

УДК 677.02

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕТЕРМОСТОЙКИХ ТКАНЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ-СПАСАТЕЛЕЙ

Дмитракович Н.М.*, Русецкий Ю.Г.*, к.т.н., Ольшанский В.И.***, к.т.н., профессор,
Грудинский М.В.*, Гречишников Е.А.*

* Научно-исследовательский центр Витебского областного управления
МЧС Республики Беларусь

** Витебский государственный технологический университет

Статья посвящена определению параметров технологического процесса получения огнетермостойких тканей специального назначения при помощи экспериментальных исследований. Полученные результаты позволяют оптимизировать диапазон скорости движения ткани основы, а также установить и оптимизировать режимы термообработки полимерных покрытий на ткани основы.

(Поступила в редакцию 26 мая 2008 г.)

Введение

Технология получения огнетермостойких тканей специального назначения характеризует ряд огнетермостойких, физико-механических свойств данных материалов. Большое влияние на структуру и свойства специальных тканей оказывает особенность нанесения полимерных многослойных жаростойких покрытий и оптимизация режимов их термообработки для обеспечения заданных характеристик тканей. Поэтому поиск оптимальных технологических параметров процесса является одной из важнейших целей в разработке технологии производства тканей данного типа.

В этой связи предлагается решить следующие задачи:

– определить основные параметры технологического процесса получения огнетермостойких тканей с металлизированным покрытием на технологической линии «*NUOVA ISOTEX*»;

– установить оптимальный диапазон скорости движения ткани основы при ракельном нанесении многослойных полимерных покрытий, в котором будет обеспечиваться качественное и равномерное нанесение покрытий на специальную огнетермостойкую ткань с металлизированным покрытием;

– установить и оптимизировать режимы термообработки полимерных многослойных покрытий на ткани основы, установить влияние технологических параметров на свойства огнетермостойких тканей специального назначения с металлизированным покрытием.

1. Экспериментальное исследование процесса ракельного нанесения полимера на ткань основы для получения специальных огнетермостойких тканей с металлизированным покрытием

Определим максимальную скорость истечения вязкого полимерного композита по ракелю типа «пятка», определим диапазон изменения минимальной и максимальной скорости транспортирования ткани основы, в котором будет равномерное и качественное наложение полимера на ткань основы. Для этого необходимо провести расчет скорости торможения вязкотекучего полимерного композита.

На рисунке приведена схема нанесения вязкого полимерного композита на ткань основы.

Центр системы координат располагаем в серединной плоскости, а ось *OZ* направляем перпендикулярно к ограничивающим поток плоскостям.

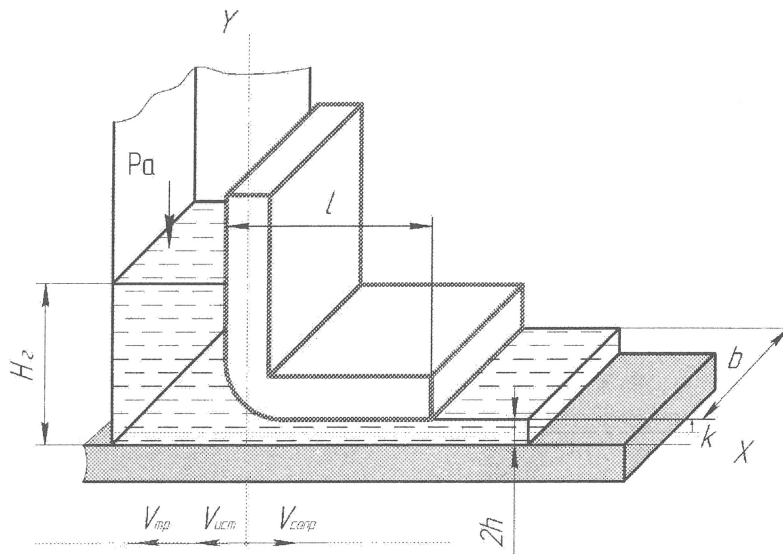


Рисунок – Схема нанесения вязкого полимерного композита на ткань основы

Будем полагать, что движение происходит в плоскостях, параллельных границам потока. Кроме того, с целью линеаризации уравнений откинем от них конвективные члены (ускорения). Пренебрегая действием объемных сил и считая движение стационарным, составим систему уравнений (1) [1, с. 464].

$$\left. \begin{aligned} \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial p}{\partial y}, \\ 0 &= \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где u, v – компоненты скорости;
 p – давление;
 μ – коэффициент вязкости системы.

Подчиним компоненты скорости граничным условиям:

$$u = v = 0 \text{ при } 0 \leq k \leq h, \quad (2)$$

где h – половина толщины наложения полимерного композита;
 k – текущее наложение полимерного композита.

Согласно третьему уравнению системы давление p является функцией только x и y . С другой стороны, взяв производную по x от обеих частей первого уравнения системы (1), по y – от второго уравнения той же системы и сложив результаты, получим уравнение Лапласа для определения $p(x, y)$:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Используя выражение (3) и выражение скорости w [1, с. 435] для плоского ламинарного движения вязкой несжимаемой жидкости между двумя безграничными плоскостями, которое можно представить себе как предельный случай течения по призматической трубе прямоугольного сечения, если одну сторону прямоугольника сохранять равной $2h$, а другую устремить к бесконечности, получим выражение для скорости u (4):

$$u = -\frac{h^2}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \left[1 - \left(\frac{k}{h} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Так как истечение жидкости происходит под действием гидростатического напора высотой H_Γ , то уравнение скорости (4) примет вид:

$$u = \frac{h^2}{2 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{1} \cdot \left[1 - \left(\frac{k}{h} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где μ^* – среднее значение динамической вязкости неньютоновской жидкости, Па·с;
 H_Γ – гидростатический напор жидкости, м;
 $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 l – длина ракеля, м;
 k – текущее значение толщины полимерного композита на ткани основы, м.

При $k = 0$ максимальное значение скорости сопротивления течению жидкости u_{max} описывается по формуле (6):

$$u_{\text{max}} = \frac{h^2}{2 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{1}. \quad (6)$$

Определим величину средней скорости сопротивления $u_{\text{ср}}$ течения жидкости по теореме о среднем [2, с. 285] по формуле (7):

$$u_{\text{ср}} = \frac{h^2}{4 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{1}. \quad (7)$$

Объемный расход жидкости Q определяется по формуле (8):

$$Q = \frac{h^2}{4 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{l} \cdot 2 \cdot h \cdot b = \frac{h^3}{4 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{l} \cdot b, \quad (8)$$

где Q – объемный расход жидкости, м³/с;
 b – ширина нанесения, м.

Массовый расход Q_m определяется по формуле (9):

$$Q_m = \frac{h^3}{4 \cdot \mu^*} \cdot \frac{H_\Gamma \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{l} \cdot b \cdot \rho_{\text{ж}}, \quad (9)$$

где Q_m – массовый расход жидкости, кг/с.

Расчетную скорость $V_{\text{сопр}}$ сопротивления за счет сил торможения вязкой жидкости определяем по формуле (10):

$$V_{\text{сопр}} = \frac{Q_m}{\rho_{\text{пов}} \cdot b}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{пов}}$ – поверхностная плотность наносимого полимерного композита на материал основы, кг/м².

Для определения скорости истечения вязкой жидкости необходимо определить критерий Рейнольдса по выражению [3, с. 297]:

$$\text{Re} = \frac{d_{\text{экр}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\Gamma}}}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (11)$$

где $d_{\text{экр}}$ – эквивалентный диаметр, определяемый по выражению (12);
 ν – кинематическая вязкость жидкости, определяемая по формуле (13), Ст.

$$d_{\text{экр}} = 4 \cdot \frac{b \cdot l}{2 \cdot (b + l)}, \quad (12)$$

$$\nu_{\text{ж}} = \frac{\mu^*}{\rho_{\text{ж}}}. \quad (13)$$

Скорость истечения вязкой жидкости через рапель рассчитаем по формуле (14):

$$V_{\text{ист}} = \varphi_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\Gamma}}, \quad (14)$$

где φ_s – коэффициент скорости, зависящий от критерия Рейнольдса.

Коэффициент скорости определяется по графику А.Д. Альтшуля [3, с. 298].

Максимальная скорость транспортирования материала основы, при которой еще обеспечивается равномерное качественное наложение полимерного композита, определяется по формуле (15):

$$V_{\text{тр}} = V_{\text{ист}} - V_{\text{сопр}}. \quad (15)$$

Проведем расчет максимальной скорости транспортирования материала основы для нанесения полимерной композиции. Скорость транспортирования должна удовлетворять условию (16):

$$V_{\text{сопр}} < V_{\text{тр}} \leq V_{\text{ист}}. \quad (16)$$

Исходные данные для расчета:

- средняя динамическая вязкость полимерного композита: $\mu^* = 16,99$ Па·с;
- высота столба жидкости гидравлического напора: $H_{\Gamma} = 0,03$ м;

- линейный размер ракеля: $l=0,0025$ м;
- ускорение свободного падения: $g = 9,81$ м/с²;
- величина половины зазора между ракелем и материалом основы: $h = 0,000125$ м;
- ширина ракеля: $b = 1,55$ м;
- объемная плотность полимерного композита при необходимой динамической вязкости: $\rho_{ж}=390,1$ кг/м³;
- поверхностная плотность полимерного композита при необходимой динамической вязкости: $\rho_{п}=0,28$ кг/м².

Определяем объемный расход жидкости по формуле (8):

$$Q = \frac{0,000125^3}{4 \cdot 16,99} \cdot \frac{0,03 \cdot 390,1 \cdot 9,81}{0,0025} \cdot 1,55 = 0,118 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определяем массовый расход жидкости по выражению (9):

$$Q_m = 0,118 \cdot 10^{-5} \cdot 390,1 = 0,00046 \text{ кг/с}.$$

Скорость сопротивления за счет сил торможения вязкой жидкости вычисляется по выражению (10):

$$V_{\text{сопр}} = \frac{0,00046}{0,28 \cdot 1,55} = 0,00106 \text{ м/с}.$$

Определим число Рейнольдса по выражению (11), эквивалентный диаметр и кинематическая вязкость при этом соответственно составляют 0,012 м и 0,0435 Ст:

$$Re = \frac{0,012 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,03}}{0,0435} = 0,2119.$$

Скорость истечения вязкого полимерного композита через щель ракеля определим по выражению (14), коэффициент скорости ϕ_s по графику А.Д. Альтшуля составляет 0,2.

$$V_{\text{ист}} = 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,03} = 0,153 \text{ м/с}.$$

Максимальная скорость транспортирования материала основы, определяемая по формуле (15), составит 9,14 м/мин.

Таким образом, при промышленном получении огнетермостойкой ткани специального назначения следует учитывать, что рабочая скорость технологической линии должна находиться в диапазоне 0,06 ÷ 9,14 м/мин, т. е. должно выполняться условие (16).

2. Экспериментальное исследование процесса термообработки полимера на ткани основы

Для исследования процесса термообработки металлизированного покрытия на ткани был применен метод математического планирования эксперимента.

Исходя из анализа теории процесса теплопередачи через многослойный пакет материалов, для исследуемого объекта предполагается, что в общем случае модель может иметь вид:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \dots + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \quad (17)$$

Объектом исследования являлся огнетермостойкий текстильный материал с металлизированным покрытием, полученный при оптимальном соотношении компонентов этого покрытия. В качестве входных факторов были приняты следующие:

- температура воздуха в термокамере, °С, X_1 ;
- массовый расход полимера в первом слое, г/м², X_2 ;
- массовый расход полимера во втором слое, г/м², X_3 ;
- время процесса термофиксации, с, X_4 .

В качестве критериев оптимизации приняты следующие свойства материала:

- устойчивость к многократному изгибу и истиранию, циклов, Y_1 ;
- коэффициент ослабления инфракрасного излучения, %, Y_2 .

Для проведения экспериментальных исследований регрессионной многофакторной модели второго порядка с выбранным числом входных факторов предлагается составление D-оптимальных матриц [4, с. 174].

С практической стороны лучше использовать планы, которые по своим свойствам близки к D-оптимальным, но отличаются меньшим числом опытов. Для числа входных факторов, равных 4, целесообразно использовать симметричный план В₄ с составлением матрицы Бокса [5, с. 120].

Композиционные матрицы Бокса позволяют обеспечить:

- постоянство дисперсии выходного параметра на равных расстояниях от центра эксперимента;
- постоянство дисперсии выходного параметра в некоторой области вокруг центра эксперимента;
- симметричный план эксперимента.

Запланированный эксперимент был проведен в испытательной лаборатории ОАО «Пинский завод искусственных кож» на лабораторной установке «WERNER MATHIS AG».

Исследование показателей «коэффициент ослабления инфракрасного излучения» и «устойчивость к многократному изгибу и истиранию» проводилось в соответствии с проектом стандарта Республики Беларусь «Одежда специальная защитная пожарных-спасателей от повышенных тепловых воздействий. Общие технические требования и методы испытаний» и утвержденными техническими условиями ТУ ВУ 300620644.014-2007 «Материал огнетермостойкий с металлизированным покрытием». По каждому опыту было получено и испытано по 10 образцов ткани специального назначения.

Обработка результатов эксперимента проводилась на ПЭВМ с использованием программы для вычисления коэффициентов полиномиальной модели и оценки ее адекватности [6]. Вычисление коэффициентов регрессии в данной программе проводилось с использованием метода наименьших квадратов [7, с. 52]. Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась путем вычисления доверительных интервалов Δb_i с учетом вычисленных диагональных элементов матрицы C_i по выражению (3.10) с учетом выражений для среднеквадратичной ошибки оценки [7, с. 79].

$$\Delta b_i = t_i \cdot \sqrt{C_i \cdot S_{\text{восп}}^2}, \quad (18)$$

где t_i – критическое значение критерия Стьюдента;
 $S_{\text{восп}}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Табличное значение критерия Стьюдента в соответствии с 95 %-м t -распределением и числом степеней свободы равно 2,01. Следовательно, доверительные интервалы для коэффициентов регрессии функции отклика Y_1 для линейных коэффициентов, для

коэффициентов парного взаимодействия и для квадратичных коэффициентов соответственно равны: $\Delta b_i=20,1$, $\Delta b_{ij}= 21,3$ и $\Delta b_{ii}^2= 53,4$. Аналогично проведен расчет для функции Y_2 . Значения доверительных интервалов равны: $\Delta b_i=0,8$, $\Delta b_{ij}= 0,85,3$ и $\Delta b_{ii}^2= 2,13$.

Проверка адекватности полученных математических моделей проводилась по критерию Фишера F_R . Модель считается адекватной, если наблюдаемое значение критерия Фишера ($F_{НАБ}$) не превышает табличного ($F_{КР}$). Для всех полученных моделей $F_{НАБ} \leq F_{КР}$ ($1,97 \leq 2,66$, $1,01 \leq 2,66$ для моделей Y_1 , Y_2 соответственно), следовательно, гипотеза об адекватности моделей не отвергается.

Проведенный регрессионный анализ с использованием D-оптимального симметричного плана B_4 позволил получить математические модели процесса термообработки:

– показатель «устойчивость к многократному изгибу и истиранию» металлизированной ткани после термообработки:

$$Y_1 = 1263,1 - 21,54X_1 + 51,06X_2 + 21,3X_3 - 96,1X_1^2 - 106,9X_3^2 + 54,2X_4^2; \quad (19)$$

– показатель «коэффициент ослабления инфракрасного излучения» металлизированной ткани после термообработки:

$$Y_2 = 72,48 + 1,717X_1 + 0,89X_2 + 0,88X_3 + 0,851X_4 - 2,5X_2^2. \quad (20)$$

На основании проведенных исследований полученные уравнения регрессии (19)–(20) адекватны и значимы.

Решение системы уравнений (19)–(20) позволяет провести оптимизацию технологических режимов термообработки металлизированного покрытия на ткани основы.

Решив систему уравнений методом перебора, получаем оптимальное значение входных факторов (22) с использованием перехода от кодированных значений к натуральным при условии, что функции Y_1 и Y_2 стремятся к максимуму и изменение входных факторов находится в интервале (21).

$$\begin{cases} 160 \leq X_1 \leq 190 \\ 190 \leq X_2 \leq 250; \\ 90 \leq X_3 \leq 150 \\ 55 \leq X_4 \leq 75 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} Y_{1\text{опт}} = 1344 \text{ циклов} \\ Y_{2\text{опт}} = 73,32 (\%) \end{cases} \text{ при } \begin{cases} X_1 = 175,7 (^\circ\text{C}) \\ X_2 = 236,5 (\text{гр}/\text{м}^2) \\ X_3 = 126,0 (\text{гр}/\text{м}^2) \\ X_4 = 75 (\text{с}) \end{cases} \quad (22)$$

По результатам проведенных исследований по оптимизации режимов термообработки металлизированного покрытия на ткани получены и испытаны образцы материалов с металлизированным покрытием. Погрешность в значениях теоретических и экспериментальных исследований составила не более 4 %.

3. Анализ влияния технологических параметров процесса нанесения полимерной композиции на ткань основы

Анализ математических моделей (3) и (4) при исследовании процесса термообработки показал, что значение температуры в зонах сушки нецелесообразно увеличивать выше 175,7 °С. Увеличение температуры приводит к резкому уменьшению устойчивости к многократному изгибу и истиранию и к увеличению коэффициента ослабления

инфракрасного излучения. Увеличение массовых расходов полимера в первом и втором слоях материала приводит к увеличению исследуемых параметров. Это объясняется увеличением массы и толщины материала и повышением его устойчивости к воздействию циклических физико-механических нагрузок. Температура термообработки сильно влияет на устойчивость к многократному изгибу и истиранию. Это объясняется незаконченным процессом выхода воды из состава дисперсии, что и увеличивает отслаивание материала покрытия. Незначительное влияние температуры процесса термообработки на ослабление инфракрасного излучения объясняется дополнительным поглощением лучистой энергии на выход остаточной влаги из состава композиционного материала.

Таким образом, с помощью полученных математических моделей в выбранном диапазоне исследований определено оптимальное соотношение компонентов покрытия для обеспечения максимальных показателей по огнестойкости, коэффициенту ослабления инфракрасного излучения и устойчивости к многократному изгибу и истиранию огнетермостойкой ткани специального назначения, решена задача оптимизации характеристик огнетермостойкой ткани и при процессе термообработки.

В зависимости от отклонения технологических параметров на линии «NOVA ISOTEX» определили значения показателей «устойчивость к многократному изгибу и истиранию» и «коэффициент ослабления инфракрасного излучения».

Для определения зависимости поверхностной плотности слоя от толщины проведены исследования полимерной пленки в лаборатории ОАО «Пинский завод искусственных кож» на лабораторной установке фирмы «Werner Wathis AG» с использованием прямого метода нанесения на бумагу для воднодисперсионных полиакрилатов и полиуретанов «BHT» производства компании «Favini spa». Наносился состав композиции каждого из слоев отдельно при динамической вязкости 16 – 17 Па·с. Масса сухого остатка при этом составила около 62 %.

Отклонение температурных режимов технологической линии составляет ± 5 °С, что в пересчете через оптимальные режимы процесса термообработки (22) составляет соответственно 170,7 °С и 180,7 °С.

При проведении эксперимента по термообработке полимерного покрытия на ткани в выбранном диапазоне исследований установлено, что увеличение времени термообработки не ухудшает исследуемые характеристики. Подтверждают этот факт и исследования, проведенные в отделении водородной энергетики ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси, по определению зависимости потери массы полимера от температуры, времени и скорости нагрева материала. Установлено, что исследуемый материал начинает терять массу, связанную с пиролизом, в диапазоне температур 400–900 °С при времени нахождения материала в термокамере около 2 ч [9]. Следовательно, существенное влияние на свойства материала оказывает нижнее минимальное время термообработки и температура воздуха в термокамере. Минимальное время термообработки с учетом разброса скорости транспортной ленты и найденного значения входных факторов (22) составляет около 1,1 мин.

Установлено, что доверительный интервал значений входных факторов с учетом отклонений технологических параметров находится в области оптимальных значений (22), и следовательно, выполняется условие достижения максимума функций отклика.

Определен диапазон изменения рабочей скорости технологической линии (0,06 ÷ 9,14 м/мин), при котором обеспечивается равномерное и качественное наложение полимерного композиционного материала на ткань основы с учетом динамической вязкости полимера.

Заключение

В результате проведенной работы определены основные параметры технологического процесса получения огнетермостойких тканей с металлизированным покрытием на технологической линии «NUOVA ISOTEX», установлен оптимальный диапазон скорости движения ткани основы при ракельном нанесении многослойных полимерных покрытий, в

котором будет обеспечиваться качественное и равномерное нанесение покрытий в специальной огнетермостойкой ткани с металлизированным покрытием. На основе расчетов методом математического планирования многофакторного эксперимента установлены и оптимизированы режимы термообработки полимерных многослойных покрытий на ткани основы, установлена степень влияния технологических параметров на свойства огнетермостойких тканей специального назначения с металлизированным покрытием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – 4-е изд. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
2. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – 7-е изд. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 640 с.
3. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
4. Севостьянов, А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности / А.Г. Севостьянов. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 392 с.
5. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
6. Науменко, А.А. Вычисление коэффициентов полиномиальной модели и оценка ее адекватности / А.А. Науменко, М.А. Игнатенко // Сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-техн. информ. центр. – М., 1985. – Вып. 3: Аннотационный указатель программных средств. – С. 53 – 56.
7. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э.К. Лецкий, В. Шеффер; под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 553 с.
8. Кожа искусственная. Методы определения толщины и массы 1 м²: ГОСТ 17073–71. – Введ. 01.07.72. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1980. – 3 с.
9. Разработка методов и технологии получения огнетермостойких тканей с металлизированным покрытием: отчет о НИР (промеж.) / Науч.-исслед. центр Витебского областного управления МЧС Респ. Беларусь; рук. темы Н.И. Стетюкевич. – Витебск, 2007. – 29 с. – № ГР 2006892.