные стороны реальности. Для более полного исследования свойств системы необходимо использовать ряд моделей, позволяющих с разных сторон и с разной степенью детальности отражать рассматриваемый процесс функционирования реального объекта.

**4. Принцип агрегирования.** Сложная система можно представляется в виде агрегатов (подсистем), в которых, при математическом описании используются стандартные математические схемы и методы. Принцип агрегирования позволяет достаточно гибко перестраивать построенную модель в зависимости от задач исследования.

**5. Принцип параметризации.** Моделируемая система имеет в своем составе относительно изолированные подсистемы, характеризующиеся определенными показателями, которые могут иметь векторный характер. Такие подсистемы можно заменять в модели соответствующими константами процесса функционирования. Зависимость значений этих констант задается в виде таблиц, графиков или совокупности аналитических выражений (формул). [14,52] .

Построение математической модели, ограничиваясь этими принципами не позволяет достаточно полно оценивать состояние технической системы при возникновении предельных состояний. Это связано, в первую очередь, с многопараметричностью функционирования объектов реального мира, с невозможностью создать математические модели, ограничиваясь каким-либо одним математическим выражением.

Для построения многофакторной математической модели для исследования предельных состояний эти принципы дополним положениями теории критических ситуаций, разработанной д.т.н. Уразбахтиным Ф.А.

Количественную оценку возникновения предельных состояний, начинающихся с развития критических ситуаций, будем производить с помощью **показателей критичности (критериальных показателей)**. Они количественно оценивают степень приближения к предельному состоянию по интенсивности проявления отдельного свойства в условиях конкретной ситуации.

Такие показатели назовем частными. Они представляются в виде

$$y_{i,j,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{i,j,l} > 1 \\ D_{i,j,l}, & \text{если } 1 \geq D_{i,j,l} \geq 0, \\ 0, & \text{если } D_{i,j,l} < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $D_{i,j,l} = f(x_i)$  - функция от параметров технологической системы;  $i = 1...3$  - номер этапа изготовления оболочки, предполагается: 1- пропитка, 2- намотка, 3 - отверждение;  $j$  - номер процесса в  $i$ -м этапе;  $l$  - номер частного показателя критичности  $j$ -го процесса.

Вид показателей (2.3) позволяет сравнивать различные по физической природе и размерности параметры намотки в результате выполнения процесса. Значения показателей  $Y_{i,j,l}$  находятся в интервале от 0 до 1.

При этом предполагается что:

- при значениях показателя  $Y_{i,j,l}$  в диапазоне от 0 до 1,0 считается, что появление критической ситуации маловероятно;
- наименьшая степень появления критических ситуаций ожидается при  $Y_{i,j,l}=1$ ;
- в остальных случаях – критичность приводит к получению оболочки, несоответствующей техническим требованиям.

Частные показатели  $Y_{i,j,l}$ , в зависимости от принадлежности к определенному элементу системы составляют массив **обобщенных интегрированных -  $Y_{i,ja}$  и качественных -  $Y_{i,jk}$  критериальных показателей:**

$$Y_{\kappa} = \sum_{i=1}^{m_i} Y_{ik} / m_i; Y_a = \sum_{i=1}^{m_i} Y_{ia} / m_i \quad (2.4)$$

$$Y_{ik} = \sum_{j=1}^{n_j} Y_{i,jk} / n_j, Y_{ia} = \sum_{j=1}^{n_j} Y_{i,ja} / n_j \quad (2.5)$$

$$Y_{i,ja} = \{y_{i,j,l}, i=1..3, j=1, m_i, l=1, n_j\} \quad (2.6)$$

$$Y_{i,jk} = A \sum_{l=1}^{p_{i,j}} (y_{i,j,l})_{vp} / p_{i,j} + B \sum_{l=1}^{r_{i,j}} (y_{i,j,l})_p / r_{i,j} + C \sum_{l=1}^{s_{i,j}} (y_{i,j,l})_{np} / s_{i,j} \quad (2.7)$$

где  $Y_{\kappa}$ ,  $Y_a$  - качественный и интегрированный обобщенный минимаксный критерий процесса изготовления стеклопластиковой оболочки;  $Y_{ik}$  и  $Y_{ia}$  - качественный и интегрированный критериальные показатели  $i$ -го этапа изготовления;  $Y_{i,ja}$  и  $Y_{i,jk}$  - качественный и интегрированный критериальные показатели процесса в  $i$ -м этапе изготовления;  $y_{i,j,l}$  - частный критериальный показатель процесса изготовления стеклопластика;  $D_{i,j,l}$  - функция от параметров технологической системы -  $x_i$ ;  $n_j$  - количество показателей  $Y_{i,ja}$  и  $Y_{i,jk}$  в  $j$ -м процессе;  $m_i$  - количество показателей  $Y_{ik}$  и  $Y_{ia}$  в  $i$ -м этапе;  $p_{i,j}$  - количество особо ответственных показателей в  $j$ -м процессе  $i$ -го этапа изготовления;  $r_{i,j}$  - количество ответственных показателей в  $j$ -м процессе  $i$ -го этапа изготовления;  $s_{i,j}$  - количество не ответственных показателей в  $j$ -м процессе  $i$ -го этапа изготовления;  $i = 1..3$  - номер этапа изготовления оболочки, предполагается: 1- пропитка, 2- намотка, 3 - отверждение;  $j$  - номер процесса в  $i$ -м этапе;  $l$  - номер частного критериального показателя  $j$ -го процесса;  $A, B, C$  - коэффициенты значимости, назначенные экспертным советом (в данном случае, 0,6; 0,3 и 0,1 соответственно).

В (2.7) индексом « $vp$ » обозначены показатели, которые зависят от пяти и более параметров, « $p$ » - показатели, которые имеют от 3 до 5 аргументов-

параметров, « $np$ » - показатели, показатели, зависящие менее чем от трех параметров.

В общем случае, реализация математической модели сводится к определению значений двух обобщенных критериальных показателей [21]:

$$M = \{Y_k\}; \{Y_a\} \quad (2.8)$$

На основе такой модели (2.8) возникновения критических ситуаций представляется возможным построить алгоритм методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиков методом намотки (Рисунок 2.3.1).

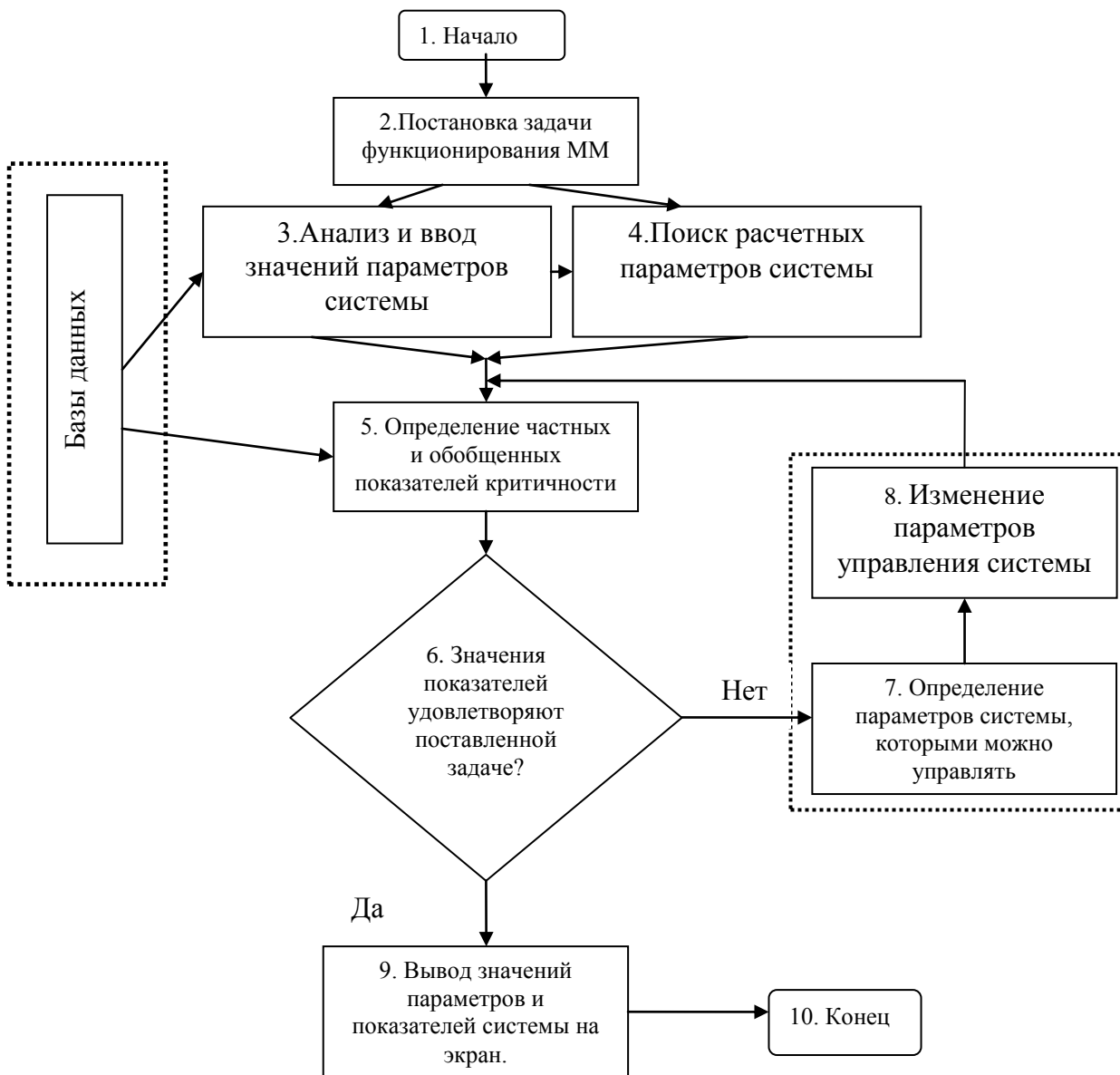


Рисунок 2.3.1 –Алгоритм методики прогнозирования качества изготовления стеклопластиковой оболочки

Алгоритм состоит из последовательности блоков.

**Блок 1.** Начало. Является входом в алгоритм.

**Блок 2.** Формулировка задачи, которая будет решаться с помощью математической модели (ММ).

Построенная в терминах выбранной технической системы математическая модель позволяет проводить прогнозирование качества процесса изготовления оболочки и оптимизацию параметров системы по следующим критериям эффективности:

1. Максимальная экономичность. Предполагается, что в этом случае максимально используются возможности оборудования и рационально используются материалы. При этом, длительность процесса должна быть минимальной, а качество оболочки удовлетворительным. Тогда, значения показателей должны быть максимально приближены к предельным.

2. Значение параметров процесса должны соответствовать выбранному критерию оптимизации. В этом случае, выбранный параметр должен быть максимально соответствовать желаемому значению при условии отсутствия критичности.

Для ракетной техники основными проектными параметрами, определяющими качество изделия, являются максимальная прочность конструкции, ее минимальная масса и отсутствие дефектов. Примем эти параметры как критерии оптимизации. При этом, считаем, что условие отсутствия дефектов обеспечивается в случае нахождения значений частных критериальных показателей в интервале от 0 до 1.

3. Максимальное качество оболочки по всем свойствам.

Некоторые требования, предъявляемые к стеклопластиковой оболочке, являются противоречивыми. Поэтому, невозможно достичь наилучшего качества изделия одновременно по всем свойствам. Однако, можно определить оптимальное соотношение значений всех свойств в совокупности. Для этого предлагается использовать обобщенные критерии [7,20, 40].

**Блок 3.** Ввод значений параметров элементов системы или их выбор из предложенных вариантов базы данных.

Для каждого из этапов изготовления оболочки характерно наличие известных параметров системы. Для этапа пропитки - это скорость движения стекложгута, сила натяжения, температура связующего, величина межвалкового зазора и т.д. Для этапа намотки - угол намотки, количество слоев, длина и толщина оболочки, температура оправки. Для этапа отверждения такими параметрами принимаем температуру отверждения, скорость нагрева, время выдержки.

Все эти параметры оговорены технологическим процессом или требованиями конструкторской документацией, либо найдены опытным путем.

#### **Блок 4.** Поиск расчетных значений параметров системы.

На этом этапе в алгоритме производится поиск значений характеристик технической системы (Таблица 2.3.1), требующих расчета по математическим зависимостям. К таким параметрам на этапе пропитки относятся требуемая масса связующего, текущая вязкость связующего, фактическое капиллярное давление и т.д.

Таблица 2.3.1 - Вычисляемые параметры технической системы

№п/п	Обозначение	Наименование
1	$M_c$	Масса связующего, приходящаяся на единицу площади поверхности пропитываемого наполнителя, кг
2	$\nu_\tau$	Текущая вязкость связующего, Па·с
3	$T_n$	Температура, при которой связующее достигнет предельной минимальной вязкости, °К
4	$O_n$	Объемная пористость материала
5	$P_{кф}$	Фактическое капиллярное давление, МПа
6	$\sum P_d$	Суммарное давление связующего, МПа
7	$u_{кан}$	Скорость движения связующего вдоль капилляра, м/с
8	$K_d$	Коэффициент проницаемости связующего
9	$h_{max}$	Глубина пор в наполнителе максимальная, м
10	$h_\tau$	Фактическая глубина проникновения связующего, м
11	$\tau_l$	Продолжительность контакта наполнителя со связующим, с
12	$L$	Длина области контакта наполнителя со связующим, м
13	$\tau_n$	Необходимая продолжительность пропитки, с

## Продолжение таблицы 2.3.1

14	$Q$	Фактический расход связующего, кг/с
15	$S_l$	Площадь оправки, покрытая смазкой или клеем, м <sup>2</sup>
16	$S$	Площадь боковой поверхности оправки, м <sup>2</sup>
17	$\sigma_{ac}$	Предел прочности стеклопластика, МПа
18	$\sigma_a$	Предел прочности армирующей основы, МПа
19	$H_0$	Коэффициент объемной плотности,
20	$m$	Относительная величина технологического зазора, м
21	$e$	Технологический зазор, который устанавливается при укладке стекловолоконного жгута, м
22	$\delta_{00}$	Толщина смазки или клея, м
23	$\mu$	Характеристика сплющивания нитей
24	$n$	Количество стекловолокон в нити, шт
25	$P_\kappa$	Пористость жгута
26	$K_n$	Коэффициент несплошности нанесения смазки
27	$\lambda$	Текстурный критерий
28	$\nu$	Коэффициент анизотропии
29	$r$	Усредненный радиус пор, м
30	$K$	Коэффициент капиллярности
31	$\Pi$	Критерий удельной прочности армирующего волокна в жгуте
32	$L_{n1}$	Необходимая для намотки длина стекложгута, м
33	$G_a$	Необходимая для намотки масса стекложгута, кг
34	$D_{0cp}$	Средний диаметр оболочки, м
35	$H_n$	Критерий компоновки структуры стеклонити
36	$d_n$	Средний диаметр стекловолоконной нити, м
37	$E$	Отношение предела прочности связующего к пределу прочности стеклопластика
38	$E_n$	Отношение предела прочности связующего по техническим условиям к пределу прочности стеклопластика
39	$b_n$	Фактическая ширина жгута, м
40	$b_{nпред}$	Предельная ширина жгута, м
41	$H_\rho$	Коэффициент весовой плотности стеклопластика
42	$G_{св}$	Вес потребного количества связующего, кг
43	$F_n$	Площадь поперечного сечения жгута, м <sup>2</sup>
44	$D$	Наружный диаметр конической оболочки, м
45	$e_n$	Нормативный технологический зазор, м
46	$\sigma_p^c$	Действительный предел прочности стеклопластика на растяжение, МПа
47	$\sigma_c^c$	Действительный предел прочности стеклопластика на сжатие, МПа
48	$N$	Погонное усилие стекложгута на формуемую поверхность, МПа/м



## Продолжение таблицы 2.3.1

49	$T$	Натяжение технологической ленты, МПа
50	$\psi_2$	Угол обхвата оправки, градус
51	$\sigma_r$	Радиальные термоупругие напряжения, МПа
52	$\sigma_\theta$	Осевые термоупругие напряжения, МПа
53	$\sigma_{э\kappa\text{в}}$	Эквивалентные термоупругие напряжения, МПа
54	$\sigma_{co}$	Напряжение на поверхности оправки, МПа
55	$\Delta t(x)_{\max}$	Установленная максимально допустимая разница температур соприкасающихся слоев, °К
56	$\tau$	Машинное время формования, с

**Блок 5.** Определение частных и обобщенных показателей критичности.

На основе данных, полученных опытным путем и выявленных закономерностей, определяется номенклатура частных и обобщенных показателей критичности процессов создания стеклопластиковой оболочки (подключаются созданные базы данных). Такие показатели должны быть пронормированы (2.3) и безразмерны, несмотря на описание разных по своей природе свойств системы.

Расчет значений всех показателей проводится последовательно: сначала частные показатели элементов, затем обобщенные показатели каждого элемента и всей системы в целом.

**Блок 6.** На данном этапе алгоритма проводится определение каждого показателя критичности системы, и при обнаружении предельного состояния фиксируется этот случай. Если значения частных и обобщенных показателей являются некритичными, то считается, что техническая система отражает нормальное (расчетное) функционирование объекта исследования и производится переход к **блоку 8**. Если же значения хотя бы одного показателя выходит за рамки некритичного интервала, то техническая система отражает предельное состояние по некоторому частному показателю критичности, и тогда осуществляется переход к **блоку 7**.

**Блок 7.** Определяются параметры технической системы, которыми можно управлять с целью исключения появления предельного состояния.

Для каждого конкретного случая критичности имеются свои параметры. Они зависят от конкретной комбинации значений оценок внешних факторов и содержания поставленной задачи. Обычно, изменяемые параметры не требуют расчета и отражают процессы, которые реализуются на практике при функционировании исследуемого объекта.

**Блок 8.** Изменение числового значения параметров управления системы в заданном диапазоне происходит по определенной, последовательно установленной процедуре.

Процесс этот циклический и происходит до момента исключения появления предельных состояний.

**Блок 9.** Окончательное определение значений параметров и показателей технической системы с учетом всех допущений и погрешностей с точки зрения поставленной задачи. Здесь же определяются значения наиболее чувствительных параметров системы и фиксируются значения показателей критичности.

**Блок 10.** Конец.

Предложенный обобщенный алгоритм на основе математической модели (2.8) позволяет решать конкретные производственные задачи, а также отслеживать и управлять критическими ситуациями, происходящими при работе технической системы, не проводя дорогостоящую экспериментальную отработку.

Безусловно, математическая модель может дополняться другими параметрами и показателями технической системы по мере появления новых знаний и в зависимости от конкретной постановки задачи.

Рассмотрим содержание параметров и показателей технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки».

## 2.4 Выводы по главе II

На основании изложенного, можно сделать следующие выводы:

- 1) Составленная в рамках системного подхода, техническая система «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» отражает механизм возникновения предельных состояний и позволяет учитывать

многофакторность и многопараметричность процесса. Приведенные структурные и функциональные схемы процесса являются основанием для разработки алгоритма прогнозирования качества изготовления стеклопластика.

- 2) Выбраны критерии оптимизации работы технической системы, позволяющие находить оптимальное соотношение параметров для получения качественных оболочек по основным свойствам.
- 3) Разработан алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек, являющийся основой для осуществления интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений. Его применение позволяет выявлять моменты возникновения проблемных (критических) ситуаций и конструировать альтернативы развития технологических процессов с их учетом.

## **ГЛАВА III. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Каждый из элементов системы обладает необходимым набором параметров, в число которых также входят параметры управления. Все они определяются в ходе пассивных или активных экспериментов или из справочной литературы.

Рассмотрим методы и средства измерения параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки».

### **3.1. Методы и средства измерения параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки»**

В процессе функционирования технической системы «Изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки», значительное влияние на результат оказывают значение массовых параметров компонентов стеклопластика.

К ним относится масса связующего, необходимая для качественной пропитки наполнителя -  $M_c$ , масса армирующего материала, приходящейся на единицу площади -  $M_a$ , удельный вес материала связующего -  $j$ , масса смазки или клея -  $m_d$  и массы стеклопластиковой оболочки до и после сушки -  $G_0, G_1$ .

Для определения значений этих параметров используются весы со средним и обычным классом точности по ГОСТ 29329-92. Пределы измерений составляют от 2 г до нескольких тонн [98]. Например, находят применение весы типа РН-10Ц13У (Приложение Б, Рисунок 1), которые позволяют проводить взвешивание компонентов стеклопластика до 10 кг с погрешностью  $\pm 5$  г и ВСП4-150А - 1000А при взвешивании связующего и наполнителя массой до 1000 кг с погрешностью от  $\pm 50$  г.

Одними из параметров технической системы, описывающих процесс пропитки, являются плотности композиционного волокнистого материала -  $\gamma_n$  и стекловолокна -  $\gamma_{cm}$  и фактическая линейная плотность стекловолоконной ленты -  $T_m$ , которая определяется отношением массы нити наполнителя к длине 1000 м.

Плотность стеклопластика определяется взвешиванием образца и делением его массы на объем. Плотность сырья стекловолокна обычно определяется по справочникам (например, в [44]).

Связующее является элементом технической системы, обеспечивающим надежное скрепление волокон наполнителя между собой и заполняющим поры и пустоты в стеклопластике. Этим достигается его монолитность и необходимые механические характеристики. Степень заполнения пор зависит от требуемой вязкости связующего -  $\nu_n$ , вязкости, достаточной для заполнения межволоконного пространства в армирующей основе -  $(\nu_{cs})_{пред}$  и фактической вязкости -  $\nu_{св}$

Для определения значения вязкостей применяют вискозиметры типа ВЗ-246 ГОСТ 9070-75 (Приложение Б, Рисунок 2) с диапазоном времени истечения от 12 до 200 Па·сек.

При определении вязкости учитывается энергия активации связующего -  $E_0$ , значение которой находится с помощью уравнения Аррениуса [48] и известном значении универсальной газовой постоянной -  $R$  [8].

Значение *текущей* вязкости устанавливается в зависимости от температуры -  $T$ . Считается, что необходимая вязкость для пропитки связующим армирующего материала достигается в диапазоне температур от  $T_n$  до  $T_k$ . Для технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки» обычно устанавливается текущая -  $T_\tau$  и базовая температура связующего -  $T_0$ , значения которых находятся в интервале  $[T_n, T_k]$ , а также температура полимеризации -  $T_{пл}$ .

Значения этих параметров определяются с помощью термометров ТТ ГОСТ 2823-73 (Приложение Б, Рисунок 3) с диапазоном измерения температур от

минус 35 °С до плюс 450 °С или электронных термометров со щупом с диапазоном измерения температур от минус 3 °С до плюс 450 °С [99].

Этими средствами измеряют и значения текущей температуры желатинизации смолы-  $T_{ж}$ , разницу температур соприкасающихся слоев -  $\Delta t(x)$  и начальную температуру материала -  $T_n$

Для обеспечения качественной намотки, оправка должна иметь температуру -  $T_{опр}$ . Температура оправки, также температуры затвердевания -  $T_{зам}$  и отпуска -  $T_{отп}$  определяется с помощью термопар. Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров, классы допуска и диапазоны измерений приведены в ГОСТ Р 8.585-2001. Наиболее точные термопары – с термоэлектродами из благородных металлов: платинородий-платиновые ПП (тип S (Pt-10%Rh / Pt) (тип R (Pt-13%Rh / Pt), платинородий-платинородиевые ПР (тип В (Pt-30%Rh /Pt-6%Rh)). Их преимуществом является значительно меньшая термоэлектрическая неоднородность, чем у термопар из неблагородных металлов. Они более устойчивы к окислению, вследствие чего являются стабильными.

К наиболее современным средствам измерения можно отнести бесконтактные тепловизоры.

Функционирование технической системы происходит во времени. Поэтому необходимо точное измерение таких параметров, как длительности нагрева оправки -  $\tau_{наг}$ , поддержания температурного режима для желатинизации смолы -  $\tau_{выд}$ , полимеризации -  $\tau_{пл}$ , процесса пропитки -  $\tau_{пр}$  и скорости нагрева -  $u_{наг}$ . Их измерение проводят с помощью часов любой марки, удовлетворяющей ГОСТ 27752-88 и ГОСТ 10733-98, секундомеров ГОСТ 8.423-81, а также по значениям, зафиксированным самописцами.

Элемент технической системы «Наполнитель» характеризуется несколькими параметрами, для определения которых используются средства линейных измерений: нормативным -  $d''_e$  и фактическим диаметром элементарных волокон -  $d_e$ , текстурным критерием -  $\lambda$ , рассчитываемым в зависимости от толщины текстурного слоя -  $\delta_m$  и диаметра элементарного

волокна -  $d$ , и глубиной пор -  $h_n$ . Для определения значений таких параметров используют микрометры типа МК ГОСТ 65007-90 с диапазоном измерений от 0 до 600  $\mu\text{м}$  и классом точности 2, линейки ГОСТ 427-75 или штангенциркули ГОСТ 166-89 (Приложение Б, Рисунок 4-7). Этими же инструментами определяют относительную величину технологического зазора между лентами -  $m$ , фактический технологический зазор -  $e$ , радиус конической оболочки -  $r_0$  и значения фактических относительных линейной -  $l_{ул}$  и объемной усадки материала -  $V_{об}$  (путем обмера образца материала до и после термообработки). Аналогично определяют значения линейных параметров процесса пропитки (толщину ленты стеклоткани наполнителя -  $h_{л}$ , площадь поверхности зоны контакта наполнителя и связующего -  $S_{уд}$ , и относительную толщину наноса связующего на поверхность наполнителя -  $q$ ) и намотки (минимальный -  $D_{0min}$  и максимальный -  $D_{0max}$  диаметры оправки, длину -  $L_0$  и толщина стенки -  $\delta_0$ ).

Для расчета коэффициента несплошности нанесения смазки или клея -  $K_n$ , используют геометрические характеристики - покрытую -  $S_1$  и непокрытую -  $S_2$  смазкой площади оправки. Для определения этих площадей так же проводятся измерения линейными средствами и расчеты по известным формулам.

Половина угла при вершине конической оболочки -  $\lambda_1$  определяется угломерами ГОСТ 5378-88 (Приложение Б, Рисунок 7) и угломерами, установленными на намоточных станках. Они так же используются при определении углов намотки ленты -  $\alpha_0$  и наклона наматываемой нити стеклоарматуры к поверхности оправки -  $\varphi$ .

Для измерения длин также применяются оптические мерители - лазерные дальномеры.

Такое свойство наполнителя как пропитываемость, определяется радиусом щелевых пор -  $r$ , который определяют при известных значениях ширины и длины поры и ее эффективного радиуса (соответственно -  $t_n$ ,  $l_n$ ,  $r_{эф}$ ). Значения

этих параметров находятся с помощью микроскопов ГОСТ 8074-82. При этом возникает необходимость в проведении дополнительных вычислений.

Пористость, характерная для многих композиционных материалов, определяется визуально, с пересчетом площади пор к общей площади поверхности материала.

Для технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом наметки» характерно наличие нескольких параметров давления. Это предельное капиллярное давление пропитки -  $P_k$ , внешнее избыточное давление -  $\Delta P_{вн}$ , парциальные давления материала -  $P_n^m$  и среды -  $P_n^c$ , а так же давление отверждения -  $P_{отв}$ . Все они измеряются при помощи различных манометров по ГОСТ 18140-84, ГОСТ 22725-77 и ГОСТ 2405-88.

Давление вакуума -  $P_{вак}$  измеряется вакуумметрами — приборами, измеряющими разрежение (давления ниже атмосферного) по ГОСТ 2405-88, установленными в печи или автоклаве непосредственно в рабочей области или внутри оснастки.

В математической модели технической системы введен коэффициент технологических потерь -  $K_n$ , который оценивает потери материала связующего в процессе производства [71]. К таким потерям относят остатки связующего в емкости, используемой для хранения материала, его стекание со сборочной единицы, потери на брак. Значение коэффициента технологических потерь назначается в зависимости от степени отработки технологического процесса формования стеклопластиковых оболочек. Он находится в пределах от 1,05 до 1,5. Например, для изделий, проходящих опытные конструкторские работы, значение  $K_n$  принимается равным 1,5, а для изделий серийного и крупносерийного производства -  $K_n=1,05$ .

При пропитке наполнителя связующим происходит заполнение межволоконного пространства. На этом этапе функционирования технической системы значимыми параметрами являются: нормативный коэффициент проницаемости -  $K_D^n$ , объемное содержание волокон в конструкционном



композиционном материале -  $V_6$  и коэффициент извилистости капилляров -  $K_{изв.}$ , который варьируется в интервале от 1,21...1,25.

Номинальная скорость движения связующего вдоль капилляра -  $u''_{кан}$  является одним из самых важных параметров. Его значение устанавливается в технических условиях. При необходимости, он может быть определен в лабораторных условиях на модифицированном приборе Волковой.

Одним из важнейших элементов технической системы «Изготовления стеклопластиковой оболочки методом намотки» является «Оснастка». Она представляет собой специальную оправку, с помощью которой обеспечивается необходимая форма изделия. Оправка характеризуется несколькими параметрами.

Первым из них является шероховатость поверхности -  $Ra$ . Согласно стандарту ISO 8503, существует несколько способов измерения шероховатости:

- 1) визуальный (сравнение по образцам) [9];
- 2) бесконтактный (при помощи микроскопа) по ГОСТ 2789-73;
- 3) контактный (профилометр) по ГОСТ 2.309-73.

В условиях производства шероховатость определяют контактным методом с помощью профилометров. Профилометры используются для измерения шероховатости поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения составляют прямую линию в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных, приборостроительных и других предприятий, а также в полевых условиях. Измерение параметров шероховатости поверхности производится по средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений (Приложение Б, Рисунок 9).

Параметром технической системы, значительно влияющим на качество стеклопластиковой оболочки при намотке, является степень обезжиривания поверхности оправки -  $K_{об.ж.}$ . От значения этого параметра зависит адгезия смазки (или клея) с материалом оправки. Степень обезжиривания считается достаточной, в случае, когда капля воды, нанесенная на поверхность металла, растекается по нему сплошной пленкой без образования четкого выпуклого мениска. Наиболее

качественное и быстрое обезжиривание достигается в специальных моечных машинах с подачей горячей (ее температура 60 - 70 С) щелочной струи под давлением 0,3-0,5 МПа на обрабатываемую поверхность, находящуюся на расстоянии 150 - 200 мм [32].

По ГОСТ 9.402.-80 различают две степени за жирности:

- первая степень. Характеризуется наличием тонких слоев минеральных масел, смазочных, смазочно-охлаждающих эмульсий, смешанных с металлической стружкой и пылью (содержание загрязнений до 3 г/м<sup>2</sup>);
- вторая степень. Характеризуется наличием толстых слоев консервационных смазок, масел и трудноудаляемых загрязнений, графитовых смазок, нагаров шлифовальных и полировальных паст (содержание загрязнений свыше 3 г/м<sup>2</sup>).

Существует несколько методов определения степени обезжиривания.

*Метод контроля степени обезжиривания по смесиваемости* применяется для контроля поверхностей после обезжиривания водными моющими растворами.

В нем степень обезжиривания определяется по времени до разрыва пленки воды на обработанной поверхности. Считается, что в течение этого времени пленка воды или раствора сохраняется на чистой поверхности металла и не собирается в капли.

*Метод контроля степени обезжиривания каплей растворителя.*

Метод применяют для контроля поверхностей после обезжиривания органическими растворителями и водными моющими растворами (на сухой поверхности). На поверхность изделия (или образца) наносят 2-3 капли растворителя и выдерживают не менее 15 с. Затем, к испытуемому участку поверхности прикладывают кусок фильтровальной бумаги и прижимают его к поверхности до полного впитывания растворителя в бумагу. На другой кусок фильтровальной бумаги наносят 2-3 капли чистого растворителя и выдерживают до его полного испарения. При дневном или искусственном освещении сравнивают внешний вид обоих кусков фильтровальной бумаги. Степень обезжиривания определяется по наличию или отсутствию масляного пятна на первом куске.

*Метод контроля степени обезжиривания протиркой.*

Метод применяют для поверхностей, обезжиренных водными моющими растворами и органическими растворителями.

Качество обезжиривания металлических поверхностей перед окрашиванием контролируется визуальным осмотром при дневном или искусственном освещении. Предполагается, что при протирании подготовленной поверхности чистой ветошью, на ней не должно быть следов пыли и жировых загрязнений.

В этом случае, степень обезжиривания оценивается по критериям, представленным в таблице 3.1.1.:

Таблица 3.1.1- Степени обезжиривания

Степень обезжиривания	Время до разрыва пленки воды, с, при методе смачиваемости	Наличие масляного пятна на фильтровальной бумаге при капельном методе	Наличие темного пятна на салфетке при испытании методом протирки
Первая	Более 30	Отсутствует	Не явно выраженное расплывчатое
Вторая	Менее 30	Не явно выраженное, расплывчатое	Явно выраженное

Кроме того, необходимо знать и толщину -  $\delta_{00}$  нанесенной смазки или клея. Обычно, такие измерения производятся визуально, так как эти вещества находятся в жидком или гелеобразном состоянии.

При вращении шпинделя намоточного станка, может наблюдаться биение оправки относительно его оси вращения -  $\psi$ . Его измерение производят с помощью индикаторов часового типа, рычажно-зубчатых индикаторов, пружинных головок и контрольных центров. В таблице 3.1.2 указаны справочные значения погрешности измерений биения [16].

Параметрами элементов «наполнитель» и «связующее» являются такие прочностные характеристики, как пределы прочности стекловолоконной арматуры -  $\sigma_a$ , стеклопластика -  $\sigma_{ac}$  и связующего -  $\sigma_c$ .

Таблица 3.1.2 - Предельные погрешности измерения ( $\Delta$ , мкм), при измерении биения универсальными измерительными средствами

Средства измерения	Ход стержня, мм	Номинальный размер, мм						
		1-6	6-10	10-18	18-50	80-120	120-180	180-260
Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01мм	0,1	10	10	10	10	10	10	10
	0,8	15	15	15	15	15	15	15
	0,1	10	10	10	10	10	10	10
	0,02-0,03	5	5	5	5	5	5	5
Головки пружинные (микрокаторные) с ценой деления, 001 мм.		0,5	1	1	1	1	1	1

Значения этих параметров устанавливаются испытаниями на образцах. Геометрические размеры образцов указаны в нормативной документации на испытываемый материал. Такие образцы подвергаются нагрузке на специальных машинах типа *РМИ* или гидравлических прессах (в зависимости от вида нагружения). Установленные на этих машинах самописцы позволяют получить диаграмму напряжений, по которой и определяется искомый параметр. Методика проведения испытаний приведена в ГОСТ 1497- 84, ГОСТ 9651-84, ГОСТ 14019 - 2003.

В свою очередь, напряжение натяжения поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии -  $\sigma_{ж.ф}$ , поверхностное натяжение на границах «жидкость-тело», «твердая фаза-пар» и «жидкость –пар» -  $\sigma_{жт}$ ,  $\sigma_{т.п}$ ,  $\sigma_{ж.п}$  измеряются универсальными тензиометрами типа *DCAT*, а угол смачивания поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии -  $\theta_{см}$  - прибором типа *РСА 100М*.

Стеклопластик является в значительной степени анизотропным материалом. Для определения критерия его анизотропности, определяется количество стекловолокон в арматуре стеклопластика в двух направлениях (соответственно

$a_{1s}$ ,  $a_{2s}$ ). Это достигается путем визуального осмотра и подсчета количества волокон в каждом направлении на вырезанном образце армирующего материала.

Важным параметром наполнителя стеклопластика считается критерий объемной плотности стекловолоконной ткани -  $H_0$ . Существует несколько способов его определения:

- метод вытеснения жидкости;
- метод ртутной порозиметрии;
- метод вытеснения газа.

Во всех методах предполагается проникновение текучей среды в поры материала и заполнения всего объема пор. Это позволяет определить реальный объем, занимаемый текучей средой.

Одним из наиболее точных методов измерения плотности является метод вытеснения гелия, в котором используется гелиевый пикнометр. В случаях, когда не рекомендуется использовать гелий (например, при исследовании активированных углей), используется другой инертный газ, например азот.

При использовании метода вытеснения гелия, хорошо высушенный, взвешенный образец помещается в измерительную камеру, откалиброванную по объему. Рабочий газ под определенным давлением, подается в эталонную камеру и затем перемещается в измерительную камеру с образцом. Когда давление стабилизируется, фиксируются экспериментальные данные и вычисляется объем помещенного материала. По предварительно определенной массе образца, затем рассчитывается его плотность [101].

Коэффициент трения между стеклонитью и стеклоарматурой -  $k_m$  (или оправкой) оказывает существенное влияние на функционирование технической системы. На практике его определяют специальным прибором, предназначенным для определения статического и кинетического коэффициентов трения. Прибор используется для определения прочностных и деформационных характеристик материалов при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге, отслаивании, расслаивании.

Он характеризуется большим ходом траверсы, диапазоном скоростей испытания, возможностью смены силоизмерительных датчиков и захватов. При этом образцы могут быть различной формы и размеров [102].

Для описания процесса намотки необходимо знать общее количество слоев текстуры одинакового направления -  $z$  и действительное количество пасм в технологической ленте в каждом направлении -  $a$ . Поиск значений этих параметров производят на специально подготовленных образцах, в лабораторных условиях путем визуальных наблюдений и последующего подсчета.

Технологические параметры системы, такие как шаг намотки -  $S$ , на практике устанавливают с помощью намоточного станка, на котором уже предложены возможные варианты режимов. Таким же образом задают число оборотов шпинделя в минуту -  $n_{ш}$ , подачу ленты -  $S_{ш}$  и усилие, непосредственно создаваемое технологическим оборудованием -  $T_{об}$ . При этом, количество одновременно формируемых деталей -  $m_1$ , для конических оболочек, как правило, не превышает одной. Однако, для цилиндрических оболочек это значение может варьироваться в зависимости от длины детали и рабочей зоны станка. В этом случае, намоткой создают одну большую оболочку, а потом, с помощью механической обработки она режется на детали необходимой длины.

Важной характеристикой этапа отверждения оболочки является скорость влагоотведения с ее наружной -  $U_{отв1}$  и внутренней -  $U_{отв2}$  сторон. Эти характеристики определяются путем измерения влажности (влагосодержания) материала через равные отрезки времени прямыми и косвенными методами.

В прямых методах осуществляется непосредственное разделение влажного материала на сухое вещество и влагу.

В косвенных методах находится значение параметра, функционально связанного с влажностью материала.

В качестве приборов для измерения влажности здесь применяют бесштифтовый прибор *Extech O295*, позволяющий производить измерения влажности без повреждения поверхности исследуемого объекта при помощи

бесштифтового датчика. Этим же прибором можно определить и начальное влагосодержание -  $W_{0ф}$ , а также влагосодержания начальных слоев -  $W_{ц}$  и на поверхности оболочки -  $W_{п}$ .

Значения интенсивности -  $i_n$  и скорости отверждения -  $N_c$  в зависимости от температуры находятся по образцам – свидетелям, которые испытываются на влагосодержание и твердость в разные моменты времени сушки.

Таковы средства и методы измерения параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки».

Общий перечень параметров представлен в Таблице 3.1.3.

Таблица 3.1.3. Параметры технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки»

№ п/п	Обозначение параметра	Содержание параметра	Размерность
<b>Параметры этапа пропитки</b>			
1	$M^u_c$	Требуемая масса связующего для качественной пропитки, которая установлена технологическим процессом	кг
2	$M_a$	Масса армирующего материала, используемого для создания композиционного материала, которая приходится на единицу площади	кг
3	$K_n$	Коэффициент технологических потерь	-
4	$T_n$	Начальная температура связующего, при которой происходит полная пропитка наполнителя	°К
5	$T_k$	Конечная температура связующего, при которой происходит полная пропитка наполнителя	°К
6	$T_\tau$	Текущая температура связующего	°К
7	$\nu_n$	Предельная минимальная вязкость связующего	Па ·сек
8	$T_0$	Базовая температура, при которой вязкость связующего $\nu_0$	°К
9	$E_0$	Энергия активации связующего при вязком течении	Дж/моль
10	$R$	Универсальная газовая постоянная	Дж/(моль·К)
11	$\nu_0$	Базовая вязкость связующего	Па ·сек
12	$T_{пл}$	Температура полимеризации	°К
13	$\tau_{пл}$	Продолжительность полимеризации	сек

## Продолжение таблицы 3.1.3

14	$\tau_{np}$	Длительность процесса пропитки наполнителя	сек
15	$\gamma_n$	Плотность стекловолоконных нитей	кг/см <sup>3</sup>
16	$\gamma_{cm}$	Плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно	кг/см <sup>3</sup>
17	$O_n^u$	Номинальная объемная пористость наполнителя	текс
18	$d_e$	Диаметр элементарных волокон наполнителя	мкм
19	$T_m$	Линейная плотность стеклонити	текс
20	$\rho_n$	Поверхностная плотность наполнителя	г/м <sup>2</sup>
21	$P_k$	Предельное значение капиллярного давления	МПа
22	$\sigma_{ж.ф}$	Напряжение натяжения поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии	МПа
23	$\theta_{см.ф}$	Угол смачивания поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии	°
24	$d_{кап}$	Диаметр межволоконного капилляра	мкм
25	$K_{изв}$	Коэффициент извилистости капилляра	-
26	$V_e$	Объемное содержание волокон в нити	-
27	$\nu_\tau$	Коэффициент вязкости связующего	-
28	$d$	Толщина пасм нитей	мм
29	$\Delta P_{вн}$	Внешнее избыточное давление;	МПа
30	$u_{кап}^u$	Нормативная скорость движения связующего вдоль капилляра	м/с
31	$S_{уд}$	Площадь поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой	м <sup>2</sup>
32	$\sigma_{жт}$	Поверхностное натяжение на границе «жидкость-тело»	Па
33	$j$	Удельный вес материала связующего	кг/см <sup>3</sup>
34	$g$	Ускорение свободного падения	м/с <sup>2</sup>
35	$h_n$	Средняя глубина пор связующего	м
36	$V$	Скорость поступления связующего на поверхность наполнителя	м/с
37	$\sigma_{жт}$	Поверхностное натяжение на границе «жидкость-тело»	Па
38	$r_{эф}$	Эффективный радиус пор в наполнителе	м
39	$\sigma_{тп}$	Поверхностное натяжения на границе «твердая фаза-пар»	МПа
40	$\sigma_{жп}$	Поверхностное натяжения на границе «жидкость – пар»	МПа
41	$L$	Длина области контакта	мм
42	$B$	Ширина пасм нитей	мм
43	$\tau_1$	Продолжительность пропитки связующим	сек
44	$Q_n$	Номинальный расход связующего	кг/м <sup>2</sup>



Продолжение таблицы 3.1.3

45	$M_m$	Поверхностная масса стекловолоконного наполнителя	кг/м <sup>2</sup>
46	$B$	Ширина стекловолоконного наполнителя	м
47	$V_l$	Скорость протяжки ленты наполнителя	м/с
48	$q$	Относительная толщина наноса связующего на поверхность наполнителя	м
<b>Параметры этапа намотки</b>			
1	$Ra$	Шероховатость оправки	мкм
2	$D_{0min}$	Минимальный диаметр оправки	Мм
3	$D_{0min}$	Максимальный диаметр оправки	мм
4	$d_1$	Толщина жгута	мм
5	$d_2$	Ширина жгута	мм
6	$\psi_1$	Коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте	-
7	$L_0$	Длина оправки	мм
8	$\delta_0$	Толщина стенки оправки	мм
9	$K_{обж}$	Степень обезжиривания фактическая	-
10	$\xi$	Коэффициент упаковки волокон в нити	-
11	$m_\delta$	Масса смази или клея	кг
12	$\delta_{00}$	Толщина смазки или клея	мм
13	$S_1$	Покрытая клеем площадь оправки	мм <sup>2</sup>
14	$S_2$	Непокрытая клеем площадь оправки	мм <sup>2</sup>
15	$T_{опр}$	Температура оправки	°С
16	$\sigma_b^{\Delta x}$	Предел прочности на разрыв стекловолокон армирующего материала при разрывной длине	МПа
17	$\tau_{наг}$	Длительность нагрева оправки	сек
18	$\sigma_b^{min}$	Минимальный предел прочности стекловолокон при конкретной разрывной длине	МПа
19	$\psi$	Биение оправки	мкм
20	$\Delta x$	Разрывная длина армирующего материала	мм
21	$\sigma_a$	Предел прочности стекловолоконной арматуры	МПа
22	$\sigma_{ac}$	Предел прочности стеклопластика	МПа
23	$\sigma_c$	Предел прочности материала связующего	МПа
24	$d$	Средний диаметр элементарного волокна	мкм
25	$\gamma_1$	Объемная масса стекловолоконной нити	кг/м <sup>3</sup>
26	$\delta_m$	Толщина текстурного слоя	мм
27	$a_{1s}$	Количество стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлении 1	шт
28	$a_{2s}$	Количество стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлении 2	шт
29	$t_n$	Ширина поры	мкм

## Продолжение таблицы 3.1.3

30	$l_n$	Длина поры	мкм
31	$r_{min}$	Минимальный радиус поры для предельной вязкости жидкого связующего	мкм
32	$G_{an}$	Масса стекловолоконных жгутов, находящихся на складе	кг
33	$L^n$	Длина стекловолоконных жгутов, находящихся на складе	м
34	$d_3$	Максимальный диаметр стекловолоконной нити	Мкм
35	$d_4$	Минимальный диаметр стекловолоконной нити	мкм
36	$k_m$	Коэффициент трения между стекловолокнистыми нитями и арматурой (или оправкой)	
37	$\nu_{св}$	Вязкость связующего	Па·сек
38	$(\nu_{св})_{пред}$	Предельная вязкость связующего	Па·сек
39	$\gamma_c$	Плотность стеклопластика	кг/м <sup>3</sup>
40	$\lambda_a$	Половина угла в вершине конической оболочки	град
41	$z$	Общее количество слоев текстуры одинакового направления	шт
42	$S_n$	Шаг намотки	
43	$m$	Относительная величина технологического зазора между лентами	мм
44	$e$	Фактический технологический зазор	мм
45	$a$	Действительное количество пасм в технологической ленте в каждом направлении.	шт
46	$\sigma_{вро}$	Предел прочности материала оправки	МПа
47	$\varphi$	Угол наклона наматываемой нити стеклоарматуры к поверхности оправки	град
48	$T_{об}$	Усилие, непосредственно создаваемое технологическим оборудованием	МПа
49	$r_0$	Текущий радиус конической оболочки	мм
50	$n_{ш}$	Число оборотов шпинделя в минуту	Об/мин
51	$S_{ш}$	Подача ленты в мм/об	Мм/об
52	$m_1$	Количество одновременно формуемых деталей	шт
<b>Параметры этапа отверждения</b>			
1	$u_{наг}$	Скорость нагрева оболочки	Град/сек
2	$T_{ж}$	Температура желатинизации смолы	град
3	$P_{вак}$	Давление вакуума	МПа
4	$\tau_v$	Время поддержания температурного режима желатинизации смолы	сек

## Продолжение таблицы 3.1.3

5	$\sigma_{пред}$	Предельное значение внутренних термоупругих напряжений	МПа
6	$\Delta t(x)$	Действительная максимальная разница температур соприкасающихся слоев	град
7	$T_{н1}$	Начальная температура материала	град
8	$T_{зат}$	Температура затвердевания	град
9	$u_{наг2}$	Скорость повышения температуры до достижения температуры полимеризации	Град/мин
10	$P_n^м$	Парциальное давление материала	МПа
11	$P_n^с$	Парциальное давление среды	МПа
12	$\Delta T_{отп}$	Разница между предельной температурой и температурой отпуска,	град
13	$P_{отв}$	Давление отверждения	МПа
14	$\tau_{выд}$	Время выдержки на режиме	с
15	$l_{ул}$	Относительная линейная усадка материала	%
16	$V_{уб}$	Относительная объемная усадка материала	%
17	$\sigma_{нв}$	Внутренние напряжения	МПа
18	$W_{0ф}$	Начальное влагосодержание	%
19	$W_{ц}$	Влагосодержание начальных слоев	
20	$i_n$	Интенсивность отверждения	
21	$N_c$	Скорость отверждения	м/с
22	$U_{отв1}$	Скорость влагоотведения с наружной поверхности оболочки	г/с
23	$U_{отв2}$	Скорость влагоотведения с внутренней поверхности оболочки	г/с
24	$u_{отп}$	Скорость понижения температуры отпуска	град.К/с
25	$T_{отп}$	Температура отпуска	град.К
26	$G_1$	Вес стеклопластиковой оболочки после сушки;	кг
27	$G_0$	Вес стеклопластиковой оболочки до сушки	кг
28	$\alpha_{он}$	Температурный коэффициент линейного расширения оправки	1/град*10 <sup>-6</sup>
29	$\alpha_{\theta}$	Температурный коэффициент линейного расширения слоев композиционного материала	1/град*10 <sup>-6</sup>
30	$K_{ан}$	Коэффициент анизотропии	
31	$\gamma_{под}$	Коэффициент податливости оправки	
32	$\gamma_{r\theta}$	Коэффициент податливости материала	

Продолжение таблицы 3.1.3

33	$D_{ж}$	Цилиндрическая жесткость оболочки	МПа
34	$E_{\theta}$	Модуль Юнга	МПа
35	$\mu$	Коэффициент Пуассона	
36	$W_{п}$	Влагосодержание на поверхности оболочки	%

### 3.2 Параметры управления технической системой

В математической модели создания стеклопластиковых оболочек участвует большое количество параметров. Изменяя значения некоторых из них можно осуществлять управление состоянием всей системы [83]. Эти параметры позволяют найти наилучшие режимы изготовления стеклопластиковой оболочки.

Для каждого этапа изготовления стеклопластика выделим их и установим интервал возможных значений.

#### 1. Процесс пропитки.

Допустим, что обеспечена поставка конкретной марки наполнителя и связующего, с установленными параметрами. Таким образом, изменение характеристик материала не представляется возможным. Соответственно, следует варьировать режимными параметрами самого процесса.

Первым из таких параметров будет угол смачивания наполнителя связующим -  $\theta_{см}$ , определяемый наклоном поверхности капли жидкости к смачиваемой ею поверхности. Значение этого угла в основном зависит от природы веществ, участвующих в смачивании. Его можно изменить путем введения в связующее модифицированных добавок. Величина угла смачивания может находиться в диапазоне от 180 до 0°, причем при угле  $180 > \theta_{см} > 90^\circ$  смачивание будет плохое, а  $90 > \theta_{см} > 0^\circ$  - ограниченное, характерное для нашей системы. Угол смачивания  $\theta_{см}=0^\circ$  наблюдается в случае полного смачивания, когда жидкость растекается в тонкую пленку. Оптимальный угол смачивания наполнителя не модифицированным полимером составляет - 24,14 °.

Значение скорости пропитки жгута зависит от величины значения вязкости связующего. Кроме того, от вязкости связующего зависит и качество пропитки наполнителя. Для изготовления стеклопластиковых оболочек применяют эпоксидные смолы с вязкостью от 2 до 25 Па·с. Изменение значения вязкости связующего достигается варьированием его температуры. Таким образом, изменяемым параметром пропитки можно считать начальную и конечную температуру связующего. В среднем, в зависимости от типа связующего, температура состава может колебаться от 15 до 80° С.

Качество пропитки наполнителя определяется по массе связующего -  $M_c$ . Варьируя этим значением, можно изменять механические свойства полуфабриката. При этом, бездефектный стеклопластик получается при процентном содержании связующего в оболочке в интервале от 20 до 60 %.

Пропитка также определяется глубиной проникновения связующего в наполнитель. Эта характеристика зависит от угла смачивания, скорости протяжки наполнителя и длительности взаимодействия связующего и наполнителя. Длительность взаимодействия наполнителя (длительность пропитки) и связующего в зависимости от скорости пропитки, может составлять от 5-10 мин до получаса.

Режимным параметром является расход связующего. Изменение его значений достигается различными способами, в зависимости от технологии пропитки, например, изменяя отверстия в фильере или скорость протяжки ленты.

К изменяемым параметрам относится температура и длительность полимеризации, которые связаны между собой.

## 2. Процесс намотки.

На этапе намотки стеклопластика можно выделить несколько параметров, при изменении которых будут изменяться свойства системы.

На стадии подготовки поверхности под намотку, к таким параметрам относятся многие характеристики: шероховатость поверхности -  $Ra$  и геометрические параметры оправки -  $\delta_0$ ,  $L_0$ , степень обезжиривания -  $K_{обж}$ ,

толщина -  $\delta_{00}$  и масса -  $m_n$  подслоя, его несплошность -  $K_n$ , температура оправки -  $T_{опр}$ , биение оправки относительно центров -  $\psi$ .

Непосредственно в процессе намотки технически допустимо варьирование углом намотки -  $\alpha$ . Его значение может находиться в диапазоне от 0 до 90 ° к оси оправки.

Так же поддается варьированию значение технологического натяжения ленты -  $T$ , обеспечивающее плотность намотки.

### 3. Процесс сушки.

В процессе сушки основными варьируемыми параметрами являются температурные режимы. В зависимости от типа связующего режим отверждения может протекать в диапазоне от 15 до 150°C.

В начале сушки определяющей будет температура желатинизации, достичь которую можно изменяя скорость нагрева -  $u_{наг1}$  (1-5 °С/мин). Так же эта температура зависит и от начальной температуры материала -  $T_n$ , как правило, равной температуре окружающей среды или температуре намотки. Дополнительно задается давление вакуума -  $P_v$ . Для поддержания достигнутого режима требуется установить время выдержки -  $\tau_{в1}$  (30-60 мин). По аналогии с начальным этапом сушки, здесь требуется достижение температуры отверждения. Это происходит за счет изменения скорости нагрева -  $u_{наг2}$  (1-5 °С/мин) и давления -  $P_{ви}$  1-2 МПа. Для поддержания достигнутого режима требуется установить время выдержки -  $\tau_{в2}$  до 8 часов. Наряду с параметрами процесса сушки, важное значение имеет влагосодержание материала -  $W$ , варьирование которым осуществляется подсушиванием. В конце сушки происходит отпуск материала с изменяемой скоростью -  $u_{отп}$  до температуры -  $T_{отп}$ .

Кроме этих изменяемых параметров, в математической модели используются параметры поставки, значения которых изменяются от каждой партии в рамках установленного диапазона значений. Фактические значения этих

параметров определяется на входном контроле, и в зависимости от него выбирают соответствующую партию материала.

Партия материала стекловолокна характеризуется параметрами, среди которых диаметр элементарных волокон наполнителя -  $d_6$ , толщина и ширина жгута -  $d_1$  и  $d_2$ , количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки -  $a$ .

### 3.3 Выводы по ГЛАВЕ III

Итак:

- 1) Установлены параметры элементов технической системы «Изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки», необходимые для реализации математической модели прогнозирования качества.
- 2) Определены методики и средства измерения этих параметров.
- 3) Выявлены параметры, которыми можно управлять с целью изменения состояния технической системы и установлены допустимые диапазоны их значений.

## **ГЛАВА IV КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Для оценки состояния технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» и прогнозирования качества изделия выявим возможные критические ситуации и сформулируем математические выражения для определения критериальных показателей.

Весь процесс функционирования системы условно разделим на три этапа: пропитка, намотка и отверждение.

### **4.1 Оценки процесса пропитки**

В процессе функционирования системы, происходит пропитка связующим (полиэфирной смолой) армирующей основы, состоящей из стеклонитей и ее скручивание. Результатом такого процесса является образование стекложгутов.

Этим процессом создается жесткая связь между связующим и стеклянной армирующей основой. В нем происходит нанесение жидкого связующего на поверхность армирующей основы и заполнение ею межволоконного пространства (Рисунок 4.1).

Нанесение связующего обычно проводится на вертикально или горизонтально движущуюся армирующую основу. В большинстве случаев, применение находит второй вариант, при котором армирующая основа «пропускается» через ванну, заполненную связующим в жидкой консистенции.

В ходе такой пропитки возникают критичности, которые условно можно разделить на три группы. Первая группа связана с параметрами элемента «наполнитель», вторая - с параметрами элемента «связующее», а третья - с процессом проникновения связующего в глубь межволоконного пространства.



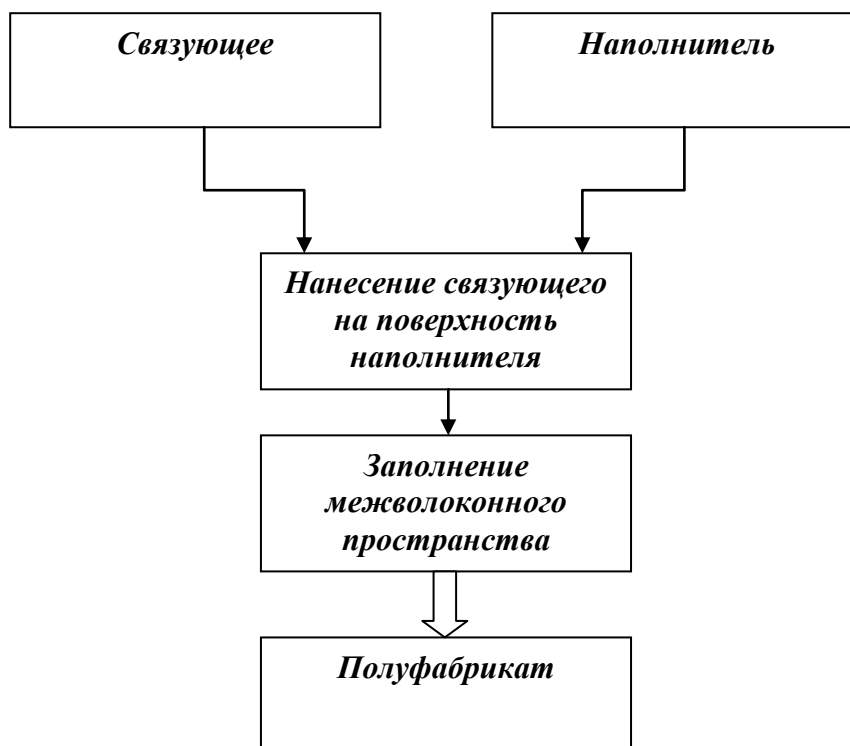


Рисунок 4.1 - Техническая схема процесса пропитки

Обобщенный критериальный показатель критичности, связанный с поведением связующего, состоит из пяти частных показателей:

$$Y_{1.1} = \{y_{1.1.j}; j=1..5\}. \quad (4.1)$$

В нем, первый показатель критичности отражает ситуацию, связанную с недостатком массы связующего, необходимого для качественной пропитки наполнителя. Этот показатель -  $y_{1.1.1}$  определяется выражением (2.3) в котором -

$$D_{1.1.1} = M_c / M^h_c. \quad (4.2)$$

Здесь

$$M_c = M_a \cdot K_n / 100 - K_n, \quad (4.3)$$

- масса связующего, приходящаяся на единицу площади поверхности пропитываемого наполнителя;  $M_a$  - масса армирующего материала, используемого для создания композиционного материала, которая приходится на единицу площади;  $K_n$  - коэффициент технологических потерь;  $M^h_c$  - требуемая масса связующего для качественной пропитки, которая установлена технологическим процессом.

Пропитываемость армирующей основы напрямую связана с вязкостью связующего. Чрезмерно высокая вязкость приводит к критичности, при которой связующее из-за больших сил трения не сможет заполнить поры в армирующем материале.

Показатель критичности -  $y_{1.1.2}$ , связанный, с вязкостью связующего имеет вид (2.3) с функцией

$$D_{1.1.2} = v_{\tau} / v_{\tau}^H \quad \text{при } v_{\tau} \in [T_n, T_k], \quad (4.4)$$

где  $v_{\tau}$  - предельное значение вязкости связующего, при которой поры армирующей основы полностью заполняются связующим;  $T_n, T_k$  - начальная и конечная температуры связующего, при которых происходит полная пропитка наполнителя.

Значение вязкости связующего в зависимости от текущей температуры -  $T_{\tau}$  определяется выражением [30]

$$v_{\tau} = v_0 \cdot \exp \left[ \frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T_{\tau}} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (4.5)$$

где  $T_0$  - базовая температура, при которой вязкость связующего -  $v_0$ ;  $E_0$  - энергия активации связующего при вязком течении;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

Процесс пропитки происходит в диапазоне температур, при котором связующее полностью заполняет поры в наполнителе. В противном случае, считаем, что имеет место предельное состояние, которое оценивается частным показателем -  $y_{1.1.3}$  вида (2.3) с функцией

$$D_{1.1.3} = T_{\tau} / T_n, \quad (4.6)$$

$$\text{где } T_n = \left[ \frac{R}{E_0} \ln \left( \frac{v_n}{v_0} \right) - \frac{1}{T_0} \right] \quad (4.7)$$

- температура, при которой связующее достигнет предельной максимальной вязкости -  $v_n$ .

Связующее после заполнения пор затвердевает в процессе полимеризации. Этот процесс начинается при температуре полимеризации -  $T_{nl}$  и продолжается в течение отрезка времени -  $\tau_{nl}$ , установленного для каждого вида связующего.

Возникновение критичности здесь связано с изменением температуры и длительности нахождения связующего в жидкой консистенции. Показатели критичности -  $y_{1.1.4}$  и  $y_{1.1.5}$  в данном случае будут иметь вид (2.3) с функциями

$$D_{1.1.4} = T_{\tau} / T_{nl} \quad \text{для } \tau = \tau_{np}, \quad (4.8)$$

$$D_{1.1.5} = \tau_{np} / \tau_{nl}, \quad (4.9)$$

где  $\tau_{np}$  - длительность процесса пропитки наполнителя.

Наполнитель (или армирующая основа) является основным элементом в конструкционном композиционном материале, сопротивляющимся механическим нагрузкам.

Возникновение критичностей с ней обычно связано некондиционностью, то есть, с нарушением технических требований.

Стекловолоконные наполнители характеризуются объемной пористостью [32]:

$$O_n = 1 - \gamma_n / \gamma_{cm}, \quad (4.10)$$

где  $\gamma_n$ ,  $\gamma_{cm}$  - плотность стекловолоконных нитей и материала, из которого изготовлено стекловолокно.

Если принять номинальную объемную пористость -  $O_n^h$ , а допуск на ее изменение -  $\Delta_{1.1}$ , то показатель критичности -  $y_{1.2.1}$  имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{1.2.1} = 1 - \frac{(O_n^h - O_n)^2}{2 \cdot \Delta_{1.1}^2}. \quad (4.11)$$

Наполнитель из состоит из стеклонитей нитей, состоящих, в свою очередь, из элементарных волокон, характеризующихся диаметром элементарных волокон -  $d_g$ . Если диаметр волокна, отличается от нормативного, то тогда считаем, что имеет место критичность. Показатель критичности -  $y_{1.2.2}$  по диаметру элементарного волокна имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{1.2.2} = 1 - \frac{(d''_6 - d_6)^2}{2 \cdot \Delta_{1.2}^2}, \quad (4.12)$$

где  $d''_6 \pm \Delta_{1.2}$ , - диаметр волокна, установленный техническими требованиями с допуском.

При проведении пропитки устанавливаются требования на значения линейной плотности стеклонити -  $T_m$  (за нее принимается масса нити длиной 1000 м) в виде  $T''_m \pm \Delta_{1.3}$ .

Критичность возникает в случае, когда значение линейной плотности стеклонити -  $T_m$  не будет соответствовать техническим условиям. Выражение показателя -  $y_{1.2.3}$  для этого случая имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{1.2.3} = 1 - \frac{(T''_m - T_m)^2}{2 \cdot \Delta_{1.3}^2}. \quad (4.13)$$

Еще одним параметром армирующей основы является ее поверхностная плотность -  $\rho_n$ . Ограничения устанавливаются в виде -  $(\rho''_n \pm \Delta_{1.4})$ .

Критичностью считается случай, когда поверхностная плотность армирующей основы не удовлетворяет техническим условиям. Количественной оценкой этого состояния является показатель -  $y_{1.2.4}$  в виде (2.3) с функцией -

$$D_{1.2.4} = 1 - \frac{(\rho''_n - \rho_n)^2}{2 \cdot \Delta_{1.4}^2}. \quad (4.14)$$

Армирующая основа из стекловолоконных нитей имеет пористую структуру. Поры переставляют собой каналы- капилляры.

Процесс пропитки начинается с вытеснения воздуха из этих каналов. Это действие может происходить только в случае, когда преодолевается давление, создаваемое силами поверхностного натяжения связующего. Критичность здесь возникает в отсутствии вытеснения воздуха. Она характеризуется показателем -  $y_{1.3.1}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{1.3.1} = \frac{P_{кф}}{P_{к}}, \quad (4.15)$$

где  $P_{к}$  - предельное значение капиллярного давления;

$$P_{кф} = 4 \cdot \sigma_{ж.ф} \cos \theta_{см} / d_{кан.ф} \quad (4.16)$$

- капиллярное давление в межволоконном капилляре от действия связующего [16];  $\sigma_{ж.ф}$  и  $\theta_{см}$  - напряжение натяжения и угол смачивания поверхностной пленки полиэфирной смолы в жидком состоянии;  $d_{кан}$  - диаметр межволоконного капилляра.

Связующее в ходе пропитки должно заполнить все межволоконное пространство. Критичность будет в случае, когда заполнение капилляров не произойдет. Она определяется показателем -  $y_{1.3.2}$ , который имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{1.3.2} = 1 - \frac{(K_{Д}^n - K_{Д})^2}{2 \cdot \Delta_{1.5}^2}, \quad (4.17)$$

где  $K_{Д}^n$  - нормативная степень проникновения связующего вглубь наполнителя.

Здесь, фактическая степень проникновения связующего вглубь стекловолоконного наполнителя определяется коэффициентом проницаемости:

$$K_{Д} = \frac{V_{г}^2}{32 \cdot K_{изв}}, \quad (4.18)$$

где  $K_{изв} = 1,21 \dots 1,25$  - коэффициент извилистости капилляра;  $V_{г}$  - объемное содержание волокон в нити [5].

Технологической характеристикой в процессе пропитки является скорость движения связующего вдоль капилляра [33]

$$u_{кан} = K_{Д} \cdot P_{Д} / \nu_{\tau} d, \quad (4.19)$$

где:

$$P_{Д} = P_{к} + \Delta P_{вн} \quad (4.20)$$

- суммарное давление, создаваемое связующим в капилляре (в случае пропитки без дополнительного внешнего избыточного давления  $\Delta P_{вн}=0$ ) ;  $\nu_{\tau}$  - коэффициент вязкости связующего;  $d$  - толщина пасм нитей [33].

При чрезмерно большом значении скорости -  $u_{кан}$  на поверхности армирующей основы возникнет толстая пленка связующего. Она после отвердевания делает композиционный материал не однородным.

В то же время, при малой скорости -  $u_{кан}$ , связующее не полностью заполняет поры (капилляры) основы. Предельные значения скоростей проникновения определяют экспериментально в виде  $u_{кан}^n \pm \Delta_{1.6}$ .

Эта критичность определяется показателем -  $y_{1.3.3}$  вида (2.3) с функцией

$$D_{1.3.3} = 1 - \frac{(u_{кан}^n - u_{кан})^2}{2 \cdot \Delta_{1.6}^2}. \quad (4.21)$$

В процессе пропитки, связующее в жидкой консистенции заполняет поры наполнителя под действием сил гидростатического давления. При большом давлении, возникновение предельного состояния связано с недостаточной глубиной проникновения связующего. Необходимая максимальная глубина проникновения связующего в поры определяется выражением [95]

$$h_{max} = \frac{S_{y\partial} \cdot \sigma_{жст} \cdot \cos\theta_{см.ф}}{j \cdot g \cdot O_n}, \quad (4.22)$$

где  $S_{y\partial}$  - площадь поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой;  $\sigma_{жст}$  - поверхностное натяжение на границе «жидкость-тело»;  $j$  - удельный вес материала связующего;  $g$  - ускорение свободного падения.

Однако, поры не будут заполнены связующим, если они окажется глубже максимального возможного значения для данного связующего -  $h_{max}$ . Эту критичность предлагается оценивать показателем -  $y_{1.3.4}$  вида (2.3) с функцией

$$D_{1.3.4} = h_{max} / h_n. \quad (4.23)$$

Согласно [95], фактическая глубина проникновения -  $h_{\tau}$  связующего может оказаться еще меньше. Ее можно определить из формулы:

$$S_{y\delta} \cdot \sigma_{ж.м} \cdot \cos \theta_{см.ф} - j \cdot g \cdot O_n \cdot h_\tau - \frac{S_{y\delta}}{r_{эф}} \cdot v_\tau \cdot h_\tau \cdot \frac{dh_\tau}{d\tau_1} = 0 \quad (4.24)$$

В случае наполнителей с регулярной пористой структурой имеем

$$h_\tau = \sqrt{\frac{2}{v_\tau} \cdot \sigma_{ж.м} \cdot \cos \theta_{см.ф} \cdot r_{эф} \cdot \tau_1}, \quad (4.25)$$

где  $\tau_1 = L/V$  – продолжительность контакта наполнителя с армирующей основой;  $V$  - скорость поступления связующего на поверхность основы;  $L = S_{y\delta} / B$  - длина области контакта;  $B$  - ширина пасм нитей;  $r_{эф}$  - эффективный радиус пор в наполнителе [16].

В случае, если значение  $h_\tau$  окажется меньше  $h_n$ , то возникнет критичность, в ходе которой поры наполнителя не полностью пропитаются связующим. Показатель критичности -  $y_{1.3.5}$  для этого случая представляется в виде (2.3) с функцией

$$D_{1.3.5} = \frac{h_\tau}{h_n}. \quad (4.26)$$

Степень пропитываемости зависит еще и от продолжительности этого процесса -  $\tau_1$ . При недостаточной продолжительности процесса пропитки связующее полностью не проникает и не заполняет все поры армирующей основы. Показатель этой критичности -  $y_{1.3.6}$  имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{1.3.6} = \frac{\tau_1}{\tau_n}, \quad (4.27)$$

где необходимая продолжительность пропитки определяется выражением [18]

$$\tau_n = \frac{L \cdot v_\tau \cdot O_n}{2 \cdot K_d \cdot P_d}. \quad (4.28)$$

Проникновение в поры стекловолоконного наполнителя связующего находящегося в жидкой консистенции, может произойти только в случае приемлемой смачиваемости. Это свойство состоит в способности смолы растекаться по поверхности наполнителя. Критичностью считается случай

отсутствия самопроизвольного растекания связующего. Показатель критичности -  $y_{1.3.7}$  имеет вид (2.3) с функцией [60] -

$$D_{1.3.7} = \frac{\sigma_{ж.т}}{\sigma_{тн} \cdot \sigma_{ж.п} \cos \theta_{см.ф}}, \quad (4.29)$$

где  $\sigma_{т.п}$ ,  $\sigma_{ж.п}$  - поверхностные натяжения на границах «твердая фаза-пар» и «жидкость – пар».

При нанесении связующего на поверхность армирующей основы появляется слой дисперсных частиц. Он образуется в процессе отверждения связующего и удерживается на поверхности. Наличие такого слоя приводит к чрезмерному расходу связующего, недопустимому соотношению между компонентами в готовом композиционном материале, плохому качеству поверхности и нарушению однородности. Это предельное состояние оценивается показателем -  $y_{1.3.8}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{1.3.8} = 1 - \frac{(Q_n - Q)^2}{2 \cdot \Delta_{1.7}^2}, \quad (4.30)$$

где  $Q_n \pm \Delta_{1.7}$  - расход связующего с двухсторонним допуском, установленный технологическим процессом.

Фактический расход связующего определяется выражением [81]

$$Q = \frac{M_m \cdot V_1 \cdot q}{1 - q}, \quad (4.31)$$

где  $M_m$  - поверхностная масса стекловолоконного наполнителя;  $V_1$  - скорость протяжки ленты армирующей основы;  $q$  - относительная толщина слоя связующего на поверхности основы.



## 4.2 Количественные характеристики процесса намотки

Процесс намотки (формования) стеклопластиковой оболочки можно представить в виде связей элементов, представленных на рисунке 4.2.

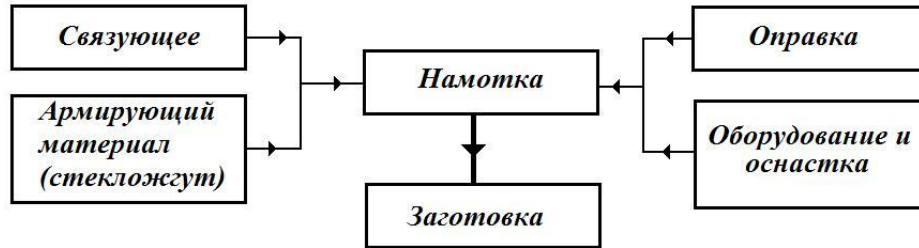


Рисунок. 4.2 - Связи между элементами технической системы на этапе намотки

Взаимодействие этих элементов сопровождается появлением критичностей, связанных с невозможностью проявления свойств установленной интенсивности. Оценивать интенсивность проявления таких свойств будем с помощью критериальных показателей (показателей критичности).

Показатель критичности процесса намотки волокнистого наполнителя связующим -  $Y_{2,i}$  состоит из трех обобщенных критериальных показателей, которые оценивают предельные состояния, связанные с функционированием элементов «оснастка», «наполнитель» и «связующее».

*Первый обобщенный критериальный показатель* -  $Y_{2,1}$  состоит из частных показателей критичности -  $Y_{2,1,j}$ , связанных со свойствами применяемой технологической оснастки (в основном, оправки для намотки).

Считаем, что качество внутренней поверхности оболочки напрямую зависит от шероховатости наружной поверхности оправки -  $Ra$ , на которую наматывается стекложгут, обильно пропитанный связующим. Значение этой характеристики должно находиться в диапазоне -  $Ra_{дон} \pm \Delta_{2,1}$ , при котором обеспечивается необходимая шероховатость внутренней поверхности оболочки согласно требованиям конструкторской документации.

Кроме того, значение шероховатости поверхности  $- Ra_{oon} \pm \Delta_{2.1}$ , также влияет на адгезию между стеклопластиком и оправкой.

Если в качестве оправки используется корпусная деталь, входящая в состав изделия, то благодаря адгезии обеспечивается надежное прилипание стеклопластика к основному материалу. Если для намотки используется технологическая оправка, то значения характеристик адгезии стеклопластика к оправке должны быть такими, чтобы после намотки можно было свободно снять оболочку. В противном случае имеет место критичность.

Выражение показателя этой критичности  $- Y_{2.1.1}$  определяется выражением (2.3), где

$$D_{2.1.1} = 1 - \frac{(Ra - Ra_{oon})^2}{2\Delta_{2.1}^2} \quad (4.32)$$

Стеклопластиковые оболочки летательных аппаратов сопротивляются воздействиям аэродинамических нагрузок. Они должны иметь геометрию наружной поверхности повышенной точности. Недопустимыми являются отклонения от установленных геометрических параметров.

Считаем, что характеристики оправки должны быть такими, чтобы при намотке стекложгутом была получена оболочка в виде усеченной конической оболочки заданных размеров (длиной  $- L_0$ , и толщиной стенки  $- \delta_0$  и диаметрами - минимальным  $- D_{0min}$  и максимальным  $- D_{0max}$ ). Критичностью является случай, при котором хотя бы один из этих геометрических параметров полученной оправки не находится в установленном диапазоне  $- D_{0min}^H \pm \Delta_{2.2}$ ,  $D_{0max}^H \pm \Delta_{2.3}$  или  $L_H \pm \Delta_{2.4}$ . В этом случае, если требования документации выполнены не будут, то считается что не обеспечено требуемое качество оболочки.

Выражения показателей критичности по каждому из этих параметров  $- Y_{2.1.2}$ ,  $Y_{2.1.3}$ ,  $Y_{2.1.4}$  имеют вид (2.3), в которых используются функции -

$$D_{2.1.2} = 1 - \frac{(D_{0min}^H - D_{0min})^2}{2\Delta_{2.2}^2}, \quad D_{2.1.3} = 1 - \frac{(D_{0max}^H - D_{0max})^2}{2\Delta_{2.3}^2}, \quad D_{2.1.4} = 1 - \frac{(L_0 - L_H)^2}{2\Delta_{2.4}^2} \quad (4.33)$$

Для получения необходимой адгезии, помимо обеспечения шероховатости, поверхность оправки должна быть предварительно обезжирена. Недостаточная степень обезжиривания приводит к критичности, которая сопровождается образованием зон непрочности между стеклопластиком и оправкой. Оценку критичности будем проводить по сравнению коэффициента обезжиривания поверхности оправки -  $K_{обж}$  с установленной нормативной степени обезжиривания -  $K_{обж}^н \pm \Delta_{2.5}$ .

Показатель критичности -  $y_{2.1.5}$ , связанный с обезжириванием имеет вид (2.3), в котором

$$D_{2.1.5} = 1 - \frac{(K_{обж} - K_{обж}^н)^2}{2\Delta_{2.5}^2} \quad (4.34)$$

Обезжиренная поверхность оправки покрывается слоем смазки или клея, в зависимости от назначения стеклопластиковой оболочки. Толщина этого слоя должна быть достаточной для полной адгезии. Критичность можно оценить по характеристикам массы -  $m_\delta$ , толщине смазки или клея -  $\delta_{00}$  и коэффициенту сплошности -  $K_n$ . Она возникает в случае, когда фактические значения параметров не будут соответствовать установленным нормативным значениям -  $m_\delta^н \pm \Delta_{2.6}$ ,  $\delta_{00}^н \pm \Delta_{2.7}$ ,  $K_n^н \pm \Delta_{2.8}$ .

Выражения показателей критичности -  $y_{2.1.6}$ ,  $y_{2.1.7}$ ,  $y_{2.1.8}$  принимают вид (2.3) с функциями

$$D_{2.1.6} = 1 - \frac{(m_\delta - m_\delta^н)^2}{2\Delta_{2.6}^2}, \quad D_{2.1.7} = 1 - \frac{(\delta_{00} - \delta_{00}^н)^2}{2\Delta_{2.7}^2}, \quad D_{2.1.8} = 1 - \frac{(K_n - K_n^н)^2}{2\Delta_{2.8}^2}, \quad (4.35)$$

где  $\delta_{00} = \frac{m_\delta}{\rho_{00}S}$ ;  $K_n = \frac{S_1 - S_2}{S_1}$ ,  $S = \pi \frac{D_{0max} + D_{0min}}{4} \sqrt{(D_{0max} - D_{0min})^2 + 4L_0^2}$  - площадь боковой поверхности оправки;  $S_1 = S - S_2$  - площадь оправки, покрытая смазкой или клеем;  $\rho_{00}$  - плотность смазочного материала;  $S_2$  - площадь поверхности оправки, непокрытая смазкой.

Для качественной намотки температура на поверхности оправки -  $T_{опр}$  должна быть одинаковой и находиться на уровне -  $T^*_{опр} \pm \Delta_{2,9}$ , не допускающем охлаждение намотанных слоев стеклопластика. Нарушение этого требования является критичностью, так как при низкой температуре происходит увеличение вязкости связующего, что приведет к недостаточной адгезии между слоями стекложгута. В тоже время, при высокой температуре толщины смазочного слоя будет недостаточно и произойдет “прилипание” стекловолоконного жгута к поверхности [58].

Выражение показателя этой критичности -  $y_{2.1.9}$  по температуре оправки будет иметь вид (2.3), с функцией

$$D_{2.1.9} = 1 - \frac{(T^*_{опр} - T_{опр})^2}{2\Delta_{2,9}^2} \quad (4.36)$$

Температурный режим оправки в процессе намотки должен быть неизменным в течение отрезка времени -  $\tau^*_{наг} \pm \Delta_{2,10}$ , установленного в технических требованиях. Недостаточная продолжительность или прерывание процесса подогрева считаем критичностью, которая приведет к снижению адгезии между оправкой и связующим вследствие изменения температуры оправки -  $T_{опр}$ .

Выражение показателя критичности -  $y_{2.1.10}$  в этом случае будет иметь вид (2.3). В нем:

$$D_{2.1.10} = 1 - \frac{(\tau^*_{наг} - \tau_{наг})^2}{2\Delta_{2,10}^2} \quad (4.37)$$

где  $\tau_{наг}$  - действительная продолжительность температурного режима намотки.

Коническая оболочка головной части ракеты обязательно должна быть симметричной. Это достигается обеспечением соосности оправки с валом намоточного станка. Оценивая величину несоосности по биению, которое должно находиться в пределах -  $\psi \pm \Delta_{2,11}$ , считаем критичностью случай, когда значение -  $\psi$  не находится в этих пределах.

Показатель критичности  $y_{2.1.11}$  принимаем в виде (2.3) совместно с функцией -

$$D_{2.1.11} = 1 - \frac{\psi^2}{2A_{2.11}^2} \quad (4.38)$$

Вторым элементом технической системы намотки является армирующая основа (наполнитель), которая состоит из стекловолоконистых жгутов. Основным ее назначением является получение прочной конической оболочки для головной части ракеты.

В процессе формования, армирующая основа может оказаться источником критичностей, которые оцениваются показателями  $-Y_{2.2.j}$ .

Критичностью считаем случай получения стеклопластика с недостаточной прочностью. Она может возникнуть при повышенном содержании связующего, при котором предел прочности стеклопластика окажется недостаточным [13]. В данном случае о критичности можно судить по соотношению между пределами прочности армирующей основы -

$$\sigma_a = \psi_1 H_0 \sigma_b^{\min} \cos^2(\alpha) \quad (4.39)$$

и готового стеклопластика-

$$\sigma_{ac} = [\psi_1 H_0 \sigma_b^{\Delta x} \cos^2(\alpha) + (1 - H_0) \sigma_c] \pm \Delta_{12} \quad (4.40)$$

Здесь,  $H_0 = \xi \frac{a \cdot n}{a \cdot n + m}$  - коэффициент объемной плотности;  $e = \sqrt{(1 + 2\mu)\bar{d}^2} - d$  -

технологический зазор, который устанавливается при укладке стекловолоконных

лент;  $m = \frac{e}{d}$  - относительная величина технологического зазора;  $\mu = \frac{d_1}{d_2}$  -

характеристика сплющивания нитей;  $\bar{d} = 0,9974d$ ;  $d_1, d_2$  - толщина и ширина жгута;

$a$  - количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки;

$n = \frac{d_1 d_2}{d_s^2}$  - количество нитей в жгуте;  $\alpha$  - угол армирования (намотки);  $\psi_1$  -

коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте;  $\xi$  -

коэффициент упаковки волокон в нити;  $\sigma_b^{Ax}$  - предел прочности на разрыв стекловолокон армирующего материала при разрывной длине  $\Delta x$ ;  $\sigma_b^{min}$  - минимальный предел прочности стекловолокон при конкретной разрывной длине;  $\sigma_c$  - предел прочности материала связующего;  $d_s$  - средний диаметр стекловолоконной нити;  $\gamma_1$  - объемная масса стекловолоконной нити [44].

Выражение показателя этой критичности -  $y_{2.2.1}$  имеет вид (2.3) с функцией

$$D_{2.2.1} = \frac{\sigma_{ac} - \sigma_a}{\Delta_{2.12}}, \quad (4.41)$$

где  $\Delta_{2.12}$  - допустимая разность между  $\sigma_a$  и  $\sigma_{ac}$ .

Считаем, что критичность в процессе формования возникнет при значении критериев армирующей основы, не удовлетворяющей техническим требованиям. В технических требованиях назначаются следующие критерии: текстурный -  $\lambda = 0,1\delta_m$ , анизотропный -  $v = \frac{a_{1s}}{a_{1s} + a_{2s}}$  и удельной прочности армирующего волокна в жгуте -  $\Pi = 4\frac{H_0}{d}$ . ( $\delta_m$  - толщина текстурного слоя, приходящаяся на базовую толщину 10 мм;  $a_{1s}$ ,  $a_{2s}$  - количества стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлениях 1 и 2).

Техническими требованиями ограничиваются значения критериев в виде диапазонов -  $\lambda_n \pm \Delta_{2.13}$ ,  $v_n \pm \Delta_{2.14}$ ,  $\Pi_n \pm \Delta_{2.15}$ .

Выражения показателей критичности -  $y_{2.2.2}$ ,  $y_{2.2.3}$ ,  $y_{2.2.4}$  по этим критериям имеют вид (2.3) с функциями -

$$D_{2.2.2} = 1 - \frac{(\lambda_n - \lambda)^2}{2\Delta_{2.13}^2}, \quad D_{2.2.3} = 1 - \frac{(v - v_n)^2}{2\Delta_{2.14}^2}, \quad D_{2.2.4} = 1 - \frac{(\Pi - \Pi_n)^2}{2\Delta_{2.15}^2}. \quad (4.42)$$

Стекловолоконные жгуты перед намоткой пропитываются жидким связующим. Пропитка состоит в заполнении связующим всего межволоконного пространства, содержащего поры. Поры характеризуются усредненным радиусом -  $r$ . Критичностью считаем случай, когда радиус -  $r$  окажется таким, что не будет происходить заполнение пор жидким связующим с вязкостью -  $(v_{ca})_{пред}$ .

Выражение показателя критичности -  $y_{2.2.5}$  по осредненному радиусу пор имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{2.2.5} = \frac{r}{r_{min}}, \quad (4.43)$$

где  $r = \frac{t_n l_n}{2t_n + l_n}$ ;  $t_n, l_n$  - ширина и длина поры;  $r_{min}$  - минимальный радиус поры для предельной вязкости жидкого связующего  $(v_{св})_{пред}$ .

Другой характеристикой пропитываемости считается капиллярность -  $K = I - H_0$  [44]. Если эта характеристика не находится в установленных техническими требованиями значениях -  $K_n \pm \Delta_{2.15}$ , то тогда имеет место критичность.

Выражение показателя для нее -  $y_{2.2.6}$  представляются в виде (2.3) с функцией -

$$D_{2.2.6} = I - \frac{(K - K_n)^2}{2\Delta_{2.15}^2}. \quad (4.44)$$

Целесообразность производства стеклопластиков определяется экономическими затратами. Затраты связаны с количеством стекловолоконных жгутов необходимых для производства планового числа оболочек, в сравнении с количеством, имеющимся на складе предприятия.

Предположим, на складе в расчете на одну заготовку в виде конической оболочки находится некоторая масса стекловолоконных жгутов -  $G_{an}$  и длина -  $L_n \pm \Delta_{2.16}$ . Тогда критичностью считаем случай, когда наблюдается нехватка стекложгута в необходимых количествах по массе и длине на складе.

Показатели критичности по этим характеристикам -  $y_{2.2.7}$  и  $y_{2.2.8}$  представляются в виде (2.3) с функциями

$$D_{2.2.7} = \frac{L_n - L_{nl}}{L_n}; \quad D_{2.2.8} = \frac{G_{an} - G_a}{G_a}, \quad (4.45)$$

$$\text{где } L_{n1} = \frac{\pi}{2} [D_{0\min} + D_{0\max} + \delta_0] \frac{L_0 \delta_0}{d_n^2} \quad ; \quad G_a = 0,12 \gamma_{cm} D_{ocp} \delta_0 H_n \cdot L_n \left( 1 + \frac{\delta_0}{2D_{ocp}} \right) \quad ;$$

$D_{0cp} = 0,5(D_{0\min} + D_{0\max})$ ;  $H_n = m \left( \frac{d}{d_n} \right)^2$  - критерий компоновки структуры стеклонити;

$d_n = \frac{d_3 + d_4}{2}$  - средний диаметр стекловолоконной нити;  $\gamma_{cm}$  - плотность материала стекловолокон.

Третьим элементом технической системы является связующее, с помощью которого скрепляются жгуты армирующей основы. Критичности, возникающие в этом элементе, характеризуются показателями -  $y_{2.3.j}$

После полимеризации из армирующей основы, пропитанной связующим, образуется сплошная монолитная среда – материал стеклопластика. Из-за разнородности применяемых материалов (связующего и наполнителя) эта монолитная среда по всему своему объему имеет различные значения характеристик, то есть, является анизотропной.

Для снижения коэффициента анизотропии, связующее должно обладать необходимой прочностью. Критичностью является случай, когда предел прочности связующего после полимеризации -  $\sigma_c$  не будет соответствовать установленному техническими требованиями  $\sigma_c^{TY} \pm \Delta_{2.17}$ . Считаем, что эта критичность может появиться при соотношении между пределами прочности связующего -  $\sigma_c$  и стеклопластика -  $\sigma_{ac}$  не соответствующим техническим требованиям.

Выражения показателей критичности -  $y_{2.3.1}$  и  $y_{2.3.2}$ , связанные с пределами прочности, имеют вид (2.3) с функциями

$$D_{2.3.1} = \frac{\sigma_c^{TY} - \sigma_c}{\Delta_{2.17}}, \quad D_{2.3.2} = 1 - \frac{(E - E_n)^2}{2\Delta_{2.18}^2}, \quad (4.46)$$

где  $E = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ac}}$ ;  $E_n = \frac{\sigma_c^{TY}}{\sigma_{ac}}$ ;  $\Delta_{2.18}$  - технический допуск на изменение отношения  $E_n$ .

В условиях производства стеклопластиковых оболочек критичностью считаем случай отсутствия необходимого количества связующего для



качественной пропитки оболочки. Показатель критичности -  $y_{2.3.3}$  в этом случае имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{2.3.3} = \frac{G_{св}^n}{G_{св}}, \quad (4.47)$$

где  $G_{св} = G_a \frac{1-H_6}{H_6}$  - количество связующего, необходимого для создания оболочки

[44];  $H_6 = H_0 \frac{\gamma_{см}}{\gamma_c}$  - коэффициент весовой плотности стеклопластика;  $\gamma_c$  - плотность

стеклопластика;  $G_{св}^n$  - масса связующего, находящегося на складе предприятия, принятое в расчете на одно изделие.

*Сам процесс намотки* также может являться источником критичностей, которые оцениваются показателями -  $Y_{2.4.j}$ .

Намотка проводится стекловолоконным жгутом под углом -  $\alpha$  к оси симметрии оболочки. Неудачное соотношение между этим углом -  $\alpha$ , половиной угла в вершине конической оболочки -  $\lambda_a$  и коэффициентом трения между стекловолокнистыми нитями и арматурой (или оправкой) -  $k_m$  может создать критичность [90].

В этом случае показатель -  $y_{2.4.1}$  будет иметь вид (2.3) с функцией -

$$D_{2.4.1} = \frac{k_m * \sin(\alpha)}{\text{tg}(\lambda_a)}. \quad (4.48)$$

Если фактическая ширина жгута -  $b_n = \frac{S_H}{a}$  окажется меньше  $b_{нпред} = \frac{S_H^2}{a\sqrt{10D^2 + S^2}}$ , то тогда возникнет критичность, связанная с нарушением сплошности армирующей основы оболочки [90].

В этом случае показатель -  $y_{2.4.2}$ , связанный с шириной стекложгута, будет иметь вид (2.3) с функцией -

$$D_{2.4.2} = b_n / b_{нпред} \quad (4.49)$$

Здесь,  $D = D_{0cp} + 2zd$  - наружный диаметр стеклопластиковой конической оболочки;  $z$  - общее количество слоев одинакового направления в создаваемой оболочке;  $S_H = \frac{a \cdot n \cdot d}{\sin(\alpha)}$  - шаг намотки.

Критичность, связанная с местными утолщениями, может возникнуть в местах перекрытия жгутов, если зазор не будет соответствовать установленному  $-e_n = 0,73d$

Показатель этой критичности -  $y_{2.4.3}$  имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{2.4.3} = \frac{e}{e_n} = \frac{e}{0,73d} . \quad (4.50)$$

Проявление свойства прочности стеклопластиков обычно количественно оценивается пределом прочности на сжатие -  $\sigma_c^c$  и на растяжение -  $\sigma_p^c$  . Критичностью считается случай, когда эти характеристики у оболочки не будут соответствовать техническим требованиям.

Показатель этой критичности -  $y_{2.4.4}$  , связанной с пределами прочности полученной оболочки имеет вид (2.3) с функцией

$$D_{2.4.4} = \min \left\{ \frac{\sigma_p^c}{\sigma_p^{TV}} ; \frac{\sigma_c^c}{\sigma_c^{TV}} \right\} , \quad (4.51)$$

где  $\sigma_p^c = 2 \cdot [(\sigma_a \cdot \cos^2 \alpha - \sigma_c) H_0 + \sigma_c]$ ,  $\sigma_c^c = 0,5 \cdot H_0 (2\sigma_a \nu \cos^2 \alpha - \sigma_c) + \sigma_c (1 + H_0)$  - действительные пределы прочности стеклопластика на растяжение и сжатие;  $\sigma_c^{TV}$ ,  $\sigma_p^{TV}$  - пределы прочности на сжатие и растяжение, установленные техническими требованиями.

В ходе намотки стекловолоконные жгуты подвергается натяжению для обеспечения необходимого усилия прижатия слоев стеклопластика. При чрезмерно большом натяжении возникает критичность, связанная с обрывом нитей в жгуте. Она может быть определена по углу обхвата -

$$\psi_2 = \varphi \sqrt{\cos^2(\lambda_a) \cdot \sin^2(\alpha) + \sin^2(\lambda_a)} . \quad (4.52)$$

Выражения показателей -  $y_{2.4.5}$ ,  $y_{2.4.6}$ , отражающих эти критичности, имеет вид (2.3) и функции

$$D_{2.4.5} = \frac{\sigma_a}{\sigma}; \quad D_{2.4.6} = 1 - \frac{1}{2} \frac{(\psi_2 - \psi_{2н})^2}{\Delta_{2.19}^2}, \quad (4.53)$$

где  $\sigma = \frac{T}{F_n}$  - напряжение, возникающее в натянутой ленте, при намотке;  $F_n = d_1 \cdot d_2$  - площадь поперечного сечения жгута;  $T = T_0 \text{Exp} \left[ \psi_2 \sqrt{\cos^2(\lambda_a) \cdot \sin^2(\alpha) - \sin^2(\lambda_a)} \right]$  - натяжение технологической ленты;  $\varphi$  - угол наклона наматываемого стекложгута к поверхности оправки;  $T_0$  - усилие, непосредственно создаваемое технологическим оборудованием;  $\psi_{2н} \pm \Delta_{2.1}$  - нормативное значение угла обхвата с технологическим допуском [90].

Наматываемый стекложгут оказывает давление на формуемую поверхность. Погонное усилие определяется выражением [90]

$$N = \frac{\cos \lambda_a}{r_0} \sin^2 \alpha T_0 \text{Exp} \left\{ \varphi \left[ \sqrt{(k_m \cos(\lambda_a) \sin(\alpha))^2 - \sin^2(\lambda_a)} - \frac{\sin(\lambda_a)}{\text{tg}(\alpha)} \right] \right\}, \quad (4.54)$$

где  $r_0 \in 0,5(D_{0min} \dots D_{0max})$  - текущий радиус конической оболочки.

С одной стороны, давление уплотняет стекловолоконистую структуру, позволяя осуществить качественную намотку, сопровождаемую адгезией связующего с поверхностями стеклянных волокон, и создает плотное прилегание к формуемой поверхности оправки. С другой стороны, при действии давления происходит проявление свойства прочности. Критичность может возникнуть в случае, когда напряжение на поверхности оправки -  $\sigma_{co} = \frac{N}{\alpha_0 r_0 \psi_2}$  превысит пределы прочности материалов оправки -  $\sigma_{epo}$  и (или) армирующей основы -  $\sigma_a$ . На основе этих характеристик оценка критичности проводится двумя показателями -  $y_{2.4.7}, y_{2.4.8}$ , которые имеют вид (2.3) с функциями -

$$D_{2.4.7} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{co}}, \quad D_{2.4.8} = \frac{\sigma_{epo}}{\sigma_{co}}. \quad (4.55)$$

К параметрам, характеризующим эффективность технологического процесса, относится машинное время формования [85, 90]. Критичностью по этому параметру считается случай, когда машинное время формования -  $\tau = \frac{L_0 \delta_0}{n_{uu} S_{uu} \delta_m m_l}$ , где

$m_i$  - количество одновременно формуемых деталей;  $n_{ш}$  - угловая скорость вращения шпинделя намоточного станка;  $S_{ш}$  - подача ленты) не будет находиться в диапазоне, установленном при разработке технологического процесса. Вид показателя этой критичности -  $y_{2.4.9}$  имеет вид (2.3) с функцией-

$$D_{2.4.9} = 1 - \frac{1}{2} \frac{(\tau - \tau_n)^2}{\Delta_{2.20}^2}, \quad (4.56)$$

где  $\tau_n \pm \Delta_{2.20}$  - нормативное значение машинного времени.

### 4.3. Показатели процесса отверждения

Отверждение является заключительным этапом функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки». В ходе выполнения этого этапа происходит превращение жидких реакционноспособных олигомеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры [78]. Превращение сопровождается конвекционным отверждением, которое должно быть экономичным и технологичным. Конвекционное отверждение состоит из трех последовательных временных действий:

- а) переход жидкой смолы в гелеобразное состояние;
- б) затвердевание гелеобразной смолы и приобретение ею прочности, достаточной для снятия изделия с оправки и транспортировки;
- в) полное отверждение, при котором смола становится прочной и приобретает требуемые физические и химические свойства [45, 46].

В ходе выполнения каждого из этих действий, возникают предельные состояния, негативно влияющие на качество оболочки.

На первом этапе, на оболочку «одевается» резиновый мешок для обеспечения герметичности. В таком виде оболочка устанавливается в специальную прессформу, к которой подводится высокое давление и температура.

В случае чрезмерно быстрого (или, наоборот, медленного) нагрева относительно температуры желатинизации -  $T_{ж}$  возникает предельное состояние в

композиционном материале. Это состояние будет оцениваться по нагреву. Выражение функции в показателе критичности -  $y_{3.1.1}$  имеет вид

$$D_{3.1.1} = 1 - \frac{(u_{наг} - u_{наг}^n)^2}{\Delta_{3.1}^2}, \quad (4.57)$$

где  $u_{наг}$ ,  $u_{наг}^n$  - действительная и установленная скорость нагрева.

Если в процессе нагрева не удастся достигнуть температуры -  $T_{жс}^n \pm \Delta_{3.2}$ , при которой происходит желатинизация смолы композиционного материала, то тогда считаем, что возникло предельное состояние, которое оценивается показателем критичности -  $y_{3.1.2}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.1.2} = 1 - \frac{(T_{жс} - T_{жс}^n)^2}{\Delta_{3.2}^2}. \quad (4.58)$$

Для предотвращения появления пористости на поверхности материала в результате газообразования при нагреве смолы, внутри мешка с оболочкой создается вакуум.

Предельное состояние может также возникнуть при отличии давления вакуума -  $P_{вак}$  от требуемого значения -  $P_{вак}^n \pm \Delta_{3.3}$ , установленного в требованиях технологической документации. В этом случае, функция показателя критичности -  $y_{3.1.3}$  вида (2.3) имеет выражение -

$$D_{3.1.3} = 1 - \frac{(P_{вак} - P_{вак}^n)^2}{\Delta_{3.3}^2}. \quad (4.59)$$

Расчетный температурный режим необходимо поддерживать для достижения равномерной желатинизации смолы по толщине материала в течение времени -  $\tau_{\epsilon}$ . Предельное состояние может возникнуть при несоответствии продолжительности выдержки требуемому значению -  $\tau_{\epsilon}^n \pm \Delta_{3.4}$ . Это предельное состояние будет оцениваться показателем критичности -  $y_{3.1.4}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.1.4} = 1 - \frac{(\tau_{\epsilon} - \tau_{\epsilon}^n)^2}{\Delta_{3.4}^2}. \quad (4.60)$$

Предельное состояние может возникнуть также при неравномерном распределении температуры по толщине материала -  $t(x)$ . Из опыта установлено, что, если материал прогрет не равномерно, тогда однородную желатинизацию смолы достигнуть не удастся. Этот случай будем считать предельным состоянием, которое оценивается показателем критичности -  $y_{3.1.5}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.1.5} = 1 - \frac{[\Delta t(x) - \Delta t(x)_{\max}]^2}{\Delta_{3.5}^2}, \quad (4.61)$$

где  $\Delta t(x)_{\max} = \max[t(x)_{j+1} - t(x)_j] \pm \Delta_{3.5}$  - установленная максимально допустимая разница температур соприкасающихся слоев;  $\Delta t(x)$  - действительная максимальная разница температур соприкасающихся слоев [13,14].

Предельное состояние может возникнуть, если начальная температура материала на момент начала режима отверждения -  $T_{n1}$  не соответствует требуемой -  $T_{n1}^H \pm \Delta_{3.6}$ . В этом случае не удастся за расчетное время осуществить нагрев до температуры желатинизации смолы. Состояние будем оценивать показателем -  $y_{3.1.6}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.1.6} = 1 - \frac{(T_{n1} - T_{n1}^H)^2}{\Delta_{3.6}^2}. \quad (4.62)$$

При отверждении смолы в композиционном материале на **втором этапе** может возникнуть предельное состояние, связанное с расхождением парциальных давлений материала  $P_n^M$  и среды  $P_n^c$ . Это предельное состояние оценивается показателем критичности -  $y_{3.2.1}$  вида (2.3) с функцией

$$D_{3.2.1} = 1 - \frac{(P_n^M - P_n^c)^2}{\Delta_{3.7}^2}, \quad (4.63)$$

где  $\Delta_{3.7}$  - технологический допуск на изменение создаваемого парциального давления в материале.

На качество процесса отверждения значительное влияние оказывает скорость нагрева -  $u_{наг2}$  до температуры затвердевания. Ее обычно назначают в виде  $u_{наг2}^H \pm \Delta_{3.8}$ . Расхождение значений скорости нагрева с установленной в

технической документации, считаем предельным состоянием, которое оценивается показателем критичности -  $y_{3.2.2}$  вида (2.3) с функцией

$$D_{3.2.2} = 1 - \frac{(u_{наз2} - u_{наз2}^H)^2}{\Delta_{3.8}^2}. \quad (4.64)$$

Предельное состояние может возникнуть также в случае, когда не удастся достигнуть температуры затвердевания -  $T_{зам}$ . Его возникновение оценим показателем -  $y_{3.2.3}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.2.3} = 1 - \frac{(T_{зам} - T_{зам}^H)^2}{\Delta_{3.9}^2}, \quad (4.65)$$

где  $T_{зам}^H \pm \Delta_{3.9}$  - температура отвердевания смолы, определенная экспериментально и зафиксированная в технологическом процессе.

На втором этапе отверждения оболочки происходит увеличение давления в прессформе до значения -  $P_{отв}$ .

В случае отличия этого давления отвердевания -  $P_{отв}$  от установленного в технологическом процессе -  $P_{отв}^H \pm \Delta_{3.10}$  возникает критическая ситуация и показатель критичности -  $y_{3.2.4}$  имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{3.2.4} = 1 - \frac{(P_{отв} - P_{отв}^H)^2}{\Delta_{3.10}^2}. \quad (4.66)$$

Технологическим процессом предусмотрена операция поддержания состояния оболочки при определенных значениях температуры и давления. При выполнении этой операции удастся достичь равномерное по толщине отвердевание смолы и полный вывод всех летучих веществ из оболочки.

Качество выполнения данной операции будем оценивать по продолжительности ее выполнения -  $\tau_{выд}$ . Критичностью в этом случае является ситуация, когда продолжительность выдержки не будет соответствовать нормативному. Выражение показателя критичности -  $y_{3.2.5}$  вида (2.3) в этом случае имеет функцию -

$$D_{3.2.5} = 1 - \frac{(\tau_{выд} - \tau_{выд}^H)^2}{\Delta_{3.11}^2}, \quad (4.67)$$

где  $\tau^{н}_{выд} \pm \Delta_{3.11}$  - нормативная продолжительность выдержки, установленная технологическим процессом.

В ходе отверждения происходит усадка материала. Она сопровождается изменениями линейных размеров оболочки. При определенных соотношениях этих размеров наблюдается коробление. Предельное состояние можно отследить именно по этим изменениям. Выражения показателей критичности -  $y_{3.2.6}$  и  $y_{3.2.7}$  вида (2.3) с функциями-

$$D_{3.2.6} = 1 - \frac{(l_{yl} - l^{н}_{yl})^2}{\Delta_{3.12}^2}, \quad D_{3.2.7} = 1 - \frac{(V_{yob} - V^{н}_{yob})^2}{\Delta_{3.13}^2}, \quad (4.68)$$

где  $l_{yl}$  - линейная усадка материала;  $V_{об}$  - относительная объемная усадка материала;  $l^{н}_{yl} \pm \Delta_{3.12}$ ,  $V^{н}_{yob} \pm \Delta_{3.13}$  - установленные для технологического процесса отверждения значения линейной и объемной усадки с соответствующими допусками [33].

Появление усадки в оболочке из композиционного материала создает внутренние напряжения -  $\sigma_n$ . При достижении ими значения предела прочности материала на растяжение -  $\sigma^c_p$  происходит растрескивание материала, появление микротрещин. Это предельное состояние будем оценивать показателем -  $y_{3.2.8}$  вида (2.3) с функцией-

$$D_{3.2.8} = (\sigma^c_p - \sigma_n) / \sigma^c_p. \quad (4.69)$$

Причиной коробления материала может являться также различная скорость влагоотведения -  $U_{омв}$  по толщине оболочки. Коробление в этом случае происходит в направлении поверхности с меньшим влагосодержанием. Предельное состояние оценивается по расхождению влагоотведения с наружной ( $U_{отв1}$ ) и внутренней ( $U_{отв2}$ ) сторон оболочки. Показатель критичности -  $y_{3.2.9}$  вида (2.3) имеет функцию -

$$D_{3.2.9} = U_{омв2} / U_{отв1}. \quad (4.70)$$

На процесс сушки значительное влияние оказывают различие влагосодержаний наружных и внутренних слоев [61, 91]. Критичность здесь возникает при влагосодержании -  $W_{0ф}$  меньшим требуемого -  $W_{0min}$ . Показатель



критичности этого состояния оценивается показателем -  $y_{3.2.10}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.2.10} = W_{0\min} / W_{0ф} . \quad (4.71)$$

Значительное расхождение влагосодержания материала по толщине оболочки приводит к предельному состоянию, в ходе развития которого появляются внутренние трещины и расслоения. Оценку этой критичности будем проводить показателем -  $y_{3.2.11}$  вида (2.3) с функцией -

$$D_{3.2.11} = 1 - \frac{(W_u - W_n)^2}{\Delta_{3.14}^2}, \quad (4.72)$$

где  $W_u, W_n$  - влагосодержание центральных слоев и на поверхности оболочки;  $\Delta_{3.14}$  – допустимая разница между этими влагосодержаниями.

Изменение скорости влагоотведения может стать причиной появления предельного состояния. Считаем, что оно возникает, когда скорость влагоотведения будет отличаться от установленной в технологическом процессе. На этой основе, показатель критичности -  $y_{3.2.12}$  имеет вид (2.3) с функцией -

$$D_{3.2.12} = 1 - \frac{(G_0 - G_1)^2}{\Delta_{3.15}^2}, \quad (4.73)$$

где  $G_0, G_1$  - вес стеклопластиковой оболочки до и после сушки с двухсторонним допуском  $\Delta_{3.15}$  [33].

На втором этапе отверждение происходит с интенсивностью -  $i_n$  и скоростью -  $N_c$  в зависимости от температуры. В случае, когда значения этих характеристик не будут соответствовать установленным в технологическом процессе, наступает предельное состояние. Его оценку будем проводить с помощью показателей критичности -  $y_{3.2.13}$  и  $y_{3.2.14}$  вида (2.3) с функциями -

$$D_{3.2.13} = 1 - \frac{(i_n - i_n^H)^2}{\Delta_{3.16}^2}; \quad D_{3.2.14} = 1 - \frac{(N_c - N_c^H)^2}{\Delta_{3.17}^2}, \quad (4.74)$$

где  $i_n^H \pm \Delta_{3.16}$ ,  $N_c^H \pm \Delta_{3.17}$  – установленные технологическим процессом значения интенсивности и скорости отверждения с двухсторонними допусками.

На **третьем** этапе отверждение сопровождается приобретением композиционным материалом оболочки новых свойств. Эти свойства появляются в ходе плавного понижения температуры [45, 46].

«Плавность» понижения будем оценивать по скорости -  $u_{omn}$ . При недостаточной скорости -  $u_{omn}$  будет происходить перегрев оболочки. В тоже время при чрезмерно большой скорости -  $u_{omn}$  - возникновение термоупругих напряжений за счет роста внутренних деформаций. Это предельное состояние предлагается оценивать двумя показателями критичности -  $y_{3.3.1}$  и  $y_{3.3.2}$  вида (2.3) с функциями -

$$D_{3.3.1} = 1 - \frac{(u_{omn} - u_{omn}^n)^2}{\Delta_{3.18}^2}; \quad D_{3.3.2} = 1 - \frac{(T_{omn} - T_{omn}^n)^2}{\Delta_{3.19}^2}, \quad (4.75)$$

где  $u_{omn}^n \pm \Delta_{3.18}$ ,  $T_{omn}^n \pm \Delta_{3.19}$  - установленные скорости и температуры отпуска.

В ходе этого этапа появляются радиальные и осевые термоупругие напряжения. Если любая из этих характеристик превышает предельное значение -  $\sigma_{пред} \pm \Delta_{3.20}$ , то происходит растрескивание и расслаивание материала оболочки. Это предельное состояние предлагается оценивать тремя показателями критичности -  $y_{3.3.3}$ ,  $y_{3.3.4}$  и  $y_{3.3.5}$  вида (2.3) с функциями -

$$D_{3.3.3} = 1 - \frac{(\sigma_r - \sigma_{пред})^2}{\Delta_{3.20}^2}; \quad D_{3.3.4} = 1 - \frac{(\sigma_\theta - \sigma_{\theta пред})^2}{\Delta_{3.20}^2}, \quad D_{3.3.5} = 1 - \frac{(\sigma_{экс} - \sigma_{экс.пред})^2}{\Delta_{3.20}^2} \quad (4.76)$$

где  $\sigma_{пред} \pm \Delta_{3.20}$ , - предельное напряжение прочности композиционного материала с технологическим допуском.

Действительные радиальные, осевые и эквивалентные напряжения определяются выражениями

$$\sigma_r = \frac{E_\theta (\alpha_\theta - \alpha_{он}) \Delta T_{omn}}{k_{ан} - \gamma_{нод} + \gamma_{r\theta}} + \frac{D_{ж} (I + k_{ан})}{\kappa_{ан} + \gamma_{нод} + \gamma_{r\theta}}; \quad (4.84)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\kappa_{ан} E_\theta (\alpha_\theta - \alpha_{он}) \Delta T_{omn}}{k_{ан} - \gamma_{нод} + \mu_1} + \frac{D_{ж} (I + k_{ан}) (\gamma_{нод} + \kappa_{ан})}{\kappa_{ан} + \gamma_{нод} + \mu_1}; \quad (4.85)$$

$$\sigma_{экс} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_r \cdot \sigma_\theta + \sigma_\theta^2}, \quad (4.86)$$

где  $D_{жс}$  – цилиндрическая жесткость оболочки;  $\alpha_{on}$ ,  $\alpha_{\theta}$  – температурные коэффициенты линейного расширения оправки и композиционного материала;  $k_{an}$ ,  $\gamma_{под}$  – коэффициенты анизотропии и податливости оправки;  $\Delta T_{отп}$  – разница между предельной температурой и температурой отпуска,  $E_{\theta}$  – модуль Юнга;  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma_{r\theta}$  – коэффициент податливости материала [28, 33].

Таковы показатели критичности в математической модели прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки.

#### 4.4 Выводы по ГЛАВЕ IV

1. Выявлены 73 критические ситуации, негативно влияющие как на качество процесса изготовления стеклопластиков так и на свойства создаваемой оболочки.

2. Составлены выражения количественных оценок в виде частных и обобщенных показателей критичности. Они позволяют свести многокритериальную задачу оптимизации технологического процесса к однокритериальной и прогнозировать качество каждого этапа изготовления стеклопластиковых оболочек.

## ГЛАВА V Решение прикладной задачи

Для решения технологических задач, возникающих при создании стеклопластиковых оболочек методом намотки, определим исходные данные и произведем расчеты режимных параметров.

### 5.1 Параметры изготовления оболочки корпуса для головной части баллистической ракеты методом намотки

Предположим, перед руководством предприятия поставлена задача в кратчайшие сроки наладить производство модернизированной баллистической ракеты с измененным корпусом головной части.

В отделы – разработчики технологической и конструкторской документации направлено техническое задание, содержащее в себе следующие требования к корпусу (Таблица.5.1.1).

Таблица 5.1.1 - Характеристики корпуса головной части.

№п/п	Характеристики	Значения
1	Длина, не более, м	2,2
2	Минимальный диаметр, не более, м	1,1
3	Максимальный диаметр, не более, м	1,6
4	Толщина стенки, не более, м	0,002
5	Внутреннее давление, не более, МПа	5
6	Внешнее давление, не более, МПа	3
7	Предел прочности на растяжение, не менее, МПа	479
8	Предел прочности на сжатие, не менее МПа	37
9	Масса, не более, кг	85,0
10	Максимальная температура эксплуатации, не более, °К	2500

Требуется определить технологические параметры процесса, соответствующие получению оболочки высокого качества и провести оптимизацию техпроцесса по следующим критериям эффективности: 1) минимальная масса; 2) максимальная прочность; 3) экономичность оболочки.

Для каждого этапа функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» (пропитки, намотки и отверждения) установим основанные на существующих технологических процессах исходные данные (Таблица 5.1.2-5.1.4) [16, 28].

Таблица 5.1.2 - Параметры этапа пропитки наполнителя связующим.

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал Изменения	№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал изменения
1	$M_{cn}$	Кг/м <sup>2</sup>	4	150-200	19	$\Delta_{1,4}$	Кг/м <sup>3</sup>	100	-
2	$\nu_{\tau}^H$	Па·с	16	15-20	20	$d_{кф}$	Мм	1	0,1-2
3	$E_0$	КДж/моль	50	20-70	21	$K_{изв}$	-	1,21	1,05-1,3
4	$R$	Дж/(моль·К)	8,314	8-9	22	$V_g$	-	0,72	0,5-1
5	$T_{nl}$	°К	323	310-360	23	$\Delta_{1,5}$	-	0,001	-
6	$\tau_{nl}$	Сек.	20000	20000-40000	24	$u_k^H$	М/с	25	18-32
7	$\gamma_n$	Кг/м <sup>3</sup>	2800	2000-3000	25	$\Delta_{1,6}$	М/с	5	-
8	$\gamma_{cm}$	Кг/м <sup>3</sup>	2100	2000-3000	26	$j$	Кг/м <sup>3</sup>	2600	2500-2800
9	$O_n^H$	Кг/м <sup>3</sup>	0,25	0,2-0,5	27	$g$	М/с <sup>2</sup>	9,81	-
10	$\Delta_{1,1}$	Кг/м <sup>3</sup>	0,1	-	28	$h_n$	М	0,00012	0,00005-0,00015
11	$d_g$	М	0,00001	0,00001-0,00002	29	$r_{эф}$	М	0,000005	0,000002-0,000007
12	$d_{en}$	М	0,00001	0,000008-0,000015	30	$Q_n$	Кг/м <sup>2</sup>	4	2-6
13	$\Delta_{1,2}$	М	0,0000001	-	31	$\Delta_{1,7}$	Кг/м <sup>2</sup>	0,5	-
14	$T_{mn}$	Кг/М	880	800-900	32	$K_n^H$	-	0,02	0,01-0,03
15	$T_m$	Кг/М	880	850-950	33	$d$	М	0,0005	0,0003-0,0008
16	$\Delta_{1,3}$	Кг/М	100	-	34	$M_m$	Кг/м <sup>2</sup>	90	80-120
17	$\rho_n$	Текс	2500	1500-1700	35	$B$	М	0,2	0,1-0,3
18	$\rho_{nt}$	текс	2500	1600-1800					

Таблица 5.1.3 - Параметры этапа намотки.

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал изменения	№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал изменения
1	$Ra_{oon}$	МКМ	1,5	0,5-1,5	38	$N_{un}$	-	0,5	0,3-0,5
2	$\Delta_{2,1}$	МКМ	0,5	-	39	$\Delta_{2,14}$		0,1	-
3	$D_{0min}^H$	М	1,1	1-2	40	$t_n$	Мм	0,0025	0,002-0,003
4	$\Delta_{2,2}$	М	0,1	-	41	$l_n$	Мм	0,0053	0,0048-0,0058
5	$D_{0max}^H$	М	1,6	1,55-1,65	42	$d_3$	Мм	0,002	0,001-0,003
6	$\Delta_{2,3}$	М	0,1	-	43	$d_5$	М	0,002	0,0001-0,0008
7	$L_H$	М	2,2		44	$L_n^n$	М	7100000	0-8000000
8	$\Delta_{2,4}$	М	0,3	-	45	$d_4$	Мм	0,0005	0,001-0,003
9	$\delta_{00}^H$	М	0,0007	0,0001-0,001	46	$\delta_o$	М	0,03	0,02-0,04
10	$\Delta_7$	М	0,00025	-	47	$\Delta_{17}$	М	1000	-
11	$K_{обж}^H$	%	100	85-105	48	$\Pi n$	-	1380	1300-1500
12	$\Delta_{2,5}$	%	15	-	49	$\Delta_{16}$		100	-

## Продолжение таблицы 5.1.3

13	$m^H_g$	кг	1,6	1,43-1,73	50	$Kn$	-	0,3	0,2-0,4
15	$\Delta 2.6$	кг	0,15	-	51	$\Delta 15$		0,05	-
16	$Kn$		0,97		52	$\sigma_c$	МПа	240	200-250
17	$\Delta 2.8$	м <sup>2</sup>	0,1	-	53	$\tau_H$	Мин	110	80-130
18	$T_H$	°С	45	38-48	54	$K^H_H$	-	0,9	0,8-1,1
19	$\Delta 2.9$	°С	3	-	55	$\sigma_{ac}^{TY}$	МПа	590	500-600
20	$\tau^H_{наг}$	мин	90	85-95	56	$\Delta 19$	МПа	10	-
21	$\Delta 2.10$	мин	10	-	57	$\sigma_{BX}$	МПа	280	270-290
22	$\Psi_n$	мм	0,76	0,6-0,8	58	$v_{св}$	Па·сек	255	230-280
23	$\Delta 2.11$	мм	0,2	-	59	$(v_{св})_{пред}$	Па·сек	200	190-210
24	A	-	18	15-25	60	$\gamma_1$	Н/м <sup>3</sup>	25000	24000-26000
25	$d_1$	м	0,006	0,005-0,007	61	$R_{1min}$	Мм	0,0008	0,0007-0,0009
26	$d_2$	м	0,008	0,007-0,009	62	$G_{an}$	Кг	830	700-900
27	$\gamma_1$	кг/м <sup>3</sup>	20	15-25	63	$z$	шт	8	3-13
28	$\Psi_1$	-	0,7	0,65-0,75	64	$\sigma^{TY}_c$	МПа	250	200-300
29	$\sigma_b^{min}$	МПа	190	180-200	65	$\Delta 18$	МПа	20	-
30	$\Delta 2.12$	МПа	20	-	66	$G^{II}_{св}$	Кг	500	0-600
31	$\xi$	-	0,8	0,55-1,05	67	$\gamma_c$	кг/м <sup>3</sup>	1800	1500-2000
32	$\sigma^{TY}_{ac}$	МПа	590	560-610		$Ga$	Кг	10000	0-20000
33	$\lambda_n$	-	0,0006	0,0005-0,0009	68	$\Delta 20$	М	0,2	-
34	$\Delta 2.13$		0,0003	-	69	$\sigma^{TY}_P$	МПа	465	440-490
35	$\delta_m$	м	0,006	0,005-0,007	70	$\Delta 21$		0,15	-
36	$a_{1s}$	шт	300	290-310	71	$\Delta 22$	мин	15	-
37	$a_{2s}$	шт	300	290-310					

Таблица 5.1.4 - Параметры этапа отверждения.

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал изменения	№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Интервал изменения
1	$u_{наз1}$	°К/с	5	5-8	27	$E$	КДж/моль	144	130-150
2	$\Delta_{3.1}$	°К/с	1	-	28	$\sigma_p$	МПа	5	0-400
3	$T_{жс}$	°К	363	350-370	29	$U_{омг2}$	г/с	0,05	0,05-0,08
4	$\Delta_{3.2}$	°К	5	-	30	$W_{0min}$	-	0,7	0,5-1
5	$P_6$	МПа	0,8	0,5-0,8	31	$W_n$	-	0,65	0,5-1
6	$\Delta_{3.3}$	МПа	0,2	-	32	$\Delta_{3.14}$	-	0,3	-
7	$\tau_{61}$	с	14000	14000-15000	33	$G_1$	Кг	20	15-20
8	$\Delta_{3.4}$	с	500	-	34	$\Delta_{3.20}$	Кг	5	-
9	$\Delta t(x)_{max}$	°К	11	9-12	35	$i_{nl}$	-	25000	20000-28000
10	$\Delta_{3.5}$	°К	1	-	36	$\Delta_{3.15}$	-	1500	-
11	$T_H$	°К	293	290-310	37	$N_c^H$	-	10	8-12
12	$\Delta_{3.6}$	°К/с	5	-	38	$\Delta_{3.16}$	-	2	-
13	$P_n^c$	МПа	1	0,8-1,2	39	$u_{омн}$	°К/с	10	10-15
14	$\Delta_{3.7}$	МПа	0,5	-	40	$\Delta_{3.17}$	°К/с	5	-
15	$u_{наз2}$	°К/с	10	6-12	41	$T_{омн}$	°К	298	280-300

## Продолжение таблицы 5.1.4

16	$\Delta_{3,8}$	°К	5	-	42	$\Delta_{3,18}$	°К	30	-
17	$T_{np}$	°К	390	385-400	43	$\alpha_{on}$	-	0,000105	0,00001-0,0005
18	$\Delta_{3,9}$	°К	5	-	44	$\alpha_{\theta}$		0,000101	0,00001-0,0005
19	$P_{вн}$	МПа	2	1,5-2	45	$D_{жс}$	МПа	1	0,8-1,2
20	$\Delta_{3,10}$	МПа	0,3	-	46	$\gamma_{omn}$		0,15	0,10-0,20
21	$\tau_{в2}$	С	14500	14000-15000	47	$\kappa$	-	1,3	1,-1,5
22	$\Delta_{3,11}$	С	100	-	48	$\mu_1$	-	0,25	0,2-0,4
23	$l_{y.l.дон}$	-	0,07	0,05-0,1	49	$\gamma_{r\theta}$	-	0,2	
24	$v_{y.об.}$	-	0,01	0,001-0,03	50	$\sigma_{пред}$	МПа	1,2	1-2
25	$\Delta_{3,12}$	-	0,01	-	51	$\Delta_{3,19}$	МПа	0,1	-
26	$\Delta_{3,13}$	-	0,005	-					

## 5.2 Определение параметров технической системы для создания высококачественной оболочки

Корпус головной части баллистической ракеты является деталью, подверженной избыточным внутреннему и внешнему давлениям, сжимающим усилиям лобового сопротивления и аэродинамическому нагреву. Во внутренней полости головной части располагается полезный груз. Его необходимо доставить в заданную географическую точку, не нарушая целостности, и при этом обеспечить сохранность требуемых свойств. Именно из-за этого корпуса головных частей изготавливаются по технологии, обеспечивающей наибольшее качество.

Рассмотрим задачи определения параметров технической системы «Изготовление корпуса головной части баллистической ракеты методом намотки» в различных постановках, которые обеспечивают требуемое качество оболочки. Для этого будем использовать данные, приведенные в таблицах 5.1.1-5.1.4.

Считаем, что при этом предельные состояния должны отсутствовать, а возможность развития критических ситуаций должна быть сведена к минимуму. В нашей модели, значения показателей критичности должны быть максимально «приближены» к 1.

Математическим моделированием определены значения параметров технической системы (Таблица. 5.2.1), которые обеспечивают получение оболочки без возникновения предельных состояний.

Таблица 5.2.1 - Параметры технической системы изготовления оболочки без возникновения предельных состояний

№	Обозначение параметра	Размерность	Значения	№	Обозначение параметра	Размерность	Значения
<b>Процесс пропитки</b>							
1	$K_n$	-	1,3	35	$\alpha$	град	50
2	$M_a$	Кг/м <sup>2</sup>	320	36	Код намотки	-	3
3	$M_c$	Кг/м <sup>2</sup>	4,2147923	37	$\lambda$	град	14
4	$T_0$	°К	295	38	$\kappa$	-	0,48
5	$v_0$	Па·с	17	39	$S$	М	0,1
6	$\tau_{np}$	Сек.	30000	40	$T_{об}$	Н	4000
7	$P_\kappa$	МПа	10	41	$\varphi$	град	15
8	$\sigma_{эф}$	Па	4	42	$\Psi_{2n}$	град	0,2
9	$T_\tau$	°К	350	43	$\sigma_{вро}$	МПа	100
10	$v_\tau$	Па·с	15,895777	44	$m_l$	шт	1
11	$T_n$	°К	9,5970823	45	$S_{ш}$	Мм/об	200
12	$O_n$	-	0,25	46	$n_{ш}$	Об/мин	16
13	$\theta_{смф}$	°	26	47	$\delta_{опр}$	М	0,03
14	$v_\tau$	Па·с	10	<b>Процесс отверждения</b>			
15	$\Delta P_{вн}$	Па	15	48	$u_{наг}$		5
16	$S_{уд}$	м <sup>2</sup>	0,06	49	$P_{вак}$	МПа	0,8
17	$V$	м/с	0,001	50	$\tau_в$	сек	14000
18	$\sigma_{жт}$	Па	25	51	$\Delta t(x)$	°К	11
19	$\sigma_{тп}$	Па	12	51	$T_{н1}$	°К	293
20	$\sigma_{жп}$	Па	2,5	52	$P_n^м$	МПа	1
21	$V_l$	м/с	0,25	53	$u_{наг2}$	°К/с	10
22	$Q$	Мм	0,15	54	$T_{зат}$	°К	390
23	$v_n$	Па·с	18	55	$P_{отв}$	МПа	2
<b>Процесс намотки</b>							
24	$Ra$	Мкм	1,5	56	$\tau_{выд}$	сек	14500
25	$D_{0min}$	М	1,1	57	$l_{ул}$	-	0,07
26	$D_{0max}$	М	1,6	58	$V_{об}$	-	0,01
27	$L_0$	М	2,2	59	$U_{отвл}$	°К/с	0,05
28	$K_{обж}$	%	100	60	$W_{0ф}$	-	0,7
29	$m_\delta$	Кг	1,6	61	$W_{ц}$	-	0,65
30	$\rho_{00}$	Кг/м <sup>3</sup>	1000	62	$G_0$	кг	20



## Продолжение таблицы 5.2.1

31	$S_2$	М2	0,05	63	$i_n$	-	25000
32	$T_{opr}$	К	45	64	$N_c$	-	10
33	$\tau_{наг}$	Мин	90	65	$u_{omn}$	°К/с	10
34	$\psi$	Мм	0,76	66	$T_{omn}$	°К	298
				67	$\Delta T_{omn}$	°К	150

Проведем анализ появления предельных состояний на всех этапах изготовления стеклопластиковой оболочки, связанных со свойствами армирующей основы, связующего и процессами их взаимодействия.

Для этапа пропитки найденные параметры технической системы, определяющие свойства армирующей основы и связующего имеют оптимальные значения с точки зрения критичности. Они обеспечивают получение качественной оболочки и исключают возникновение критических ситуаций. На это указывают значения частных и обобщенных показателей критичности, равные 1.

По значениям этих показателей можно утверждать, что интенсивность проявления свойств, которых они описывают, также будет наибольшей.

В процессе изготовления оболочек было отмечено, что вязкость связующего влияет на степень пропитки армирующей основы. Она зависит от множества параметров (базовой температуры -  $T_0$ , энергии активации связующего при вязком течении -  $E_0$ , универсальной газовой постоянной  $R$  и др.), в том числе и температуры пропитки.

Это утверждение подтверждается изменением значений показателей критичности -  $y_{1.1.3}$  и  $y_{1.1.2}$  в зависимости от базовой вязкости связующего (Рисунок 5.2.1).

Отсюда, дается рекомендация: значение вязкости связующего должно быть таким, чтобы достигались максимальные значения обоих показателей.

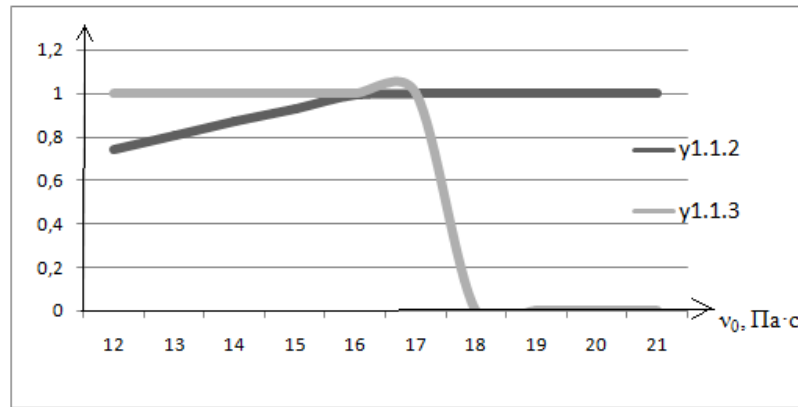


Рисунок 5.2.1 – График зависимости показателей критичности от базовой вязкости связующего

Для рассматриваемого случая, рекомендуется значение вязкости 16-17 Па·сек. При нем достигается необходимое качество оболочки и значение температуры пропитки остается в пределах установленного интервала (показатели -  $y_{1.1.3}$  и  $y_{1.1.2}$  равны 1).

В случае, когда вязкость связующего менее 16 Па·сек, связующее «стекает» с поверхности армирующей основы и полная пропитка не достигается. Это подтверждает и характер изменения значений показателя -  $y_{1.1.2}$  (он уменьшается при уменьшении значения вязкости).

При увеличении вязкости более 17 сек, связующее уже не заполняет поры наполнителя и пропитка становится не полной. На это указывают и значения показателя критичности -  $y_{1.1.3}$ , которые при увеличении вязкости стремятся к нулю и достигают его уже при 18 Па·сек.

В результате функционирования системы, не обеспечивающего качественную пропитку армирующей основы связующим, внутри оболочки образуются множественные дефекты в виде отслоений, пустот и растрескиваний, т.е. не обеспечивается ее необходимое качество. На это указывают значения обобщенных интегрированного и качественного показателя критичности процесса пропитки, которые уменьшаются до значения 0,927 и 0,898 соответственно.

В процессе реализации рассматриваемого этапа пропитки, моделированием установлено, что степень проникновения связующего в глубь наполнителя, его

скорость и расход оказались ниже нормативных, то есть пропитка оказалась не полной, но достаточной для получения качественной оболочки.

Это связано с тем, что свойства процесса пропитки зависят от большого числа параметров, одновременно участвующих в процессе. К числу таких параметров относится угол смачивания -  $\theta_{см.ф}$ , объемное содержание волокон в нити -  $V_в$ , площадь поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой -  $S_{уд}$ , предельное значение вязкости связующего, при которой поры армирующей основы полностью заполняются связующим -  $\nu_\tau$  и предельное значение капиллярного давления -  $P_k$ .

Заметим, что при расчете не достигли максимального значения показатели -  $y_{1.3.2}$ ,  $y_{1.3.3}$ ,  $y_{1.3.8}$ , оценивающие вероятность возникновения критических ситуации по этим свойствам. (Рисунок 5.2.2).

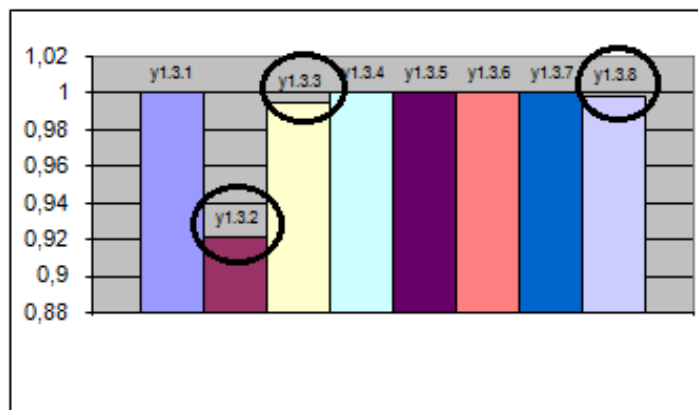


Рисунок 5.2.2 – Показатели критичности этапа пропитки

В таких случаях, значения параметров системы в совокупности должны обеспечивать оптимальную интенсивность проявления каждого свойства для получения оболочки приемлемого качества.

Экспериментально было выяснено, что оптимальное значение угла смачивания связующим армирующей основы для полной пропитки должно находиться в диапазоне от  $23^\circ$  до  $27^\circ$  (эффективный угол смачивания равен  $26^\circ$ ). Уменьшение угла смачивания менее  $23^\circ$  и увеличение более  $27^\circ$  ведет к возникновению критических ситуаций по целому ряду свойств, оцениваемых

параметрами: капиллярное давление -  $P_k$ , максимальная глубина пор -  $h_{\max}$ , фактическая глубина проникновения связующего -  $h_r$  и смачиваемость армирующей основы.

Установлено, что значение угла смачивания  $26^\circ$  является не единственным значением, при котором процесс пропитки происходит наиболее полно. Полная пропитка смолой ЭД-16 ровинга РВМН10-2400 происходит так же при значениях угла смачивания  $37^\circ$ ,  $51^\circ$ ,  $62^\circ$ ,  $76^\circ$ ,  $87^\circ$ ;  $95^\circ$ .

При использовании этих значений, наблюдается незначительное уменьшение фактической глубины проникновения связующего в поры. Это связано с функцией  $\cos(\theta_{см.ф})$  и достигает максимума в случае, когда  $\cos(\theta_{см.ф}) = 0,99$ .

Эти выводы подтверждаются графиком изменения критериальных показателей от угла смачивания, полученным в результате реализации математической модели (Рисунок 5.2.3).

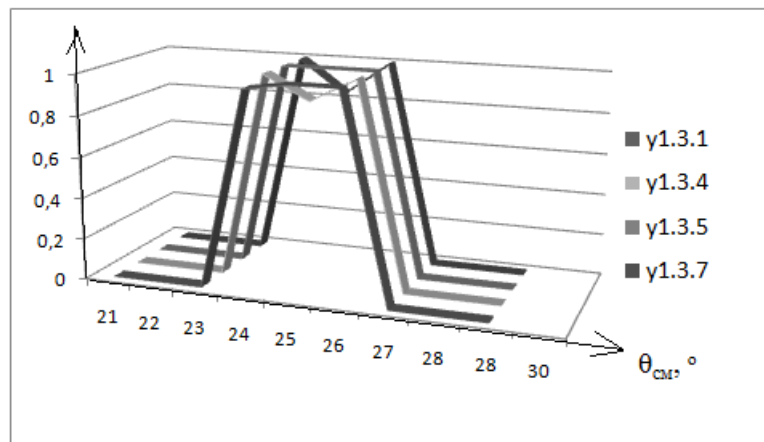


Рисунок 5.2.3 – График зависимости показателей критичности от угла смачивания

При осуществлении пропитки стеклянного ровинга смолой ЭД-16 было установлено, что при увеличении объемного содержания волокон в нити армирующей основы, увеличиваются значения коэффициента проницаемости и скорости движения связующего вдоль капилляра. При этом, коэффициент проницаемости оказывается в большей степени чувствителен к этому изменению.

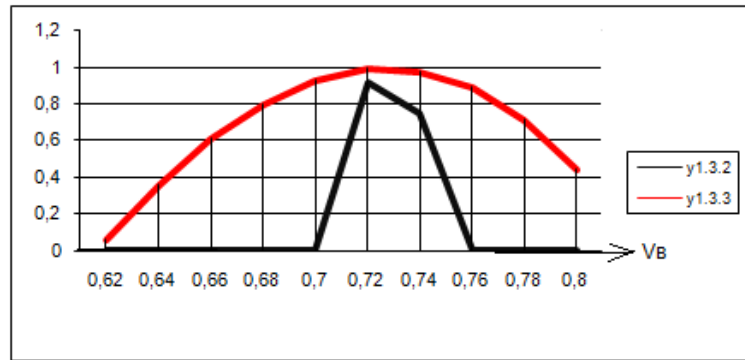


Рисунок 5.2.4 – График зависимости показателей критичности от объемного содержания волокон в нити

На это указывает и график зависимости показателей критичности -  $y_{1.3.2}$  и  $y_{1.3.3}$  от объемного содержания волокон в нити (Рисунок 5.2.4). Кривая изменения значения показателя  $y_{1.3.3}$ , связанного со скоростью движения связующего вдоль капилляра, имеет параболический вид, характерный для большинства показателей критичности. А кривая изменения показателя -  $y_{1.3.2}$ , связанного с коэффициентом проницаемости претерпевает скачок. Это связано с относительно большим шагом значений объемного содержания волокон при расчете – 0,2. При использовании для расчетов шаг изменения исследуемого параметра 0,05, кривая зависимости также приобретает параболический вид. Отсюда можно сделать вывод о том, что вероятность возникновения критических ситуаций, связанных с коэффициентом проницаемости больше, чем со скоростью движения связующего, зависит от объемного содержания волокон.

Следующим параметром процесса пропитки, влияющим на проявление нескольких свойств оболочки, является площадь поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой -  $S_{уд}$ . Для принятых начальных режимных параметров (Таблица 5.1.1), оптимальные значения площади взаимодействия для качественной пропитки оказались находящимися в диапазоне от 0,03 до 0,06 м<sup>2</sup>. При уменьшении площади взаимодействия связующего и наполнителя менее 0,03 м<sup>2</sup> происходит уменьшение фактической глубины проникновения смолы в поры стекложута, а при увеличении более 0,06 м<sup>2</sup> - уменьшение значения

максимально возможной глубины проникновения. Такое изменение параметров системы привело к неполной пропитке армирующей основы связующим и образованию в оболочке внутренних дефектов.

Математическое моделирование с целью исследования зависимости показателей критичности процесса пропитки от площади поверхности взаимодействия наполнителя и связующего (Рисунок 5.2.5) показало наличие связей между параметрами. При значениях площади пропитки менее  $0,03 \text{ м}^2$ , увеличивается вероятность возникновения критической ситуации, связанной с фактической глубиной проникновения связующего в поры наполнителя, а при значениях более  $0,06 \text{ м}^2$  - критической ситуации, связанной с максимальной глубиной проникновения.

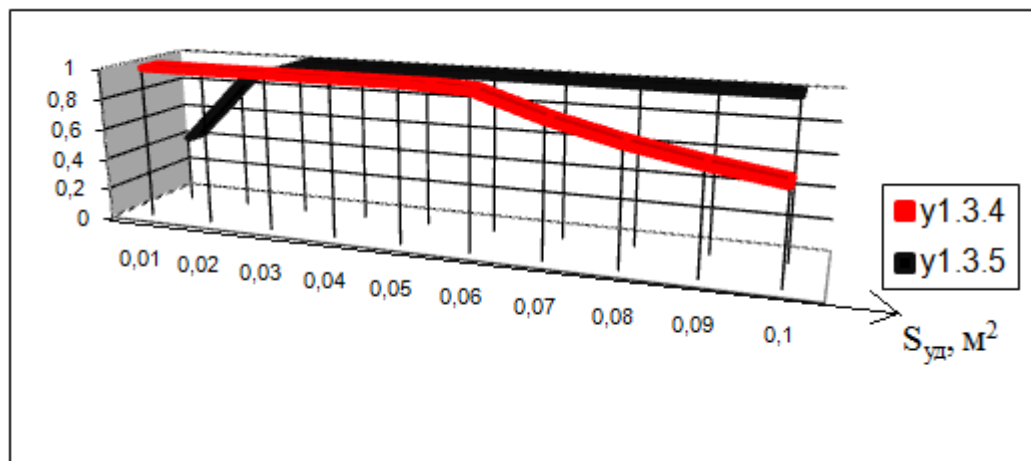


Рисунок 5.2.5 – График зависимости показателей критичности от площади поверхности взаимодействия связующего с армирующей основой

В результате практической реализации процесса намотки было установлено, что глубина проникновения связующего и продолжительность пропитки зависят и от коэффициента вязкости связующего -  $\nu_r$ . Моделированием установлено, что коэффициент вязкости связующего оказывает влияние на значения функций -  $D_{i,j,l}$  трех частных показателей критичности -  $y_{1.3.3}$ ,  $y_{1.3.5}$ ,  $y_{1.3.6}$ , и, как следствие, на значения обобщенных показателей процесса (Рисунок 5.2.6). Но значения показателей -  $y_{1.3.5}$ ,  $y_{1.3.6}$  при этом остаются равными единице. Рекомендуется

значения этого параметра для установленных исходных данных, с точки зрения отсутствия предельных состояний брать в интервале от 8 до 13 Па·с. В противном случае, наблюдается изменение продолжительности и глубины проникновения связующего, которое ведет к развитию предельного состояния и некачественной пропитке.

Капиллярное давление также оказывает влияние на параметры процесса пропитки. В первую очередь, это скорость и продолжительность пропитки. Чем меньше капиллярное давление, тем ниже скорость и качество пропитки, на что показывают графики изменения показателей критичности -  $y_{1.3.1}$  и  $y_{1.3.3}$  (Рисунок 5.2.7).

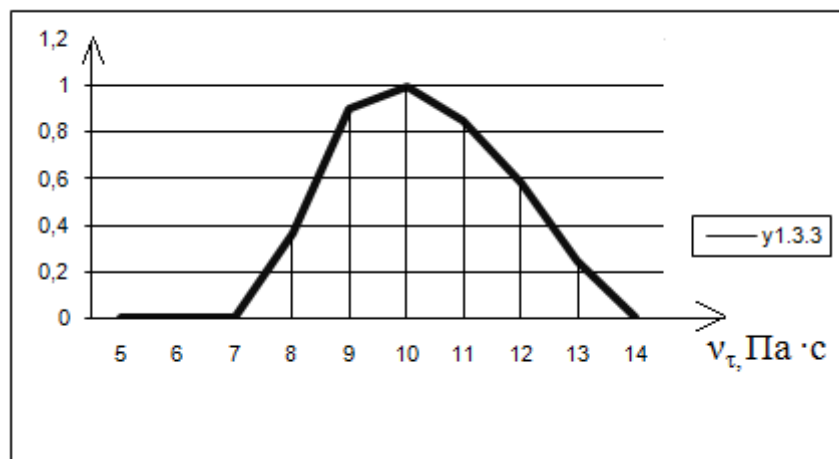


Рисунок 5.2.6 – График зависимости показателя критичности  $y_{1.3.3}$  от коэффициента вязкости связующего

В конечном итоге, как показало моделирование, полная пропитка стекложгута смолой ЭД-16 достигается при значениях обобщенных показателей критичности, представленных на рисунках 5.2.8 и 5.2.9. Но, значение качественного обобщенного показателя  $Y_{1.3}$  оказалось ниже 1 из-за большого количества входящих в него чувствительных параметров.

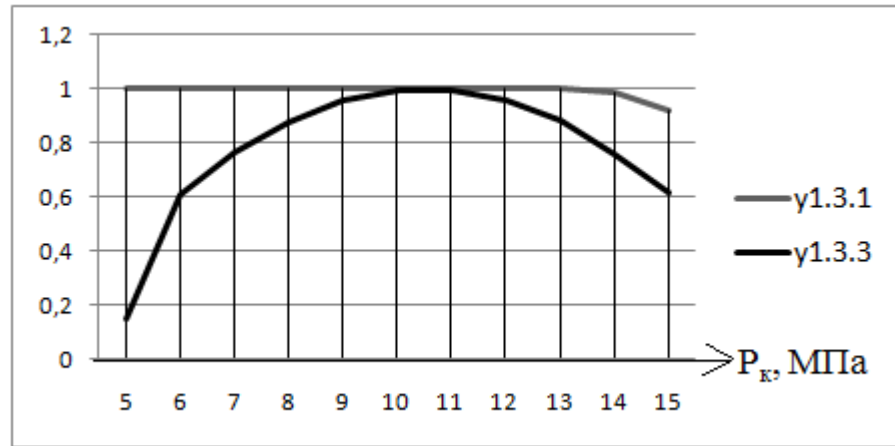


Рисунок 5.2.7 – График зависимости показателей критичности от предельного значения капиллярного давления

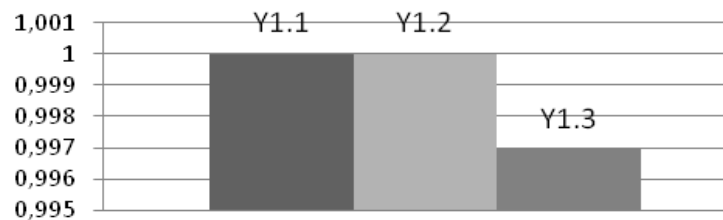


Рисунок 5.2.8 – Интегрированные обобщенные показатели критичности процесса пропитки

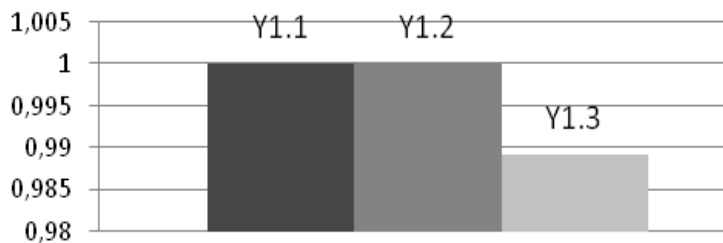


Рисунок 5.2.9 – Качественные обобщенные показатели критичности процесса пропитки

Итак, процесс пропитки с найденными моделированием режимными параметрами протекает в расчетном режиме и без возникновения предельных состояний, что позволяет получить качественную оболочку.

**На этапе намотки** стекложгута возникают критические ситуации, связанные с оснасткой, оборудованием, компонентами стеклопластика и процессом взаимодействия этих элементов. Некоторые из параметров намотки оказывают влияние на возникновение критических ситуаций сразу по нескольким



признакам. К таким параметрам относятся длина оболочки -  $L_0$  и масса смазки или клея -  $m_0$ .

Несоответствие длины оболочки создает критические ситуации связанные с недостаточной длиной оправки (показатель -  $y_{2.1.4}$ ), низким значением коэффициента сплошности нанесения смазки или клея (показатель -  $y_{2.1.7}$ ), и недостаточной адгезии стеклопластика к оправке (показатель -  $y_{2.1.8}$ ), нехваткой длины и массы стекложгута, находящегося на складе (показатели -  $y_{2.2.7}$  и  $y_{2.2.8}$ ), нехваткой связующего (показатель -  $y_{2.3.3}$ ), недостаточной шириной жгута (показатель -  $y_{2.4.2}$ ), и увеличением машинного времени формования (показатель -  $y_{2.4.9}$ ).

На основании результатов моделирования удалось составить графики изменения показателей критичности от длины оболочки и массы смазки или клея, которые при сравнении с экспериментом подтверждают достоверность математической модели (Рисунки 5.2.2.10, 5.2.11).

Наибольшей чувствительностью к изменению длины оболочки обладают такие параметры, как длина оправки, необходимая толщина клея и машинное время формования. При заданных начальных условиях, увеличение длины оболочки на более 2,2 м влечет за собой нехватку длины и массы стекложгута и связующего, что ведет к получению оболочки с ненормативными геометрическими размерами и внутренними дефектами.

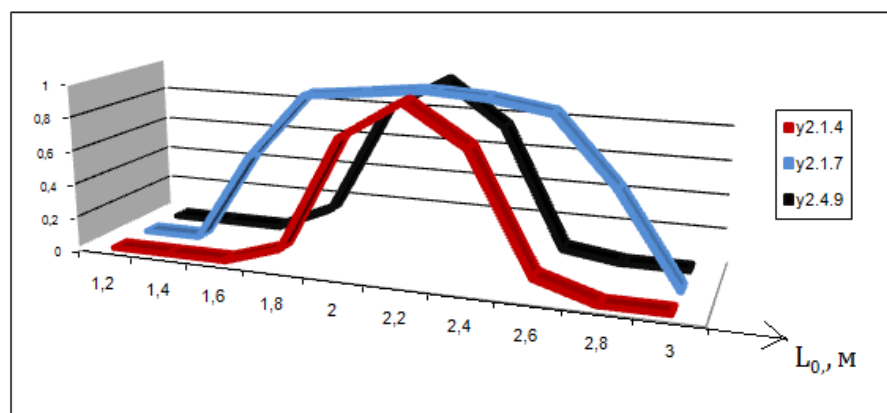


Рисунок 5.2.10 – График зависимости показателей критичности от длины оболочки

От массы смазки или клея зависят характеристики сплошности нанесения на корпус или оправку, а также вероятность возникновения критической ситуации, которая оценивается показателем -  $y_{2.1.6}$ . В случае, когда смазки или клея оказывается недостаточно, то не достигается необходимая адгезия стеклопластика к формообразующей поверхности, а при его избытке - появляются межслойные дефекты.

Как показали экспериментальные исследования, для рассматриваемой технической системы оптимальное количество смазки или клея, при котором возникновение критических ситуаций исключено, находится в интервале от 1,2 до 2 кг (Рисунок 5.2.11).

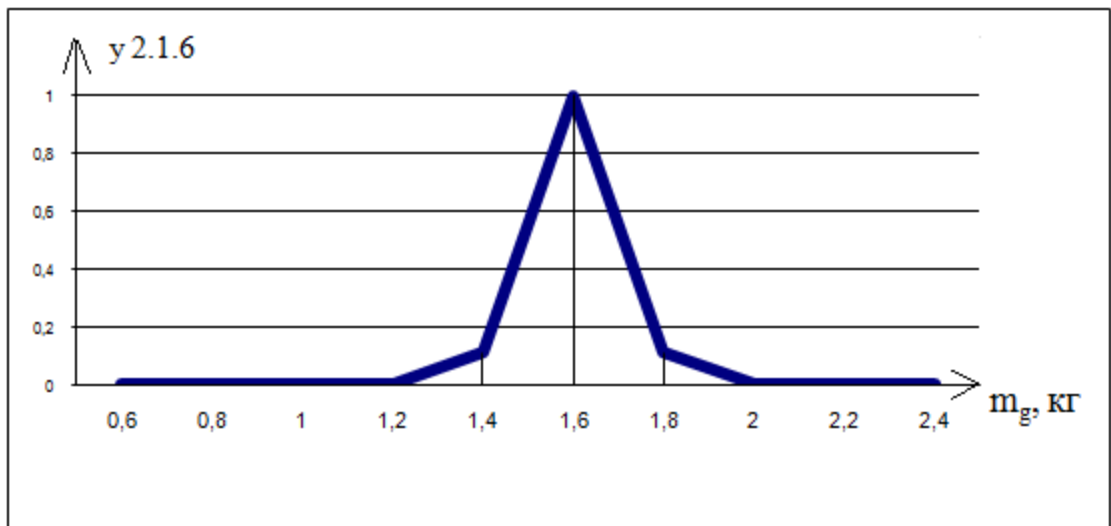


Рисунок 5.2.11 – График зависимости показателя критичности от массы смазки или клея

Наполнитель стеклопластика определяет механические свойства оболочки и выявление критических ситуаций, связанных с ним необходимо.

Иногда при намотке некоторые свойства армирующей основы проявляются не достаточно интенсивно. К ним относится капиллярность материала -  $K$ , длина -  $L_{nl}$  и масса стекложгута -  $G_a$ . Эти свойства зависят от большого количества параметров, поэтому интенсивность их проявления одновременно не может быть максимальной. В этом случае растет вероятность возникновения критических ситуаций, что и доказывают вычисленные значения показателей критичности. (Рисунок 5.2.12).

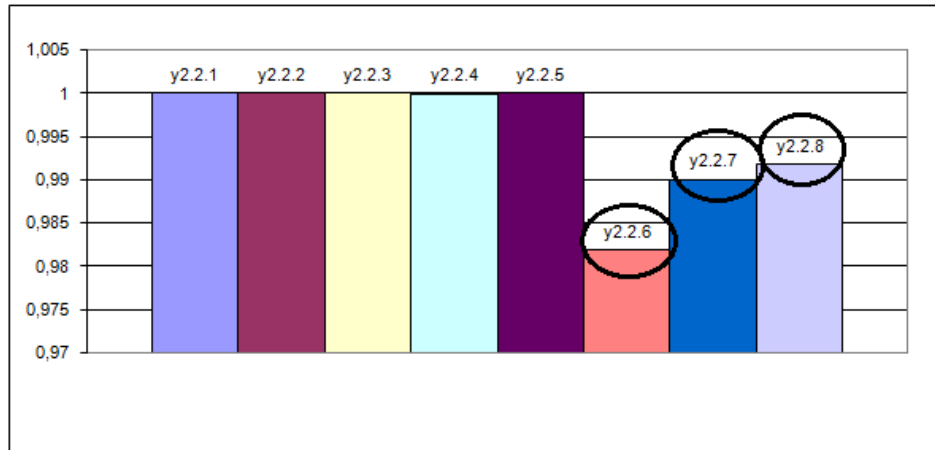


Рисунок 5.2.12 – Показатели критичности этапа намотки по наполнителю

Рассмотрим влияние таких параметров на показатели критичности и качество оболочки.

Количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки -  $a$  влияет на значения пределов прочности стеклопластика и армирующей основы, капиллярности, критерия удельной прочности стекловолокна в жгуте, количества связующего, необходимого для создания оболочки, пределы прочности стеклопластика на растяжение и сжатие.

Замечено, что при увеличении количества пасм одного направления увеличивается значение предела прочности армирующей основы, но уменьшается прочность готового стеклопластика на растяжение и сжатие из-за увеличения коэффициента объемной плотности материала -  $H_0$  и уменьшения массовой доли эластичного связующего.

Однако, в исследуемом нами диапазоне значений, эти изменения оказались не значительными (от 0,005 до 7,325 МПа) и находятся за пределами критической области.

Эти закономерности находят подтверждение при реализации математической модели (Рисунки 5.2.13, 5.2.14).

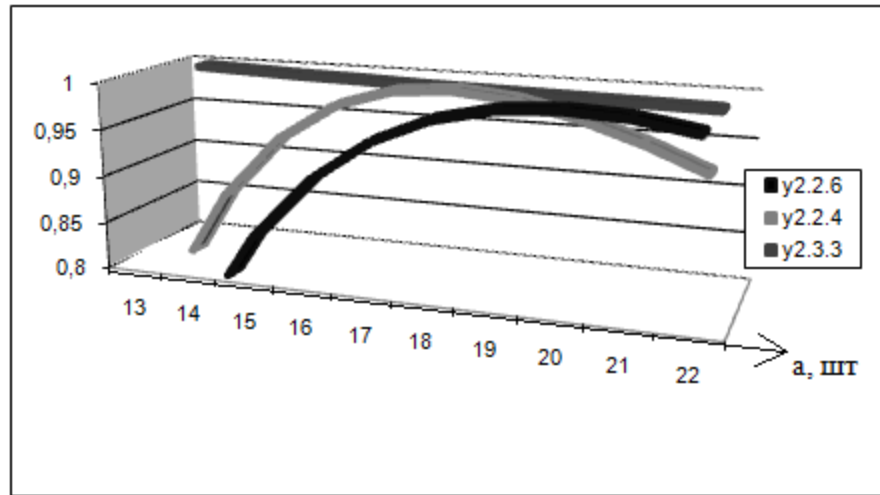
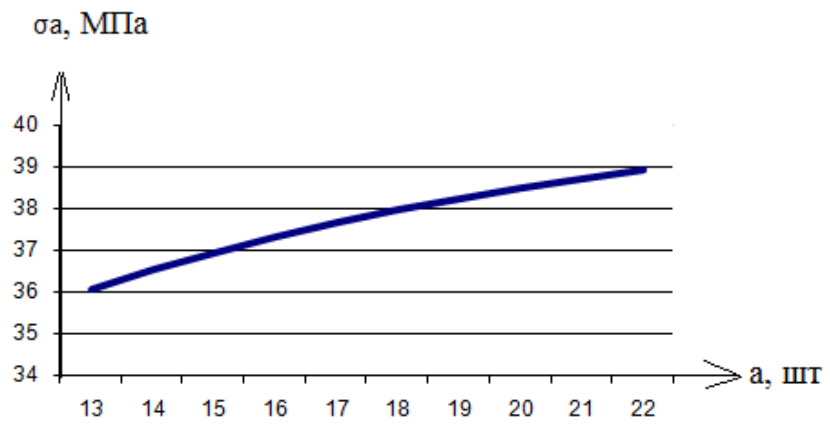
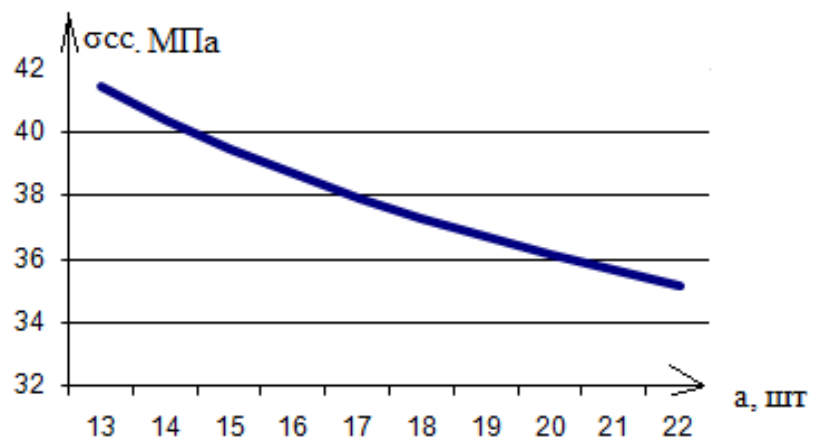


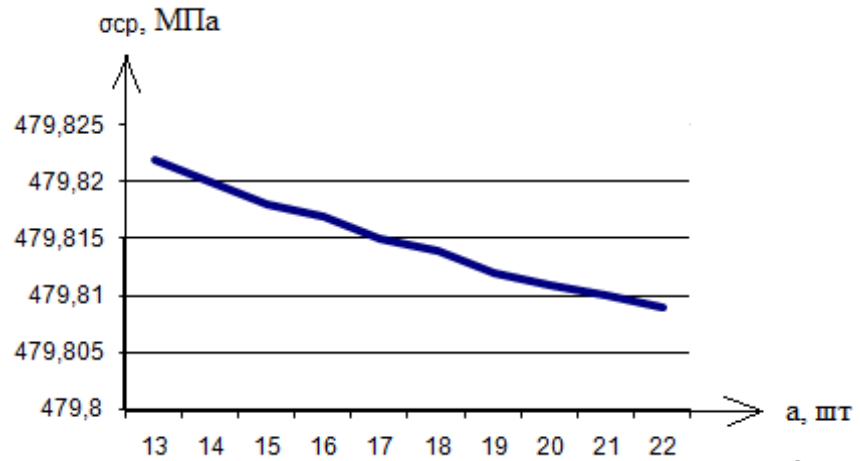
Рисунок 5.2.13– График зависимости показателей критичности от количества пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки.



а)



б)

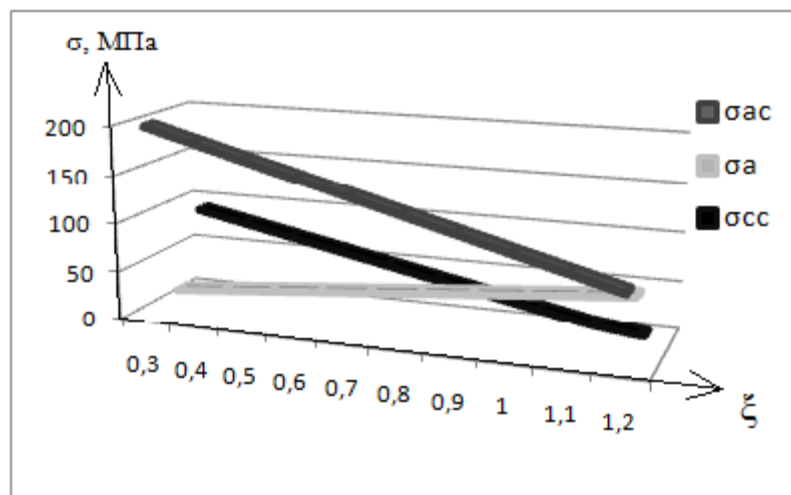


в)

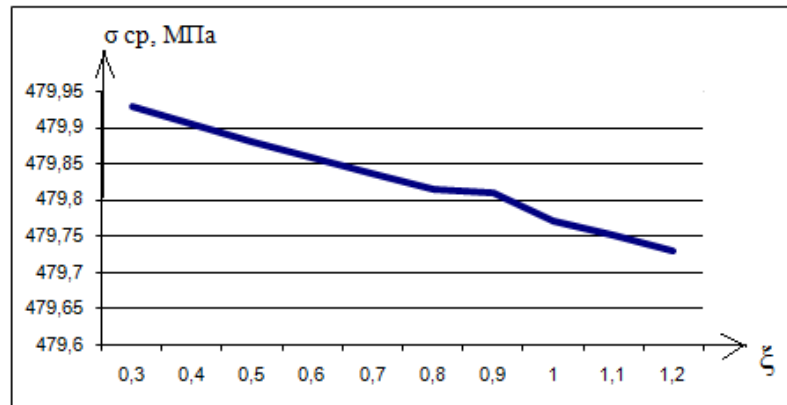
Рисунок 5.2.14 – График зависимости пределов прочности от количества пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки:

а) армирующей основы; б) стеклопластика на сжатие; в)стеклопластика на растяжение

На возникновение критичностей, связанных с прочностью стеклопластиков оказывает влияние коэффициент упаковки волокон в нити -  $\xi$  (Рисунок 5.2.15). При увеличении значения этого параметра происходит увеличение объемной плотности материала и снижение предела прочности на растяжение и сжатие.



а)



б)

Рисунок 5.2.15– График зависимости пределов прочности от коэффициента упаковки волокон в нити:

- а) армирующей основы, стеклопластика на сжатие и неотвержденного стеклопластика; б)стеклопластика на растяжение

Появление критичности по удельной прочности армирующего волокна в жгуте -  $\Pi$  (показатель -  $y_{2.1.4}$ ), коэффициенту капиллярности -  $K$  (показатель -  $y_{2.2.6}$ ), количеству и соотношению прочности связующего с армирующей основой (показатели -  $y_{2.3.2}$  и  $y_{2.3.3}$ ) также связано с коэффициентом упаковки волокон в нити.

Замечено, что увеличение коэффициента упаковки волокон в нити ведет к уменьшению необходимого для качественной пропитки связующего и изменению капиллярности армирующей основы по параболическому закону. При достижении коэффициентом -  $\xi$  значений, превосходящих 0,9 происходит критическая ситуация, ведущая к развитию предельного состояния – недостаточной капиллярности наполнителя и появлению расслоений стеклопластика (Рисунок 5.2.16.)

На проявление свойств стеклопластика влияет средний диаметр стекловолоконной нити -  $d_5$ . Но, как показала практика, это влияние не приводит к развитию предельных состояний. Это подтверждают построенные с помощью математической модели зависимости показателей критичности (Рисунки 5.2.17, 5.2.18).

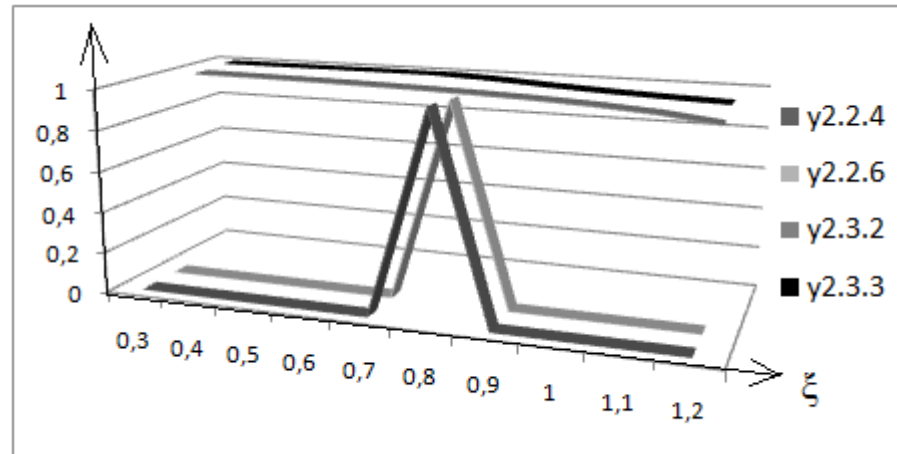


Рисунок 5.2.16 – График зависимости показателей критичности от коэффициента упаковки волокон в нити

Значения показателя критичности -  $y_{2.3.2}$ , по прочности связующего и армирующей основы, при увеличении параметра -  $d_5$  непрерывно медленно растет (не более 0,012 на всем интервале), а показателя -  $y_{2.4.3}$ , связанного с технологическим зазором -  $e_n$ , уменьшается (не более 0,049).

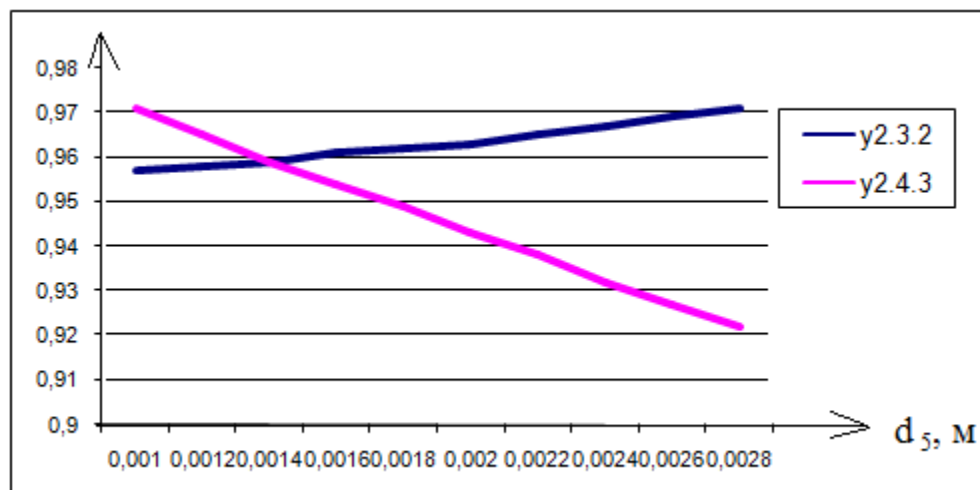


Рисунок 5.2.17 – График зависимости показателей критичности  $y_{2.3.2}$ ,  $y_{2.4.3}$ , от среднего диаметра стекловолоконной нити

Зависимости показателей критичности -  $y_{2.2.4}$ ,  $y_{2.2.6}$  и  $y_{2.4.9}$ , связанные с удельной прочностью стекловолокна в жгуте, коэффициентом капиллярности и

машинным временем формования имеют параболический характер. Среди них, машинное время формования и удельная прочность стекловолокна оказываются весьма чувствительными.

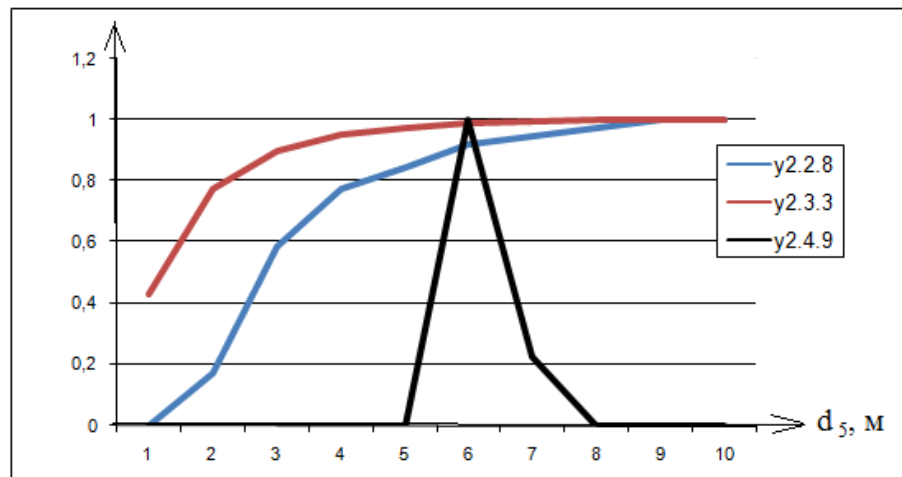
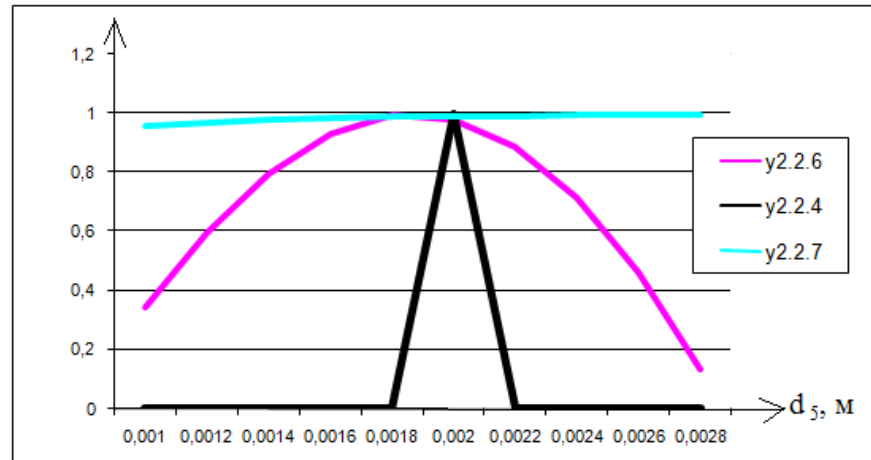


Рисунок 5.2.18 – Графики зависимости других показателей критичности от среднего диаметра стекловолоконной нити.

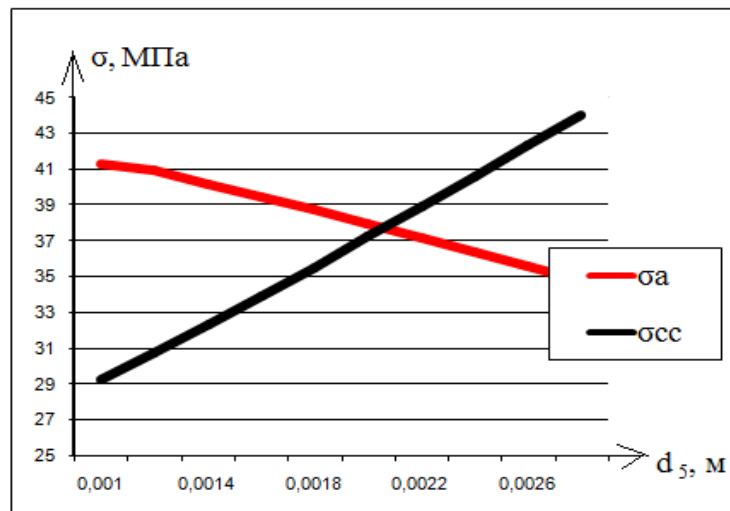
Значения показателей критичности -  $y_{2.2.8}$  и  $y_{2.3.3}$ , увеличиваются до максимального значения - «1», то есть вероятности возникновения критических ситуаций по необходимой массе стекложгута и связующего уменьшаются. Однако, при увеличении среднего диаметра стекловолоконной нити увеличивается масса оболочки, то неприемлемо для деталей летательных аппаратов.

Также происходит изменение показателя -  $y_{2.2.7}$ , связанного необходимой длиной стекложгута -  $L_{н1}$ . Для длины стекложгута, находящегося на складе, с

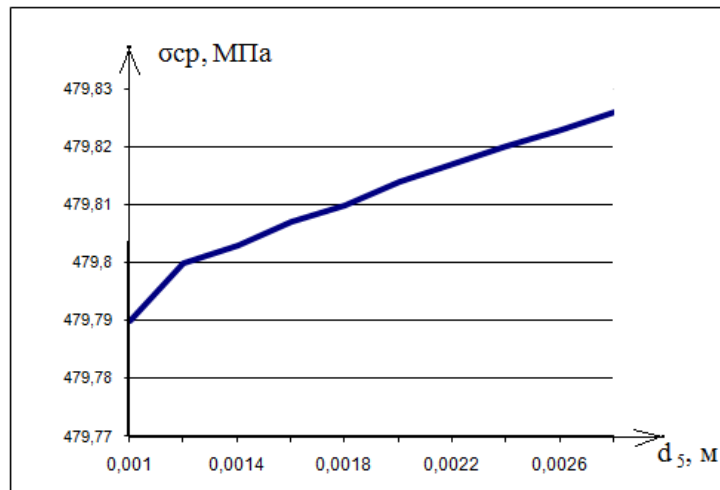


ростом диаметра волокна уменьшается вероятность возникновения критической ситуации.

Что касается прочностных характеристик, то с увеличением толщины стекловолоконной нити, значения всех пределов прочности увеличиваются, кроме предела прочности арматуры из-за уменьшения коэффициента объемной плотности стеклопластика, что показывают графики зависимостей показателей критичности по этим свойствам (Рисунок 5.2.19).



а)



б)

Рисунок 5.2.19– График зависимости пределов прочности от среднего диаметра стекловолоконной нити:

а) армирующей основы и стеклопластика на сжатие; б) стеклопластика на растяжение

Толщина стекловолоконного жгута -  $d_1$  и его ширина -  $d_2$  влияют на прочностные свойства стеклопластика, оцениваемые удельной прочностью стекловолокна в жгуте (показатель -  $y_{2.2.4}$ ), коэффициентом капиллярности (показатель -  $y_{2.2.6}$ ), соотношением прочности связующего и армирующей основы (показатель -  $y_{2.3.2}$ ), необходимым количеством связующего (показатель -  $y_{2.3.3}$ ) и величиной технологического зазора (показатель -  $y_{2.4.3}$ ).

При увеличении толщины жгута, все эти характеристики уменьшаются, кроме удельной прочности стекловолокна в жгуте и коэффициента капиллярности, которые при этом растут. Это связано с уменьшением прочности стеклопластика.

Однако, при увеличении ширины жгута происходит уменьшение необходимого количества связующего, которое связано с количеством нитей в жгуте. Установлено, что чем больше ширина жгута, тем больше количество нитей и коэффициент объемной и весовой плотности и тем больше связующего необходимо для создания оболочки.

Это находит подтверждение при реализации математической модели и построении графиков изменения показателей критичности. Установлено, что характер влияния обоих параметров на вероятность возникновения критических ситуаций одинаков, за исключением критичностей, которые оцениваются показателями -  $y_{2.2.8}$  и  $y_{2.4.3}$  (Рис. 5.2.20, 5.2.21).

Прочностные свойства оболочки при увеличении толщины и ширины жгута и сохранении значения толщины нити ухудшаются. При этом происходит рост прочности армирующей основы (Рисунки 5.2.21, 5.2.22). Это является следствием увеличения коэффициента объемной и весовой плотности стеклопластика.

Одним из важных параметров процесса создания стеклопластиковой оболочки является угол намотки -  $\alpha$ .

Исследуем связь между параметрами процесса и углом намотки в диапазоне от 40 до 60 °.

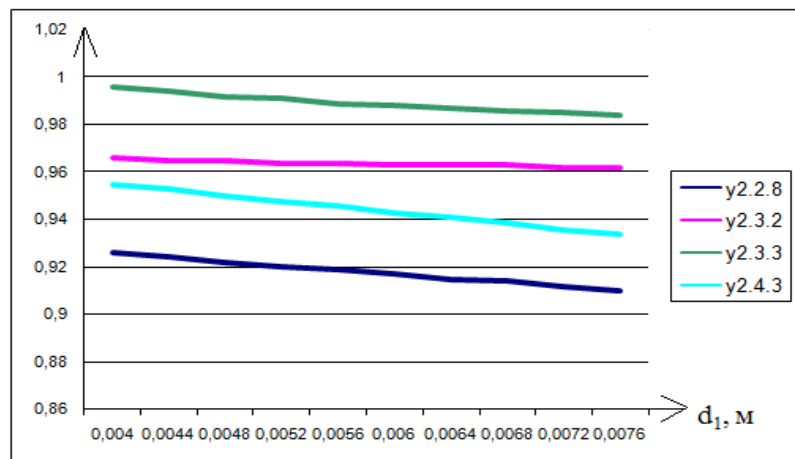
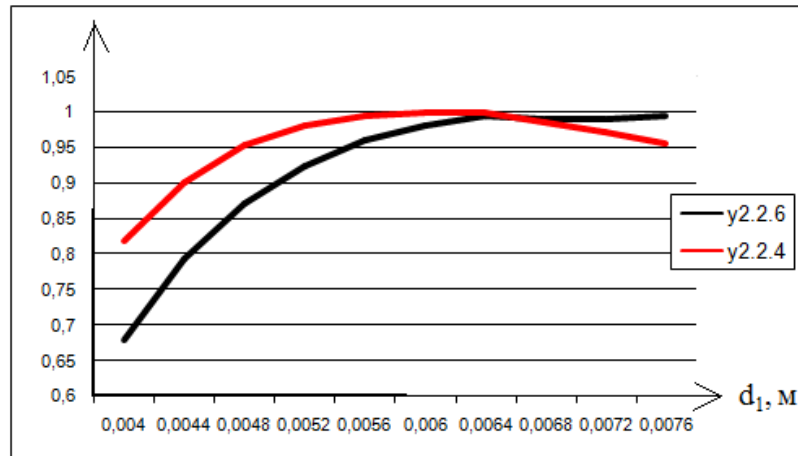


Рисунок 5.2.20 – Графики зависимостей показателей критичности от толщины жгута

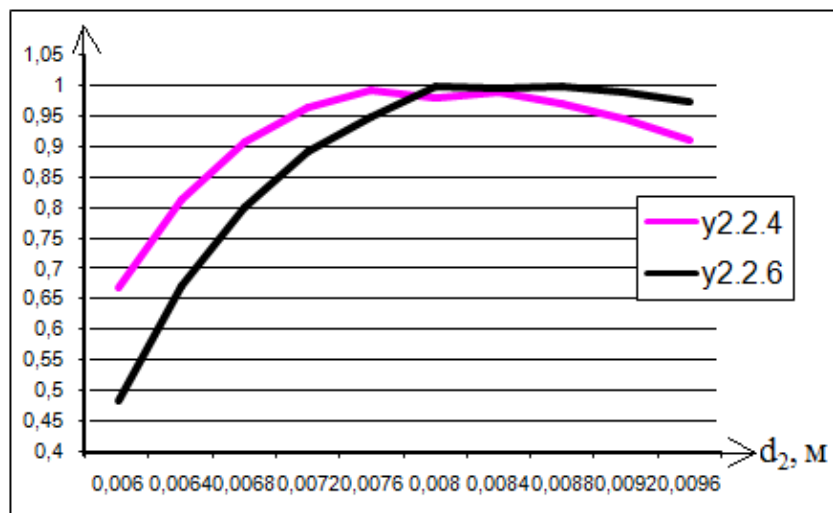
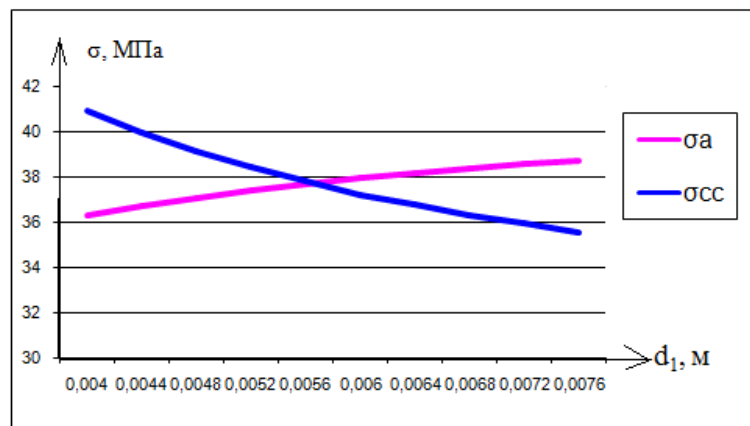


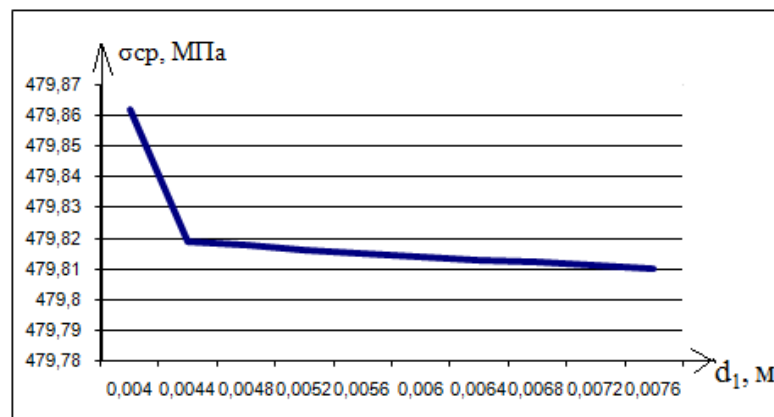
Рисунок 5.2.21 – Графики зависимостей показателей критичности от ширины жгута

Установлено, что изменение предельной шириной жгута -  $b_{npред}$  и напряжение ленты при намотке -  $\sigma$ , в зависимости от угла намотки имеет скачкообразный характер, обусловленный наличием в формулах функции  $\cos(\alpha)$ . В этом случае, существует несколько оптимальных и несколько критичных значений угла намотки.

Прочностные характеристики с увеличением угла намотки в заданном интервале значений уменьшаются. Особенно интенсивно это наблюдается для предела прочности армирующей основы и стеклопластика.

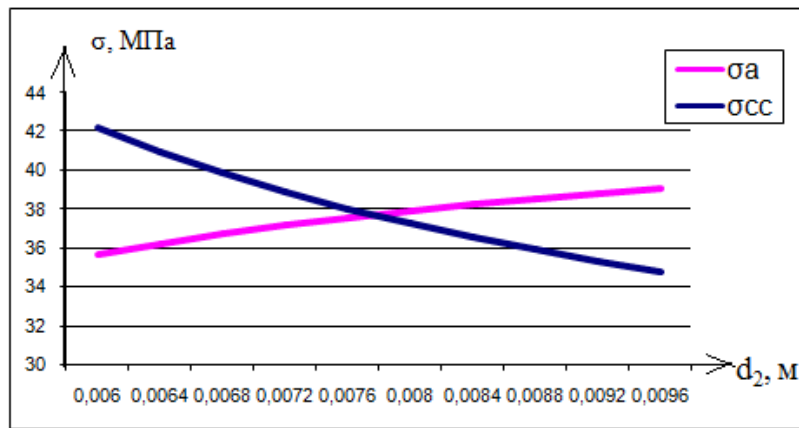


а)

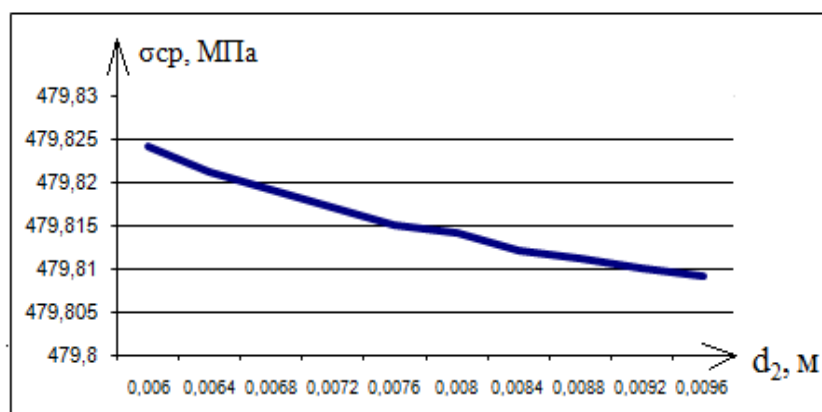


б)

Рисунок 5.2.22-1– График зависимости пределов прочности толщины жгута: а) армирующей основы и стеклопластика на сжатие; б) стеклопластика на растяжение.



а)



б)

Рисунок 5.2.22-2 – График зависимости пределов прочности от ширины жгута: а) армирующей основы и стеклопластика на сжатие; б) стеклопластика на растяжение.

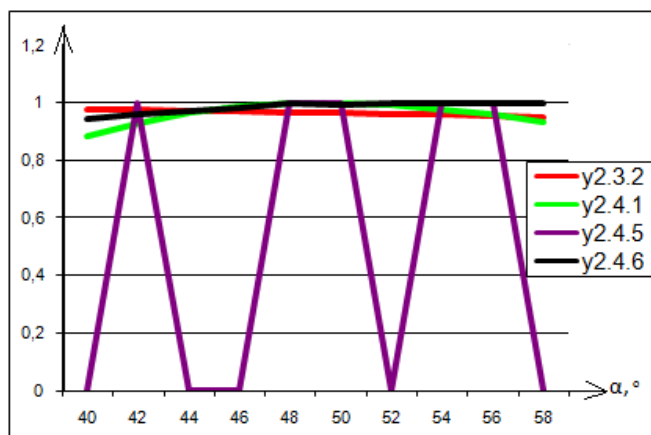
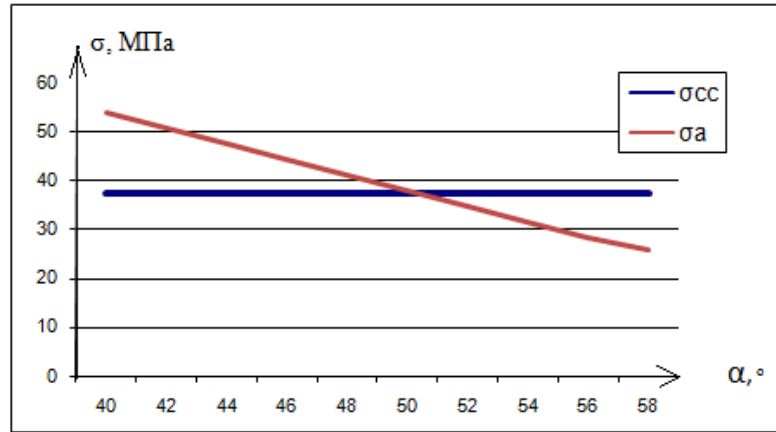
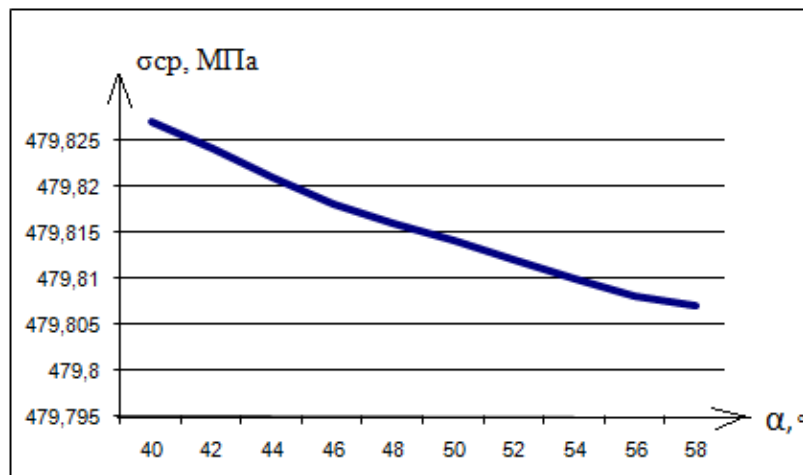


Рисунок 5.2.23 – Графики зависимостей показателей критичности от угла намотки.

На основании результатов математического моделирования, построены графики зависимостей показателей критичности и прочностных характеристик от угла намотки (Рисунки 5.2.23, 5.2.24).



а)



б)

Рисунок 5.2.24 – График зависимости пределов прочности от угла намотки:

а) армирующей основы и стеклопластика на сжатие; б) стеклопластика на растяжение.

Полученные зависимости подтверждают выявленные на практике закономерности.

Однако, не все параметры процесса намотки, характеризующие связующее, достигают оптимальных значений.

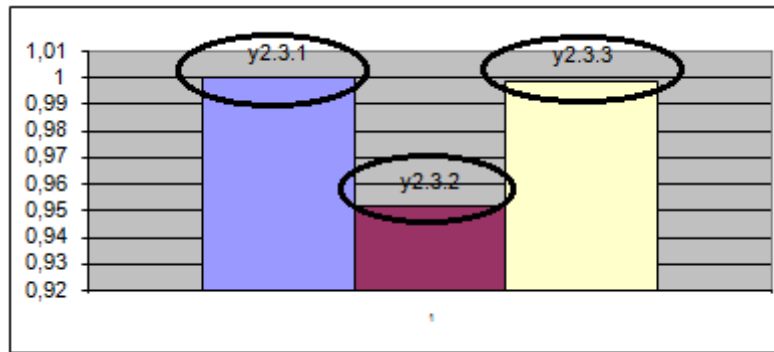


Рисунок 5.2.25 – Показатели критичности процесса намотки по связующему

К числу таких параметров относятся пределы прочности связующего после полимеризации -  $\sigma_c$  и на разрыв стекловолокон армирующего материала -  $\sigma_b^{Ax}$ , а также коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте -  $\psi_1$ .

При изменении прочности материала связующего, показатель критичности -  $y_{2.2.1}$ , не изменяется, а показатель -  $y_{2.3.1}$ , принимает максимальное значение и остается при дальнейшем увеличении на этом уровне (Рисунок 5.2.26). При этом, прочностные свойства армирующей основы не изменяются, а пределы прочности стеклопластика растут (Рисунок 5.2.27).

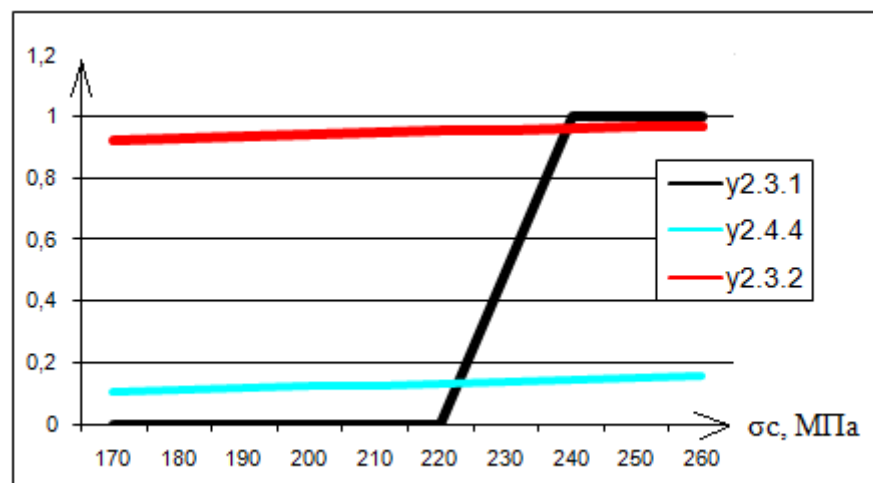


Рисунок 5.2.26 – Графики зависимостей показателей критичности от предела прочности связующего

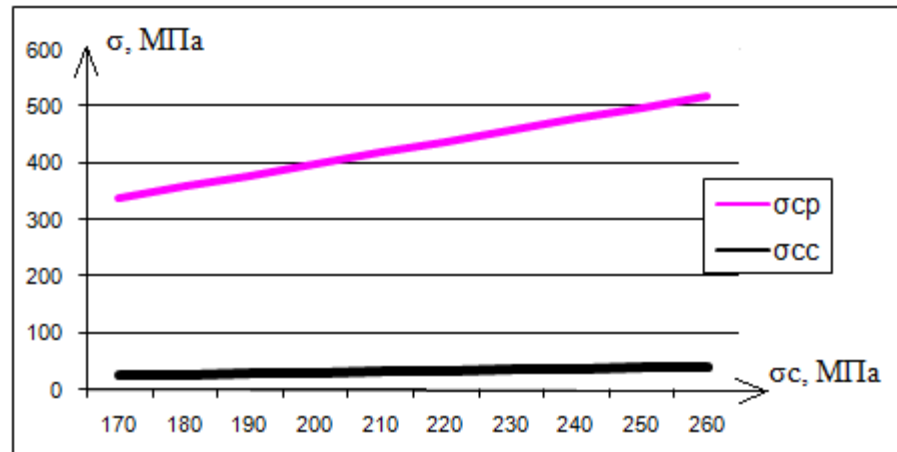


Рисунок 5.2.27 – График зависимости пределов прочности стеклопластика на растяжение и сжатие от предела прочности связующего

Показатели -  $y_{2.3.2}$  и  $y_{2.4.4}$ , оценивающие интенсивность проявления прочности стеклопластика и оболочек при увеличении предела прочности материала связующего также медленно растут, но соотношение пределов прочности стеклопластика и связующего остается на низком уровне из-за малой прочности связующего.

С увеличением значения коэффициента -  $\psi_1$ , увеличивается предел прочности армирующей основы и значения соответствующих показателей критичности (Рисунки 5.2.28, 5.2.29). Это связано с тем, то при увеличении этого коэффициента достигается более равномерное натяжение нитей и снижается риск их разрыва.

Толщина текстурного слоя, приходящаяся на базовую толщину 10 мм -  $\delta_m$  оказывает влияние на машинное время формования -  $\tau$  (показатель  $y_{2.4.9}$ ) (Рисунок 5.1.30).



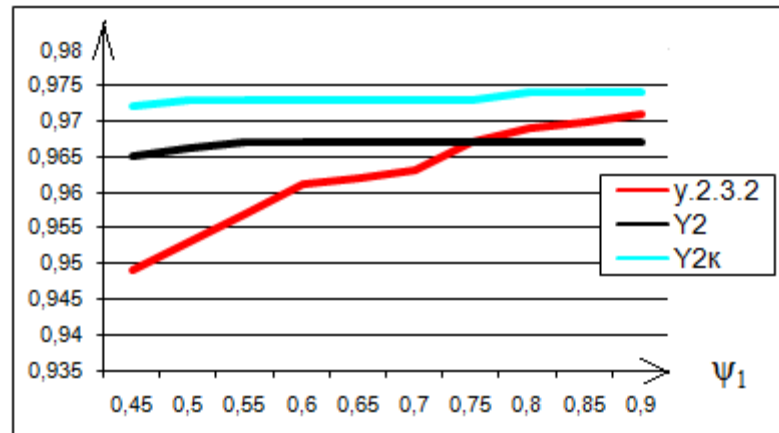


Рисунок 5.2.28 – Графики зависимостей показателей критичности от коэффициента равномерности натяжения нитей в жгуте.

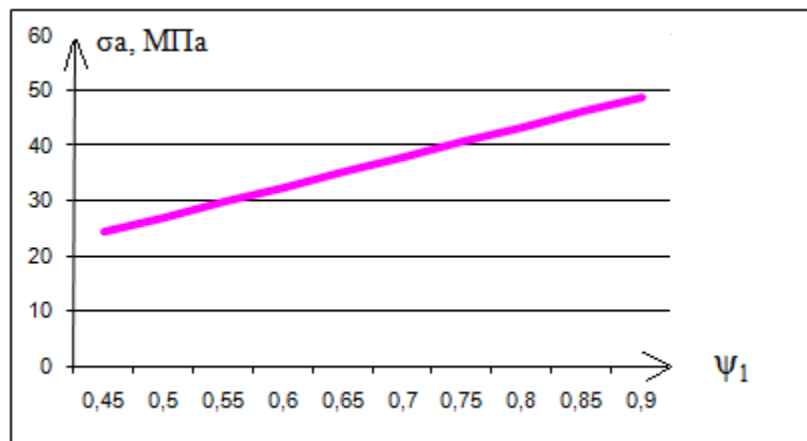


Рисунок 5.2.29 – Графики зависимостей предела прочности армирующей основы от коэффициента равномерности натяжения нитей в жгуте.

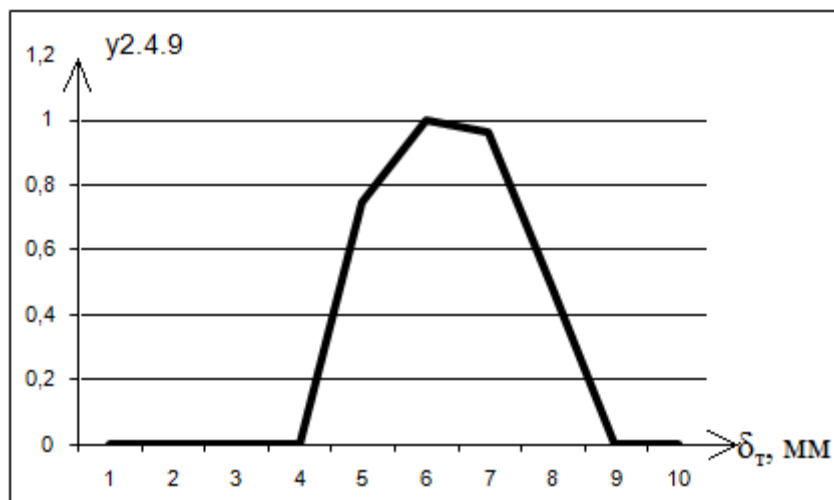


Рисунок 5.2.30 – Графики зависимостей показателя критичности толщины текстурного слоя.

Значения обобщенных показателей критичности процесса намотки представлены на рисунках 5.2.31, 5.2.32.

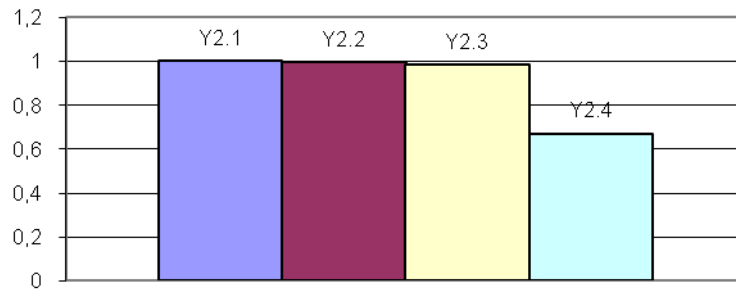


Рисунок 5.2.31 – Обобщенные интегрированные показатели процесса намотки.

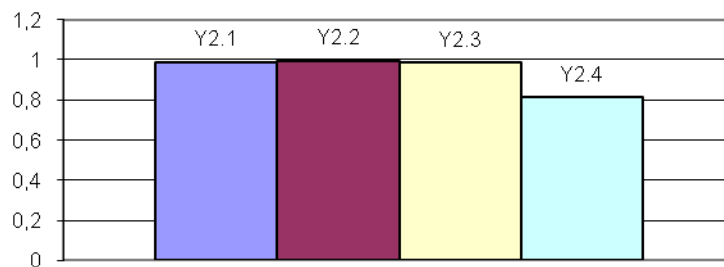
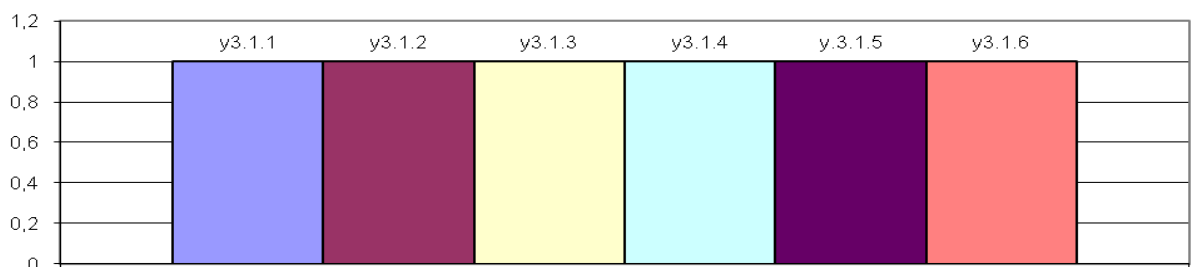
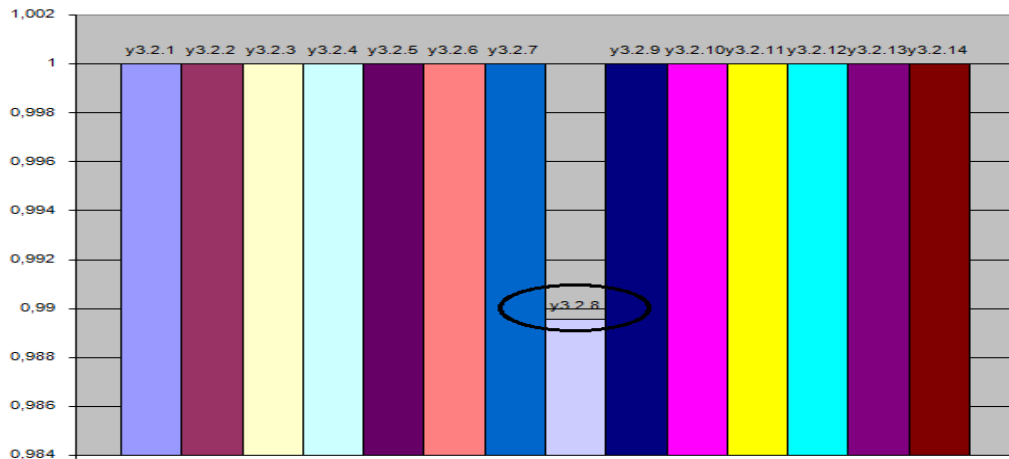


Рисунок 5.2.32 – Обобщенные качественные показатели процесса намотки

При реализации **процесса отверждения** намотанного стеклопластика по рассчитанным параметрам, удалось получить оболочку приемлемого качества, при этом возникновения критических ситуаций не наблюдалось. Это подтверждают вычисленные показатели критичности, которые имеют максимально возможные для установленных исходных данных значения (Рисунок 5.2.33)



а)



б)



в)

Рисунок 5.2.33 – Показатели критичности этапа отверждения:

- а) этапа перехода связующего в гелеобразное состояние; б) этапа затвердевания связующего; в) полного отверждения

Для этого процесса, не выявлены параметры, влияющие на проявление одновременно нескольких рассматриваемых свойств оболочки.

Однако установлено, что внутренние напряжения -  $\sigma_n$  (показатель  $y_{3.2.8}$ ), зависят от предела прочности стеклопластика на растяжение -  $\sigma_p^c$  (Рисунок 5.2.34).

Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что при заданных начальных условиях, с увеличением предела прочности на растяжение, степень проявления критической ситуации по внутренним термоупругим напряжениям снижается, то есть, снижается вероятность появления внутренних дефектов.

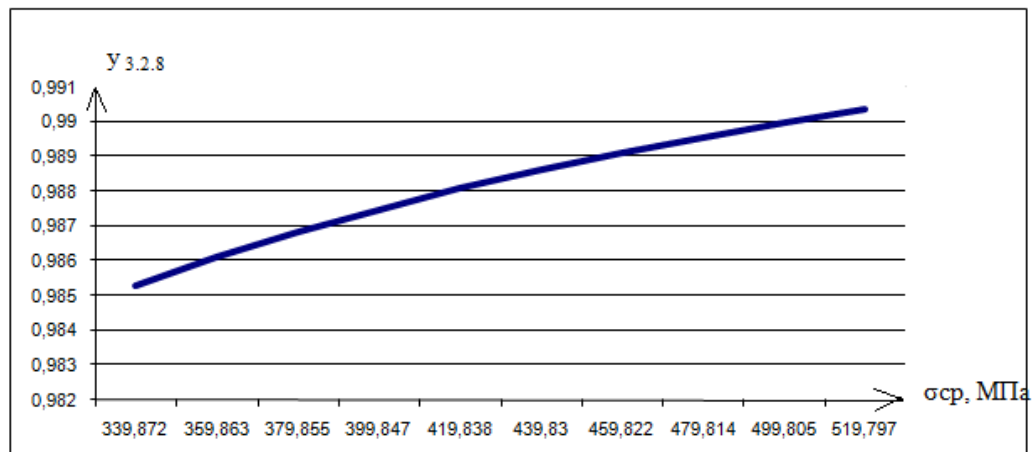


Рисунок 5.2.34 – График зависимостей показателя критичности  $y_{3.2.8}$  от величины предела прочности стеклопластика на растяжение

При этом, важная роль отводится увеличению предела прочности связующего.

Кроме параметра  $\sigma_p^c$ , влияющего на проявление свойств в процессе намотки и отверждения, такими возможностями обладают плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно  $\gamma_{cm}$  и диаметр элементарных волокон наполнителя  $d_e$ . Характер изменения показателей критичности в зависимости от этих параметров изображен на рисунке 5.2.35,

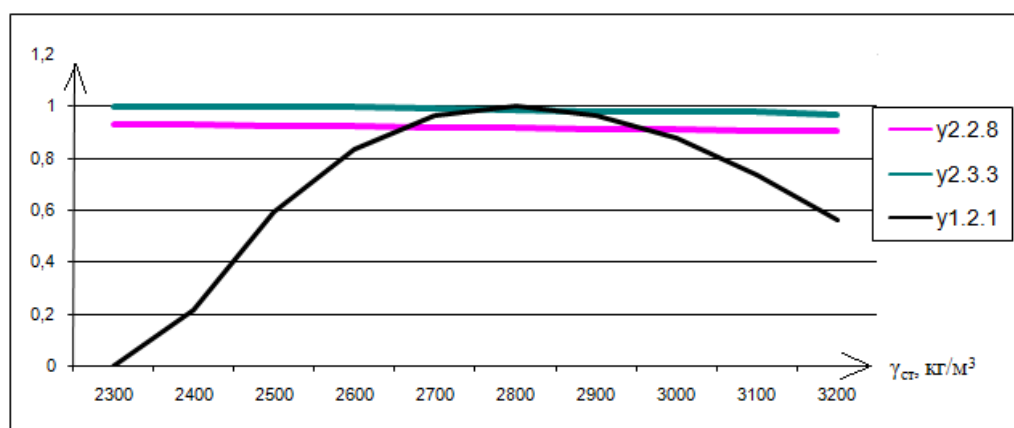


Рисунок 5.1.35 – Графики зависимостей показателей критичности от плотности материала волокон.

При этом, изменение показателя критичности -  $y_{1.2.1}$  имеет параболический характер, а значения показателей -  $y_{2.2.8}$  и  $y_{2.3.3}$  медленно снижаются, хотя для изучаемого интервала остаются в не критичной области.

С другой стороны, увеличение плотности материала -  $\gamma_{ст}$  ведет к увеличению веса изделия. Поэтому, увеличение его значения более  $2800 \text{ кг/м}^3$  в данных условиях нецелесообразно.

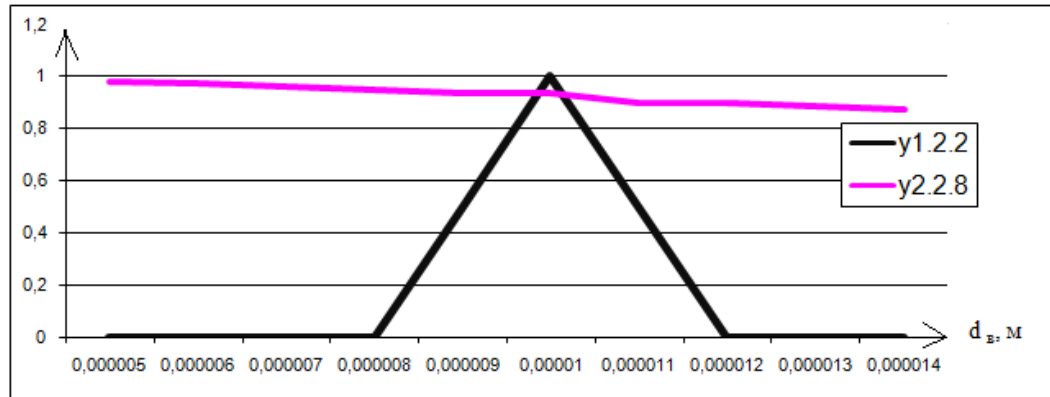
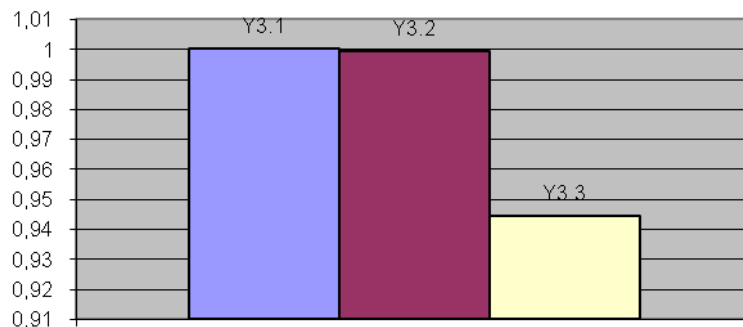
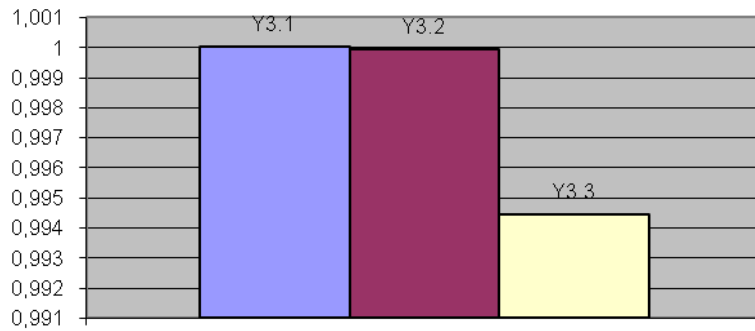


Рисунок 5.2.36 – Графики зависимостей показателей критичности от диаметра элементарного волокна

Увеличение диаметра элементарного волокна ведет к возникновению предельного состояния – нерасчетному увеличению массы армирующего вещества (показатели -  $y_{1.2.2}$  и  $y_{2.2.8}$ ). Это подтверждается графиками рисунка 5.4.36. При этом, изменение показателя -  $y_{1.2.2}$  имеет параболический характер и обладает высокой чувствительностью.



а)



б)

Рисунок 5.2.37 – Обобщенные показатели критичности процесса отверждения: а) интегрированные; б) качественные

Рассматриваемый процесс создания стеклопластиковой оболочки методом намотки на практике обеспечивает изготовление качественной детали, что подтверждается вычисленными обобщенными показателями критичности, которые имеют максимально возможные значения (Рисунки 5.2.38, 5.2.39) и представленным актом внедрения (Приложение А).

В процессе исследования, было выяснено, что значение обобщенных интегрированных и качественных показателей отличаются друг от друга, в зависимости от того, по какому параметру произошло увеличение вероятности возникновения критической ситуации. Если такая ситуация возникает по неответственному параметру, то обобщенный качественный показатель критичности оказывается выше интегрированного и качество оболочки не страдает, в противном случае – наоборот.

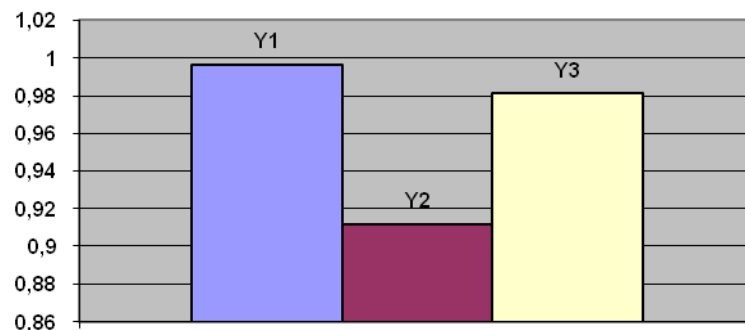


Рисунок 5.2.38– Обобщенные интегрированные критериальные показатели технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки»

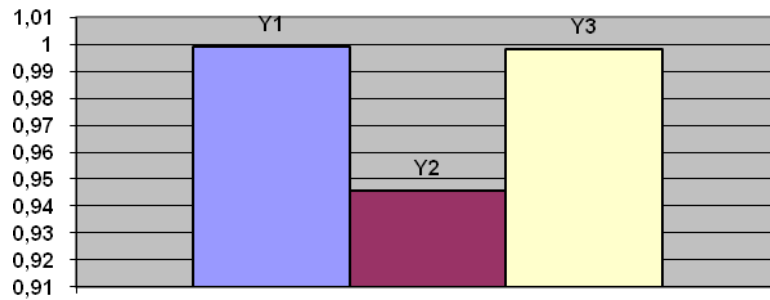


Рисунок 5.2.39 – Обобщенные качественные показатели технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки»

В целом, можно утверждать, что наиболее ответственным этапом функционирования технической системы с точки зрения качества оболочки является процесс намотки.

### 5.3. Оптимизация параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки»

При проектировании деталей и узлов ракетной техники используются три критерия качества: минимальная масса, максимальная прочность и экономичность. Эти условия нашли отражение в критериях оптимизации параметров изготовления стеклопластиковой оболочки головной части ракеты.

Можно утверждать, что получение оболочки одинаково высокого качества одновременно по этим критериям невозможно. Поэтому, оптимизацию параметров технической системы будем производить по каждому критерию отдельно [29, 43].

#### 5.3.1 Поиск параметров технической системы для изготовления высокопрочной оболочки

Прочность оболочки корпуса головной части ракеты является самым значимым критерием оптимизации. В случае, когда прочностные свойства не соответствуют требуемым, оболочка не может быть использована по назначению,

несмотря на то, что по другим критериям она может соответствовать или даже превосходить нормативы. Поэтому, задача получения оболочки с требуемой прочностью является приоритетной задачей изготовления подобных деталей.

Оптимизацию параметров технической системы будем производить с учетом следующих условий :

- 1) значения пределов прочности оболочки на растяжение и сжатие не должны быть меньше значений, заявленных в техническом задании;
- 2) при определении параметров, соответствующих наивысшей прочности, их значения должны обеспечивать приемлемое качество оболочки по другим свойствам (в т.ч. массе и геометрическим параметрам);
- 3) для оптимизации параметров по прочности будем использовать среднюю приведенную прочность -  $\sigma_{cp}$  :

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_p^c + \sigma_c^c}{2}, \quad (5.1)$$

где  $\sigma_c^c$  - предел прочности стеклопластика на сжатие;  $\sigma_p^c$  - предел прочности стеклопластика на растяжение.

В этом случае, целевая функция оптимизации будет иметь вид [53]:

$$\sigma_{cp}^{x_i} \rightarrow \max, \quad (5.2)$$

где  $x_i$  - совокупность зависимых параметров.

$$x_i = \{a; \xi; d_1; d_2; d_5; \alpha; \sigma_c\}, \quad (5.3)$$

где  $a$  - количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки;  $\xi$  - коэффициент упаковки волокон в нити;  $d_1$  и  $d_2$  - толщина и ширина жгута;  $d_5$  - средний диаметр стекловолоконной нити;  $\alpha$  - угол армирования (намотки);  $\sigma_c$  - предел прочности материала связующего.

Решение должно предполагать отсутствие критических ситуаций при изготовлении оболочки.

С точки зрения прочности, такими ситуациями будет недостаточная удельная прочность армирующего волокна в жгуте (показатель -  $y_{2.2.4}$ ),



избыточная капиллярность армирующей основы (показатель -  $y_{2.2.6}$ ), недостаточная ширина стекложгута (показатель -  $y_{2.4.2}$ ), его слабое натяжение (показатель -  $y_{2.4.5}$ ) и недостаточная длительность формования (показатель -  $y_{2.4.9}$ ). Основным показателем, оценивающим возникновение критической ситуации, связанной с недостаточной прочностью оболочки является показатель -  $y_{2.4.4}$ .

Зададимся ограничением на минимальные значения показателей критичности, при которых удастся достичь приемлемого качества оболочки по всем свойствам (5.4).

Для частных показателей критичности установим интервал значений от 0,5 до 1. В этом случае, критические ситуации не происходят, а интенсивность проявления свойств больше половины возможной.

Значения обобщенных качественных показателей критичности должны находиться в диапазоне от 0,85 до 1. При этом оболочка будет иметь высокое качество.

Показатель, оценивающий возникновение критичности по свойству, с точки зрения которого производится оптимизация (в данном случае  $y_{2.4.4}$ ), должен иметь значения не выходящие за рамки не критичного интервала.

$$\left[ \begin{array}{l} 0,5 \leq y_{2.2.4} \leq 1; 0,5 \leq y_{2.2.6} \leq 1; 0 < y_{2.4.2} \leq 1; 0 < y_{2.4.4} \leq 1; \\ 0,5 \leq y_{2.4.5} \leq 1; 0,5 \leq y_{2.4.9} \leq 1; 0,85 \leq Y_{2\text{крит}} \leq 1 \end{array} \right]. \quad (5.4)$$

В случае оптимизации технологического процесса по прочности оболочки, показатель -  $y_{2.4.2}$  оказывается зависимым от большого количества параметров и отличается высокой чувствительностью. Поэтому, диапазон его возможных значений так же ограничим не критичным интервалом.

На основании графиков зависимостей значений показателей критичности от параметров системы, представленных в разделе 5.2, определим значения зависимых параметров, отвечающих максимальным значениям пределов прочности стеклопластика и средней приведенной прочности (Таблица 5.3.1).

Таблица 5.3.1 - Параметры, обеспечивающие наилучшие прочностные свойства оболочки согласно графикам

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	$\sigma_p^c$ , МПа	$\sigma_c^c$ , МПа	$\sigma_{cp}$ , МПа
1	$a$	шт	13	479,822	41,403	260,612
2	$\zeta$	-	0,3	479,927	88,978	284,452
3	$d_5$	м	0,0028	479,826	44,012	261,969
4	$d_1$	м	0,004	479,862	40,914	260,388
5	$d_2$	м	0,006	479,824	42,21	261,017
6	$\alpha$	град	40	479,827	37,279	258,553
7	$\sigma_c$	МПа	260	519,997	40,369	280,183

На основании данных таблицы 5.3.1, можно утверждать, что большое влияние на прочность оболочки оказывают коэффициент упаковки волокон в нити –  $\zeta$  и предел прочности связующего –  $\sigma_c$ . При этом, средняя приведенная прочность оболочки при изменении значения  $\zeta$  увеличивается за счет увеличения предела прочности стеклопластика на сжатие, а при изменении  $\sigma_c$  – за счет увеличения предела прочности стеклопластика на растяжение.

Таким образом, в случае, когда корпус головной части ракеты будет подвержен растягивающим нагрузкам или избыточному внутреннему давлению, необходимо достичь заданную прочность оболочки через увеличение предела прочности связующего. Если же преобладающим нагружением является сила лобового сопротивления, то увеличивать прочность целесообразно путем уменьшения коэффициента упаковки волокон в нити.

В нашем случае, максимальное значение средней приведенной прочности 284,452 МПа.

Однако, при изготовлении оболочки с такими прочностными характеристиками не выполняются условия (5.4). Более того, значения указанных показателей имеют абсолютно критичное значение «0» (Таблица 5.3.2), что указывает на возникновение критических ситуаций сразу по нескольким свойствам. При этом, приемлемого качества оболочки достичь не удастся.

Таблица 5.3.2 - Значения показателей критичности в процессе изготовления оболочки с максимальными значениями пределов прочности

Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение
$Y_{1.1.1}$	1	$Y_{2.1.1}$	1	$Y_{3.1.1}$	1
$Y_{1.1.2}$	1	$Y_{2.1.2}$	1	$Y_{3.1.2}$	1
$Y_{1.1.3}$	1	$Y_{2.1.3}$	1	$Y_{3.1.3}$	1
$Y_{1.1.4}$	1	$Y_{2.1.4}$	1	$Y_{3.1.4}$	1
$Y_{1.1.5}$	1	$Y_{2.1.5}$	1	$Y_{3.1.5}$	1
$Y_{1.2.1}$	1	$Y_{2.1.6}$	1	$Y_{3.1.6}$	1
$Y_{1.2.2}$	1	$Y_{2.1.7}$	0,999	$Y_{3.2.1}$	1
$Y_{1.2.3}$	1	$Y_{2.1.8}$	0,999	$Y_{3.2.2}$	1
$Y_{1.2.4}$	1	$Y_{2.1.9}$	1	$Y_{3.2.3}$	1
$Y_{1.3.1}$	1	$Y_{2.1.10}$	1	$Y_{3.2.4}$	1
$Y_{1.3.2}$	0,920	$Y_{2.1.11}$	1	$Y_{3.2.5}$	1
$Y_{1.3.3}$	0,995	$Y_{2.2.1}$	1	$Y_{3.2.6}$	1
$Y_{1.3.4}$	1	$Y_{2.2.2}$	1	$Y_{3.2.7}$	1
$Y_{1.3.5}$	1	$Y_{2.2.3}$	1	$Y_{3.2.8}$	0,990
$Y_{1.3.6}$	1	$Y_{2.2.4}$	0	$Y_{3.2.9}$	1
$Y_{1.3.7}$	1	$Y_{2.2.5}$	1	$Y_{3.2.10}$	1
$Y_{1.3.8}$	0,998	$Y_{2.2.6}$	0	$Y_{3.2.11}$	1
$Y_{1.1}$	1	$Y_{2.2.7}$	0,994	$Y_{3.2.12}$	1
$Y_{1.2}$	1	$Y_{2.2.8}$	0,982	$Y_{3.2.13}$	1
$Y_{1.3}$	0,989	$Y_{2.3.1}$	1	$Y_{3.2.14}$	1
$Y_1$	0,996	$Y_{2.3.2}$	0,990	$Y_{3.3.1}$	1
$Y_{1.1кач}$	1	$Y_{2.3.3}$	1	$Y_{3.3.2}$	1
$Y_{1.2кач}$	1	$Y_{2.4.1}$	0,881	$Y_{3.3.3}$	1
$Y_{1.3кач}$	0,996	$Y_{2.4.2}$	0	$Y_{3.3.4}$	1
$Y_{1кач}$	0,998	$Y_{2.4.3}$	0,928	$Y_{3.4.5}$	1
		$Y_{2.4.4}$	0,419	$Y_{3.1}$	1
		$Y_{2.4.5}$	0	$Y_{3.2}$	1
		$Y_{2.4.6}$	0,945	$Y_{3.3}$	0,944
		$Y_{2.4.7}$	1	$Y_3$	0,981
		$Y_{2.4.8}$	1	$Y_{3.1кач}$	1
		$Y_{2.4.9}$	0	$Y_{3.2кач}$	1
		$Y_{2.1}$	0,999	$Y_{3.3кач}$	0,994
		$Y_{2.2}$	0,747	$Y_{3кач}$	0,998
		$Y_{2.3}$	0,996		

Продолжение таблицы 5.3.2

	$Y_{2,4}$	0,575	
	$Y_2$	0,829	
	$Y_{2,1кач}$	0,988	
	$Y_{2,2кач}$	0,597	
	$Y_{2,3кач}$	0,997	
	$Y_{2,4кач}$	<b>0,748</b>	
	$Y_{2кач}$	0,832	

С помощью модели определим значения параметров, влияющих на прочность оболочки, при которых возникновение критических ситуаций не наблюдаются и выполняются все заданные условия (Таблица 5.3.3).

Таблица 5.3.3 - Зависимые параметры, обеспечивающие наивысшую прочность оболочки при отсутствии критических ситуаций

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	$\sigma^c_p$ , МПа	$\sigma^c_c$ , МПа	$\sigma_{ср}$ , МПа
1	$a$	шт	16	519,806	43,369	281,587
2	$\zeta$	-	0,8			
3	$d_5$	м	0,0021			
4	$d_1$	м	0,006			
5	$d_2$	м	0,008			
6	$A$	град	47,15			
7	$\sigma_c$	МПа	260			

Этим параметрам технической системы соответствуют следующие показатели критичности этапа намотки и всего процесса изготовления оболочки (Таблица 5.3.4).

Таким образом, найдены параметры технической системы, при которых достигаются максимальные значения средней приведенной прочности - 281,587 МПа и пределов прочности оболочки на растяжение и сжатие 519,806 МПа и 43.369 МПа соответственно.

Таблица 5.3.4 - Значения показателей критичности в процессе изготовления заготовки с максимальными значениями пределов прочности при отсутствии критических ситуаций

Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение
$Y_{1.1.1}$	1	$Y_{2.1.1}$	1	$Y_{3.1.1}$	1
$Y_{1.1.2}$	1	$Y_{2.1.2}$	1	$Y_{3.1.2}$	1
$Y_{1.1.3}$	1	$Y_{2.1.3}$	1	$Y_{3.1.3}$	1
$Y_{1.1.4}$	1	$Y_{2.1.4}$	1	$Y_{3.1.4}$	1
$Y_{1.1.5}$	1	$Y_{2.1.5}$	1	$Y_{3.1.5}$	1
$Y_{1.2.1}$	1	$Y_{2.1.6}$	1	$Y_{3.1.6}$	1
$Y_{1.2.2}$	1	$Y_{2.1.7}$	0,999	$Y_{3.2.1}$	1
$Y_{1.2.3}$	1	$Y_{2.1.8}$	0,999	$Y_{3.2.2}$	1
$Y_{1.2.4}$	1	$Y_{2.1.9}$	1	$Y_{3.2.3}$	1
$Y_{1.3.1}$	1	$Y_{2.1.10}$	1	$Y_{3.2.4}$	1
$Y_{1.3.2}$	0,920	$Y_{2.1.11}$	1	$Y_{3.2.5}$	1
$Y_{1.3.3}$	0,995	$Y_{2.2.1}$	1	$Y_{3.2.6}$	1
$Y_{1.3.4}$	1	$Y_{2.2.2}$	1	$Y_{3.2.7}$	1
$Y_{1.3.5}$	1	$Y_{2.2.3}$	1	$Y_{3.2.8}$	0,990
$Y_{1.3.6}$	1	$Y_{2.2.4}$	0,501	$Y_{3.2.9}$	1
$Y_{1.3.7}$	1	$Y_{2.2.5}$	1	$Y_{3.2.10}$	1
$Y_{1.3.8}$	0,998	$Y_{2.2.6}$	0,834	$Y_{3.2.11}$	1
$Y_{1.1}$	1	$Y_{2.2.7}$	0,990	$Y_{3.2.12}$	1
$Y_{1.2}$	1	$Y_{2.2.8}$	0,933	$Y_{3.2.13}$	1
$Y_{1.3}$	0,989	$Y_{2.3.1}$	1	$Y_{3.2.14}$	1
$Y_1$	0,996	$Y_{2.3.2}$	0,974	$Y_{3.3.1}$	1
$Y_{1.1кач}$	1	$Y_{2.3.3}$	0,944	$Y_{3.3.2}$	1
$Y_{1.2кач}$	1	$Y_{2.4.1}$	0,993	$Y_{3.3.3}$	0,792
$Y_{1.3кач}$	0,996	$Y_{2.4.2}$	0,312	$Y_{3.3.4}$	0,967
$Y_{1кач}$	0,998	$Y_{2.4.3}$	0,941	$Y_{3.4.5}$	0,962
		$Y_{2.4.4}$	0,168	$Y_{3.1}$	1
		$Y_{2.4.5}$	1	$Y_{3.2}$	0,999
		$Y_{2.4.6}$	0,986	$Y_{3.3}$	0,944
		$Y_{2.4.7}$	1	$Y_3$	0,981
		$Y_{2.4.8}$	1	$Y_{3.1кач}$	1
		$Y_{2.4.9}$	0,789	$Y_{3.2кач}$	0,999
		$Y_{2.1}$	0,999	$Y_{3.3кач}$	0,994

Продолжение таблицы 5.3.4

	$Y_{2.2}$	0,0,905	$Y_{3кач}$	0,998
	$Y_{2.3}$	0,989		
	$Y_{2.4}$	0,799		
	$Y_2$	0,923		
	$Y_{2.1кач}$	0,988		
	$Y_{2.2кач}$	0,853		
	$Y_{2.3кач}$	0,990		
	$Y_{2.4кач}$	<b>0,822</b>		
	$Y_{2кач}$	0,928		

При использовании параметров, указанных в таблице 5.3.3, критические ситуации не возникают, значение обобщенных показателей критичности находятся в установленных пределах, а оболочка имеет приемлемое качество по всем параметрам и максимально возможные прочностные характеристики.

### 5.3.2 Определение параметров системы для получения экономичной оболочки

Важным критерием качества стеклопластиковых оболочек является экономичность. Она связана, прежде всего, с эффективной работой оборудования и взаимодействия элементов технической системы [86]. В рамках решения задачи об эффективности изготовления стеклопластиковых оболочек, разработанные показатели критичности должны быть приближены к нулю, но не равные ему. В противном случае, приемлемое качество обеспечено не будет.

Целевая функция задачи в оптимизационной постановке будет иметь вид:

$$(Y_a, Y_k) \xrightarrow{x_i} \min, \quad (5.5)$$

где  $x_i$  - совокупность зависимых параметров (67 изменяемых параметров в т. ч. угол намотки, температура отверждения, шаг намотки и др.).

В этом случае, единственным ограничением будет

$$y_{i.j.l} \longrightarrow 0 \quad \text{НО} \quad y_{i.j.l} \neq 0 \quad (5.6)$$

С помощью математической модели найдены значения режимных параметров система, при которых полученная оболочка из стеклопластика является максимально экономичной (Таблица 5.3.5).

Таблица 5.3.5 - Параметры технологической системы, при которых достигается максимальная экономичность.

№	Обозначение параметра	Размерность	Значения	№	Обозначение параметра	Размерность	Значения
<b>Процесс пропитки</b>							
1	$K_n$	-	1	35	$\alpha$	град	48
2	$M_a$	КГ/М <sup>2</sup>	0,1	36	Код намотки	-	3
3	$M_c$	КГ/М <sup>2</sup>	0,0001	37	$\lambda$	град	14
4	$T_0$	°К	10	38	$\kappa$	-	0,38
5	$v_0$	Па·с	0,1	39	$S$	М	0,146
6	$\tau_{np}$	Сек.	1	40	$T_{об}$	Н	4000
7	$P_\kappa$	МПа	8	41	$\varphi$	град	15
8	$\sigma_{эф}$	Па	4	42	$\psi_{2n}$	град	0,35
9	$T_\tau$	°К	1	43	$\sigma_{вро}$	МПа	1
10	$N$	Па·с	18829,746	44	$m_l$	шт	1
11	$T_n$	°К	423,266	45	$S_{ш}$	Мм/об	110
12	$O_n$	-	0,207	46	$n_{ш}$	Об/мин	17,9
13	$\theta_{смф}$	°	99	47	$\delta_{опр}$	М	0,03
14	$v_\tau$	Па·с	7	<b>Процесс отверждения</b>			
15	$\Delta P_{вн}$	Па	5	48	$u_{наг}$		4,1
16	$S_{уд}$	мм <sup>2</sup>	20	49	$P_{вак}$	МПа	0,61
17	$V$	кг/с	0,7	50	$\tau_v$	сек	13510
18	$\sigma_{эст}$	Па	100	51	$\Delta t(x)$	°К	10,1
19	$\sigma_{тп}$	Па	100	51	$T_{н1}$	°К	288,5
20	$\sigma_{эп}$	Па	100	52	$P_n^m$	МПа	0,51
21	$V_l$	м/с	0,3	53	$u_{наг2}$	°К/с	5,1
22	$Q$	мм	0,123	54	$T_{зат}$	°К	385,5
23	$v_n$	Па·с	18	55	$P_{отв}$	МПа	1,71
<b>Процесс намотки</b>							
24	$Ra$	мкм	0,8	56	$\tau_{выд}$	сек	14410
25	$D_{0min}$	м	0,96	57	$l_{ул}$	-	0,061
26	$D_{0max}$	м	1,46	58	$V_{об}$	-	0,0055
27	$L_0$	м	1,78	59	$U_{отвл}$	°К/с	1

## Продолжение таблицы 5.3.5

28	$K_{обж}$	%	79	60	$W_{0ф}$	-	10
29	$m_{\partial}$	кг	1,4	61	$W_{ц}$	-	0,37
30	$\rho_{00}$	Кг/м3	720	62	$G_0$	кг	15,5
31	$S_2$	М2	0,21	63	$i_n$	-	23550
32	$T_{опр}$	К	40,8	64	$N_c$	-	8,1
33	$\tau_{наг}$	мин	76	65	$u_{омн}$	°К/с	5,1
34	$\psi$	мм	0,48	66	$T_{омн}$	°К	268,1
				67	$\Delta T_{омн}$	°К	100

При функционировании системы с этими параметрам, оказалось, что интенсивность проявления свойств минимальна, а вероятность возникновения критических ситуаций значительно увеличивается. Вместе с тем, качество оболочки остается на приемлемом уровне (но самом низком из возможных). Это подтверждается анализом значений вычисленных показателей критичности (Таблица 5.3.6).

Таблица 5.3.6 Значения показателей критичности в процессе изготовления оболочки при его максимальной эффективности

Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение
$y_{1.1.1}$	0,0002525	$y_{2.1.1}$	0,02	$y_{3.1.1}$	0,19
$y_{1.1.2}$	1	$y_{2.1.2}$	0,02	$y_{3.1.2}$	1
$y_{1.1.3}$	0,0023631	$y_{2.1.3}$	0,02	$y_{3.1.3}$	0,9639
$y_{1.1.4}$	0,003096	$y_{2.1.4}$	0,02	$y_{3.1.4}$	0,0396
$y_{1.1.5}$	0,00005	$y_{2.1.5}$	0,02	$y_{3.1.5}$	0,19
$y_{1.2.1}$	1	$y_{2.1.6}$	0,111111	$y_{3.1.6}$	0,19
$y_{1.2.2}$	1	$y_{2.1.7}$	0,054	$y_{3.2.1}$	0,0396
$y_{1.2.3}$	1	$y_{2.1.8}$	0,053756	$y_{3.2.2}$	0,0396
$y_{1.2.4}$	1	$y_{2.1.9}$	0,02	$y_{3.2.3}$	0,19
$y_{1.3.1}$	0,0796418	$y_{2.1.10}$	0,02	$y_{3.2.4}$	0,065556
$y_{1.3.2}$	0,920798	$y_{2.1.11}$	0,02	$y_{3.2.5}$	0,19
$y_{1.3.3}$	0,0757051	$y_{2.2.1}$	1	$y_{3.2.6}$	0,19
$y_{1.3.4}$	0,0159737	$y_{2.2.2}$	1	$y_{3.2.7}$	0,19
$y_{1.3.5}$	0,6349099	$y_{2.2.3}$	1	$y_{3.2.8}$	0,989579



Продолжение таблицы 5.3.6

$Y_{1.3.6}$	0,4160424	$Y_{2.2.4}$	0,999954533	$Y_{3.2.9}$	0,05
$Y_{1.3.7}$	0,2511245	$Y_{2.2.5}$	1	$Y_{3.2.10}$	0,077
$Y_{1.3.8}$	0,9090686	$Y_{2.2.6}$	0,98186172	$Y_{3.2.11}$	0,128889
$Y_{1.1}$	0,2011523	$Y_{2.2.7}$	0,99276382	$Y_{3.2.12}$	0,19
$Y_{1.2}$	1	$Y_{2.2.8}$	0,94632600	$Y_{3.2.13}$	0,065556
$Y_{1.3}$	0,412908	$Y_{2.3.1}$	1	$Y_{3.2.14}$	0,0975
$Y_1$	0,5380201	$Y_{2.3.2}$	0,966332	$Y_{3.3.1}$	0,0396
$Y_{1.1кач}$	0,6257939	$Y_{2.3.3}$	0,992597	$Y_{3.3.2}$	0,00665555
$Y_{1.2кач}$	1	$Y_{2.4.1}$	0,878035	$Y_{3.3.3}$	0,7547071
$Y_{1.3кач}$	0,4943646	$Y_{2.4.2}$	1	$Y_{3.3.4}$	0,95661986
$Y_{1кач}$	0,7067195	$Y_{2.4.3}$	0,943781	$Y_{3.4.5}$	0,94403941
		$Y_{2.4.4}$	0,146146	$Y_{3.1}$	0,428917
		$Y_{2.4.5}$	1	$Y_{3.2}$	0,178806
		$Y_{2.4.6}$	0,341309	$Y_{3.3}$	0,5403244
		$Y_{2.4.7}$	1	$Y_3$	0,38268224
		$Y_{2.4.8}$	0,090514	$Y_{3.1кач}$	0,942892
		$Y_{2.4.9}$	0,069366	$Y_{3.2кач}$	0,917881
		$Y_{2.1}$	0,029533	$Y_{3.3кач}$	0,95403244
		$Y_{2.2}$	0,99011326	$Y_{3кач}$	0,93826822
		$Y_{2.3}$	0,98631		
		$Y_{2.4}$	0,607683		
		$Y_2$	0,65341		
		$Y_{2.1кач}$	0,01479		
		$Y_{2.2кач}$	0,98807094		
		$Y_{2.3кач}$	0,987679		
		$Y_{2.4кач}$	0,822378		
		$Y_{2кач}$	0,703229		

На основании данных таблицы 5.3.6, можно сделать вывод о том, что при заданных начальных условиях свойства технической системы не могут проявляться максимально интенсивно и ее эффективность остается низкой.

Достичь наибольшей эффективности при сохранении приемлемого качества оболочки удастся по параметрам поставки армирующей основы, технологическим режимным параметрам процессов и параметрам оснастки. Меньше всего поддаются оптимизации параметры, связанные с прочностными характеристиками, пропитываемостью и фазовыми превращениями связующего.

Кроме степени эффективности работы системы, используя предложенную модель, можно вычислить параметры, значения которых должны быть минимальными: температурные режимы, длительность процессов и т.д .

Например, для установленных исходных данных, суммарная минимальная продолжительность учтенных временных процессов изготовления стеклопластиковой оболочки составляет 671,814 мин или 11,196 часа (максимальная продолжительность при наилучшем качестве оболочки – 1175,557 мин или 19,592 часа). Разница в длительности изготовления по первому и второму варианту составляет порядка 8 час., т.е. примерно одну смену. В условиях современного производства такое сокращение цикла дает существенную экономию денежных средств.

Максимальная температура в процессе изготовления стеклопластиковой оболочки по рассчитанным параметрам достигается в процессе отверждения оболочки и составляет 385,5 °К.

### **5.3.3 Поиск параметров технической системы для получения оболочки с минимальной массой**

Для всех летательных аппаратов, и особенно для ракетной техники одним из основных требований является минимальная масса конструкций и агрегатов. Доказано, что чем меньше вес самого аппарата, тем больше полезного груза он

сможет нести и доставлять на большую дальность. Для головных частей баллистических ракет это положение особенно актуально.

С помощью предложенной математической модели определим параметры технической системы изготовления оболочки, при которых достигается ее минимальная масса, но обеспечивается приемлемое качество (критических ситуаций не происходит).

Определять минимальную массу будем исходя из сводной массы оболочки (5.7), при этом за основу возьмем случай, когда достигается максимальная эффективность работы системы.

$$G_{об} = G_{св} + G_a \cdot \quad (5.7)$$

где  $G_{св}, G_a$  - масса связующего и армирующей основы.

В этом случае, целевая функция оптимизации будет иметь вид:

$$G_{об} \xrightarrow{x_i} \min, \quad (5.8)$$

где  $x_i$  - совокупность зависимых параметров.

$$x_i = \{a; \xi; d_1; d_2; d_5; \gamma_{см}; d_6; L_0\} \quad (5.9)$$

где  $a$  - количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки;  $\xi$  - коэффициент упаковки волокон в нити;  $d_1$  и  $d_2$  - толщина и ширина жгута;  $d_5$  - средний диаметр стекловолоконной нити;  $\gamma_{см}$  - плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно;  $d_6$  - диаметр элементарных волокон наполнителя;  $L_0$  - длина оболочки.

При расчете целевой функции необходимо учитывать, что ее минимальное значение должно обеспечивать приемлемое качество оболочки по другим свойствам, т.е. будет выполняться условие (5.6).

Как показал анализ графиков зависимостей показателей критичности от параметров процесса, приведенных в параграфе 5.2, на массу связующего и наполнителя оказывает влияние плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно-  $\gamma_{см}$ , диаметр элементарного волокна -  $d_6$ , длина оболочки -  $L_0$ ,

толщина и ширина жгута -  $d_1$  и  $d_2$ , количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки -  $a$ , коэффициент упаковки волокон в нити -  $\xi$  и ее средний диаметр -  $d_5$ . Все эти параметры не зависят от технологии изготовления оболочки и являются параметрами поставки, однако они оказывают существенное влияние на массу оболочки (Таблица 5.3.7).

Таблица 5.3.7 - Масса наполнителя и связующего и зависимые параметры

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	$G_{св}$ , МПа	$G_a$ , Мпа	$G_a$ , Мпа
<b>При максимальной экономичности процесса</b>						
1	$a$	шт	13	4,3494	45,622	49,923
2	$\Xi$	-	0,8			
3	$d_5$	м	0,002			
4	$d_1$	м	0,006			
5	$d_2$	м	0,008			
6	$\gamma_{cm}$	кг/м <sup>3</sup>	2380			
7	$d_6$	м	0,00001			
8	$L_0$	м				
<b>При минимальной массе наполнителя и связующего</b>						
1	$a$	шт	13	1,7466	37,3626	39,1092
2	$\Xi$	-	0,8			
3	$d_5$	м	0,002			
4	$d_1$	м	0,0045			
5	$d_2$	м	0,008			
6	$\gamma_{cm}$	кг/м <sup>3</sup>	2800			
7	$d_6$	м	0,0000087			
8	$L_0$	м	1,78			
<b>При высоком качестве оболочки</b>						
1	$a$	шт	16	5,8878	82,4729	88,3607
2	$\Xi$	-	0,8			
3	$d_5$	м	0,002			
4	$d_1$	м	0,006			
5	$d_2$	м	0,008			
6	$\gamma_{cm}$	кг/м <sup>3</sup>	2800			
7	$d_6$	м	0,00001			
8	$L_0$	м	2,2			

По данным таблицы 5.3.7 видно, что с изменением условий поставки компонентов стеклопластика в указанных пределах, ее масса может существенно изменяться (в данном случае почти в два раза).

Значения показателей критичности, соответствующих минимально возможной массе 39,109 кг, представлены в таблице 5.3.8.

Таблица 5.3.8 - Значения показателей критичности в процессе изготовления оболочки при минимальной массе

Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение
$Y_{1.1.1}$	0,0002525	$Y_{2.1.1}$	0,02	$Y_{3.1.1}$	0,19
$Y_{1.1.2}$	1	$Y_{2.1.2}$	0,02	$Y_{3.1.2}$	1
$Y_{1.1.3}$	0,0023631	$Y_{2.1.3}$	0,02	$Y_{3.1.3}$	0,9639
$Y_{1.1.4}$	0,003096	$Y_{2.1.4}$	0,02	$Y_{3.1.4}$	0,0396
$Y_{1.1.5}$	0,00005	$Y_{2.1.5}$	0,02	$Y_{3.1.5}$	0,19
$Y_{1.2.1}$	1	$Y_{2.1.6}$	0,111111	$Y_{3.1.6}$	0,19
$Y_{1.2.2}$	0,155	$Y_{2.1.7}$	0,054978	$Y_{3.2.1}$	0,0396
$Y_{1.2.3}$	1	$Y_{2.1.8}$	0,053756	$Y_{3.2.2}$	0,0396
$Y_{1.2.4}$	1	$Y_{2.1.9}$	0,02	$Y_{3.2.3}$	0,19
$Y_{1.3.1}$	0,0796418	$Y_{2.1.10}$	0,02	$Y_{3.2.4}$	0,065556
$Y_{1.3.2}$	0,920798	$Y_{2.1.11}$	0,02	$Y_{3.2.5}$	0,19
$Y_{1.3.3}$	0,0757051	$Y_{2.2.1}$	1	$Y_{3.2.6}$	0,19
$Y_{1.3.4}$	0,0159737	$Y_{2.2.2}$	1	$Y_{3.2.7}$	0,19
$Y_{1.3.5}$	0,6349099	$Y_{2.2.3}$	1	$Y_{3.2.8}$	0,98958
$Y_{1.3.6}$	0,4160424	$Y_{2.2.4}$	0,286	$Y_{3.2.9}$	0,05
$Y_{1.3.7}$	0,2511245	$Y_{2.2.5}$	1	$Y_{3.2.10}$	0,077
$Y_{1.3.8}$	0,9090686	$Y_{2.2.6}$	0,02730	$Y_{3.2.11}$	0,128889
$Y_{1.1}$	0,2011523	$Y_{2.2.7}$	0,9927638	$Y_{3.2.12}$	0,19
$Y_{1.2}$	0,78875	$Y_{2.2.8}$	0,9626373	$Y_{3.2.13}$	0,065556
$Y_{1.3}$	0,412908	$Y_{2.3.1}$	1	$Y_{3.2.14}$	0,0975
$Y_1$	0,4676034	$Y_{2.3.2}$	0,970481	$Y_{3.3.1}$	0,0396
$Y_{1.1кач}$	0,6257939	$Y_{2.3.3}$	0,998507	$Y_{3.3.2}$	0,00665555
$Y_{1.2кач}$	0,978875	$Y_{2.4.1}$	0,878035	$Y_{3.3.3}$	0,75470714
$Y_{1.3кач}$	0,4943646	$Y_{2.4.2}$	1	$Y_{3.3.4}$	0,95661986
$Y_{1кач}$	0,6996778	$Y_{2.4.3}$	0,95263	$Y_{3.4.5}$	0,94403941

Продолжение таблицы 5.3.8

$y_{2.4.4}$	0,174446	$Y_{3.1}$	0,428917
$y_{2.4.5}$	1	$Y_{3.2}$	0,178806
$y_{2.4.6}$	0,341309	$Y_{3.3}$	0,5403244
$y_{2.4.7}$	1	$Y_3$	0,38268225
$y_{2.4.8}$	0,090514	$Y_{3.1кач}$	0,942892
$y_{2.4.9}$	0,069366	$Y_{3.2кач}$	0,917881
$Y_{2.1}$	0,034531	$Y_{3.3кач}$	0,95403244
$Y_{2.2}$	0,78362056	$Y_{3кач}$	0,93826823
$Y_{2.3}$	0,989663		
$Y_{2.4}$	0,611811		
$Y_2$	0,604906		
$Y_{2.1кач}$	0,031284		
$Y_{2.2кач}$	0,6568670		
$Y_{2.3кач}$	0,990696		
$Y_{2.4кач}$	0,828631		
$Y_{2кач}$	<b>0,62687</b>		

Все показатели критичности процесса изготовления стеклопластиковой оболочки с минимальной массой находятся в некритичной области значений, что говорит о ее приемлемом качестве. Однако, обобщенные качественные показатели процессов несколько ниже, чем при других вариантах изготовления. Это связано с тем, то изменяемые режимные параметры системы остались теми же как и в случае получения оболочки при максимальной эффективности работы системы (они имеют минимальные значения), а изменились условия поставки армирующей основы.

Таким образом, с помощью математической модели удалось определить параметры, влияющие на массу оболочки и найти значения целевой функции, при которых сводная масса оболочки достигает минимального значения при сохранении приемлемого качества.

## 5.4 Выводы по ГЛАВЕ V

- 1) Система количественных оценок состояния стеклопластиковых оболочек, построенная на основе показателей критичности позволяет оптимизировать параметры технической системы, исходя из выбранного критерия эффективности (минимальная масса, продолжительность процессов и температурные режимы, максимальная прочность и экономичность) и проводить прогнозирование качества оболочки при экстремальном изменении режимных параметров (например, в случае отказа оборудования).
- 2) В результате применения построенной системы для оценки качества реальной стеклопластиковой детали, изготовленной методом намотки, доказано, что достижение максимального качества оболочки, равно как и ее экономичности одновременно по всем свойствам невозможно из-за большого количества взаимосвязанных параметров. Поэтому, значения обобщенного критерия эффективности всегда будут ниже значений частных критериев.
- 3) Выявлено, что масса оболочки существенно зависит от параметров компонентов стеклопластика и при изменении их значений даже в рамках в технических условий, может значительно увеличиваться за счет увеличения объемной плотности стекложгута;
- 4) Установлено, что для наиболее эффективного управления качеством оболочки необходимо, в первую очередь, изменять значения среднего диаметра стекловолоконной нити и угла намотки;
- 5) Доказано, что прочностью оболочки можно управлять путем изменения значений предела прочности связующего, количества пасм одного направления и толщины стекловолоконной нити. Оказалось, что при изменении этих параметров в установленном диапазоне значений, пределы прочности стеклопластика на растяжение и сжатие могут существенно изменяться .
- 6) Выявлено, что при увеличении ширины жгута увеличивается количество связующего необходимого для создания качественной оболочки. Это связано с увеличением значений коэффициентов объемной и весовой плотности

стеклопластика. Но при этом происходит снижение предела прочности материала на сжатие.

8) Показано, что с увеличением предела прочности на растяжение, вероятность возникновения внутренних дефектов снижается. Это наиболее сильно проявляется в случае увеличения предела прочности связующего.



## Заключение

В ходе выполнения диссертационного исследования достигнута цель – построена научно-обоснованная методика прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки и получены следующие результаты:

1) Предложен и экспериментально подтвержден алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки.

На его основе построена новая математическая модель, учитывающая 153 различных по физической природе параметров и возникновение 73 критических ситуаций.

В результате реализации модели определяются значения количественных оценок качества процесса изготовления, которые оказывают существенную интеллектуальную поддержку при принятии управленческих решений, позволяют выявлять моменты возникновения проблемных (критических) ситуаций и конструировать альтернативы развития технологических процессов с их учетом.

Структура математической модели допускает возможность корректировки выражений показателей и дополнение комплекса новыми - по мере выявления других свойств наполнителя и связующего, режимов и процессов пропитки, намотки и сушки оболочки;

2) Выбраны критерии оптимизации технологических параметров изготовления стеклопластиковых оболочек, на которые в значительной степени оказывают влияние возникающие критические ситуации. К таким критериям относятся максимальная прочность и экономичность и минимальная масса изделия.

Определены параметры технической системы, позволяющие эффективно управлять ее состоянием, среди которых угол смачивания наполнителя связующим, вязкость и температура связующего, степень обезжиривания, толщина - и масса подслоя и др.

3) Выявлены 73 критические ситуации, возникающие в процессе изготовления стеклопластиков, составлены выражения их количественных оценок в виде частных и обобщенных показателей критичности. Использование этих оценок позволило свести многокритериальную задачу оптимизации технологического процесса к однокритериальной и прогнозировать качество каждого этапа изготовления стеклопластиковых оболочек.

4) Разработана методика прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковых оболочек, применение которой в практической деятельности позволяет снизить количество брака при изготовлении на 20 %, более чем на 40 %, сократить длительность отработки новых композиционных изделий и осуществлять адаптацию процесса изготовления к изменяющимся условиям производства.

Разработанная методика и соответствующие математические модели опробована на «Воткинском заводе», что подтверждается актом внедрения, представленным в Приложении А.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Александров, В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин: Учебник/ В.А. Александров. – СПб.: Лань, 2016. – 368 с.
2. Андреева, А.В. Основы физикохимии и технологии композитов: учебное пособие для вузов / А.В. Андреева. – М.: ИПРЖР, 2001. – 192 с.
3. Антонов, А.В. Системный анализ: учеб. для вузов/ А.В.антонов. – 3-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 454 с.
4. Анферов, А.А, Шардакова, М.А. Получение информации о недопустимых режимах эксплуатации гидромашин/ А.А.Анферов// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. - №2. – С. 13-15.
5. Арсентьева, С.Н. Роль технологических факторов в формировании структурно – напряженного состояния конструкционных стеклопластиков: дис. ...канд. тех. наук: : 05.02.01/ Арсентьева Светлана Николаевна; АГТУ им. И.И.Ползунова; науч. рук. В.Б. Маркин. - Барнаул, 2005. - 129 с.
6. Афанасьев, В.Н Анализ временных рядов и прогнозирование: учебник/ В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: ФиС, ИНФРА-М, 2012. – 320 с.
7. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс/ Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
8. Блументаль, Г. Энгельс З., Справочник химика/Г. Блументаль: в 2-х томах. - Том 1. - М.: Мир, 1984. – 672 с.
9. Богданов, В. Н., Малежик, И. Ф., Верхола, А. П. Справочное руководство по черчению/ В. Н. Богданов. — М.: Машиностроение, 1989 — 864 с.
10. Богодухов, С.И. Технологические процессы в машиностроении: учебник / С.И. Богодухов, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов. - Ст. Оскол: ТНТ, 2012. - 624 с.
11. Бруштейн, Б.Е., Дементьев, В.И. Основы токарного дела/ Б.Е. Бруштейн. - М.: ВУПИ Профтехиздат, 1962 –160 с.
12. Ваганов, А. М., Калмычков, А.П., Фрид М.А. Проектирование корпусных конструкций из стеклопластика/ А.М.Ваганов. – Л.: «Судостроение», 1972. – 272 с.

13. Васильев, В.В., Криканов, А.А. Оптимальное армирование композитных систем с ограничениями по деформациям/ В.В. Васильев// Механика композитных материалов. - 1984 . - №2. - С.109-116
14. Васильев, К. К., Служивый, М. Н. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / М. Н. Служивый. – Ульяновск :УлГТУ, 2008. – 170 с.
15. Вдовин, В.М. Теория систем и системный анализ: Учебник для бакалавров / В.М. Вдовин, Л.Е. Суркова и др. - М.: Дашков и К, 2016. - 644 с.
16. Воробьев, В.А. Полимерные теплоизоляционные материалы/ В.А.Воробьев. - М.: Стройиздат, 1972. – 320 с.
17. Вольнов, О.И., Дудукин, Д.О. Стеклопластик. История развития, технология производства, формообразование деталей и современное применение/О.И. Вольнов//Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. -2014. - №5 (107). – С.400-404.
18. Голенков, В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков. - М.: Машиностроение, 2004. - 464 с.
19. Голубева, Н.В. Математическое моделирование систем и процессов: учебное пособие / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2013. - 192 с.
20. Горобец, Г.С. Теория вероятностей, математическая статистика и элементы случайных процессов / Г.С. Горобец. - М.: КД Либроком, 2013. - 232 с.
21. Гумеров, А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов: Учебное пособие / А.М. Гумеров. - СПб.: Лань, 2014. - 176 с.
22. Данелян, Т.Я. Теория систем и системный анализ: учебно-методический комплекс / Т.Я. Данелян. - М.: Ленанд, 2016. - 360 с.
23. Даньков, В.В. Моделирование процессов и систем: учебное пособие / В.В. Даньков, М.М. Скрипниченко, С.Ф. Логинова и др. - СПб.: Лань, 2015. - 288 с.
24. Дегтярев, Ю.И., Системный анализ и исследование операций/Ю.И. Дегтярев. – М.: Высшая школа, 1996. – 335 с.

25. Дворкин, Л.И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов / Л.И. Дворкин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. - 386 с.
26. Иванов, Д.А., Ситников А.И., Шляпин, С.Д. Дисперсноупрочненные волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы: учебное пособие/ Д.А. Иванов. – М.: МАТИ, 2009. – 306 с.
27. Ившин, В.П. Современная автоматика в системах управления технологическими процессами: учебное пособие / В.П. Ившин, М.Ю. Перухин. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 400 с.
28. Карпинос, Д.М. Композиционные материалы: справочник/Д.М. Карпинос. – Киев: Наукова думка, 1985. – 588 с.
28. Кербер, М.Л., Виноградов, В.М., Головкин, Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология/ М.Л.Кербер. – СПб.: Профессия, 2008.-560 с.
29. Козлов, В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений / В.Н. Козлов. - М.: Проспект, 2016. - 176 с.
30. Костиков, В.И., Маурах, М.А., Митин, Б.С. Высокотемпературные материалы/ В.И.Костиков. – М.: Металлургия, 1968. – 128 с.
31. Костиков, В.И., Варенков, А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы/ В.И. Костиков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 500 с.
32. Котелевский, Ю.М. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа/ Ю.М. Котелевский. - М.:Недра, 1976-496 с.
33. Комков, М.А., Тарасов, В.А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения/М.А.Комков. - М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2011. – 431 с.
34. Криканов, А.А Проектирование композитных баллонов давления минимальной массы при ограничениях по жесткости и прочности/ А.А. Криканов// Механика композиционных материалов и конструкций. – 1998. – Т.4. - №4. – С. 93-114.

35. Крыжановский, В.К., Бурлов, В.В., Паниматченко, А.Д. Технические свойства полимерных материалов/ В.К. Крыжановский. - СПб: изд-во «Профессия», 2003. - 240с.
36. Кудряшов, Е.А. Материалы и технологические процессы машиностроительных производств / Е.А. Кудряшов, С.Г. Емельянов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов. - М.: Альфа-М, НИЦ ИНФРА-М, 2012. - 256 с.
37. Кузьмин, В.В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения / В.В. Кузьмин. - М.: Высшая школа, 2008. - 279 с.
38. Куликов, Г.Г., Антонов, В.В., Антонов, Д.В., Шингареев, Ф.Ф. Стандартизация информационных потоков посредством интеграции информационных систем как инструмент автоматизации производства/ Г.Г. Куликов// Научное обозрение. – 2015. - №17. – С.152-155.
39. Куликов, Г.Г., Конев, К.А., Суворова, В.А. Теория систем и системный анализ: учебное пособие для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлениям 080800 (230700) "Прикладная информатика", 230100 "Информатика и вычислительная техника" / Г. Г. Куликов, К. А. Конев, В. А. Суворова. – Уфа.: ФГБОУ ВО УГАТУ Уфа. - 2012.- 159 с.
40. Куликов, Г.Г., Навалихина, Н.Д., Габассов, Р.К., Тымченко, А.А. Методика мониторинга проекта по критериям эффективности/ Г.Г.Куликов// Программные продукты и системы. - 2013. - № 4. - С. 82.
41. Кумаченкова,\* Ю.Ю., Уразбахтин, Ф.А. Комбинированные теплозащитные покрытия как эффективное средство сохранности боевых зарядов в стратегических ракетах от температурных воздействий/ Ф.А. Уразбахтин // XXIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: сборник материалов.( Казань, КВВКУ 17-19 мая 2011 г.). -Казань, 2011. - С. 177-178

42. Кустов, М.А. Изучение эффективности использования интеллектуальных материалов в композиционных структурах/ М.А.Кустов//Труды МАИ. - 2012. - № 51. - С. 3
43. Леонтьев, С.К. Технологическое прогнозирование и планирование: российский и зарубежный опыт, перспективы для отечественного оборонно-промышленного комплекса / С.К. Леонтьев, А.М. Губинский. - М.: Моск.университета, 2014. - 248 с.
44. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам / Дж. Любин: в 2 кн.2. - М.: Машиностроение, 1988. - 446 с
45. Лыков, А.В. Теория сушки/ А.В.Лыков. - М.: Энергия, 1968. – 472 с.
46. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности/ М.В.Лыков. - М.: Химия, 1970. – 432 с.
47. Максанова Л.А., Аюрова О.Ж. Полимерные соединения и их применение: учебное пособие/ Л.А. Максанова . - Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2005. - 356 с.
48. Манапова, Л.З., Зазыбин, А.Г., Зиганшин, М.А. Практическое руководство к лабораторным работам по физической и коллоидной химии. Для студентов геологического факультета/ Л.З. Манапова. - Казань: Казанский государственный университет, 2008. - 69 с.
49. Мендель, А.В. Модели принятия решений: учебное пособие / А.В. Мендель. - М.: ЮНИТИ, 2013. - 463 с.
50. Мороз, В.Г. Методические указания к лабораторно-практической работе «Назначение допуска, выбор измерительных средств и измерение биения вала»/ В.Г. Мороз. - М.: 2001.
51. Мэттьюз, Ф., Ролингс, Р. Композитные материалы. Механика и технология/ Ф. Мэттьюз. -М.: Техносфера, 2004. - 408с.
52. Никитин, А.В. Компьютерное моделирование физических процессов/ А.В. Никитин. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. - 679 с.

53. Никифоров, А.Д. Теоретические основы прогнозирования в технике и технологии. / А.Д. Никифоров, А.Н. Ковшов, А.Г. Схиртладзе. - М.: Высшая школа, 2010. - 519 с.
54. Острейковский, В.А. Теория систем/ В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 1997. – 240 с.
55. Образцов, И.Ф., Бакулин, В.Н. Уточненные модели для исследования напряженно-деформационного состояния трехслойных цилиндрических оболочек/ И.Ф.Образцов // Доклады Академии наук. - 2006. - Т. 407. - № 1. - С. 36-39.
56. Образцов, И.Ф., Васильев, В.В., Бунаков, В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов/ И.Ф.Образцов. - М.: Машиностроение, 1977. - 141 с.
57. Пономарев, М.И., Тененев, В.А., Якимович, Б.А. Анализ систем данных с неопределенностью: учебное пособие для студентов вузов / М.И. Пономарев. - Ижевск: Изд-во ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова, 2011.- 288 с.
58. Пэйгано, Н. Межслойные эффекты в композитных материалах/ Н. Пэйгано. - М.: Мир, 1993. — 346 с.
59. Речкалов, А.В., Куликов, Г.Г., Антонов, В.В., Артюхов А.В. Разработка формальной модели производственного процесса с применением корпоративной информационной системы/ А.В. Речкалов// Научное обозрение. - 2015. - № 12. - С. 187-196.
60. Сафин, В.Н. Композиционные материалы/ В.Н. Сафин. – Челябинск: Изд-во «Центр» ЮУрГУ, 2010. - 36 с.
61. Соколовский М.И., Шатров В.Б., Шайдурова Г.И., Лобковский Д.С. Влияние межфазного взаимодействия между полимерной матрицей и наполнителями на эксплуатационные характеристики макрогетерогенных систем полимерных композиций/ А.А. Ассовский, Г.К. Берлин// Космический вызов XXI века: сборник статей.- 2016.- С. 275-280.



62. Ставров, В. П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров. - Минск: БГТУ, 2006. - 482 с.
63. Стрельников, С.В., Петухов, В.И., Постнов, В.И., Швец, Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера/ С.В. Стрельников// Известия Самарского научного центра РАН. - 2011. - Том 13. - №4 (2). – С 498-507.
64. Тененев, В.А., Шаура, А.С., Якимович, Б.А. Структурно-параметрическая оптимизация и управление: монография/ В. А. Тененев, А. С. Шаура, Б. А. Якимович - Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2014. – 235 с.
65. Тененёв, В.А., Якимович, Б.А. Методы анализа и моделирования систем/В.А. Тененев, Б.А.Якимович. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. - 152 с.
66. Тимофеев, Н.Е., Абдуллин, И.А., Белобородова, О.И., Богатеев, Г.Г. Основы производства изделий из стеклопластика: учебное пособие/ Н.Е. Тимофеев. – Казань, КГТУ, 2006. – 160 с.
67. Трофимов, Н.Н., Канович, М.З. Основы создания полимерных композитов / Н.Н. Трофимов. - М.: Наука, 1999. — 539 с.
68. Тучинский, Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л.И.Тучинский. - М.: Металлургия, 1986. — 208 с.
69. Уразбахтин, Ф.А. Многокритериальность при функционировании сложных технических устройств/Ф.А. Уразбахтин //Автоматизация и современные технологии. - 1996. - № 12. С. 5-8.
70. Уразбахтин Ф.А. Критические ситуации в процессе жизненного цикла технических систем/ Ф.А.Уразбахтин// Всероссийская научно-практическая конференция «Современные аспекты компьютерной интеграции машиностроительного производства»: сборник материалов, 2003. С. 6-10.
71. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю. Математическая модель пропитки препрега для изготовления волокнистых конструкционных композитных материалов/ Ф.А. Уразбахтин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – №2 (22). - С 100-110.

72. Уразбахтин, Ф.А. Критические ситуации в жизненном цикле ракетного комплекса / Ф.А. Уразбахтин // Вестник академии военных наук . - 2011. - №3. С.129-131.
73. Уразбахтин, Ф.А. Особенности проектирования сложных функционирующих систем// Ф.А. Уразбахтин / Автоматизация и современные технологии. - 1996. - № 10. С. 14-16.
74. Уразбахтин, Ф.А. Особенности уравнивания функционирующих машиностроительных конструкций/Ф.А. Уразбахтин// Известия вузов. Машиностроение, 1992. - № 7. С. 48.
75. Уразбахтин, Ф.А. Управление выходом из критического состояния при функционировании технических устройств/ Ф.А. Уразбахтин // Автоматизация и современные технологии. - 1998. - № 11. С. 15-20.
76. Уразбахтин, Ф.А., Уразбахтина, А. Ю., Репко, А.В. Динамика критических ситуаций в алмазном шлифовании/Ф.А. Уразбахтин. - Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2005. - 176 с.
77. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю., Болонкин, В.А. Предельные состояния в процессе отверждения волокнистых стеклопластиков/ Ф.А. Уразбахтин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015.- №3. – С 79-85.
78. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю., Рыбин, А.Н. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности многоступенчатых ракет/ Ф.А. Уразбахтин // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012»: тезисы докладов. ( Москва МАИ, 13-15 ноября 2012 г.). – СПб.: Мастерская печати. - 2012. – С 160-161.
79. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю., Уразбахтин, В.Ф. Математическая модель теплозащиты головной части с учетом возникновения критических ситуаций в процессе полета ракеты/ Ф.А. Уразбахтин // Известия вузов. Авиационная техника. - 2014. - №1. - С 73-77.
80. Уразбахтин, Ф.А., Герасимов, Е.Н. Оптимизация по одному и многим критериям балочных статически неопределимых систем при динамических

ограничениях/ Ф.А. Уразбахтин. // Сб. “Оптимизация конструкций при динамических нагрузках”. - Тарту: Изд-во ТГУ, 1979. - С. 64-66.

81. Уразбахтин, Ф.А., Уразбахтина, А.Ю., Хмелева, А.В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракет/Ф.А. Уразбахтин. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 408 с.

82. Уразбахтина А.Ю., Никитина О.В., Уразбахтин Ф.А., Харина Ю.Ю. Разработка системы количественных оценок качества выполнения технологических процессов изготовления силовых корпусов частей многоступенчатой ракеты/ А.Ю. Уразбахтина //Отчет о НИР № 14. В37.21.1838 от 14.10.2012 (Министерства образования и науки) - 300 с.

83. Усиченко М.В. Регулирование технологических и эксплуатационных свойств в системе пэнд-эпоксидный стеклопластик: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06/ Усиченко Михаил Васильевич; РХТУ им. Д. И. Менделеева.- Москва, 2004 . - 182 с.

84. Фатиков, В.С., Куликов, Г.Г., Трушин, В.А., Ганеев, А.А., Абдулнагимов, А.И. Концепция интеллектуального мониторинга состояния лопаток турбин в процессе эксплуатации авиационных ГТД/ В.С. Фатиков, Г.Г. Куликов// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, 2013. - Т. 17. - № 4. - С. 11-17.

85. Фоминых, Р.Л., Якимович, Б.А., Коршунов, А.И. Исследование и определение показателей организационно-технического уровня производственных систем машиностроения/ Р.Л. Фоминых// Научно-практическая конференция «Высокие технологии в механике» сборник материалов. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ. - 2002. С. 52-53.

86. Фоминых, Р.Л., Коршунов, А.И., Якимович, Б.А. Метод прогнозирования трудоемкости изготовления машиностроительного изделия с учетом организационно-технического уровня производственной системы/ Р.Л. Фоминых, А.И. Коршунов, Б.А. Якимович // Экономика и производство, 2003. - № 4. - С. 43-46.

87. Фридляндер, И. Н. Свойства композиционных материалов и эффективность их применения/ И.Н. Фридляндер// Композиционные материалы: сборник материалов. - М.: Наука. - 1981. - С. 5- 11..
- 88.Харинова Ю.Ю., Уразбахтин Ф.А. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности ракет методом напыления / Ю.Ю.Харинова // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке-2013: сборник научных трудов. (Ижевск, ИжГТУ, 23-25 апреля 2013 г.). – Ижевск, изд-во ИжГТУ. - 2013. – С 254-255.
89. Христюбов, В.Л., Куликов, Г.Г., Минаева, С.И Концептуальная модель управления капитальным ремонтом авиационных ГТД в условиях серийного предприятия/ В.Л.Христюбов// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16.№ 2 (47). С. 203-209
90. Цыплаков, О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек/ О.Г. Цыплаков. - Л.: Машиностроение, 1968. 176 с.
91. Шайдурова, Г.И., Лузенин, А.Ю., Ефремов, А.Н. Расчетно-экспериментальные исследования процессов десорбции влаги из внутренних оболочек типа «Кокон», выполненных из композиционных материалов/ И.Г. Ассовский, А.А. Берлин, Г.К. Коротаев// Космический вызов XXI Века: сборник статей. - Москва, 2016. - С. 294-298.
92. Шаракшанэ, А.С., Железнов, И.Г., Сложные системы/ А.С. Шаракшанэ. – М.: Высшая школа, 1977. – 261 с.
93. Этих, Ю.К., Бухаров, С.В, Виноградов, В.М. Методический подход к оптимизации технологических параметров процесса изготовления листовых упрочненных термопластов/ Ю.К. Этих.// Известия ВолгГТУ, 2010. - Том 4. - №4. - С.65-69
94. Якимович Б.А., Михайлов Ю.О., Дресвянников Д.Г., Майер В.А. Разработка прогрессивных технологий и освоение изготовления корпусов ракетной техники/ Б.А.Якимович//Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 2012. - № 4. - С. 45-49.

95. Сівуцький В.І., Кричковська Л.А., Колосова О.П. Кінетика процесу просочування волокнистих наповнювачі композиціями епоксидних полієрів / В.І. Сівуцький // Прикладная физика и материаловедение. Восточно-Европейский журнал передовой технологии. - 2013. - №215 (62). - С.13-16.
96. Справочник материалов/Армирующие материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sammas.ru/spravochnik-materialov/armiruyushchie-materialy>. - Время обращения: 30.11.2014. 16:38
97. Лаборатория тюнинга/ Стеклопластик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://laboratoriatinga.ru/stekloplastik/stekloplastik\\_11.html](http://laboratoriatinga.ru/stekloplastik/stekloplastik_11.html) . - Время обращения: 30.11.2014. 13:32
98. Вессервис плюс/ Классификация весов и весового оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.vesserviceplus.com](http://www.vesserviceplus.com). [www.ukrtrade.ru](http://www.ukrtrade.ru) . - Время обращения: 22.11.2014. 12:36.
99. ООО "ЭКСИМКАРГОТРЕЙД"/ Контрольно- измерительные приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ukrtrade.ru](http://www.ukrtrade.ru) . - Время обращения: 21.11.2014. 15:23
100. Ареометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> . - Время обращения: 30.11.2014. 10:53
101. Пикнометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.porometer.ru/picnometers/> . - Время обращения: 30.11.2014 15:22.
102. Прибор для определения коэффициента трения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://labdepot.ru/view.php?id=563>. - Время обращения: 30.11.2014.16:09

УТВЕРЖДАЮ



Главный инженер-  
технический директор  
АО «Воткинский завод»  
Кузин Р.Ф.  
2016 г.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

«06» сентября 2016 г.

Мы, нижеподписавшиеся: представитель ВФ ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», д.т.н., профессор УРАЗБАХТИН Ф.А. и представитель предприятия – Главный химик ФОНАРЕВ Ю.М. составили настоящий акт, которым подтверждаем, что в ходе выполнения работ по усовершенствованию технологического процесса изготовления стеклопластиковых заготовок методом намотки внедрены в практику расчетов на АО «Воткинский завод» следующие материалы:

№	Содержание	Достигнутая эффективность
1	Математические модели процессов пропитки, намотки и отверждения стеклопластиковых заготовок (отв. Исполнители: Харинова Ю.Ю., Уразбахтин Ф.А)	Автоматизация расчетов по определению параметров процесса пропитки стеклопластиковых заготовок
2	Методика, алгоритм и программам прогнозирования и оценки качества процесса изготовления стеклопластиковых заготовок методом намотки (отв. Исполнители: Харинова Ю.Ю., Уразбахтин Ф.А)	Повышение качества изготовления стеклопластиковых заготовок методом намотки и сокращение брака на 20 %

Представитель ВФ ФГБОУ ВПО  
«ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»  
д.т.н., профессор Уразбахтин Ф.А.

Главный химик  
АО «Воткинский завод»  
Фонарев Ю.М.

**Средства измерения параметров технической системы  
«Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки»**

1. Средство измерения массовых характеристик.

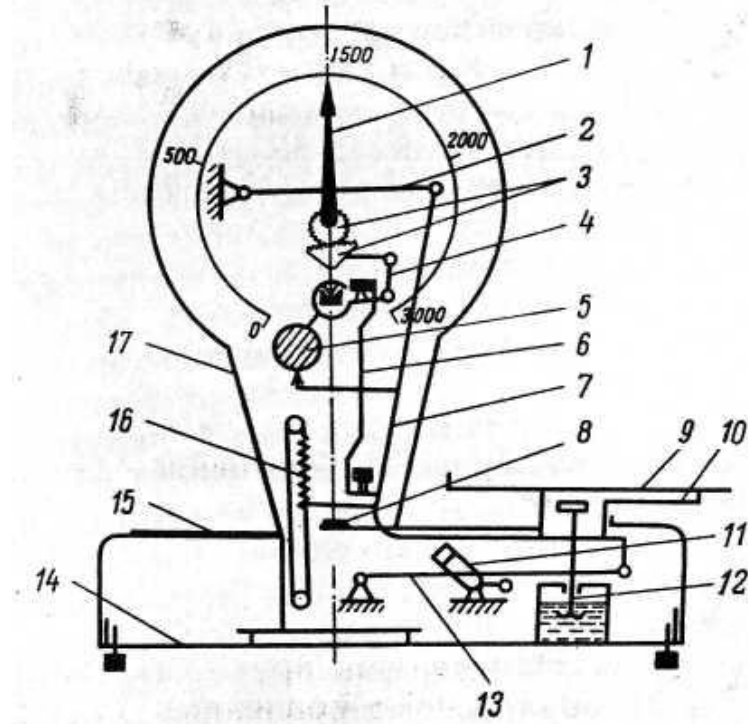


Рисунок 1 – Схема настольных циферблатных весов РН-10Ц13У:

1 – стрелки; 2 – струнка; 3 – зубчатая пара; 4 – шарнирный параллелограмм; 5 – квадрантный измеритель силы; 6 – стяжка; 7 – грузоприемный рычаг; 8 – уровень; 9 – грузоприемная площадка; 10 – тарировочная площадка; 11 – изолир; 12 – шток успокоителя; 13 – главный рычаг; 14 – плита; 15 – кожух; 16 – тарокомпенсатор; 17 – корпус.

## 2. Средство измерения вязкости связующего.

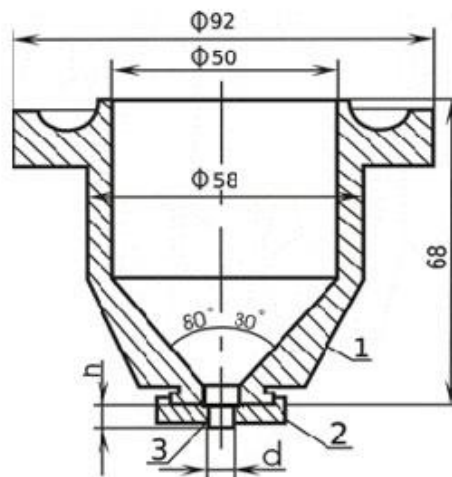


Рисунок 2 - Вискозиметр ВЗ-246 ГОСТ 9070-75:

1 - резервуар; 2 - гайка; 3 – сопло.

## 3. Средство измерения температуры.

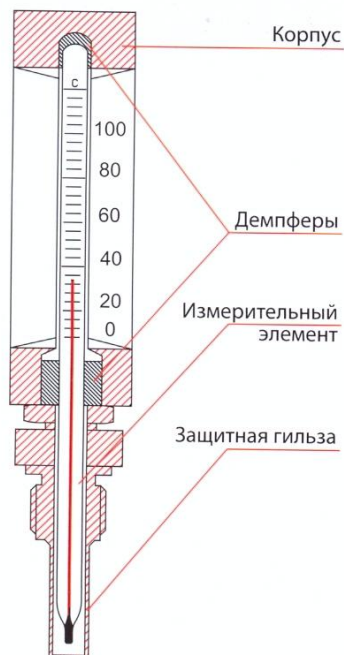


Рисунок 3 - Устройство термометра ТТ ГОСТ 2823-73



## 4. Средства измерения линейных размеров.

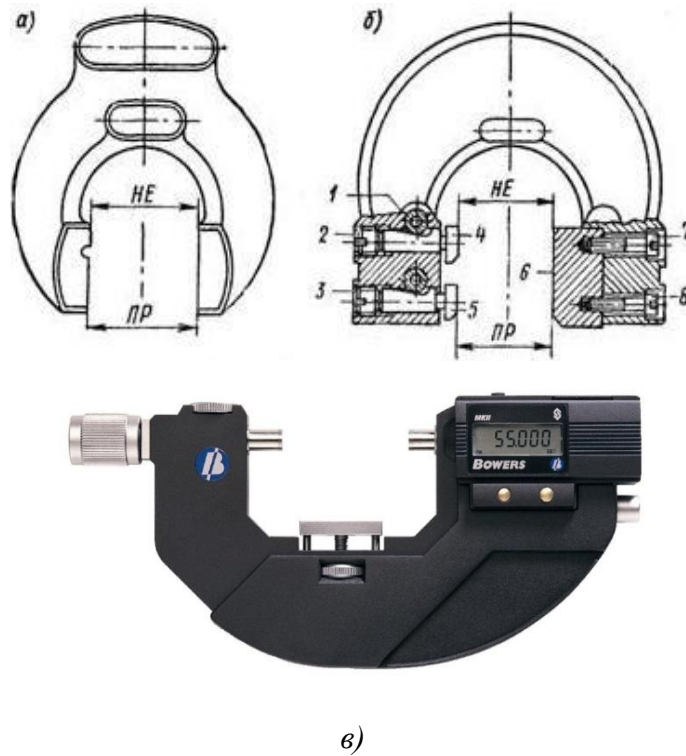


Рисунок 4 – Скобы измерительные:

а) односторонняя скоба с проходным и непроходным диаметром; б) регулируемая предельная скоба: 1 - стопорные винты; 2 и 3 - измерительные штифты; в) электронная скоба.

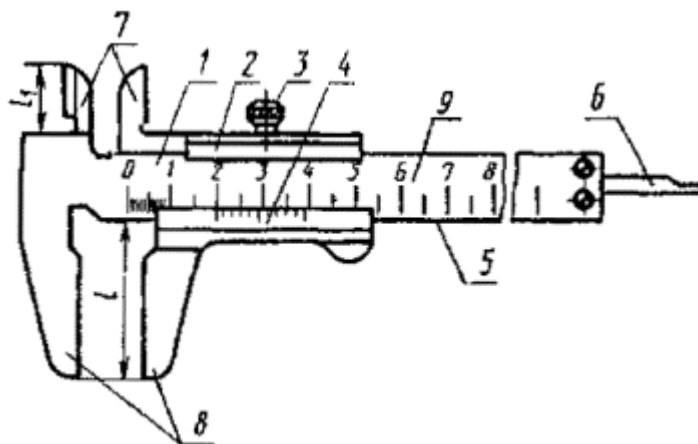


Рисунок 5 - Штангенциркуль ШЦ:

1 - штанга; 2 - рамка; 3 - зажимающий элемент; 4 - нониус; 5 - рабочая поверхность штанги; 6 - глубиномер; 7 - губки с кромочными измерительными

поверхностями для измерения внутренних размеров; 8 - губки с плоскими измерительными поверхностями для измерения наружных размеров; 9 - шкала штанги.

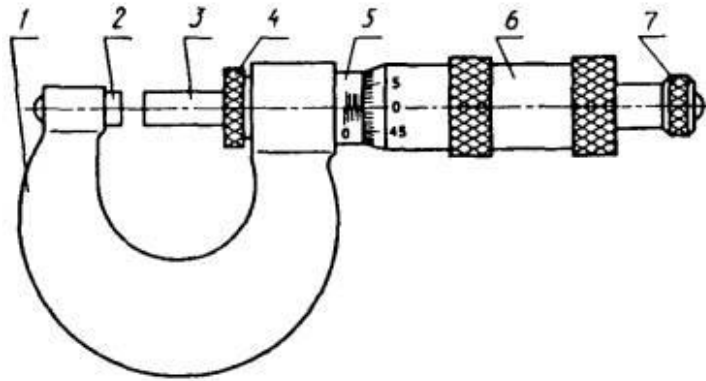


Рисунок 6 - Микрометр МК:

1 - скоба; 2 - пятка; 3 - микрометрический винт; 4 - стопор; 5 - стержень; 6 - барабан; 7 - трещотка (фрикцион).

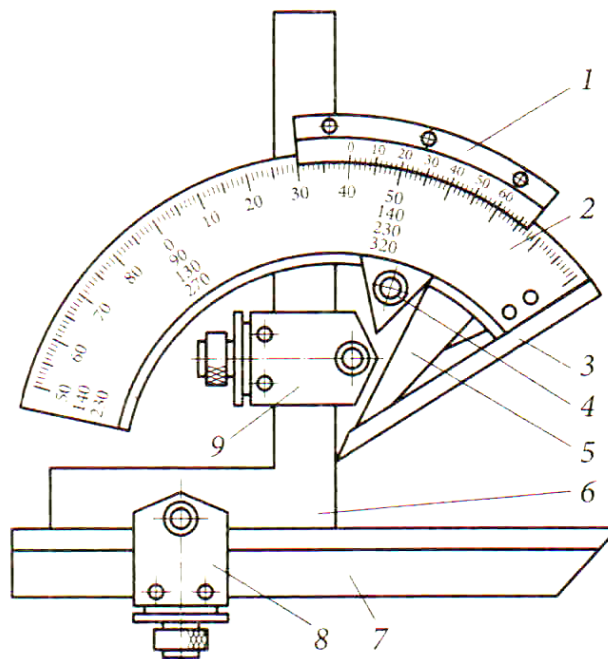


Рисунок 7- Угломер универсальный:

1 - нониус; 2 - основание; 3 - линейка; 4 - стопор; 5 - сектор; 6 - угольник; 7 - съемная линейка; 8 - державка линейки; 9 - державка угольника.

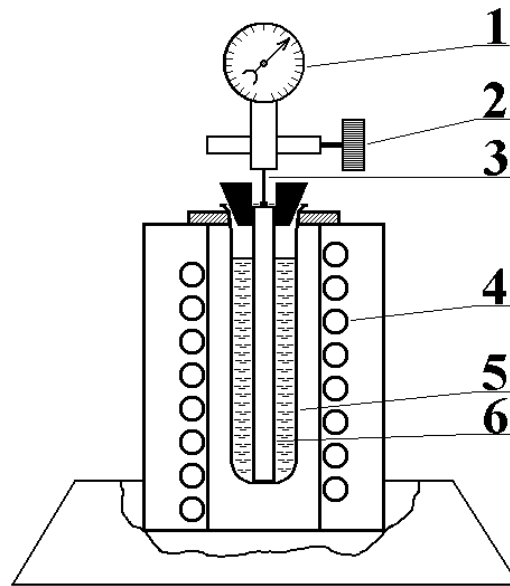


Рисунок 8- Прибор для измерения температурных коэффициентов линейного расширения: 1- индикатор; 2- винт; 3 – толкатель; 4 – печь; 5- пробирка с водой; 6 – образец.

#### 5. Измерение шероховатости поверхности

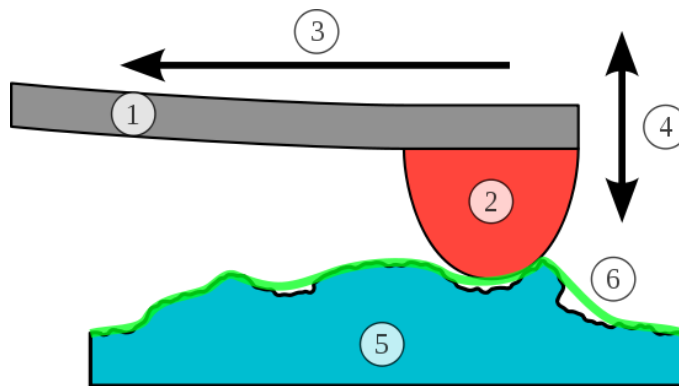


Рисунок 9- Схема измерения шероховатости профилометром.

Консоль (1) держит иглу (2) и перемещается в горизонтальном направлении (3) над поверхностью объекта (5). Движение иглы, повторяя основные неровности профиля, перемещает консоль вертикально. График вертикальных позиций (4) считается измеренным профилем поверхности (6).