

УДК 678.027.2:621.74

DOI 10.62595/1819-5245-2026-3-56-69

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОСТАДИЙНОГО АДДИТИВНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ ИЗ ВЫСОКОВЯЗКИХ ТЕРМОПЛАСТОВ В ОДНОФИЛЬЕРНОЙ ГОЛОВКЕ

М. А. КОВАЛЕНКО, В. М. ШАПОВАЛОВ

*Государственное научное учреждение «Институт
механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Научно-практически и экспериментально обосновано применение оригинальной однофильерной головки (диаметр дюзы – 1 мм) с концентрическим вихревым обдувом воздухом при аэродинамическом формировании тонкостенных волокнисто-пористых систем. Исследовано влияние кинематических параметров манипулятора (скоростей осевого перемещения и вращения) и давления распыляющего воздуха на топологию, полидисперсность волокон и кольцевую жесткость получаемых тонкостенных трубчатых изделий (длина – 800 мм, диаметр – 70 мм). Установлено, что прямоточный канал одиночной дюзы обеспечивает стабильную переработку вязкого полимерного сырья при экстремально низких давлениях экструзии (0,1–0,5 атм) и исключает риск засорения при введении дисперсных наполнителей. Определен оптимальный кинематический критерий формования: соотношение линейной скорости перемещения оправки к частоте ее вращения должно находиться в пределах 0,5–1,25 к 2. Нарушение этого баланса приводит к макродефектам («нарезание резьбы», локальное оплавление, центробежный сброс массы). Экспериментально подтверждена возможность получения изотропных структур с общей пористостью 60–80 % и диаметром волокон 150–350 мкм. Впервые установлены взаимосвязи между давлением вихревого воздуха одиночной фильеры, дисперсностью получаемых макроволокон и колоколообразной зависимостью кольцевой жесткости пористого каркаса.

Ключевые слова: melt-blowing, аэродинамическое формование, однофильерная и многофильерная головка, турбулентный вихрь, высоковязкий полипропилен, полиэтилен высокого давления, кольцевая жесткость, тонкостенные волокнисто-пористые изделия.

Для цитирования. Коваленко, М. А. Обоснование эффективности одностадийного аддитивного аэродинамического формования тонкостенных волокнисто-пористых систем из высоковязких термопластов в однофильерной головке / М. А. Коваленко, В. М. Шаповалов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 3 (106). – С. 56–69. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-56-69>

RATIONALE FOR THE EFFICIENCY OF SINGLE-STAGE ADDITIVE AERODYNAMIC MOLDING OF THIN-WALLED FIBROUS-POROUS SYSTEMS MADE OF HIGH-VISCOSITY THERMOPLASTICS IN SINGLE-SPINNERET HEAD

M. A. KOVALENKO, V. M. SHAPOVALOV

*State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer
Research Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus”, Gomel*

The article substantiates both use of a novel single-spinneret head (nozzle diameter: 1 mm) with concentric vortex air flow for the aerodynamic forming of thin-walled fibrous-porous systems has been scientifically and experimentally substantiated. The study investigated the influence of manipulator kinematic parameters (axial movement and rotation speeds) and atomizing air pressure on the topology, fiber polydispersity, and ring stiffness of the resulting thin-walled tubular products (length – 800 mm; diameter – 70 mm). It was established that the straight-flow channel of the single-spinneret nozzle ensures stable processing of viscous polymer feedstock at extremely low extrusion pressures (0.1–0.5 atm) and eliminates the risk of clogging when dispersed fillers are introduced. An optimal kinematic forming criterion was determined: the ratio of the mandrel's linear movement speed to its rotational speed should fall within the range of 0.5–1.25 to 2. Deviating from this balance leads to macro-defects (such as “thread cutting”, local melting, and centrifugal mass shedding). The feasibility of producing isotropic structures with a total porosity of 60–80 % and fiber diameters of 150–350 μm was experimentally confirmed. Relationships were established for the first time between the single-nozzle vortex air pressure, the dispersion of the resulting macro-fibers, and the bell-shaped dependency of the porous framework's ring stiffness.

Keywords: melt-blowing, aerodynamic forming, single-spinneret and multi-spinneret head, turbulent vortex, high-viscosity polypropylene, high-pressure polyethylene, ring stiffness, thin-walled fibrous-porous products.

For citation. Kovalenko M. A., Shapovalov V. M. Rationale for the efficiency of single-stage additive aerodynamic molding of thin-walled fibrous-porous systems made of high-viscosity thermoplastics in single-spinneret head. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 3 (106), pp. 56–69 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-56-69>

Введение

На сегодняшний день волокнисто-пористые полимерные материалы, полученные методом аэродинамического формования из расплава (melt-blowing, пневмоэкструзия), находят широкое применение в качестве высокоэффективных фильтрационных сред, сорбентов, защитных мембран и других специфических изделий [1–3]. Особый практический интерес представляет производство объемных полых изделий трубчатой формы, которые используются как самостоятельные фильтр-патроны глубинного типа, так и в роли жестких проницаемых каркасов (оболочек) для финишных мембранных элементов в системах водоочистки, газоразделения и промышленной аспирации [4, 5].

Традиционная технология melt-blowing ориентирована на переработку специализированных высокотекучих марок полимеров с экстремально высоким индексом текучести расплава (показателем текучести расплава (ПТР) – от 400 до 1500 г/10 мин), что позволяет получать плоские полотна с субмикронным диаметром волокон [6]. Однако такие ультратонкие волокна не обладают достаточной собственной жесткостью и прочностью, необходимыми для восприятия радиальных нагрузок и перепадов давлений в трубчатых фильтрах. Для создания формоустойчивых крупногабаритных конструкций (например, длиной 800 мм и диаметром 70 мм) со сравнительно тонкими стенками (1–1,5 мм) требуется применение стандартных высоковязких конструкционных полимеров – трубного или экструзионного полипропилена (ПП) с ПТР – 3–12 г/10 мин и полиэтилена высокого давления (ПЭВД) с ПТР – 2 г/10 мин. Переработка таких относительно вязких систем методами пневмоэкструзии сопряжена с серьезными реологическими и аэродинамическими затруднениями.

Несмотря на существование технических решений, описывающих формование трубчатых фильтров на вращающихся оправках (например, US 5,340,479), все известные варианты базируются на многопроходном напылении с использованием многорядных линейных распределительных головок. Данные, свидетельствующие о возможности удачного совмещения вихревой аэродинамики одиночного сопла с прецизионной спиральной укладкой отверждаемой струи вязкого расплава за один проход для формирования тонкостенных (1–1,5 мм) каркасов, в литературе отсутствуют.

Традиционные линейные многофильные головки распределительного типа (так называемые «вешалки» – coat-hanger dies), успешно применяемые для плоских

полотен (например, при производстве волокнистых материалов для СИЗОД), оказываются неэффективными при формировании тонкостенных полых цилиндров из высоковязкого сырья. Высокое гидродинамическое сопротивление длинных разводящих каналов в таких головках приводит к пульсациям давления и, как следствие, интенсифицирует термическую деструкцию полимера. Кроме того, многорядные головки формируют широкий, пространственно-размытый факел расплава. При попытке напыления за один технологический проход тонкого слоя на вращающуюся металлическую оправку (дорн) широкий факел вызывает неравномерное остывание массы, «овальность» изделия, спиральные наплывы и макронеоднородность волокнисто-пористого слоя.

Альтернативным решением является переход к аддитивному принципу формирования изделия, когда тонкий сфокусированный факел, генерируемый одиночным соплом, «сканирует» поверхность движущейся оправки, относительно равномерными витками укладывая волокнистую массу с той или иной степенью упорядоченности. В связи с этим возникает необходимость фундаментального обоснования оптимума геометрии экструзионного формирующего инструмента, параметров закрученного (вихревого) обдува одиночной струи расплава и кинематики принимающего устройства.

Целью настоящей работы является обоснование эффективности выбора однофильерной вихревой (турбулентной) головки и оптимизация кинематических и аэродинамических параметров процесса для обеспечения геометрической точности, изотропности свойств и контролируемой пористости тонкостенных трубчатых волокнисто-пористых изделий.

1. Специфика получения волокнисто-пористых изделий на однофильерных вихревых и многофильерных линейных головках

В процессах аэродинамического формования волокон из расплава (melt-blowing) геометрия экструзионного инструмента определяет пространственную конфигурацию факела расплава, которая является основным фактором, формирующим дисперсность получаемых волокон и морфологию материала. При формировании объемных полых изделий, таких как тонкостенные волокнисто-пористые трубы, выбор между однофильерной головкой с вихревым обдувом и многофильерной линейной головкой распределительного типа («вешалка») является определяющим фактором пространственной ориентации волокон в определенном изделии [7].

1.1. Гидродинамические особенности переработки вязких расплавов полимеров

Сравнительный анализ реологического поведения полимерных систем с низким индексом текучести расплава (ПП с ПТР – 3–12 г/10 мин и ПЭВД с ПТР – 2 г/10 мин) выявляет фундаментальные ограничения, объективно присущие линейным многофильерным головкам. Линейные многофильерные головки (типа «вешалка») предназначены для формования широких плоских полотен. Конструкция распределительного коллектора рассчитывается на определенный профиль вязкости. При переработке высоковязких полимеров (ПТР < 12) резко возрастает внутреннее гидродинамическое сопротивление в каналах головки. Это приводит к значительному градиенту давления по ширине распределения, перегреву расплава за счет диссипативного тепловыделения и, как следствие, к неконтролируемой разнотолщинности формируемых волокон.

Однофильерные головки (рис. 1) имеют один осесимметричный канал (в данном исследовании – диаметром 1 мм). Расплав в нем движется по прямой траектории без разводящих каналов и зон сдвигового запаздывания. Это минимизирует гидродинамические потери, исключает застойные явления и снижает уровень термической деструкции вязкого полимера, гарантируя стабильный объемный расход и идентичные во времени реологические свойства струи.

1.2. Аэродинамика вихревого сопла в сравнении с плоскопараллельным обдувом

Процесс аэродинамического вытягивания полимерных струй в условиях многониточного факела существенно отличается от динамики одиночной изолированной струи. При использовании плоскопараллельного обдува многофильной головки плоские потоки сжатого воздуха, подаваемые через щелевые сопла (воздушные ножи), инициируют пространственные аэродинамические колебания волокон, которые однако в значительной степени ограничены взаимным гидродинамическим влиянием соседних нитей. Для высоковязких полимерных расплавов кинетической энергии сопутствующего воздушного потока часто оказывается недостаточной для интенсивного продольного деформирования струи. Это приводит к формированию относительно грубых монофиламентов с низкой степенью извитости, что в конечном итоге обуславливает пониженную пористость и высокую плотность формируемого нетканого настила.

В то же время для однофильной головки имеет место вихревой обдув (турбулентный вихрь). Сжатый горячий воздух подается через тангенциальные или наклонные каналы, расположенные вокруг одиночной дюзы, в зоне среза фильеры формируется высокоскоростной закрученный (вихревой) поток. Создаваемые вихрем пространство действия центробежных сил и интенсивные турбулентные пульсации заставляют вязкую струю полимера совершать трехмерные спиралевидные движения (whipping-эффект). В результате для однофильной головки происходит эффективное пространственное распределение и микроутончение одиночной струи расплава, трансформирующейся в объемный факел микроволокон [8].

1.3. Влияние кинематики формования на макроструктуру трубчатого изделия

Для получения изделия в виде полого цилиндра (длина – 800 мм, диаметр – 70 мм) с прецизионной толщиной стенки 1–1,5 мм за один технологический проход оправки пространственная геометрия факела имеет критическое значение. В таблице приведен сравнительный анализ эффективности головок в данном изучаемом процессе.

Сравнительный анализ эффективности головок при формировании тонкостенных трубчатых изделий из вязких полимеров

Технологический критерий	Однофильная вихревая головка	Линейная головка «вешалка»
Геометрия факела расплава	Локализованный, конусно-вихревой	Широкий, плоскопараллельный
Регулирование толщины стенки (1–1,5 мм)	Высокоточное (путем изменения шага навивки и подачи дорна)	Затрудненное (высокий риск наплывов и разнотолщинности)
Структура пористого каркаса	Хаотичное (принудительное) переплетение закрученных волокон	Преимущественно направленная укладка нитей в войлокоподобную структуру
Стабильность формования волокнисто-пористой системы из вязкого полимерного сырья	Абсолютная (прямой канал дюзы – 1 мм)	Низкая (риск закупоривания крайних фильер, пульсации давления)

Линейная многофильная головка формирует широкую зону напыления. При попытке нанести тонкий слой (1 мм) на вращающийся дорн за один проход, широкая завеса перекрывает большие участки оправки, вызывая неравномерное остывание полимера, образование спиральных нахлестов и стыков.

В свою очередь, однофильная вихревая головка действует как точечный прецизионный инструмент. Фокусированный вихревой факел наносит волокнистую массу узкой струей. Синхронизация вращения дорна и его осевого перемещения позволяет укладывать волокно непрерывной однородной спиралью «стык в стык» либо в регулируемый «нахлест». За счет турбулентного перемешивания волокон в вихре на стыках витков не образуется нехарактерных швов, а формируется монолитная, бесшовная волокнисто-пористая стенка с высокой воспроизводимостью свойств [9–10].

2. Обоснование геометрических и аэродинамических параметров однофильной вихревой головки

Для обеспечения точности геометрических параметров и заданной пористости трубчатых изделий необходимо оптимальное сочетание структуры формирующего узла и термомеханических условий экструзии. В данном разделе приводится научно-экспериментальное обоснование выбора однофильной головки с диаметром дюзы 1 мм и с вихревой системой аэродинамического распыления струй расплава при переработке высоковязких марок ПП и ПЭВД.

2.1. Влияние диаметра фильеры на дисперсность волокон и структуру пор

Классический процесс melt-blowing ориентирован на получение ультратонких волокон (1–10 мкм) из высокотекучих полимеров. Однако для создания жестких, формоустойчивых и тонких трубчатых каркасов (оболочек для ионообменных и других фильтров) требуются более грубые структурные элементы, способные выдерживать гидродинамическое давление фильтруемой среды без деформации пор.

Экспериментально установлено, что использование одиночной фильеры с диаметром отверстия 1 мм при переработке вязкого ПП (ПТР – 3–12 г/10 мин) и ПЭВД (ПТР – 2 г/10 мин) позволяет устойчиво формировать волокна в диапазоне диаметров от 150 до 350 мкм. Данный диапазон диаметров является оптимальным по следующим причинам.

Управление архитектурой пор. Изменение технологических параметров (температуры расплава, расхода и давления воздуха) в границах указанного диапазона диаметров волокон позволяет гибко варьировать структуру изделия. Получение волокон диаметром ближе к 350 мкм приводит к формированию высокопористой макроструктуры с низким гидравлическим сопротивлением (идеально для каркасов и фильтроэлементов грубой очистки). Снижение диаметра волокон до 150 мкм обеспечивает получение более мелкой пористой структуры для финишной (условно тонкой) фильтрации.

Реологическая стабильность при низких давлениях. В отличие от многофильных систем, где для продавливания вязкого расплава требуются высокие давления, геометрия одиночной дюзы диаметром 1 мм обеспечивает минимальное гидродинамическое сопротивление из-за минимизации площади поверхности трения металла головки о полимер. Экспериментально зафиксирован диапазон приемлемых для данной головки рабочих давлений воздуха от 0,1 до 0,5 атм. Работа в данном диапазоне давлений минимизирует диссипативный разогрев полимера, снижает его термодеструкцию и уменьшает общую энергоемкость процесса экструзии.

2.2. Технологическая инвариантность и возможность переработки композитов

Выбор диаметра дюзы 1 мм продиктован не только реологией чистых и потенциально наполненных полимеров, но и требованием к универсальности разработанного оборудования.

Переработка композиционных материалов. При создании модифицированных фильтров возникает необходимость введения в матрицу ПП или ПЭВД дисперсных наполнителей (дисперсные неорганические частицы, угольные сорбенты, наносеребро, антипирены, технологические добавки). В многофильерных головках с диаметром дюз 0,2–0,4 мм введение наполнителей неизбежно вызывает закупоривание отверстий, нарушая геометрию факела. Диаметр 1 мм полностью нивелирует риск засорения дюзы твердыми агломератами, обеспечивая стабильный и непрерывный процесс напыления композитов.

Надежность и простота обслуживания. Однофильерная конструкция сопла обладает абсолютной ремонтпригодностью. В ней отсутствуют скрытые разводящие каналы, требующие длительной ультразвуковой очистки или выжигания остатков полимера при смене перерабатываемого материала. Переход с ПП на ПЭВД или очистка головки при случайном перегреве занимают минимальное технологическое время, что критически важно для гибких малотоннажных производств трубчатых фильтров, аэраторов и других изделий.

2.3. Аэродинамические параметры вихревого обдува

Трансформация вязкой струи диаметром 1 мм в волокно диаметром 150–350 мкм за один проход реализуется за счет кинетической энергии закрученного воздушного потока (рис. 1).

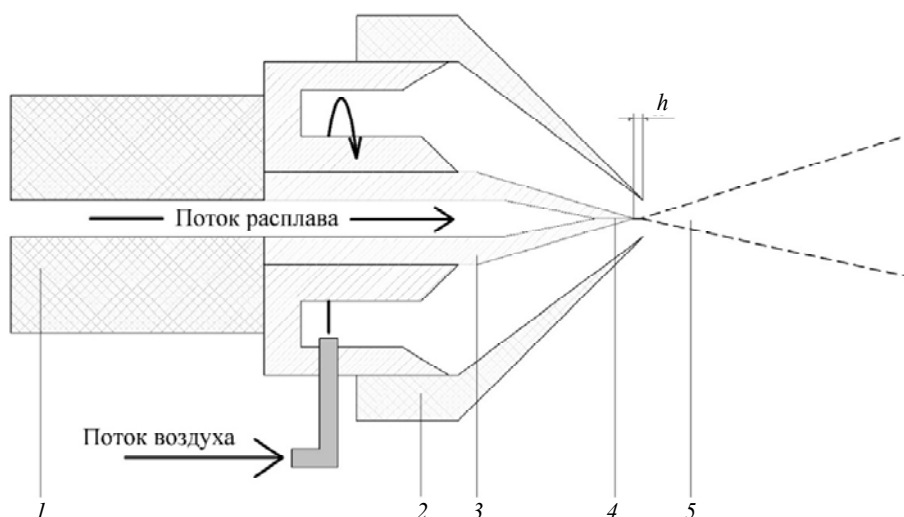


Рис. 1. Принцип работы однофильерной головки:
1 – материальный цилиндр; 2 – наружный конус;
3 – внутренний конус; 4 – фильера; 5 – факел расплава

В конструкции однофильерной головки воздух подается через систему концентрических сопел, формирующих вокруг экструдированной нити интенсивный турбулентный вихрь.

Тангенциальная составляющая скорости воздуха заставляет высокомолекулярную вязкую струю вращаться по расширяющейся спирали. Центробежные силы в сочетании с продольным аэродинамическим сдвигом равномерно утончают струю.

Вихревой поток удерживает газополимерный поток в пределах строго ограниченного конуса напыления. При продольном перемещении оправки длиной 800 мм вдоль такого сфокусированного факела волокнистая масса ложится узким фронтом, обеспечивая послойное, повитковое формирование стенки без размытия краев и наплывов.

Хаотичное вращение волокна в турбулентном вихре перед контактом с дорном исключает их направленную укладку. Волокна переплетаются во всех трех координатных направлениях (что может характеризовать процесс как аддитивный). Это гарантирует одинаковую прочность трубчатой оболочки как на разрыв вдоль оси, так и на радиальное сжатие при работе под давлением.

3. Кинематика и динамика формирования волокнисто-пористой стенки на движущейся оправке

Пространственно-геометрическая точность и бездефектность структуры тонкостенных трубчатых изделий, формируемых методом melt-blowing за один технологический проход, напрямую зависят от кинематических параметров принимающего устройства. Металлическая цилиндрическая оправка (дорн) диаметром 70 мм и длиной 800 мм закрепляется в манипуляторе, который совершает сложное движение: одновременное вращение вокруг продольной оси и поступательное (осевое) перемещение относительно неподвижного сфокусированного факела расплава. В данном разделе рассмотрены физические закономерности процесса «сканирования» поверхности дорна факелом расплава и обоснованы оптимальные режимы его перемещения.

3.1. Дефектообразование при нарушении кинематического баланса

Поскольку однофильная вихревая головка генерирует локализованный факел расплава, непрерывность наносимого слоя обеспечивается шаговой спиральной укладкой закрученного волокна. Экспериментальные исследования выявили три критических дефекта макроструктуры, возникающих при разбалансировке скоростей манипулятора.

Эффект «нарезания резьбы» (высокая скорость осевого перемещения). При чрезмерно высокой скорости продольного движения оправки шаг спирали превышает эффективную ширину пятна напыления факела. Волокнистая масса укладывается в виде изолированных, не связанных между собой витков. В структуре полностью отсутствует сплошной слой, а изделие распадается на отдельные волокнистые ленты.

Эффект термического оплавления (низкая скорость осевого перемещения). Если скорость продольного перемещения дорна слишком мала, факел расплава длительное время воздействует на один и тот же локальный участок формируемой стенки. Высокая температура транспортирующего воздуха и аккумулированное тепло полимера приводят к критическому перегреву массы. Происходит вторичное плавление уже уложенных порций микроволокон, поры смыкаются, а структура превращается в монолитную безвоздушную полимерную корку.

Эффект центробежного сброса (высокая скорость вращения). Специфика переработки вязких материалов (ПП, ПЭВД) с использованием дюзы 1 мм заключается в возможности формирования относительно массивных волокон. Такие волокна обладают значительной массой, а их поток – высокой кинетической энергией. При превышении критической скорости вращения дорна центробежные силы преодолевают адгезионное сцепление еще горячего полимера с металлической подложкой. Происходит хаотичный разброс волокнистой массы, падение плотности настила и разрушение геометрии трубы.

3.2. Обоснование оптимального критерия «перемещение – вращение»

Кинематическая схема движения оправки приведена на рис. 2, характер формирования нитевой структуры – на рис. 3. Для исключения описанных дефектов и успешного формирования бездефектного изделия с тонкой стенкой за один проход манипулятора был разработан кинематический критерий. На основе серии экспериментов установлено математическое соотношение между линейной скоростью осевого пере-

мещения оправки (V_{oc} , см/с) и частотой ее вращения ($N_{вр}$, об/с). Экспериментально доказано, что для создания изотропной, прочной и равномерной пористой структуры по всей длине 800 мм данное соотношение должно строго находиться в диапазоне:

$$V_{oc} : N_{вр} = 0,5 - 1,25 : 2.$$

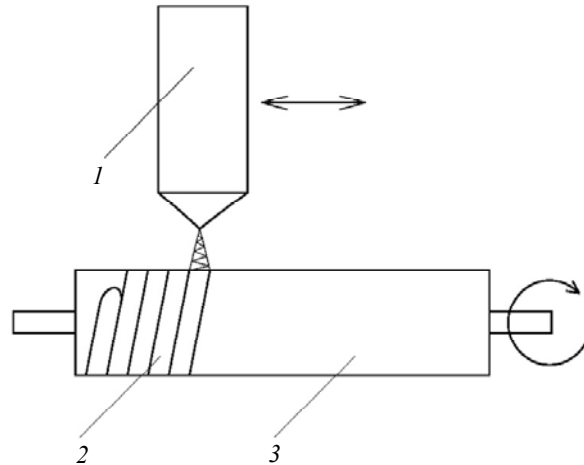


Рис. 2. Кинематическая схема движения оправки:
1 – экструдер; 2 – укладка напыляемого волокна на оправку; 3 – поверхность оправки

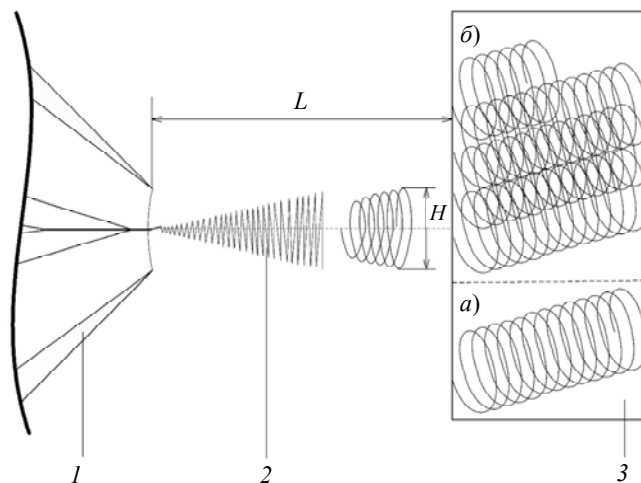


Рис. 3. Формирование бесконечной нитью расплава регулярной структуры:
1 – головка; 2 – факел; 3 – подложка (оправка); L – расстояние от фильеры до оправки; H – ширина факела на поверхности оправки:
а – вид укладки одинарной дорожки; б – вид укладки волокон при формировании перекрытия на 50 %

Такой подход гарантирует, что каждый последующий виток волокнистой спирали укладывается на дорн с прецизионным нахлестом или «стык в стык» на предыдущий виток, пока полимер находится в полурасплавленном (высокоэластическом) состоянии. В результате достигается следующее:

а) обеспечивается надежная межвитковая когезия (сваривание волокон в местах контакта на микронном уровне);

б) формируется полностью монолитная, бесшовная трубчатая оболочка с радиальным распределением пор;

в) исключаются внутренние напряжения, что позволяет легко производить последующий съем готового изделия с дорна без риска его деформации или усадки.

4. Экспериментальная оценка пористости и эксплуатационных свойств полученных фильтров

Для оценки эксплуатационной пригодности трубчатых волокнисто-пористых изделий, полученных на разработанной экспериментальной установке с однофильерной вихревой головкой, были проведены комплексные испытания их структурных и физико-механических характеристик. Ключевыми критериями оценки выступали общая объемная пористость (определяющая перспективное гидравлическое сопротивление и грязеемкость фильтра) и кольцевая жесткость при радиальном сжатии (определяющая способность каркаса выдерживать перепад давлений).

4.1. Исследование общей пористости структуры

Анализ макроструктуры образцов труб из ПП и ПЭВД, сформированных при оптимальном кинематическом соотношении скоростей перемещения и вращения (0,5–1,25 к 2), показал высокую однородность распределения воздушной фазы. Экспериментально установлено, что общая пористость полученных изделий стабильно находится в диапазоне 60–80 %. Такой высокий уровень пористости при толщине стенки 1–1,5 мм переводит разработанные изделия в класс высокоэффективных проницаемых мембранных каркасов, способных обеспечивать высокую удельную производительность фильтрации элемента, в состав которого они входят в том или ином качестве), при минимальном начальном перепаде давления.

4.2. Аэродинамический детерминизм кольцевой жесткости

Испытания физико-механических свойств проводились путем радиального сжатия кольцевых образцов до достижения 5%-й деформации их исходного диаметра. В ходе серии экспериментов была обнаружена нелинейная колоколообразная зависимость кольцевой жесткости изделия от давления сжатого воздуха $P_{\text{возд}}$, подаваемого в вихревое сопло.

Физический механизм обнаруженного явления носит комплексный реологический и аэродинамический характер и разделяется на три характерные зоны (рис. 4).

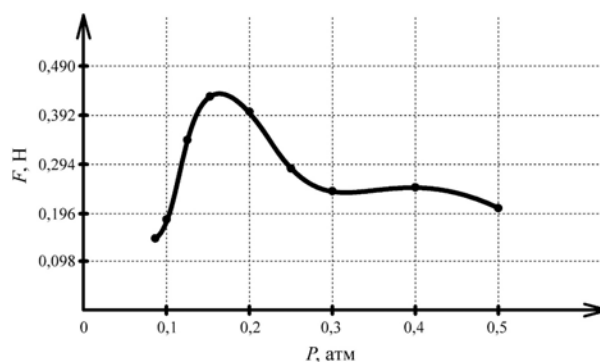


Рис. 4. Зависимость кольцевой жесткости изделия от давления воздушного потока

Восходящий участок графика (область умеренных давлений). С ростом давления воздуха от минимальных значений увеличивается кинетическая энергия вихря. Происходит интенсивное аэродинамическое утончение струи вязкого полимера с исходного диаметра 1 мм до волокон толщиной 250–350 мкм. В процессе интенсивной высокоско-

ростной вытяжки расплава происходит механическая ориентация элементов микро-структуры (надмолекулярных образований либо единичных макромолекул) вдоль оси волокна, что резко повышает собственный модуль упругости последнего. Одновременно с этим волокна укладываются на дорн в разогретом состоянии, обеспечивая максимальную когезионную прочность межволоконных контактов (узлов сетки).

Пик графика (экстремум). Формируется оптимальная, пространственно-однородная монодисперсная структура. Наблюдается идеальный баланс между высокой прочностью индивидуальных ориентированных волокон и максимальной площадью их взаимного термического сваривания в местах пересечения.

Нисходящий участок графика (область избыточных давлений). При дальнейшем увеличении давления воздуха жесткость каркаса резко падает. Избыточная турбулентность и высокая скорость воздушных струй приводят к преждевременному охлаждению волокон до момента их соприкосновения с оправкой, что критически снижает прочность когезионных связей. Кроме того, сверхвысокие скорости сдвига вызывают срыв потока расплава со среза дюзы 1 мм, провоцируя сильную полнотолщинность (разброс диаметров волокон) и появление критических дефектов структуры – полимерных капель (shots), локально блокирующих поры и снижающих общую жесткость изделия. Таким образом, регулирование давления распыляющего воздуха в однофильной вихревой головке является одним из главных аспектов прецизионного управления как дисперсностью пор (от макро- до микропор), так и несущей способностью тонкостенного пористого каркаса.

5. Микроструктурный анализ волокнисто-пористых изделий

Для подтверждения изложенных феноменологических моделей формирования бездефектной структуры и верификации механизмов спиралевидного вытягивания струи в закрученном воздушном потоке был проведен микроструктурный анализ полученных образцов волокнисто-пористых изделий. Исследование топологии, характера переплетения и дисперсности волокон выполняли методом оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете.

5.1. Топология и морфология макроволокон

На рис. 5 представлены микрофотографии фрагментов волокнисто-пористого настила, сформированного из вязкого ПП при ранее установленном оптимальном давлении распыляющего воздуха.

Визуальный анализ микроструктуры позволяет выделить несколько ключевых особенностей, характерных исключительно для разработанного однофильного вихревого метода формования.

Волокна имеют извитую, волнообразную и петлевую геометрию. В отличие от классического линейного процесса melt-blowing, где нити укладываются преимущественно параллельными слоями, вихревой поток заставляет одиночное волокно совершать сложные трехмерные колебания перед ударом о подложку. Это обеспечивает объемное (3D) переплетение структурных элементов.

На снимках оптического микроскопа в местах пересечения индивидуальных волокон четко фиксируются зоны термического сплавления – когезионные узлы связи. Из-за высокой теплоемкости массивных волокон (150–350 мкм) и вязкого состояния полимера на момент контакта соприкасающиеся нити частично диффундируют друг в друга, формируя прочный монолитный пространственный каркас. При этом волокна сохраняют свою цилиндрическую форму вне узлов, что предотвращает охрупчивание материала.

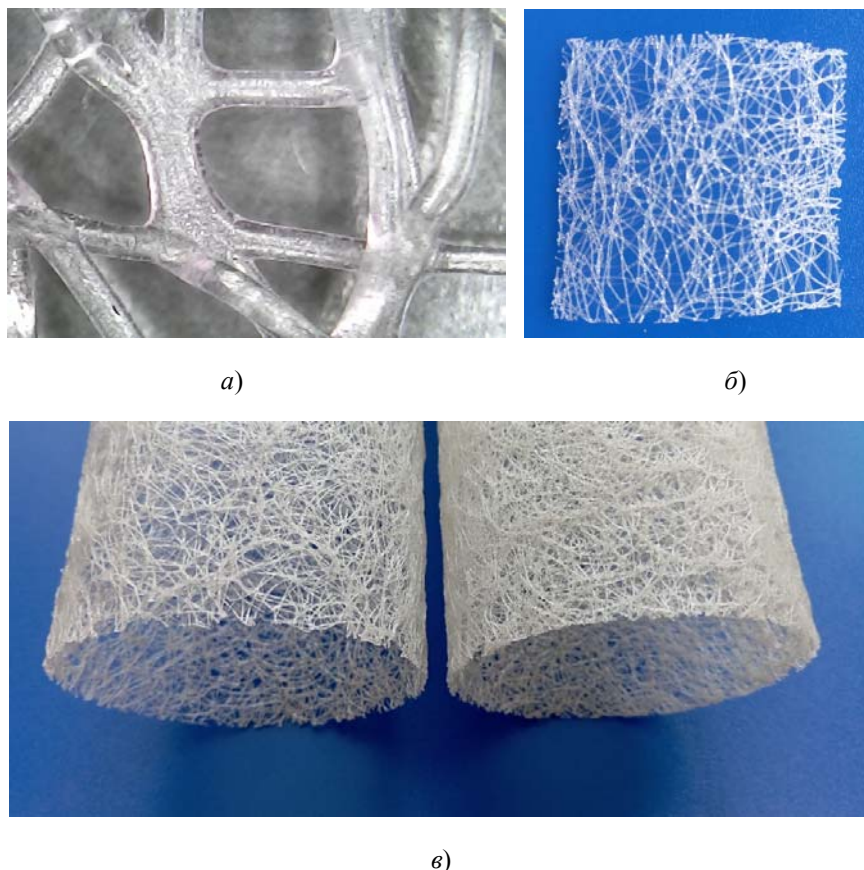


Рис. 5. Микрофотографии фрагментов волокнисто-пористого настила:
 а – микроструктура волокон и когезионных связей; б – образец холста; в – изделие

Микроструктурный анализ подтверждает отсутствие выраженной анизотропии и направленной ориентации волокон вдоль оси вращения или перемещения дорна. Хаотичная геометрия укладки гарантирует равномерное распределение сквозных пор по всему объему стенки, исключая появление сквозных каналов и обеспечивая стабильный барьерный эффект.

5.2. Оценка полидисперсности волокон и дестабилизации потока

Важным этапом микроструктурного анализа стало сопоставление геометрии волокон с ранее обнаруженной колоколообразной зависимостью кольцевой жесткости от давления воздуха.

При давлениях воздуха, соответствующих пику физико-механических свойств, волокнистый настил характеризуется высокой монодисперсностью. Волокна обладают стабильным диаметром вдоль своей оси, а разброс геометрических размеров минимален, что указывает на формирование в данном процессе зоны оптимума.

Исследования материалов оптической микроскопией показали, что после прохождения точки экстремума на графике жесткости и выхода на нисходящую ветвь в структуре резко возрастает полидисперсность волокон в настиле. Наблюдается интенсивный рост разброса значений толщины волокон, достигающий до 50 % от среднего математического значения. С реологической точки зрения это обусловлено избыточной кинетической энергией и критической турбулентностью вихря, дестабилизирующих основу струи вязкого расплава на срезе дюзы. Происходит хаотичный срыв потока, чередование зон сверхаттенуации (утончения) и локального недовытягивания волкон, что приводит к появлению критических геометрических дефектов и падению прочности каркаса [11].

5.3. Методологическая ценность формирования тонкостенных изделий за один проход

Помимо чисто технологических преимуществ производства трубчатых фильтров предложенный в настоящей работе подход – формирование прецизионного тонкостенного изделия толщиной всего 1–1,5 мм за один технологический проход оправки – имеет фундаментальное методологическое значение для исследований в области переработки полимеров. По сути, получаемое изделие представляет собой изолированный элементарный melt-blown слой. В традиционных многорядных технологиях слои многократно перекрывают друг друга, скрывая дефекты и искажая истинную физическую картину формования, что делает невозможным прямой послойный анализ. Предложенный метод «одного прохода» вносит вклад в развитие материаловедческих аспектов пневмоэкструзионных технологий полимерных композитов, позволяя определять уточненные показатели по переработке и формированию волокнистых элементов в тонкостенных конструкциях.

В области прямой верификации топологии и пористости материалов метод позволяет проводить прецизионную оценку геометрии укладки волокон, формирования пор и возникновения дефектов в их нативном виде без искажений от последующих термических циклов напыления.

При экспресс-оценке реологии новых композитов метод может быть использован как экспресс-тест для изучения формуемости, кинетики отверждения волокон, сложной ориентационной вытяжки и реального разброса толщин волокон при переработке любых новых, в том числе вторичных, или высоконаполненных композиционных материалов.

Метод позволяет производить точечную оценку физико-механических свойств путем измерения кольцевой жесткости и упругости единичной пространственной сетки, исключая влияние межслойных сдвигов и расслоений, свойственных толсто-стенным многослойным изделиям.

Заключение

Проведенный анализ исследований по оценке эффективности использования одностадийного аддитивного аэродинамического формования тонкостенных волокнисто-пористых систем из высоковязких термопластов в формирующей оснастке позволил сделать следующие выводы:

1. Обоснована нецелесообразность применения линейных многофильных головок типа «вешалка» для прецизионного формирования тонкостенных (1–1,5 мм) трубчатых волокнисто-пористых изделий из высоковязких полимеров (ПП с ПТР – 3–12 г/10 мин, ПЭВД с ПТР – 2 г/10 мин). Линейное распределение вязкого расплава приводит к критическим пульсациям давления, а широкий факел напыления исключает возможность послойного спирального формирования геометрии трубы за один проход оправки.

2. Научно и экспериментально доказана эффективность использования однофильной головки с диаметром дюзы 1 мм и концентрическим вихревым обдувом при формировании тонкостенных (1–1,5 мм) трубчатых волокнисто-пористых изделий. Прямоточный канал фильеры обеспечивает стабильное течение вязкого полимера при экстремально низких рабочих давлениях экструзии (0,1–0,5 атм), исключает деформацию сырья и позволяет беспрепятственно перерабатывать дисперсно-наполненные композиционные материалы без риска закупоривания каналов инструмента.

3. Установлено, что для получения бесшовной, монолитной трубчатой стенки длиной 800 мм и диаметром 70 мм за один технологический ход манипулятора кинематическое соотношение между линейной скоростью осевого перемещения дорна и частотой его вращения должно строго выдерживаться в интервале V_{oc} к $N_{вр} = 0,5–1,25$ к 2.

Нарушение данного баланса приводит к дефектам типа «нарезания резьбы», локальному оплавлению массы или центробежному сбросу крупных волокон (искажению геометрии).

4. Экспериментально подтверждено формирование высокопористой структуры (общая пористость – 60–80 %) с контролируемым диаметром волокон от 150 до 350 мкм. Выявлена колоколообразная зависимость кольцевой жесткости изделий от давления распыляющего воздуха, оптимум которой отвечает условиям максимальной ориентационной вытяжки микроволокон при сохранении прочности их межвиткового когезионного сваривания.

5. Показана высокая методологическая ценность предложенного принципа формирования тонкостенного изделия за один проход, который фактически моделирует изолированный элементарный melt-blown слой. Данный подход обоснован как новый метод материаловедческого экспресс-анализа, позволяющий без искажений исследовать топологию пор, когезионное взаимодействие и истинный разброс толщин волокон.

Работа выполнена в рамках задания 4.2.3 НИР 1 «Развитие научно-технологических принципов аэродинамического формирования гибридных волокнисто-пористых материалов в условиях электрофизического воздействия и модифицирования полимеров для композиционных сорбционно-фильтрационных систем в нефтегазовой и топливной промышленности» ГПНИ 7 «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.4 «Порошковые и композиционные материалы» на 2026–2030 гг.

Литература

1. Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials / L. S. Pinchuk, V. A. Goldade, A. V. Makarevich, V. N. Kestelman. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2002. – 411 p.
2. Fundamentals and Applications of Micro- and Nanofibers / A. L. Yarin, B. Pourdeyhimi, S. Ramakrishna. – Cambridge : Cambridge University Press, 2014. – 414 p.
3. Кравцов, А. Г. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы : монография / А. Г. Кравцов, С. А. Марченко, С. В. Зотов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 319 с.
4. Басов, Н. И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, В. А. Брагинский, Ю. В. Казанков. – М. : Химия, 1991. – 352 с.
5. Генис, А. В. Получение волокнистых материалов из расплавов полимеров аэродинамическим способом : учеб. пособие / А. В. Генис ; Рос. заоч. ин-т текстил. и легкой пром-сти. – М. : [б. и.], 2002. – 31 с.
6. Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review / J. Drábek, M. Zatloukal // Physics of Fluids. – 2019. – Vol. 31, N 9. – Art. 091301.
7. Shambaugh, R. L. A Macroscopic View of the Melt-Blowing Process / R. L. Shambaugh // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1990. – Vol. 27, N 12. – P. 2363–2372.
8. Krutka, H. M. Effects of Die Geometry on the Flow Field of the Melt-Blowing Process / H. M. Krutka, R. L. Shambaugh, P. E. Papavassiliou // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2003. – Vol. 42, N 22. – P. 5541–5553.
9. Bansal, V. On-line Determination of Diameter and Temperature during Melt Blowing of Polypropylene / V. Bansal, R. L. Shambaugh // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1998. – Vol. 37, N 5. – P. 1799–1806. – DOI 10.1021/ie9709042
10. Bresee, R. R. Influence of Processing Conditions on Melt Blown Web Structure. Part 1: DCD / R. R. Bresee, A. U. Qureshi // International Nonwovens Journal. – 2004. – Vol. 13, N 1. – P. 11–18.

11. Bresee, R. R. Influence of processing conditions on shot formation in melt blown webs / R. R. Bresee, Z. Yan // *International Nonwovens Journal*. – 2005. – Vol. 14, N 2. – P. 23–31.

References

1. Pinchuk L. S., Goldade V. A., Makarevich A. V., Kestelman V. N. *Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2002. 411 p.
2. Yarin A. L., Pourdeyhimi B., Ramakrishna S. *Fundamentals and Applications of Micro- and Nanofibers*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014. 414 p.
3. Kravtsov A. G., Marchenko S. A., Zotov S. V. *Polymeric fibrous-porous filtering materials: monograph*. Ed. Pleskachevskii Yu. M. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2012. 319 p. (in Russian).
4. Basov N. I., Braginskii V. A., Kazankov Yu. V. *Calculation and design of forming tools for the manufacture of products from polymeric materials*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 352 p. (in Russian).
5. Genis A. V. *Production of fibrous materials from polymer melts by aerodynamic method*. Moscow, Russian Correspondence Institute of Textile and Light Industry, 2002. 31 p. (in Russian).
6. Drábek J., Zatloukal M. Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, no. 9. Art. 091301.
7. Shambaugh R. L. A Macroscopic View of the Melt-Blowing Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1990, vol. 27, no. 12, pp. 2363–2372.
8. Krutka H. M., Shambaugh R. L., Papavassiliou P. E. Effects of Die Geometry on the Flow Field of the Melt-Blowing Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, vol. 42, no. 22, pp. 5541–5553.
9. Bansal V., Shambaugh R. L. On-line Determination of Diameter and Temperature during Melt Blowing of Polypropylene. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, vol. 37, no. 5, pp. 1799–1806. <https://doi.org/10.1021/ie9709042>
10. Bresee R. R., Qureshi A. U. Influence of Processing Conditions on Melt Blown Web Structure. Part 1. DCD. *International Nonwovens Journal*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 11–18.
11. Bresee R. R., Yan Z. Influence of processing conditions on shot formation in melt blown webs. *International Nonwovens Journal*, 2005, vol. 14, no. 2, pp. 23–31.

Поступила 02.09.2026 г.