

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЗИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ХОЛСТА ДУТЬЕВЫМ СПОСОБОМ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

**В. М. Святский<sup>1</sup>, М. В. Соколов<sup>2</sup>, В. Л. Тимофеев<sup>3</sup>**

*Кафедра «Технология машиностроения и приборостроения», Воткинский филиал  
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет  
им. М. Т. Калашикова» (1), svlad-2000@yandex.ru, г. Воткинск, Россия;  
кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), г. Тамбов, Россия;  
кафедра «Технология металлов и металловедения»,  
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет  
им. М. Т. Калашикова» (3), г. Ижевск, Россия*

**Ключевые слова:** вертикально-дутьевой процесс; вторичный термопласт; пространственная физико-геометрическая интерпретация процесса исследования; теория структурно-энерго-временных полей; формирование термоскрепленного холста.

**Аннотация:** Впервые в области изучения технологии производства волокнистых материалов из термопласта дутьевым способом технологический процесс получил пространственную физико-геометрическую интерпретацию в рамках теории структурно-энерго-временных полей. Представленная теория повышает геометрическую наглядность результатов исследований, получаемых аналитическими средствами, способствуя более глубокому теоретическому осмыслению поставленной задачи и компактному отображению используемых представлений.

---

Волокнистые материалы, производимые из вторичных термопластов, могут применяться в различных областях деятельности человека. Основное назначение таких материалов в технической сфере – создание композиционных материалов с особыми свойствами: фильтрация жидкостей; сорбция нефти и нефтепродуктов; тепло- и звукоизоляция различных видов энергетического и транспортного оборудования и др.

Широкий интерес среди известных технологических процессов получения волокнистых материалов из термопластов вызывает процесс, суть которого заключается в раздуве истекающей из плавильного агрегата струи расплавленного термопласта потоком сжатого воздуха [1, 2]. Однако данный процесс до сих пор не нашел широкого применения в промышленных условиях. Одной из причин такого положения дел является слабая теоретическая база описания процесса формообразования волокна и дальнейшего получения из него изделий, например холста, бонов, фильтров и пр.

Проведенные аналитические исследования позволили дать описание ряда фрагментов процесса волокнообразования [1, 3]. Однако сейчас появилась возможность объединить аналитические результаты с геометрическим методом (методом координат), что более глубоко раскрывает теоретические аспекты формирования волокна. Речь идет об использовании теории структурно-энерго-вре-

менных (СЭВ) полей свойств физических объектов (теории СЭВ-полей) для построения пространственной физико-геометрической интерпретации процесса изготовления изделий из вторичных термопластов дутьевым способом.

Структурно-энерго-временное исследование (СЭВ-анализ) – новая область количественного анализа физических объектов, в которой для изучения влияния на их свойства характеристик, полученных опытным путем или в эксперименте, применяют методы системного анализа, формальной логики, общей теории измерений, геометрии, теории вероятностей и теории СЭВ-полей свойств физических объектов, предложенной в работах [4, 5]. Объемная модель (СЭВ-модель) свойства физического объекта геометрически может быть представлена как объем фигуры определенной формы и величины, построенной в СЭВ-пространстве. Ее получают в пространстве декартового прямоугольного координатного угла (СЭВ-угла), по осям которого откладываются структурная С, энергетическая Э и временная В характеристики свойства объекта, являющиеся результатом эксперимента или теоретических посылок. Форма объема фигуры может быть произвольной. В целях использования простого математического аппарата, пространственная фигура (СЭВ-модель) представляет набор прямоугольных параллелепипедов. Физическая величина П, поставленная в соответствии значению объема СЭВ-модели, называется СЭВ-полем изучаемого свойства объекта. В классической науке изучаемое свойство объекта рассматривается как предмет исследования в данной конкретной задаче.

*Цель статьи* – расширить и углубить теоретические представления о формообразовании волокнистых изделий из вторичных термопластов дутьевым способом.

*Объект исследования* – вторичные термопласты.

*Предмет исследования* – технологический процесс производства волокнистых материалов из вторичных термопластов дутьевым способом.

1. При дальнейшем анализе использован ряд новшеств, введенных теорией СЭВ-полей:

– геометрическое отображение свойства физического объекта в пространственных декартовых прямоугольных координатах в виде СЭВ-полей на основе представлений о структурной С, энергетической Э и временной В характеристиках [5];

– понятие о физико-геометрической структуре единицы (ФГСЕ) физической величины (ФГСЕ величины или единица вида  $1ЯОД^k$ ), здесь Я – ядро единицы, О – оболочка единицы,  $D^k$  – оператор движения. Последний оператор необходим в обозначении единицы для более четкого отличия одних величин от других. Физическая величина, которая поставлена в соответствие отрезку в пространстве, параллельному одной из координатных осей, имеет в обозначении своей единицы оператор движения  $D^3$ . Та же самая величина, поставленная в соответствие указанному отрезку, который уже расположен в координатной плоскости и параллелен одной из координатных осей, имеет в обозначении своей единицы оператор движения  $D^2$ ; та же величина, поставленная в соответствие отрезку, лежащему на координатной оси, – Д. В теории СЭВ-полей при оценке объемного СЭВ-поля  $\Pi_i$  все математические преобразования с величинами проводятся с использованием отрезков, находящихся только в пространстве, которым в соответствие ставятся величины, в состав единиц которых входит оператор движения  $D^3$  [5];

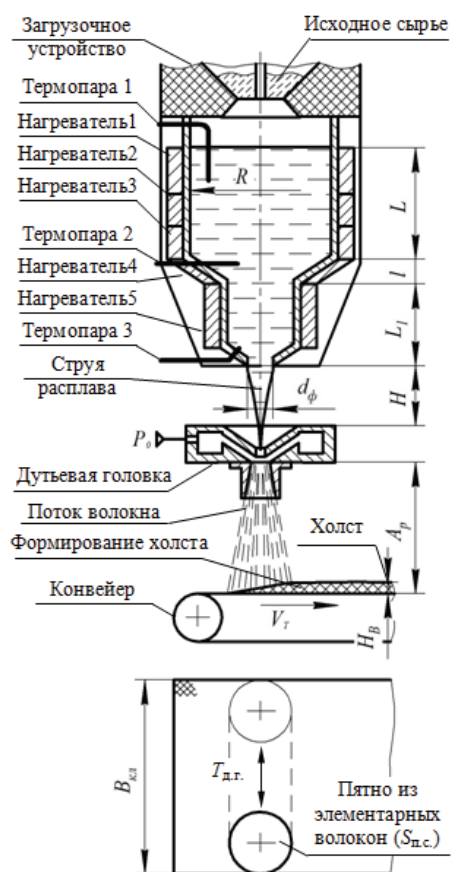
– представление о неоднородности физических величин; две сравниваемые величины считаются неоднородными, если:

- а) отличаются ядра их размерностей;
- б) отличаются оболочки их размерностей;

в) они отличаются значениями показателя степени Д-оператора;  
 г) величины сформированы в различных координатных СЭВ-углах и с помощью разных геометрических приемов;

– понятие о сложности физического смысла величины; за основу принят принцип: чем сложнее геометрический элемент, тем должна быть сложнее размерность величины, поставленной в соответствие данному геометрическому элементу; увеличение сложности геометрического элемента обозначается схемой: прямолинейный отрезок → площадь → объем. Если две величины, поставленные в соответствие двум сторонам прямоугольника, перемножаются и получается третья величина, которая поставлена в соответствие площади данного прямоугольника (то есть в геометрическом смысле получена более сложная величина в сравнении с сомножителями), то операция сокращения символов единиц запрещена. В случае деления одной величины на другую, в результате получаем в геометрическом смысле менее сложную величину, чем делимое, то есть операция сокращения символов единиц разрешена.

2. Принцип вертикально-дутьевого способа получения волокнистых материалов из вторичного термопласта заключается в раздуве струи расплава, истекающего из плавильного агрегата под действием гидростатического давления, потоком сжатого воздуха с последующим осаждением волокон на поверхность приемного конвейера, образуя термоскрепленный холст.



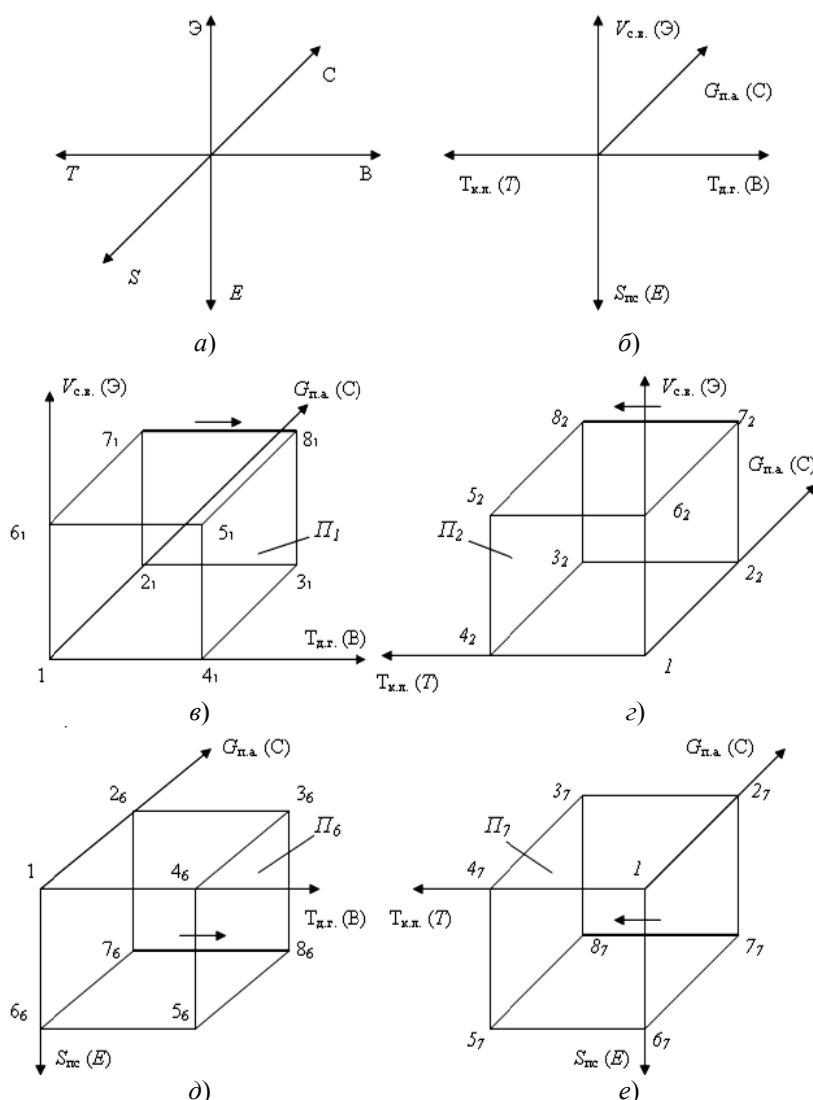
**Рис. 1. Схема установки для получения волокнистых материалов вертикально-дутьевым способом**

получения волокнистых материалов вертикально-дутьевым способом представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих основных агрегатов и узлов: плавильного агрегата гидростатического типа [2], дутьевой головки и приемного конвейера. Плавильный агрегат представляет собой цилиндр, на периферийных поверхностях и в центральной части камеры которого смонтированы электрические нагревательные элементы и термопары для контроля температуры расплава термопласта в разных сечениях агрегата. Такая конструкция плавильного агрегата обеспечивает равномерный прогрев и плавление исходного вторичного термопласта, с последующим истечением расплава термопласта под гидростатическим давлением через фильеру в направлении дутьевой головки. Производительность плавильного агрегата составила 3...5 кг/ч.

Дутьевая головка [6] с кольцевым сходящимся соплом обеспечивает раздув струи расплава потоком сжатого воздуха с образованием на выходе элементарных волокон (диаметром  $d_B = 0,04...0,06$  мм и длиной  $l_B = 10...50$  мм), которые, оседая на поверхности приемного конвейера, образуют волокнистый материал – холст. При

работе агрегата в месте соприкосновения потока элементарных волокон с конвейерной лентой образуется «пятно» из термопласта (см. рис. 1), равное ширине ленты. Оно возникает за счет колебательных движений дутьевой головки, являясь элементом холста. Давление сжатого воздуха для питания дутьевой головки в процессе волокнообразования может изменяться в пределах 50...200 кПа. Скорость движения конвейерной ленты составляет 0,1...1 м/мин [7].

3. В общем случае геометрическое рассмотрение явлений проводится теорией СЭВ-полей с использованием шестимерного пространства в декартовых прямоугольных координатах, наименование характеристик которых переведены на язык методологической терминологии (рис. 2, а). Буквы С, Э, В введены для обозначения первых трех осей, по которым откладывают структурную, энергетическую и временную характеристики процесса; S (Structure), E (Energy), T (Time) обозначаются вторые так называемые оборотные оси (соответственно структурная,



**Рис. 2. СЭВ-поля процесса формирования холста дутьевым способом:**

а – шестимерное пространство в декартовых координатах; б – запись физических величин; октанты: в – С-Э-В – первый; г – С-Э-Т – второй; д – С-Е-В – шестой; е – С-Е-Т – седьмой

энергетическая, временная). Физические величины  $C, \mathcal{E}, B, S, E, T$  – координатные характеристики СЭВ-пространства. В основании координат в каждом октанте строят параллелепипеды  $\Pi_i$  ( $i = 1, \dots, 8$ ), где индекс  $i$  соответствует номеру координатного угла. Точка 1 – начало координат (см. рис. 2). Ниже параллелепипеды  $\Pi_i$  дополнительно будут обозначаться в виде  $18_i$ ; например параллелепипед в первом октанте –  $18_1$ , параллелепипед в седьмом октанте –  $18_7$ . Номера октантов (см. рис. 2):  $C\text{-}\mathcal{E}\text{-}B$  – первый октант;  $C\text{-}\mathcal{E}\text{-}T$  – второй;  $S\text{-}\mathcal{E}\text{-}T$  – третий;  $S\text{-}E\text{-}B$  – четвертый;  $C\text{-}E\text{-}B$  – шестой;  $C\text{-}E\text{-}T$  – седьмой;  $S\text{-}E\text{-}T$  – восьмой.

В настоящей задаче построение СЭВ-полей процесса формирования волокнистого материала будет проведено в I, II, VI, VII октантах (см. рис. 2, б), хотя в принципе нет ограничений на проведение анализа в восьми октантах. Но это потребовало бы привлечения дополнительных параметров процесса. Любому параллелепипеду  $\Pi_i$  ставится в соответствие определенная физическая величина с тем же обозначением. Каждая физическая величина  $\Pi_i$  – объемное СЭВ-поле предмета рассмотрения для соответствующего октанта, поставленная в соответствие объему параллелепипеда;  $\Pi_i$  – обобщенная характеристика предмета рассмотрения для соответствующего координатного угла. Различным геометрическим элементам параллелепипедов  $\Pi_i$  (ребрам, граням и др.) ставятся также в соответствие определенные физические величины.

Процесс формообразования холста состоит из двух этапов: получение элементарного волокна и формирование на конвейерной ленте холста определенной толщины из элементарных волокон. Для построения пространственной физико-геометрической интерпретации данного технологического процесса воспользуемся его первичными характеристиками, которые влияют на качество конечного продукта.

Критерием качества процесса холстообразования является форма сечения холста в поперечном направлении, связанная с характеристикой  $H_B$  толщиной холста:

$$H_B = f(G_{п.а}, V_{с.в}, T_{д.г}, T_{к.л}, S_{пс}), \quad (1)$$

где  $G_{п.а}$  – производительность плавильного агрегата, кг/мин;  $V_{с.в}$  – скорость потока воздуха в точке раздува струи полимера, м/мин;  $T_{д.г}$  – опытное время за одно перемещение дутьевой головки, мин;  $T_{к.л}$  – опытное время прохождения конвейерной лентой, мин;  $S_{пс}$  – площадь образующего пятна на поверхности конвейерной ленты волоконнесущим потоком, м<sup>2</sup>.

Согласно аналитическим исследованиям процесса волокнообразования, массовая производительность плавильного агрегата  $G_{п.а}$ , кг·мин<sup>-1</sup>, определяется по формуле [8]

$$G_{п.а} = Q_{п.а} \rho, \quad (2)$$

где  $Q_{п.а}$  – объемная производительность, м<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность исходного сырья, кг·м<sup>-3</sup>.

Скорость потока воздуха в точке раздува струи термопласта  $V_{с.в}$ , м·мин, [8]

$$V_{с.в} = 4(Q_B + Q_K)/\pi d_2^2, \quad (3)$$

где  $Q_B$  – расход эжектируемого воздуха через центральное отверстие дутьевой головки, м<sup>3</sup>·мин;  $Q_K$  – расход воздуха через кольцевое сходящееся сопло, м<sup>3</sup>·мин;  $d_2$  – внутренний диаметр кольцевого сопла дутьевой головки, м.

Опытное время за одно перемещение дутьевой головки, мин,

$$T_{д.г} = B_{к.л}/v_{д.г}, \quad (4)$$

где  $B_{к.л}$  – ширина конвейерной ленты, м;  $v_{д.г}$  – скорость движения дутьевой головки, м/мин.

При рассмотрении процесса формирования холста существенными параметрами являются следующие:

– опытное время изготовления одного изделия (холста), мин,

$$T_{к.л} = L_{к.л}/v_{т}, \quad (5)$$

где  $L_{к.л}$  – длина получаемого изделия, м;  $v_{т}$  – скорость движения конвейерной ленты при получении одного изделия ленты, м·мин<sup>-1</sup>;

– площадь  $S_{пс}$  образующего «пятна» из элементарных волокон на поверхности конвейерной ленты, м<sup>2</sup>, определяется экспериментально.

Для геометрического отображения в пространстве декартовых координат рассматриваемого технологического процесса необходимо привести в соответствие с представлениями теории СЭВ-полей некоторые единицы физических величин, содержащихся в формуле (1). При простом рассмотрении можно констатировать, что параметры  $T_{д.г}$  и  $T_{к.л}$ , выполняя совершенно различные функции, имеют одинаковую единицу измерения 1 мин, что при СЭВ-анализе не допускается, поскольку это не позволяет просто и четко отличать величины друг от друга. В теории СЭВ-полей разработан формальный прием, который дает возможность отличать единицы данных величин. Изменим единицу измерения  $T_{д.г}$  на основе представлений, которые изложены выше. Для этого используем обобщенную формулу единицы измерений 1ЯОД<sup>k</sup>.

Запишем единицу  $T_{д.г}$  в виде произведения и с учетом наличия оператора Д будем иметь:

$$[T_{д.г}] = [B_{к.л}] \times [1/v_{д.г}] Д. \quad (7)$$

Далее используем по отношению к (7) положение о сложности физического смысла величины, которое при образовании величины  $T_{д.г}$  (как произведение двух величин) запрещает осуществлять операцию сокращения символов единиц. В результате получим

$$[T_{д.г}] = [B_{к.л}] \times [1/v_{д.г}] Д = 1 м \times 1 \text{ мин} \cdot \text{м}^{-1} = 1 \text{ мин}(\text{м}/\text{м})Д,$$

где мин – ядро Я единицы; (м/м) – оболочка О единицы; Д – оператор движения (безразмерная величина).

После таких действий единица  $T_{д.г}$  отличается от единицы  $T_{к.л}$  ( $[T_{к.л}] = 1 \text{ мин}$ ) оболочкой О, представляющей отношение м/м. Эти два параметра стали хорошо различимы по их единицам.

Аналогично поступим с оставшимися параметрами в выражениях (2), (3), (6) процесса, приведенными в (1). Затем представим в компактной форме запись физических величин для физико-геометрической интерпретации по схеме, показанной на рис. 2, б:

$$\text{БСЭВ} \equiv \{1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} Д^3; 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} Д^3; 1 \text{ мин} (\text{м}/\text{м}) Д^3; 1 \text{ м}^2 Д^3; 1 \text{ мин} Д^3\}; \\ C(G_{п.а}) Э(V_{с.в}) В(T_{д.г}) E(S_{пс}) T(T_{к.л}),$$

где БСЭВ – базис СЭВ-пространства (в фигурных скобках указаны единицы величин, которые будут откладываться по координатным осям; после двоеточия – обозначение пространства).



Располагая вышеприведенными параметрами технологического процесса получения волокнистого материала дутьевым способом, имеется возможность операцию формирования холста из элементарных волокон, осаждаемых в процессе раздува на поверхности приемного конвейера за одно перемещение дутьевой головки в поперечном направлении относительно конвейерной ленты, представить в виде СЭВ-поля  $\Pi_1$ , геометрический образ которого в виде прямоугольного параллелепипеда показан на рис. 2, в. По координатным осям отложены структурная  $G_{п.а}(С)$ , энергетическая  $V_{с.в}(Э)$  и временная  $T_{д.г}(В)$  характеристики. Объему параллелепипеда  $1\ 2_1\ 3_1\ 4_1\ 5_1\ 6_1\ 7_1\ 8_1$  поставлена в соответствие физическая величина  $\Pi_1$ , которая получила название «СЭВ-поле процесса волокнообразования в I октанте». Ребро  $7_1\ 8_1$  – СЭВ-траектория процесса формирования холста.

Запишем уравнение СЭВ-поля процесса формирования волокнистого материала в виде холста из элементарных волокон за одно перемещение дутьевой головки в I октанте  $G_{п.а} \cdot V_{с.в} \cdot T_{д.г}$  (см. рис. 2, в)

$$\Pi_1 = \text{отрезок } 5_1\ 8_1 \times \text{отрезок } 3_1\ 8_1 \times \text{отрезок } 7_1\ 8_1 = \text{СЭВ} = G_{п.а} V_{с.в} T_{д.г},$$

где отрезки  $5_1\ 8_1$ ,  $3_1\ 8_1$ ,  $7_1\ 8_1$  – геометрические элементы СЭВ-поля, в соответствии которым поставлены величины С, Э, В; последние существуют в физическом пространстве и потому имеют значение оператора движения в виде  $D^3$ .

Определим единицу измерения величины  $\Pi_1$

$$[\Pi_1] = [С \cdot Э \cdot В] = [G_{п.а}] [V_{с.в}] [T_{д.г}] = \\ = 1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 1 \text{ мин}(\text{м}/\text{м})\text{Д}^3 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{м}/\text{м}) (\text{мин}/\text{мин}) \text{ Д}^9,$$

где  $(\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{мин}^{-1})$  – ядро Я единицы;  $(\text{м}/\text{м}) (\text{мин}/\text{мин})$  – оболочка О единицы;  $D^9$  – оператор движения.

Понятия оболочки О и оператора движения  $D^k$  введена в теорию СЭВ-полей для более глубокого анализа предмета исследования. Выражение  $1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{м}/\text{м}) (\text{мин}/\text{мин}) \text{ Д}^9$  – пример обозначения единицы измерения СЭВ-поля  $\Pi_1$  как одного из вариантов технологии волокнообразования. Физический смысл единицы величины определяется главным образом ядром Я (для рассматриваемого случая  $Я \equiv \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1}$ ). Последнее говорит о том, что величина  $\Pi_1$  представляет импульс силы  $(С_1 \cdot Э_1)$  (строки 5 и 8, табл. 1), при помощи которого сжатый воздух раздувает струю расплава термопласта.

На рисунке 2, з – е, показаны другие СЭВ-поля  $\Pi_2$ ,  $\Pi_6$ ,  $\Pi_7$ . СЭВ-поле  $\Pi_2$  описывает через параметр  $T_{к.л}$  процесс, связанный с работой конвейера, на котором происходит формообразование холста из элементарных волокон. Физическую сущность  $\Pi_2$  составляет импульс силы  $(С_2 \cdot Э_2)$  (строки 13 и 16, табл. 1), которая прилагается к летящим волокнам в момент соприкосновения их с конвейерной лентой и образованием элемента термоскрепленного холста. Силы  $(С_1 \cdot Э_1)$  и  $(С_2 \cdot Э_2)$  для СЭВ-полей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  имеют разную физическую природу. Поэтому единицы их отличаются оболочкой О. То же самое имеем для импульсов (СЭВ-поля  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ). Физическая природа последних различна, что подтверждают оболочки О их единиц. С позиции теории СЭВ-полей,  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  представляются неоднородными величинами. Также неоднородны силы  $(С_1 \cdot Э_1)$  и  $(С_2 \cdot Э_2)$ .

На рисунке 2, д, е, построены СЭВ-поля  $\Pi_6$  и  $\Pi_7$ . Здесь внимание привлекают величины  $(С_6 \cdot Э_6)$  и  $(С_7 \cdot Э_7)$ , которые, судя по ядру Я, являются идентичными,

Таблица 1

**СЭВ-параметры процесса формирования холста  
вертикально-дутьевым способом**

№ п/п	Общая зависимость	Конкретная зависимость	
	Величина, уравнение	Величина, уравнение	Единица измерения величины
1	2	3	4
1	Координатный угол $G_{п.а}-V_{с.в}-T_{д.г}$ (I октант)		
2	$C_1$	$G_{п.а} = Q_{п.а} \rho$	$1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
3	$\mathcal{E}_1$	$V_{с.в} = 4(Q_{в} + Q_{к})/\pi d_2^2$	$1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
4	$B_1$	$T_{д.г} = B_{к.л} (1/v_{д.г})$	$1 \text{ мин} (\text{м/м}) \text{ Д}^3$
5	$C_1 \cdot \mathcal{E}_1$	$C_1 \cdot \mathcal{E}_1 = G_{п.а} \cdot V_{с.в}$ (сила)	$1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-2} \text{ Д}^6$
6	$C_1 \cdot B_1$	$C_1 \cdot B_1 = G_{п.а} \cdot T_{д.г}$	$1 \text{ кг} (\text{м/м})(\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
7	$\mathcal{E}_1 \cdot B_1$	$\mathcal{E}_1 \cdot B_1 = V_{с.в} \cdot T_{д.г}$	$1 \text{ м} \cdot \text{кг} (\text{м/м}) (\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
8	$\Pi_1 = C_1 \cdot \mathcal{E}_1 \cdot B_1$	$\Pi_1 = G_{п.а} \cdot V_{с.в} \cdot T_{д.г}$ (импульс силы)	$1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{м/м})$ $(\text{мин/мин}) \text{ Д}^9$
9	Координатный угол $G_{п.а}-V_{с.в}-T_{к.л}$ (II октант)		
10	$C_2$	$G_{п.а} = Q_{п.а} \rho$	$1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
11	$\mathcal{E}_2$	$V_{с.в} = 4(Q_{в} + Q_{к})/\pi d_2^2$	$1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
12	$B_2$	$T_{к.л} = L_{к.л}/v_{т}$	$1 \text{ мин} \text{ Д}^3$
13	$C_2 \cdot \mathcal{E}_2$	$C_2 \cdot \mathcal{E}_2 = G_{п.а} \cdot V_{с.в}$ (сила)	$1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-2} \text{ Д}^6$
14	$C_2 \cdot B_2$	$C_2 \cdot B_2 = G_{п.а} \cdot T_{к.л}$	$1 \text{ кг} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
15	$\mathcal{E}_2 \cdot B_2$	$\mathcal{E}_2 \cdot B_2 = V_{с.в} \cdot T_{к.л}$	$1 \text{ м} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
16	$\Pi_2 = C_2 \cdot \mathcal{E}_2 \cdot B_2$	$\Pi_2 = G_{п.а} \cdot V_{с.в} \cdot T_{к.л}$ (импульс силы)	$1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9$
17	Координатный угол $G_{п.а}-S_{пс}-T_{д.г}$ (VI октант)		
18	$C_6$	$G_{п.а} = Q_{п.а} \rho$	$1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
19	$\mathcal{E}_6$	$S_{пс}$	$1 \text{ м}^2 \text{ Д}^3$
20	$B_6$	$T_{д.г} = B_{к.л} (1/v_{д.г})$	$1 \text{ мин} (\text{м/м}) \text{ Д}^3$
21	$C_6 \cdot \mathcal{E}_6$	$C_6 \cdot \mathcal{E}_6 = V_{с.в} \cdot S_{пс}$ (момент импульса силы)	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^6$
22	$C_6 \cdot B_6$	$C_6 \cdot B_6 = V_{с.в} \cdot T_{д.г}$	$1 \text{ кг} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
23	$\mathcal{E}_6 \cdot B_6$	$\mathcal{E}_6 \cdot B_6 = S_{пс} \cdot T_{д.г}$	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{мин} (\text{м/м}) \text{ Д}^6$
24	$\Pi_6 = C_6 \cdot \mathcal{E}_6 \cdot B_6$	$\Pi_6 = G_{п.а} \cdot S_{пс} \cdot T_{д.г}$	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} (\text{м/м})(\text{мин/мин}) \text{ Д}^9$
25	Координатный угол $G_{п.а}-S_{пс}-T_{к.л}$ (VII октант)		
26	$C_7$	$G_{п.а} = Q_{п.а} \rho$	$1 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3$
27	$\mathcal{E}_7$	$S_{пс}$	$1 \text{ м}^2 \text{ Д}^3$
28	$B_7$	$T_{к.л} = L_{к.л}/v_{т}$	$1 \text{ мин} \text{ Д}^3$
29	$C_7 \cdot \mathcal{E}_7$	$C_7 \cdot \mathcal{E}_7 = G_{п.а} \cdot S_{пс}$ (момент импульса силы)	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^6$
30	$C_7 \cdot B_7$	$C_7 \cdot B_7 = G_{п.а} \cdot T_{к.л}$	$1 \text{ кг} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^6$
31	$\mathcal{E}_7 \cdot B_7$	$\mathcal{E}_7 \cdot B_7 = S_{пс} \cdot T_{к.л}$	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{мин} \text{ Д}^6$
32	$\Pi_7 = C_7 \cdot \mathcal{E}_7 \cdot B_7$	$\Pi_7 = G_{п.а} \cdot S_{пс} \cdot T_{к.л}$	$1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9$

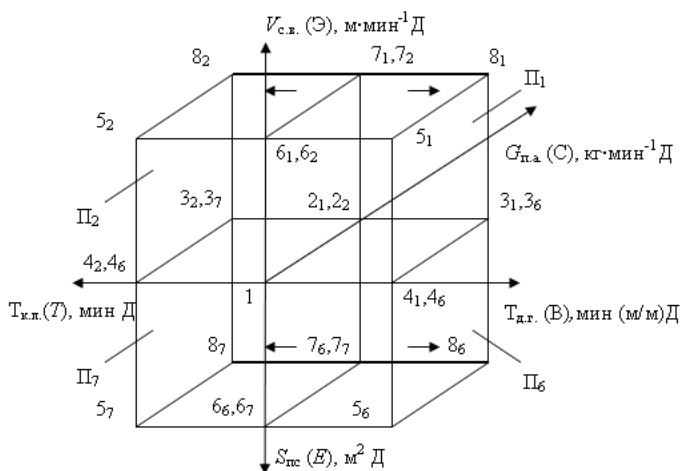


представляя собой момент  $M_0$  импульса силы. В данном случае ( $C_6\text{-}\mathcal{E}_6$ ) и ( $C_7\text{-}\mathcal{E}_7$ ), согласно представления теории СЭВ-полей, также являются неоднородными физическими величинами, поскольку отображаются в различных координатных углах.

Заметим, что координатные углы на рис. 2,  $\nu - e$ , могут образовывать единый физико-геометрический комплекс, показанный на рис. 3. Данная физико-геометрическая схема представляет собой пространственную физико-геометрическую интерпретацию процесса формирования холста из термопласта, где начало координат – точка 1; ВСТ – горизонтальная плоскость; СЭЕ – фронтальная плоскость; ВЭТЕ – профильная плоскость. Точки, имеющие «двойное» обозначение, являются вершинами параллелепипедов 18<sub>1</sub>, 18<sub>2</sub>, 18<sub>6</sub>, 18<sub>7</sub>. Эти точки могут принадлежать одновременно нескольким октантам. Так, обозначение 7<sub>1</sub> 7<sub>2</sub> указывает на то, что точка, находящаяся в координатной плоскости СЭ, принадлежит одновременно I и II октантам. Точка 2<sub>1</sub> 2<sub>2</sub>, лежащая на координатной оси С, принадлежит одновременно четырём октантам – I, II, VI, VII. Точки 8<sub>1</sub>, 8<sub>2</sub>, 8<sub>6</sub>, 8<sub>7</sub> – вершины параллелепипедов, лежащие в физическом пространстве (СЭВ-пространство). Отрезки (7<sub>1</sub> 7<sub>2</sub>)8<sub>1</sub>, (7<sub>1</sub> 7<sub>2</sub>)8<sub>2</sub>, (7<sub>6</sub> 7<sub>7</sub>)8<sub>6</sub>, (7<sub>6</sub> 7<sub>7</sub>)8<sub>7</sub> – СЭВ-траектории процесса формирования холста в четырех октантах.

В таблице 1 приведены основные СЭВ-параметры моделей П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub>, П<sub>6</sub>, П<sub>7</sub> процесса формообразования холста. Все величины столбца 2 имеют свои геометрические образцы: величины  $C_i$ ,  $\mathcal{E}_i$ ,  $V_i$ ,  $E_i$ ,  $T_i$  – пространственные ребра параллелепипедов; произведения  $C_i \cdot \mathcal{E}_i$ ,  $C_i \cdot V_i$ ,  $\mathcal{E}_i \cdot V_i$  – пространственные грани; СЭВ-поле  $P_i$  – объем параллелепипеда. В столбцах 3 и 4 указаны соответственно конкретные формулы и единицы величин.

Рассмотрим в качестве конкретного примера процесс формирования холста вертикально-дутьевым способом с диаметром получаемых элементарных волокон  $d_B \approx 50$  мкм на разработанной и изготовленной установке [8]. Производительность у плавильного агрегата гидростатического типа составляет  $G_{п.а} = 0,083$  кг/мин. Скорость потока воздуха в точке раздува струи полимера (при давлении питания  $p_0 = 80$  кПа дутьевой головки с кольцевым соплом)  $V_{с.в} = 2580$  м/мин при ширине кольцевого зазора  $B = 0,0003$  м. Ширина конвейерной ленты  $B_{к.л} = 0,6$  м. Время прохождения дутьевой головки за один проход ( $i = 1$ )  $T_{д.г} = 0,033$  мин.



**Рис. 3. Пространственная физико-геометрическая интерпретация процесса формирования холста на поверхности конвейера**

Рассчитаем значения СЭВ-полей  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_6, \Pi_7$ :

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= G_{п.а} \cdot V_{с.в} \cdot T_{д.г} = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 2580 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 0,033 \text{ мин} (\text{м/м}) \text{ Д}^3 = \\ &= 6,81 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{м/м}) (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Pi_2 &= G_{п.а} \cdot V_{с.в} \cdot T_{к.л} = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 2580 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 1 \text{ мин} \text{ Д}^3 = \\ &= 206,4 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{мин}^{-1} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Pi_6 &= G_{п.а} \cdot S_{пс} \cdot T_{д.г} = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 0,4 \text{ м}^2 \text{ Д}^3 \times 0,033 \text{ мин} (\text{м/м}) \text{ Д}^3 = \\ &= 0,001 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} (\text{м/м}) (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Pi_7 &= G_{п.а} \cdot S_{пс} \cdot T_{к.л} = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 0,4 \text{ м}^2 \text{ Д}^3 \times 1 \text{ мин} \text{ Д}^3 = \\ &= 0,032 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} (\text{мин/мин}) \text{ Д}^9.\end{aligned}$$

Таким образом, впервые в области изучения технологии производства волокнистых материалов из термопласта технологический процесс получил пространственную физико-геометрическую интерпретацию в рамках теории СЭВ-полей. Данный научный подход дает возможность обозначить каждый вариант производственной технологии одним качественно-количественным показателем. Он повышает геометрическую наглядность результатов исследований, получаемых аналитическими средствами, способствуя более глубокому теоретическому осмыслению поставленной задачи и компактному отображению используемых представлений.

#### *Список литературы*

1. Ширококов, К. П. Влияние конструктивных параметров устройства на процесс волокнообразования / К. П. Ширококов, Б. А. Сентяков, В. М. Святский // Вестник машиностроения. – 2010. – № 12. – С. 32 – 34.
2. Формообразование холстов из синтетических волокнистых материалов / В. М. Святский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 300 – 306. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.300-306
3. Элбакян, А. Г. Экспериментальное исследование процесса пирообработки холстов из супертонкого базальтового волокна / А. Г. Элбакян, Б. А. Сентяков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – № 2. – С. 67 – 70.
4. Тимофеев, В. Л. Структурно-энерго-временной анализ физических объектов: применение в металловедении и механике / В. Л. Тимофеев. – 1-е изд. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – 312 с.
5. Тимофеев, В. Л. Структурно-энерго-временной анализ физических объектов: применение в металловедении и механике / В. Л. Тимофеев. – 4-е изд., испр. и доп. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. – 372 с.
6. Сентяков, Б. А. Исследование дутьевой головки для получения полиэтилентерефталатного волокна способом вертикального раздува / Б. А. Сентяков, К. П. Ширококов, В. М. Святский // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – № 12. – С. 6 – 10.
7. Regeneration of a Fibrous Sorbent Based on a Centrifugal Process for Environmental Geology of Oil and Groundwater Degradation / V. Sviatskii [et al.] // Acta Montanistica Slovaca. – 2016. – Vol. 21, No. 4. – P. 272 – 279.
8. Процессы получения и практического использования полиэтилентерефталатного волокна из вторичного сырья : монография / В. М. Святский [и др.]. – Старый Оскол : Изд-во ТНТ, 2014. – 152 с.

## Spatial Physical-Geometric Interpretation of the Process of Canvas Formation by the Blowing Method from Secondary Thermoplastics

V. M. Svyatsky<sup>1</sup>, M. V. Sokolov<sup>2</sup>, V. L. Timofeev<sup>3</sup>

*Department of Technology of Mechanical Engineering and Instrument Making, Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (1), svlad-2000@yandex.ru, Votkinsk, Russia; Department of Computer-Integrated Systems in Engineering, TSTU (2), Tambov, Russia; Department of Technology of Metals and Metallurgy, Kalashnikov Izhevsk State Technical University(3), Izhevsk, Russia*

**Keywords:** secondary thermoplastics; vertical-blowing process; formation of thermo-bonded canvas; spatial physical-geometric interpretation of the research process; theory of structural-energy-time fields.

**Abstract:** For the first time in the field of technology of production of fibrous materials from thermoplastics by the blowing method, the technological process has received a spatial physical-geometric interpretation within the framework of the theory of CMEA-fields. The presented theory raises the geometric visibility of the results of studies obtained by analytical tools, contributing to a deeper theoretical comprehension of the problem and a compact representation of the concepts used.

### References

1. Shirobokov K.P., Sentyakov B.A., Svyatskii V.M. [Influence of constructive parameters of the device on the process of fiber formation], *Vestnik mashinosroeniya* [Bulletin of Machine Building], 2010, no. 12, pp. 32-34. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Svyatskii V.M., Sentyakov K.B., Sentyakov B.A., Svyatskii M.A. [Formation of canvases from synthetic fibrous materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 300-306, doi: 10.17277/vestnik.2017.02. pp.300-306 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Elbakyan A.G., Sentyakov B.A. [Experimental study of the process of pyroprocessing of canvases from super-thin basalt fiber], *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual systems in production], 2017, no. 2, pp. 67-70. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Timofeev V.L. *Strukturno-energo-vremennoi analiz fizicheskikh ob'ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics], Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2004, 312 p. (In Russ.)
5. Timofeev V.L. *Strukturno-energo-vremennoi analiz fizicheskikh ob'ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics], Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2010, 372 p. (In Russ.)
6. Sentyakov B.A., Shirobokov K.P., Svyatskii V.M. [A study of the blowing head for the production of polyethylene-lenteferehalate fibers by the vertical blowing method], *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies], 2010, no. 12, pp. 6-10. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Sviatskii V., Repko A., Janačova D., Ivandič Z., Perminova O., Nikitin Y. Regeneration of a fibrous sorbent based on a centrifugal process for environmental geology of oil and groundwater degradation, *Acta Montanistica Slovaca*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 272-279.

8. Sentyakov B.A., Shirobokov K.P., Svyatskii V.M., Svyatskii M.A., Fonareva K.A. *Protsessy polucheniya i prakticheskogo ispol'zovaniya polietilentereftaltnogo volokna iz vtorichnogo syr'ya* [Processes of obtaining and practical use of polyethylene terephthalate fiber from secondary raw materials: monograph], Staryi Oskol: Izd-vo TNT, 2014, 152 p. (InRuss.)

---

### **Räumliche physikalisch-geometrische Interpretation des Prozesses der Bildung der Leinwand durch das Blasverfahren aus Sekundärthermoplasten**

**Zusammenfassung:** Auf dem Gebiet der Untersuchung der Technologie der Herstellung der Fasermaterialien aus Thermoplasten durch das Blasverfahren hat der technologische Prozess im Rahmen der Theorie der SEV-Felder zum ersten Mal eine räumliche physikalisch-geometrische Interpretation erhalten. Die vorgestellte Theorie erhöht die geometrische Anschaulichkeit der Ergebnisse der Forschungen, die mit analytischen Mitteln gewonnen werden, und trägt zu einem tieferen theoretischen Verständnis der gestellten Aufgabe und zu einer kompakten Abbildung der verwendeten Darstellungen bei.

---

### **Interprétation spatiale physico-géométrique du processus de la formation de la toile par le moyen du soufflage à partir des thermoplastiques secondaires**

**Résumé:** Pour la première fois dans le domaine de l'étude de la technologie de la production des matériaux en fibres à partir des thermoplastiques par le moyen du soufflage, le processus technologique a reçu une interprétation spatiale physico-géométrique de l'interprétation dans le cadre de la théorie de l'interaction électromagnétique des champs. La théorie présentée augmente de la visibilité géométrique des résultats des recherches obtenues par les moyens analytiques en contribuant à la réflexion théorique profonde de la tâche proposés et à l'affichage compact des présentations utilisées.

---

**Авторы:** *Святский Владислав Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и приборостроения», Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова», г. Воткинск, Россия; *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Тимофеев Вадим Леонидович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов и металловедения», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова», г. Ижевск, Россия.

**Рецензент:** *Ренко Александр Валентинович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и приборостроения», Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова», г. Воткинск, Россия.