В. М. Святский (к.т.н, доц.)

ГИПОТЕЗА ВОЛОКНООБРАЗОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ТЕРМОПЛАСТА

Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета им. М.Т.Калашникова,
кафедра «Технология машиностроения и приборостроения»
427430, г. Воткинск, ул. Шувалова, 1; тел. (34145)51500, e-mail: svlad-2000@yandex.ru

V. M. Svyatskii

HYPOTHESIS OF FIBER PRODUCTION AND ESTIMATION OF FIBER MATERIAL QUALITY INDICATORS FROM THERMOPLAST

Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University
1, Shuvalova Str., 427430, Votkinsk, Russia; ph. (34145)51500, e-mail: svlad-2000@yandex.ru

Обсуждается гипотетический механизм процесса получения волокнистого материала из термопласта дутьевым способом, а также представлена методика расчета среднего диаметра d_e и длины l_e элементарных волокон. Согласно представленным расчетам, величина среднего диаметра элементарных волокон d_e зависит от скорости воздушного потока, истекающего из дутьевой головки в зоне волокнообразования. Чем больше скорость воздушного потока V_p , тем меньше диаметр элементарных волокон. Длина элементарных волокон l_e зависит от их диаметра d_e и переменного угла γ диффузора дутьевой головки. Чем меньше диаметр элементарных волокон d_e и больше переменный угол γ , тем меньше длина элементарных волокон. При $\gamma=0$ град волокно получается бесконечной длины, с увеличением угла γ длина волокна становится фиксированной.

Ключевые слова: вертикальный и горизонтальный способ раздува расплава; волокнообразование; методика расчета среднего диаметра и длины элементарных волокон; плавление термопласта.

Волокнистые материалы, производимые из первичных или вторичных термопластов, применяются 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 транспортно-оборудования и др. ^{1–3}.

The article describes the hypothesis of obtaining elementary fibers from the melt of a thermoplastic by the blowing method, as well as the method of calculation of their average diameter d_e and length l_e . The average diameter d_e of the filaments varies depending on the speed of the airflow flowing from the blow head in the fiber-forming zone. The higher the air speed V_p , the smaller the diameter of the filaments. The length of the elementary fibers depends on the diameter of the elementary fibers and the variable angle of the diffuser of the blow head. The smaller the diameter of the filaments d_e and the larger the variable angle γ , the smaller the length of the filaments. At $\gamma = 0$, the filament is of infinite length, with increasing angle γ the fiber length becomes fixed.

Key words: fiber formation; method of calculating the average diameter and length of filaments; thermoplastic melting; vertical and horizontal melt blowing method.

При проектировании промышленного оборудования для производства волокнистого материала из термопластов дутьевым способом ставится задача — определение таких геометрических и энергетических параметров технологического процесса, при которых будет обеспечено получение волокнистого материала с заданными показателями качества и, в первую очередь, имеющего требуемый средний диаметр d_e и длину l_e элементарных волокон.

У вертикально-дутьевого способа (рис. 1а), процесс преобразования расплава термопласта, истекающего из плавильного агрегата

Дата поступления 10.03.18

под гидростатическим давлением, в волокно основан на предположении, что образующийся в дутьевой головке с кольцевым соплом поток воздуха выполняет двойную роль: вытягивание струи расплава за счет сил поверхностного трения и ее отрыв. По первой гипотезе – за счет аэродинамических сил в турбулентном потоке; по второй гипотезе – за счет сил поверхностного трения. Ниже по течению воздушного потока происходит дальнейшее движение элементарных волокон, под действием турбулентного потока воздуха, при котором, в результате охлаждения волокон температура уменьшается ниже точки плавления материала, и процесс волокнообразования прекращается⁴.

Рис. 1. Расчетные схемы для определения среднего диаметра d_c и длины l_c элементарных волокон: а – вертикальный способ (вертикально-дутьевой способ); б – горизонтальный способ (экструзионно-дутьевой способ).

У экструзионно-дутьевого способа (рис. 1б), процесс получения элементарных волокон из термопластов при горизонтальном раздуве включает плавления и транспортирование исходного сырья экструзионным способом. При этом струя расплава из фильеры распространяется горизонтально. За счет силы тяжести струя расплава принимает искривленную в вертикальной плоскости форму, а также увеличивается на 15–25 % в поперечном направлении за счет уменьшения скорости течения, и далее, за счет вязкотекучего состояния расплава, диаметр струи постепенно уменьшается. Струя воздуха, истекающая из щелевого сопла дутьевой головки, воздействует на струю расплава в зоне пластичного состояния, деформируя ее, вследствие чего она отгибается, вытягивается и разрывается на элементарные волокна за счет сил поверхностного трения. Дальнейшее перемещение элементарных волокон под действием турбулентного потока воздуха, в результате их охлаждения процесс волокнообразования прекращается⁵.

Теоретическое изучение процесса истечения расплава, представленного на рис. 1а,б, показало, что характер истечения расплава зависит от многих факторов, которые влияют на качество получаемого волокна, и является функцией:

$$d_c, l_c = f(V_\phi, V_p, V_e) \quad (1)$$

где V_ϕ – скорость истечения расплава через фильеру, м/с;

V_p – скорость потока воздуха на выходе из дутьевой головки, м/с;

V_e – скорость движения волокна в момент отрыва, м/с.

Расчетная схема получения волокнистого материала вертикальным раздувом истекающей под гидростатическим давлением струи расплавленного термопласта представлена на рис. 1а. Из плавильного агрегата происходит истечение струи расплавленного термопласта, затем эта струя входит во взаимодействие с потоком сжатого воздуха, истекающего из дутьевой головки. Диаметр единичной нити, которая образуется при взаимодействии потока воздуха со струей расплавленного материала, можно определить с помощью уравнения неразрывности:

$$Q_I = Q_{II} \quad (2)$$

Определяем объемный расход струи расплава в сечениях I и II, где Q_I – расход на срезе фильеры и Q_{II} – расход в зоне вытягивания до отрыва струи путем сдвига⁶.

$$Q_I = V_\phi \frac{\pi d_\phi^2}{4}, \quad (3)$$

$$Q_{II} = V_B \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad (4)$$

где V_ϕ – скорость истечения расплава через фильеру, м/с;

V_e – скорость движения волокна в момент отрыва, м/с;

d_ϕ – диаметр фильеры, м;

d_c – средний диаметр элементарных волокон, м.

Скорость движения волокна в момент отрыва V_e зависит от средней скорости воздушного потока V_p , истекающего из дутьевой головки. Можно предположить, что скорость движения волокна V_e будет меньше скорости воздушного потока V_p , это уменьшение можно учесть коэффициентом K_t .

$$V_B = V_p K_t. \quad (5)$$

Расход струи расплава в двух сечениях примем равным $Q_I = Q_{II}$, при этом коэффициент $K_t < 1$ зависит от сил, необходимых для разрыва сплошной струи расплавленного материала, а также от геометрической формы сопла дутьевой головки и условий образования элементарных волокон. Тогда уравнение неразрывности можно записать в виде:

$$V_\phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} = V_p K_t \frac{\pi d_B^2}{4} \quad (6)$$

Следовательно, из уравнения (6) можно определить средний диаметр элементарного волокна:

$$d_\phi = \sqrt{\frac{V_\phi}{V_p K_t}} d_B \quad (7)$$

Так как скорость движения волокна зависит от скорости движения потока воздуха, то из формулы (7) можно выразить коэффициент K_t :

$$K_t = \frac{V_\phi d_\phi^2}{V_p d_B^2} \quad (8)$$

Скорость воздушного потока V_p в зоне образования элементарных волокон в дутьевой головке была исследована и определена в работах 5, 7.

Скорость истечения расплава из плавильного агрегата V_ϕ можно определить по формуле:

$$V_\phi = \frac{G}{\rho_p S} \quad (9)$$

где ρ_p — плотность расплавленного ПЭТ-материала, ($\rho_p = 1300 \text{ кг/м}^3$)³;

S — площадь фильеры, которая определяется: $S = \pi d_\phi^2 / 4$, м²;

G — объемная производительность плавильного агрегата, кг/с.

Методика определения объемной производительности плавильного агрегата гидростатического типа представлена в 8.

Результаты расчетов коэффициента K_t представлены в табл. 1.

Кроме вытягивания элементарной нити из расплава полимера и изменения ее диаметра за счет потока воздуха в дутьевой головке, здесь также присутствует сила отрыва F_{omp} , благодаря которой и образуются элементарные волокна, Н.

$$F_{omp} = C_x S \frac{\rho_g V_{cp}^2 (\text{tg } \gamma)}{2} \quad (10)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления нити;

V_{cp} — средняя скорость потока воздуха на выходе из кольцевой щели дутьевой головки, м/с;

S — площадь элементарного волокна, м², которая определяется, как $S = d_\phi l_\phi$;

ρ_g — плотность газа, кг/м³;

$\text{tg } \gamma$ — переменный угол, который влияет на формирование полимерного волокна по длине l_ϕ .

Зная силу отрыва F_{omp} , запишем условия прочности этой элементарной нити.

В соответствии с первой гипотезой, отрыв элементарных волокон происходит за счет аэродинамических сил в турбулентном потоке, где напряжение при растяжении определяется как отношение силы отрыва F_{omp} на площадь поперечного сечения элементарного волокна.

$$\sigma_p = \frac{4F_{omp}}{\pi d_\phi^2} \quad (11)$$

Таким образом, подставив выражение (10) в (11), получим общую структуру формулы:

$$\sigma_p = \frac{4C_x l_B \rho V_{cp}^2 (\text{tg } \gamma)}{2\pi d_\phi} \quad (12)$$

В момент отрыва элементарных волокон напряжение при растяжении нити должно

Таблица 1

Результаты расчетов диаметра волокна d_ϕ и коэффициента K_t

Характеристики дутьевой головки		Характеристики плавильного агрегата		Результаты расчетов характеристик		
P_0 , кПа	V_p , м/с	d_ϕ , м	V_ϕ , м/с	d_ϕ , м	V_ϕ , м/с	K_t
50	81	0.0025	0.014	0.000094	32.4	0.4
		0.0035	0.017	0.000140	32.4	0.4
100	163	0.0025	0.014	0.000024	144	0.90
		0.0035	0.017	0.000038	144	0.90
150	258	0.0025	0.014	0.000017	254.8	0.98
		0.0035	0.017	0.000028	254.8	0.98

быть больше или равной допустимому напряжению $\sigma_p \geq [\sigma_p]$.

Из формулы 12 можно выразить длину элементарного волокна l_e :

$$l_e = \frac{[\sigma_p] 2\pi d_e}{4C_x \rho V_{cp}^2 (tg\gamma)}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что чем больше диаметр волокна d_e , тем больше увеличивается длина волокна l_e с увеличением потока воздуха V_{cp} на выходе из кольцевой щели дутьевой головки.

Для определения длины волокна l_e примем предел прочности при растяжении в момент отрыва элементарных волокон из полиэтилен-терефталата $\sigma_p = 49-59$ МПа³; коэффициент лобового сопротивления нити $C_x = 0.026$. В⁴ были исследованы семь конструкций диффузоров с углом $\beta = 0; 3; 5; 8; 10; 12; 14^\circ$.

Результаты расчетов длины волокна l_e в зависимости от переменного угла γ и диаметра волокна d_e представлены в табл. 2.

Из расчетов видно, что при угле $\gamma = 0^\circ$ образуется бесконечная полимерная мононить, но чем больше угол γ , тем полимерные волокна в процессе их раздува воздухом становятся фиксированной длины l_e .

В результате натурных испытаний процесса получения волокнистого материала с применением вторичного полиэтилентерефталата, показало, что при истечении расплава с температурой $t = 270-280^\circ\text{C}$ через фильеру диаметром $d_\phi = 0.0025$ м и воздействии на образующуюся мононить потока воздуха в рабочей зоне дутьевой головки при $P_0 = 50$ кПа, образуется волокнистый материал со средним диаметром d_e от 0.000080 до 0.000107 м и длиной l_e от 0.1 до 0.5 м при угле $\gamma = 12^\circ$. При $d_\phi = 0.0035$ м, угле $\gamma = 12^\circ$ и $P_0 = 50$ кПа средний диаметр волокон d_e составил от 0.000097 до 0.000128 м и длиной l_e от 0.3 до 0.7 м. После увеличения давления воздуха в дутьевой головке до $P_0 = 100$ кПа средние диаметры волокон составили при $d_\phi = 0.0025$ м, d_e от 0.000010 до 0.000027 м; при $d_\phi = 0.0035$ м соответственно d_e от 0.000015 до 0.000034 м. В случае последних двух вариантов длина волокон l_e составила от 0.004 до 0.1 м при угле $\gamma = 12^\circ$.

Подробные экспериментальные исследования дутьевой головки с кольцевым сходящимся соплом и процесса волокнообразования представлены в работах^{4, 5}.

Представленные методики расчета среднего диаметра d_e и длины l_e волокна при получении волокнистых материалов вертикально-дутьевым способом показали следующее:

Таблица 2

Результаты расчетов длины волокна l_e					
P_0 , кПа	d_ϕ , м	$\gamma,^\circ$	Длина волокна l_e , м	d_e , м	Длина волокна l_e , м
50	0.000094	0	нить стремится к ∞	0.000140	∞
		1	1.902		4.101
		3	0.664		1.374
		5	0.382		0.821
		8	0.236		0.506
		10	0.186		0.406
		12	0.156		0.336
		14	0.133		0.281
100	0.000024	0	∞	0.000038	∞
		1	0.0319		0.0533
		3	0.0102		0.0178
		5	0.0061		0.0106
		8	0.0038		0.0066
		10	0.0030		0.0052
		12	0.0025		0.0043
		14	0.0021		0.0037
150	0.000017	0	∞	0.000028	∞
		1	0.0060		0.0166
		3	0.0021		0.0056
		5	0.0012		0.0033
		8	0.00077		0.0021
		10	0.00061		0.0016
		12	0.00051		0.0014
		14	0.00043		0.0012

Средний диаметр элементарных волокон d_e меняется в зависимости от скорости воздушного потока, истекающего из дутьевой головки в зоне волокнообразования. Чем больше скорость воздушного потока V_p , тем меньше диаметр элементарных волокон. Расхождение результатов расчета среднего диаметра волокон с их реальными значениями не превышает 13%, что, учитывая сложность технологического процесса, можно считать удовлетворительным.

Литература

1. Шильяев А.И., Ширококов К.П., Сентяков Б.А. и др. Технология и оборудование для производства волокнистых материалов способом вертикального раздува.— Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2008.— С.248.
2. Сентяков Б.А., Ширококов К.П., Святский В.М. Волокнистый сорбент для сбора нефти на основе полиэтилентерефталата // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. тр., вып. 9.— М., 2010.— С.631-634.
3. Янков В.И., Жиганов Н.К., Пирог Н.И. Переработка волокнообразующих полимеров. Т. 7. Формование волокон из расплавов полимеров.— Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.— С.452.
4. Сентяков Б.А., Святский В.М., Святский М.А. и др. Процессы получения и практического использования полиэтилентерефталатного волокна из вторичного сырья.— Старый Оскол: Изд-во «ТНТ», 2014.— 162 с.
5. Святский В.М., Сентяков К.Б., Сентяков Б.А. Расчет средней скорости и моделирование воздушного потока в рабочей зоне дутьевой головки // Автоматизация и современные технологии.— 2013.— №6.— С.20-24.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика.— М.: Наука, 1986.— С.736.
7. Ширококов, К.П., Святский В.М. Исследование влияния конструктивных параметров диффузора на характеристику устройства волокнообразования // Вестник ИжГТУ.— 2010.— №3.— С.42-44.
8. Сентяков Б.А., Святский В.М., Ширококов К.П. Определение производительности плавильного агрегата при производстве волокнистых материалов из расплава термопластов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.— 2010.— №2.— С. 36-40.

Длина элементарных волокон l_e зависит от диаметра элементарных волокон d_e и переменного угла γ . Чем меньше диаметр элементарных волокон d_e и больше переменный угол γ , тем меньше длина элементарных волокон. При $\gamma=0^\circ$ волокно получается бесконечной длины, а с увеличением угла γ длина волокна становится фиксированной.

References

1. Shilyaev A.I., Shirobokov K.P., Sentyakov B.A. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva voloknistykh materialov sposobom vertikal'nogo razduva* [Technology and equipment for the production of fibrous materials by vertical blowing]. Izhevsk, 2008, 248 p.
2. Sentyakov B.A., Shirobokov K.P., Svyatskii V.M. *Voloknistyy sorbent dlya sbora nefti na osnove polietilentereftalata* [Fibrous sorbent for collecting oil based on polyethylene terephthalate]. *Predotvrashcheniye avariy zdaniy i sooruzheniy* [Preventing accidents of buildings and structures: Collection of scientific papers], 2010, no.9, pp.631-634.
3. Yankov V.I. Zhiganov N.K. Pirog N.I. *Pererabotka voloknoobrazuyuschikh polimerov* [Forming fibers from polymer melts]. Moscow-Izhevsk: SRC «Regular and chaotic dynamics», 2006, p.452.
4. Sentyakov B.A., Sviatskii V.M., Sviatskii M.A., Shirobokov K. P., Fonareva K.L. *Protsessy polucheniya i prakticheskogo ispol'zovaniya polietilentereftalatnogo volokna iz vtorichnogo syr'ya* [Processes of obtaining and practical use of polyethylene terephthalate fiber from secondary raw materials]. Stary Oskol: TNT Publishing House, 2014, 162 p.
5. Sviatskii V.M. Sentyakov K.B. Sentyakov B.A. *Raschyot srednei skorosti i modelirovanie vozduhnogo potoka v rabochei zone dut'evoi golovki* [Calculation of average speed and modeling of airflow in the working zone of the blow head]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and modern technologies], 2013, no.6, pp.20-24.
6. Landau L.D. Lifshitz E.M. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 736 p.
7. Shirobokov K.P. Svyatskii V.M. *Issledovanie vliyaniya konstruktivnykh parametrov diffuzora na kharakteristiku ustroystva voloknoobrazovaniya* [Investigation of the influence of the design parameters of the diffuser on the characteristics of the fiber-making device]. *Vestnik ISTU*, 2010, no.3, pp.42-44.
8. Sentyakov B.A., Svyatskii V.M., Shirobokov K.P. *Opreделение proizvoditel'nosti plavil'nogo agregata pri proizvodstve voloknistykh materialov iz rasplava termoplastov* [Determination of the productivity of the melting unit in the production of fibrous materials from the melt of thermoplastics]. *Modern technologies. System analysis. Modeling. [Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye.]*. Scientific journal, 2010, no.2, pp.36-40.