

**На правах рукописи**

**Веретнов Андрей Леонидович**

**ШНЕКОВЫЙ ЭКСТРУДЕР  
СО СМЕСИТЕЛЬНЫМ ШТИФТОВЫМ УЗЛОМ**

Специальность:

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

- Научный руководитель:** Кушев Леонид Анатольевич  
доктор технических наук, профессор.
- Официальные оппоненты:** Шарапов Рашид Ризаевич  
доктор технических наук, профессор,  
БГТУ им. В.Г. Шухова, кафедра  
механического оборудования,  
профессор;
- Обод Александр Петрович  
кандидат технических наук, доцент,  
ООО «АЛНА», директор.
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Воронежский  
государственный архитектурно-  
строительный университет».

Защита состоится «12» апреля 2012 года в 12<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.014.04 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, главный учебный корпус, ауд. 242).

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2012 г.

Ученый секретарь совета

В.А. Уваров

## **Общая характеристика работы.**

### **Актуальность работы.**

Научно-технический прогресс диктует необходимость применения новых строительных материалов, характеризующихся высокими технико-эксплуатационными показателями и сравнительно низкой себестоимостью. В их число входят полимерные композиционные материалы (ПКМ), имеющие ряд преимуществ:

- уникальное сочетание компонентов;
- возможность управления свойствами путем изменения состава;
- сохранение основных достоинств полимеров.

Одношнековые экструдеры, наиболее широко распространенные агрегаты для получения полимерных композиционных материалов, имеют ряд недостатков, основной из которых – недостаточная смесительная способность шнеков стандартных конструкций. Дополнительная гомогенизация расплава и диспергирование наполнителя полимерной композиции имеет важное значение для интенсификации процесса получения полимерных композиционных материалов, т.к. повышение качества смешения ведет к улучшению и стабилизации физико-механических свойств изделий.

В настоящее время основное внимание уделяется разработке одношнековых экструдеров со смесительными зонами, которые позволяют достичь высокой степени гомогенизации расплавов полимера и диспергирования наполнителя. Однако для этих машин характерна усложненная конструкция, значительно увеличивающая стоимость изготовления и ремонта шнеков и шнековых пар. Решение этих проблем возможно при использовании смесительных приспособлений на выходном конце шнеков экструдеров, но сейчас отсутствует единый подход к рассмотрению шнековых экструдеров со смесительными приспособлениями как единого агрегата.

Поэтому представляется актуальной разработка конструкции смесительного штифтового узла (СШУ), изучение физических процессов в шнековом экструдере, оснащем СШУ, разработка математической модели, а в конечном итоге инженерной методики расчета шнекового экструдера оснащенного СШУ.

Тематика работы соответствует одному из важнейших научных направлений Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова «Создание современных систем машин и оборудования, средств механизации и автоматизации для производства строительных материалов и изделий».

**Цель работы.** Разработка шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом, обеспечивающего повышение эффективности перемешивания полимерного композиционного материала до 95%.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать патентно-чистую конструкцию шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом, обеспечивающую повышение степени гомогенизации расплава полимерного композиционного материала до 95%;

2. Разработать математическую модель процесса движения материала в смесительном штифтовом узле;

3. Установить теоретические и экспериментальные зависимости основных параметров шнекового экструдера, оснащенного смесительным штифтовым узлом, в зависимости от конструктивно-технологических параметров машины;

4. Разработать инженерную методику расчета основных конструктивно-технологических параметров шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом;

5. Осуществить внедрение в промышленное производство.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель процесса движения материала в смесительном штифтовом узле;

2. Получены аналитические зависимости затрат мощности в смесительном штифтовом узле;

3. Получены математические выражения в виде уравнений регрессии, описывающие изменение производительности, потребляемой мощности, удельного расхода электроэнергии, позволяющие определить рациональные режимы процесса экструзии полимерного композиционного материала в шнековом экструдере оснащенный смесительным штифтовым узлом.

**Достоверность** научных положений диссертационной работы основана на применении современных апробированных методов исследований экструзии; анализа и научных обобщений выполненных к настоящему времени работ по расчету шнековых экструдеров; применение современных вычислительных методов, программных комплексов; подтверждается достаточным объемом экспериментальных данных и удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

**Практическая ценность работы** заключатся в создании конструкции шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом, обеспечивающей повышение эффективности процесса перемешивания до 95% и повышения качества получаемых изделий из полимерного композиционного материала. Новизна конструктивного решения защищена патентом РФ №97087 от 20.04.2010 г.

Разработана инженерная методика расчета, позволяющая произвести расчет основных конструктивно-технологических

параметров шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом для получения полимерного композиционного материала, а также определить рациональные параметры работы машины.

Результаты работы в виде разработанной конструкции шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом и рекомендаций по режимам процесса экструзии могут быть использованы при расчете смесительных приспособлений одношнековых экструдеров в промышленности строительных материалов, химической, пищевой и др.

Математическая модель, технические характеристики, инженерная методика расчета шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом используется в проведении лабораторных и практических занятий, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также чтении лекционных курсов по дисциплине «Специальное оборудование для производства строительных материалов и изделий», по профилю «Механическое оборудование и технологические комплексы предприятий строительных материалов, изделий и конструкций» направления 270800.62 «Строительство» на кафедре «Механического оборудования предприятий промышленности строительных материалов» БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### **Автор защищает.**

1. Разработанную патентно-чистую конструкцию шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом, обеспечивающую повышение степени гомогенизации расплава полимерного композиционного материала;

2. Математическую модель процесса движения материала в смесительном штифтовом узле, аналитические зависимости определяющие затраты мощности в смесительном штифтовом узле, а также коэффициент геометрической формы смесительного штифтового узла;

3. Результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии по определению производительности, потребляемой приводом мощности и удельного расхода электроэнергии шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом и эффективности его применения;

4. Разработанную инженерную методику расчета основных конструктивно-технологических параметров шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом.

**Реализация работы.** Теоретические и экспериментальные результаты работы апробированы в ООО «ЭКО-ПЛАСТ» в технологическом процессе получения гранул полимерного композиционного материала.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных научно-технических конференциях БГТУ им. В.Г. Шухова, проведенных с 2009 по 2011 гг.; «Научные исследования, автоматика и динамика машин, инновационные и средозащитные технологии в техносфере», Курск, 2007; «Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города», Москва, 2008; «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии», Пенза, 2010.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе одна в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК РФ, получен патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из: введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 161 наименований. Работа изложена на 178 страницах, в том числе содержит 73 рисунок, 13 таблиц, 5 приложений на 10 страницах.

### **Содержание работы**

**Введение.** Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, указана научная новизна, практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1.** Выполнен анализ техники и технологии механического смешения полимеров с наполнителями. Рассмотрены конструкции смесителей периодического и непрерывного действия.

Несмотря на многолетний опыт использования шнековых экструдеров они продолжают оставаться эффективными смесительными агрегатами, широко используемыми для получения изделий из полимерных материалов. Разработка современных шнековых машин базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях отечественных и зарубежных ученых: Фишер Э., Шенкель Г., Бернхардт Э, Мак-Келви Д., Торнер Р.В., Тадмор Э., Гогос К., Ким В.С. и др. Глубокие исследования по получению строительных материалов в шнековых машинах в БГТУ им. В.Г. Шухова выполнены под руководством Богданова В.С., Севостьянова В.С., Дубинина Н.Н., Герасимова М.Д.

Рассмотрены специальные конструкции шнеков и шнековых пар для интенсификации процесса смешения.

В результате анализа способов интенсификации процессов смешения в одношнековых экструдерах определена целесообразность применения смесительных приспособлений на выходном конце шнека, обеспечивающих повышение качества смешения при незначительном увеличении удельного расхода электроэнергии приводом экструдера.

Рассмотрены существующие методики расчета производительности и потребляемой мощности приводом

одношнековых экструдеров, коэффициентов геометрических форм каналов различной конфигурации. Установлено, что они не полностью описывают процессы, происходящие в смесительных приспособлениях, и не учитывают их конструктивные особенности.

Поэтому является актуальной задача разработки математического описания процессов, происходящих в смесительных наконечниках, включающая в себя определение поля скоростей, затрат мощности, зависимости коэффициента геометрической формы от конструктивных параметров.

В главе приведено описание предложенной конструкциишнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом обеспечивающего повышение эффективности перемешивания полимерного композиционного материала.

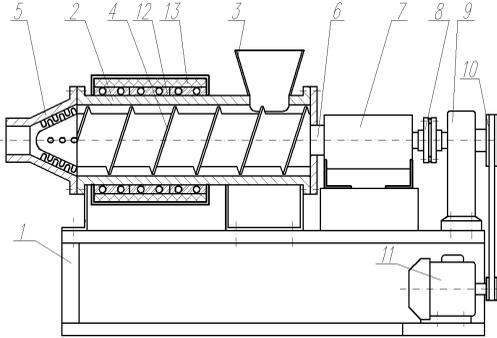


Рис. 1. Шнековый экструдер со смесительным штифтовым

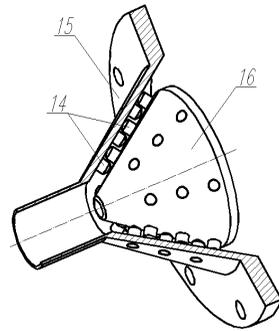


Рис. 2. Смесительный штифтовой узел

Шнековый экструдер со смесительным штифтовым узлом (рис. 1) состоит из станины 1, размещенного на ней материального цилиндра 2 с загрузочным бункером 3, из которого материал подается для переработки вращающимся шнеком 4 и транспортируется в сторону смесительного штифтового узла 5 (рис. 2). Вал 6 шнека закреплен в подшипниковом узле 7 и приводится в движение через муфту 8, редуктор 9, клиноременную передачу 10 электродвигателем 11.

Материальный цилиндр между загрузочным бункером и смесительным штифтовым узлом охватывают электронагреватели 12. Поступивший материал разогревается, полимер расплавляется и обволакивает частицы наполнителя. Комплект электронагревателей заключен в термоизолирующий корпус 13.

По достижении конца материального цилиндра расплав материала переходит в смесительный штифтовой узел, где посредством штифтов 14, расположенных на конусообразной смесительной головке 15 и смесительной насадке 16 соответственно, происходит дополнительная

гомогенизация расплава материала. Полимерная композиция выдавливается через выходное отверстие.

### Глава 2.

Конструкция СШУ позволяет предположить, что определение коэффициента геометрической формы  $K$  строго аналитическим методом невозможно. Поэтому прибегаем к методу приближенного расчета, заменив реальную систему упрощенной моделью (рис. 3).

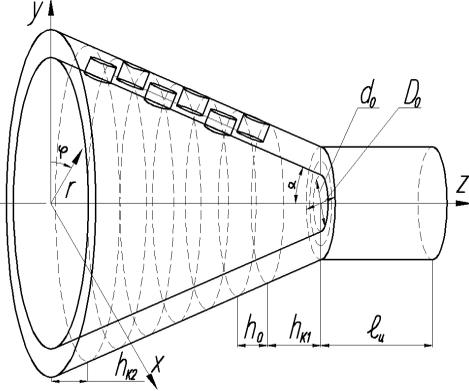


Рис. 3. Расчетная схема для нахождения коэффициента геометрической формы СШУ методом ступенчатой аппроксимации

Примем следующие допущения: смесительный наконечник неподвижен относительно конусообразной смесительной головки; вязкость расплава материала постоянна и одинакова в любом взятом объеме канала СШУ.

Согласно сделанным допущениям коэффициент геометрической формы канала СШУ равен:

$$K = \left[ \sum_{n=1}^m \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_{K1}} + \frac{1}{K_{K2}} + \frac{1}{K_u} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $K_n$  – коэффициенты геометрической формы конических участков СШУ содержащих штифты,  $\text{м}^3$ ;  $K_{K1}$  – коэффициент геометрической формы первого конического участка СШУ, не содержащего штифтов,  $\text{м}^3$ ;

$K_{K2}$  – коэффициент геометрической формы второго конического участка СШУ, не содержащего штифтов,  $\text{м}^3$ ;  $K_u$  – коэффициент геометрической формы цилиндрического участка СШУ,  $\text{м}^3$ ;  $m$  – число сечений.

Коэффициент геометрической формы цилиндрического и конических участков СШУ, не содержащих штифты рассчитываются по общепринятым формулам:

$$K_u = \frac{\pi d_u^4}{128 l_u}, \quad (2)$$

$$K_{K1} = \frac{16\pi h_{K1}^3 tg^4 \alpha \cos \alpha}{27,6 \lg \left( 1 + \frac{4h_{K1} tg \alpha}{D_0 + d_0} \right)}, \quad (3)$$

$$K_{K2} = \frac{16\pi h_{K2}^3 tg^4 \alpha \cos \alpha}{27,6 \lg \left( 1 + \frac{4h_{K2} tg \alpha}{D_0 + d_0 + 4tg \alpha (h_{K1} + 5h_0)} \right)}, \quad (4)$$

где  $d_u$  – диаметр цилиндрической части СШУ, м;  $l_u$  – длина цилиндрической части СШУ, м;  $D_0$  и  $d_0$  – диаметр меньшего основания соответственно внешнего и внутреннего конуса, м;  $h_{K1}$  и  $h_{K2}$  – высота соответственно первого и второго конического участка (проекция длины конического участка на ось  $z$ ), м;  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса СШУ с осью  $z$ .

Согласно конструктивным размерам коническая часть СШУ содержащая штифты разбивается на равные участки с шагом  $h_0$ . Исходя из этого, коэффициент геометрической формы  $n$ -го участка СШУ содержащего штифты, задается следующим соотношением:

$$K_n = \frac{\pi \left[ D_0^2 - d_0^2 + 4(D_0 - d_0)(2h_{K1} + h_0(2n-1))tg \alpha - \frac{4d_{um}h_{um}M_n}{\pi} \right]^3 \cos \alpha}{128h_0 \left[ D_0 + d_0 + 4tg \alpha (2h_{K1} + h_0(2n-1)) + 2h_{um}M_n \right]^2}, \quad (5)$$

где  $M_n$  – число штифтов в  $n$ -м сечении;  $d_{um}$  – диаметр штифта, м;  $h_{um}$  – высота штифта, м.

Подставив (2), (3), (4) и (5) в (1) получим выражение для расчета суммарного коэффициента геометрической формы СШУ.

Конструктивно СШУ состоит из двух коаксиально расположенных усеченных конусов, образующих рабочую полость. При этом внешний конус неподвижен, внутренний закреплен на выходном конце шнека экструдера и вращается вместе с ним.

Движение расплава материала через СШУ принято стационарным и ламинарным.

Для нахождения аналитических выражений описывающих распределение скоростей течения материала в СШУ можно воспользоваться уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность расплава материала,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\vec{v}$  – вектор скорости движения расплава материала в СШУ, м/с.

Если предположить, что плотность расплава материала является постоянной величиной, тогда решение уравнения (6) удобно искать в виде:

$$\vec{v} = -\text{grad} \Phi. \quad (7)$$

В силу аксиальной симметрии СШУ введем согласно рис. 3 цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ .

Тогда уравнение для нахождения неизвестной величины потенциала  $\Phi$  в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0. \quad (8)$$

В силу того, что движение расплава материала в СШУ происходит по спиральной траектории решение уравнения (8) можно представить в виде:

$$\Phi(r, \varphi, z) = \psi(r) \sin(kz - \varphi), \quad (9)$$

где  $k$  – параметр спирали.

Если ввести безразмерную координату  $\xi$  согласно соотношению:

$$\xi = k \cdot r, \quad (10)$$

тогда дифференциальное уравнение (8) приводится к виду:

$$\frac{d^2 \psi}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d\psi}{d\xi} - \left( k^2 + \frac{1}{\xi^2} \right) \psi = 0. \quad (11)$$

Общее решение уравнения (11) имеет следующий вид:

$$\psi(\xi) = C_1 I_1(\xi) + C_2 K_1(\xi), \quad (12)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  произвольные постоянные.

В силу непрерывности функции  $\Phi$  при изменении координат  $\varphi$  и  $z$  соответственно на  $2\pi$  и  $h$ , здесь  $h$  – представляет собой величину шага спирали, которая с параметром  $k$  связана соотношением:

$$k = \frac{2\pi}{h}. \quad (13)$$

На основании (9), (12) выражение (7) приводит к следующему результату:

$$v_r = -k \left[ C_1 \frac{dI_1(\xi)}{d\xi} + C_2 \frac{dK_1(\xi)}{d\xi} \right] \sin(kz - \varphi), \quad (14)$$

$$v_\varphi = \frac{1}{r} \left[ C_1 I_1(\xi) + C_2 K_1(\xi) \right] \cos(kz - \varphi), \quad (15)$$

$$v_z = -k \left[ C_1 I_1(\xi) + C_2 K_1(\xi) \right] \cos(kz - \varphi). \quad (16)$$

Произвольные постоянные  $C_1$  и  $C_2$  можно найти на основании граничных условий:

$$v_r \left( r = \frac{d_u}{2}, z = 0, \varphi = 0 \right) = 0, \quad (17)$$

$$v_\varphi \left( r = \frac{d_{uu}}{2}, z = 0, \varphi = 0 \right) = n_{uu} \frac{d_{uu}}{2}, \quad (18)$$

$$v_z \left( r = \frac{D_{K2}}{2}, z = 0, \varphi = 0 \right) = v_z^{(0)}, \quad (19)$$

где  $d_{uu}$  – диаметр шнека, м;  $n_{uu}$  – частота вращения шнека,  $\text{с}^{-1}$ ;  $v_z^{(0)}$  – начальное значение составляющей скорости вдоль оси “oz”, м/с, равное:

$$v_z^{(0)} = \frac{Q_0}{S_3}, \quad (20)$$

здесь  $S_3$  – площадь входного сечения СШУ,  $\text{м}^2$ ;  $Q_0$  – объемный расход шнекового экструдера,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Применяя соотношения (18) и (19), получим следующую систему двух уравнений с двумя неизвестными  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\begin{cases} \frac{1}{d_{uu}} \left[ C_1 I_1 \left( \frac{k d_{uu}}{2} \right) + C_2 K_1 \left( \frac{k d_{uu}}{2} \right) \right] = \frac{n_{uu} d_{uu}}{2}; \\ -k \left[ C_1 I_1 \left( \frac{k D_{K2}^{cp}}{2} \right) + C_2 K_1 \left( \frac{k D_{K2}^{cp}}{2} \right) \right] = v_z^{(0)}. \end{cases} \quad (21)$$

Решение системы (21) имеет вид:

$$C_1 = \frac{\frac{h}{2\pi} \left( v_z^{(0)} K_1(\xi_1) + \frac{\pi n_{uu} d_{uu}^2}{h} K_1(\xi_2) \right)}{I_1(\xi_1) K_1(\xi_2) - I_1(\xi_2) K_1(\xi_1)}, \quad (22)$$

$$C_2 = -\frac{\frac{h}{2\pi} \left( v_z^{(0)} I_1(\xi_1) + \frac{\pi n_{uu} d_{uu}^2}{h} I_1(\xi_2) \right)}{I_1(\xi_1) K_1(\xi_2) - I_1(\xi_2) K_1(\xi_1)}, \quad (23)$$

где введены соотношения:

$$\xi_1 = \frac{\pi d_{uu}}{h}, \quad (24)$$

$$\xi_2 = \frac{\pi D_{K2}^{cp}}{h}. \quad (25)$$

Полученные соотношения (14)-(16) в совокупности с выражениями (22) и (23) позволяют рассчитать значения проекций вектора скорости среды в СШУ.

Основные затраты мощности в смесительном штифтовом узле будут происходить за счет затрат мощности  $N_1$  на совершение работы против силы сопротивления  $R_1$  возникающей в результате движения подвижных штифтов смесительного наконечника СШУ, а также за

счет совершения работы по преодолению силы сопротивления  $R_2$ , возникающей при обтекании расплавом материала неподвижных штифтов, закрепленных на конусообразной смесительной головке СШУ. Полная мощность, затрачиваемая на совершение работы при прохождении расплава материала через СШУ будет определяться следующим соотношением:

$$N = \bar{N}_1 + \bar{N}_2, \quad (26)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – средние значения мощности, затрачиваемой на совершение работы по преодолению сил сопротивления материалом при прохождении соответственно через подвижные и неподвижные штифты, Вт. Очевидно, что:

$$\bar{N}_1 = R_1 \cdot \bar{U}, \quad (27)$$

здесь  $\bar{U}$  – среднее значение скорости вращения подвижных штифтов, которая определяется следующим соотношением:

$$\bar{U} = \frac{n_{ш}}{3} \sum_{n=1}^3 \left( d_{2n} + \frac{h_{шм}}{2} \right), \quad (28)$$

здесь величина  $d_{2n}$  задается выражением  $d_n = d_0 + 2tg\alpha (h_{к1} + (n-1) \cdot h_0)$  для соответствующего индекса суммирования “n”.

Применительно к рассматриваемому случаю среднее значение величины силы сопротивления одного вращающегося цилиндрического штифта равно:

$$\bar{R}_{2n} = \frac{4\pi\mu h_{шм} n_{ш}}{\ln k_1 - \frac{k_1^2 - 1}{k_1^2 + 1}} \left( d_{2n} + \frac{h_{шм}}{2} \right), \quad (29)$$

где

$$k_1 = \frac{D_{2n}^{cp}}{d_{шм}}, \quad (30)$$

здесь  $D_{2n}^{cp}$  – средний диаметр участка СШУ содержащего подвижные штифты, м.

Среднее значение величины силы сопротивления всех вращающихся цилиндрических штифтов определяется следующим соотношением:

$$R_1 = n_0 \sum_{n=1}^3 \bar{R}_{2n}, \quad (31)$$

где  $n_0$  – число подвижных цилиндрических штифтов в каждом ряду смесительного наконечника СШУ.

Выражение для среднего значения мощности, затрачиваемой на совершение работы по преодолению сил сопротивления материалом

при прохождении через подвижные штифты:

$$\bar{N}_1 = \frac{4}{3} \pi n_0 \mu h_{um} n_{ui}^2 \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\left( d_{2n} + \frac{h_{um}}{2} \right)}{\ln k_1 - \frac{k_1^2 - 1}{k_1^2 + 1}} \right) \cdot \left( \sum_{n=1}^3 d_{2n} + \frac{h_{um}}{2} \right). \quad (32)$$

Для нахождения величины мощности  $N_2$  необходимой на совершение работы по преодолению силы сопротивления  $R_2$  возникающей при обтекании расплавом материала неподвижных штифтов, закрепленных на конусообразной смесительной головке СШУ необходимо найти среднее значение z-компоненты скорости расплава материала.

Согласно расчетной схемы на рис. 3:

$$z_{2n-1} = h_{K1} + (2n-1)h_0, \quad (33)$$

тогда среднее значение скорости движения расплава материала вдоль образующей конуса СШУ будет равно:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{2n-1} &= v_z \left( r = \frac{D_{2n-1}^{cp}}{2}; z = z_{2n-1}; \varphi = \pi \right) \cdot \cos \alpha = \\ &= -k \left[ C_1 I_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^{cp}}{2} \right) + C_2 K_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^{cp}}{2} \right) \right] \cos(kh_{K1} + kh_0(2n-1) - \pi) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (34)$$

Величина среднего сопротивления, оказываемого неподвижным цилиндрическим штифтом, находящимся в нечетном ряду равна:

$$\bar{R}_{2n-1} = \frac{4\pi\mu\bar{v}_{2n-1}h_{um}}{\ln k_2 - \frac{k_2^2 - 1}{k_2^2 + 1}}, \quad (35)$$

где

$$k_2 = \frac{D_{2n-1}^{cp}}{d_{um}}, \quad (36)$$

здесь  $D_{2n-1}^{cp}$  – средний диаметр участка СШУ содержащего неподвижные штифты, м.

Полное сопротивление всех неподвижных цилиндрических штифтов определяется следующим соотношением:

$$R_2 = n_0 \sum_{n=1}^3 \bar{R}_{2n-1}. \quad (37)$$

Учитывая, что для нечетных рядов штифтов:

$$\bar{v}_l = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 \bar{v}_{2n-1}, \quad (38)$$

поэтому

$$\bar{N}_2 = R_2 \cdot \bar{v} = \frac{4}{3} \pi n_0 L h_{um} \left( \sum_{n=1}^3 -k \right) \frac{C_1 I_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^p}{2} \right) + C_2 K_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^p}{2} \right)}{\ln k_2 \frac{k_2^2 - 1}{k_2^2 + 1}} \cos(k h_{k1} + k h_0 (2n-1) - \pi) \cdot \quad (39)$$

$$\cdot \left( \sum_{n=1}^3 -k \right) \left( C_1 I_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^p}{2} \right) + C_2 K_1 \left( \frac{k D_{2n-1}^p}{2} \right) \right) \cos(k h_{k1} + k h_0 (2n-1) - \pi) \cos^2 \alpha$$

Полученные соотношения (32) и (39) позволяют определить затраты мощности при прохождении расплава материала через СШУ.

На основе выполненного комплекса теоретических исследований определены основные зависимости конструктивно-технологических параметров шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом, разработана инженерная методика расчета основных конструктивно-технологических параметров шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом, уточненная в ходе экспериментальных исследований.

**Глава 3.** Обоснован выбор и представлена методика проведения экспериментальных исследований в шнековом экструдере со смесительным штифтовым узлом. Описана конструкция экспериментальной установки, приведены технические данные использованного оборудования и средств измерений.

На рис. 4 представлен общий вид экспериментальной установки.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

На первом этапе проведения экспериментальных исследований определена рациональная степень наполнения полимера, и на основе анализа полученных данных определены варьируемые параметры полного факторного эксперимента.

В качестве плана для второго этапа экспериментальных исследований выбран центральный композиционный рототабельный план полного факторного эксперимента ПФЭ ЦКРП 2<sup>4</sup>. В качестве

функций отклика на воздействие факторов, определяющих характер протекания процесса, выбраны:

- производительность шнекового экструдера с СШУ  $Q$ , кг/ч;
- потребляемая мощность приводом экструдера с СШУ  $N$ , Вт;
- удельный расход электроэнергии шнековым экструдером с СШУ  $e_{yo}$ , Вт·ч/кг.

В качестве основных факторов влияющих на функции отклика выбраны:  $h$  – шаг шнека, 16..48 мм;  $n$  – частота вращения шнекового вала, 30..70  $c^{-1}$ ;  $T$  – температура нагрева корпуса, 220..280 °С;  $k_{um}$  – количество штифтов СШУ, 0..36 шт.

**Глава 4.** Приведены результаты исследования по определению взаимосвязей потребляемой мощности, производительности, удельной энергоёмкости от шага шнека, частоты вращения шнекового вала, температуры нагрева корпуса экструдера и количества штифтов СШУ.

Получены эмпирические математические выражения, в виде уравнений регрессии процесса экструзии в шнековом экструдере с СШУ, которые позволяют установить рациональный режим процесса экструзии.

Для производительности, в кодированном виде:

$$Q = 31,967 + 12,165X_1 + 0,919X_1^2 + 6,541X_2 + 0,52X_3 + 0,233X_3^2 + 0,16X_4^2 + 2,241X_1X_2 + 0,165X_1X_3 + 0,122X_1X_4 \quad (40)$$

Для мощности, в кодированном виде:

$$N = 2097 - 32,792X_1 - 7,49X_1^2 + 39,875X_2 - 11,74X_2^2 - 8,625X_3 + 31,042X_4 + 1,312X_1X_2 - 2,063X_2X_3 + 1,437X_2X_4 \quad (41)$$

Для удельного расхода электроэнергии, в кодированном виде:

$$e_{yo} = 65,63 - 33,99X_1 + 14,09X_1^2 - 13,63X_2 + 0,75X_2^2 - 1,56X_3 - 1,75X_3^2 + 1,43X_4 - 1,58X_4^2 + 5,51X_1X_2 + 0,78X_1X_3 + 0,63X_2X_3 + 0,54X_2X_4 \quad (42)$$

По уравнениям регрессии (40)-(42) были построены графические зависимости парного влияния варьируемых факторов на функции отклика. Основные графические зависимости представлены на рис. 5-7.

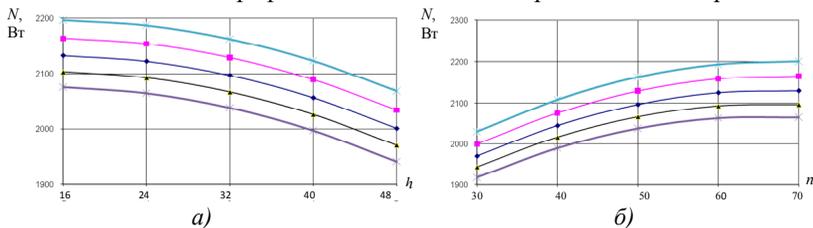


Рис. 5. Графические зависимости  $a - N=f(h, k_{um})$ ,  $b - N=f(n, k_{um})$

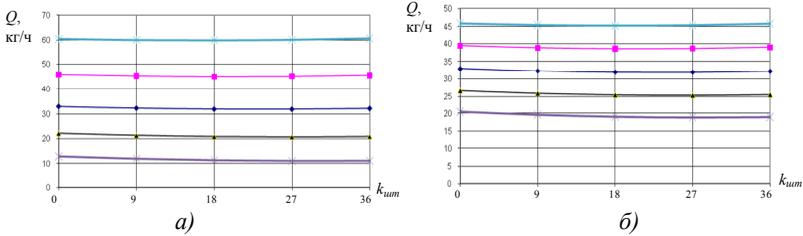


Рис. 6. Графические зависимости  $a - Q=f(k_{umv}, h)$ ,  $b - Q=f(k_{umv}, n)$

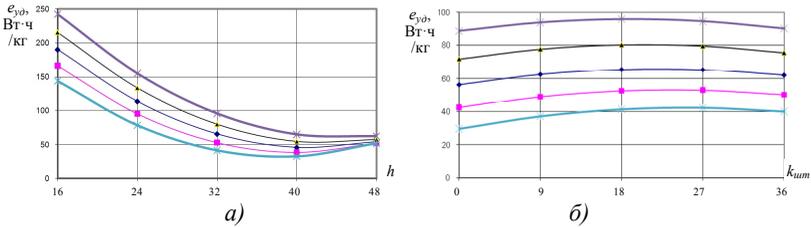


Рис. 7. Графические зависимости  $a - e_{yd}=f(h, n)$ ,  $b - e_{yd}=f(k_{umv}, n)$

На основе анализа результатов проведенных экспериментальных исследований определено, что рациональными параметрами работы шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом при экструзии полимерного композиционного материала являются: шаг нарезки шнека 35...44 мм, частота вращения шнекового вала 56...70 мин<sup>-1</sup>, температура нагрева корпуса 263...280°C, и количество штифтов СШУ 36 шт.

Проведен анализ микрофотографий сколов образцов полученного композиционного материала. Установлено, что оснащение шнекового экструдера смесительным штифтовым узлом обеспечивает повышение качества гомогенизации расплава полимерного композиционного материала до 95%.

Расхождение между расчетными значениями затрат мощности в смесительном штифтовом узле, полученными в главе 2, и значениями, полученными в ходе исследований на экспериментальной установке, не превышает 4,9 %.

**Глава 5.** Опытно-промышленный вариант смесительного штифтового узла был изготовлен для одношнекового экструдера-гранулятора, с использованием основных положений диссертационной работы, принят к внедрению в производство на ООО «ЭКО-ПЛАСТ».

Проведенные промышленные испытания на экструдере-грануляторе оснащенный смесительным штифтовым узлом показали, что при производительности 150 кг/ч удельный расход электроэнергии повысился на 0,01 кВт·ч/кг. Качество смешения получаемого полимерного композиционного материала возросло с 62 % до 91%.

Расчетный годовой экономический эффект от модернизации оборудования и введения наполнителя составил 190 тыс. рублей.

### **Основные результаты и выводы.**

1. На основе анализа направлений развития и совершенствования оборудования для экструзии полимерных композиционных материалов установлено, что одним из перспективных направлений совершенствования шнековых экструдеров является применение смесительного штифтового узла на выходном конце шнека.

2. Предложена запатентованная конструкция шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом, обеспечивающего повышение эффективности перемешивания полимерного композиционного материала.

3. Разработана математическая модель процесса движения материала, на основе которой получены выражения затрат мощности в смесительном штифтовом узле; показано, что смесительный штифтовой узел увеличивает потребляемую приводом мощность до 8%.

4. Получено аналитическое выражение для расчета коэффициента геометрической формы смесительного штифтового узла, позволяющий определить производительность шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом.

5. В качестве основного плана эксперимента выбран центральный композиционный ротатбельный план (ЦКРП)  $2^4$  полнофакторного эксперимента, определены исследуемые факторы и уровни их варьирования; для исследования процесса экструзии полимерного композиционного материала и определения производительности, потребляемой приводом мощности, удельной энергоемкости разработана экспериментальная установка шнекового экструдера со смесительным штифтовым узлом.

6. Экспериментально исследовано влияние варьируемых факторов на производительность, потребляемую приводом мощность и удельную энергоемкость шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом. Получены математические выражения в виде уравнений регрессии для  $Q$ ,  $N$ ,  $e_{\text{вд}} = f(h, n, T, k_{\text{ум}})$  в процессе экструзии полимерного композиционного материала в шнековом экструдере оснащенный смесительным штифтовым узлом. Определено влияние исследуемых факторов на формирование функции отклика. Дана оценка влияния исследуемых факторов на выходные параметры исследуемой установки.

7. Экспериментально определено, что рациональными параметрами работы шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом при экструзии полимерного композиционного материала являются:

шаг нарезки шнека 35...44 мм, частота вращения шнекового вала 56...70 мин<sup>-1</sup>, температура нагрева корпуса 263...280°С, и количество штифтов СШУ 36 шт.

8. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработана инженерная методика расчета основных конструктивно-технологических параметров шнекового экструдера оснащенного смесительным штифтовым узлом.

9. Путем анализа микрофотографий сколов образцов установлено, что оснащение шнекового экструдера смесительным штифтовым узлом обеспечивает повышение качества гомогенизации расплава полимерного композиционного материала до 95%.

10. Осуществлено промышленное внедрение смесительного штифтового узла на ООО «ЭКО-ПЛАСТ». Проведенные промышленные испытания на экструдере-грануляторе оснащенный смесительным штифтовым узлом показали, что при производительности 150 кг/ч удельный расход электроэнергии повысился на 0,01 кВт·ч/кг. Качество смешения получаемого полимерного композиционного материала возросло с 62 % до 91%. Расчетный годовой экономический эффект от модернизации оборудования и введения наполнителя составил 190 тыс. рублей.

#### **Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:**

1. *Веретнов, А.Л.* Разработка нового композиционного материала с улучшенными физико-механическими свойствами для инженерных сетей ЖКХ / А.Л. Веретнов, Л.А. Куцев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2008. - №4. – С.26-29.
2. *Куцев, Л.А.* Преимущества использования полимерных труб на объектах ЖКХ / Л.А. Куцев, А.Л. Веретнов // Научные исследования, автоматика и динамика машин, инновационные и средозащитные технологии в техносфере: сб. докл. Междунар. науч.–практич. конф. – Курск, 2007. – С.282-285.
3. *Веретнов, А.Л.* О перспективах применения наполненных полимеров в производстве труб для объектов ЖКХ / А.Л. Веретнов // Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города: сб. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 1-4 апр. 2008 г. / Москов. ин-т коммун. хоз. и строит. – Москва, 2008. – С.32-35.
4. *Веретнов, А.Л.* Разработка экструзионной установки для получения полимерного композиционного материала [Электронный ресурс] / Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова 2009.
5. *Веретнов, А.Л.* Экструзионная установка для переработки

- полимерных композиционных материалов / А.Л. Веретнов, Л.А. Куцев // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф. / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010 – С. 31-34.
6. *Веретнов, А.Л.* Экструдер для переработки полимерных композиционных материалов / А.Л. Веретнов, Л.А. Куцев, Ю.В. Фоменко // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 5-8 окт. 2010 г. / Белгор. гос. технол. ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч. 3. – С. 49-52.
7. Патент 97087 РФ, МКИ В 29 С 47/12 / Экструдер для переработки полимерных композиционных материалов / А.Л. Веретнов, Л.А. Куцев, И.В. Волабуев; БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2010115799/05; заявлено 20.04.2010г; опубл 27.08.2010 г; бюл. № 24.
8. *Веретнов, А.Л.* Экструдер со смесительным штифтовым узлом для переработки полимерных композиционных материалов / А.Л. Веретнов, Л.А. Куцев, Ю.В. Фоменко // Актуальные проблемы науки: Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 30 мая 2011 г. / Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. – Ч.4. – С. 34-35.
9. *Веретнов, А.Л.* Расчет коэффициента сопротивления смесительного штифтового узла одношнекового экструдера / А.Л. Веретнов, В.П. Воронов, Л.А. Куцев, Ю.В. Фоменко // Инновационные материалы и технологии: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 11 – 12 окт., 2011г. / Белгор. гос. технол. ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – Ч. 1. – С. 113-119.
10. *Веретнов, А.Л.* Поле скоростей среды в смесительном штифтовом узле одношнековой машины / А.Л. Веретнов, В.П. Воронов, Л.А. Куцев, Ю.В. Фоменко // Инновации и современная наука: материалы Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Новосибирск, 12 дек., 2011 г. / Новосибирск: Изд. «Сибирская ассоциация консультантов», 2011. – Ч. I. – С. 67-71.

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$C_1, C_2$  – произвольные постоянные;  $D_0$  и  $d_0$  – диаметр меньшего основания соответственно внешнего и внутреннего конуса, м;  $D_{2n}^{cp}$  – средний диаметр участка СШУ содержащего подвижные штифты, м;  $D_{2n-1}^{cp}$  – средний диаметр участка СШУ содержащего неподвижные штифты, м;  $D_{K2}^{cp}$  – средний диаметр второго конического участка СШУ, м;  $d_u$  – диаметр цилиндрической части СШУ, м;  $d_{ш}$  – диаметр шнека по гребням, м;  $d_{шт}$  – диаметр штифта, м;

$h$  – шаг спирали, м;  $h_0$  – шаг сечений, м;  $h_{K1}$  – высота первого конического участка СШУ, м;  $h_{K2}$  – высота второго конического участка СШУ, м;  $h_{шт}$  – высота штифта, м;  $I_1(\xi)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода от мнимого аргумента;  $K_1(\xi)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода от мнимого аргумента;  $k$  – параметр спирали, м<sup>-1</sup>;  $k_1, k_2$  – безразмерные множители;  $l_u$  – длина цилиндрической части СШУ, м;  $M_n$  – число штифтов в n-м сечении;  $N_1$  – средние значения мощности, затрачиваемой на совершение работы по преодолению сил сопротивления материалом при прохождении через подвижные штифты, Вт;  $N_2$  – средние значения мощности, затрачиваемой на совершение работы по преодолению сил сопротивления материалом при прохождении через неподвижные штифты, Вт;  $n_0$  – число штифтов в ряду;  $n_{ш}$  – частота вращения шнека, с<sup>-1</sup>;  $Q_0$  – объемный расход шнекового экструдера, м<sup>3</sup>/с;  $R_1$  – сила сопротивления движению подвижных штифтов СШУ, Н;  $R_2$  – сила сопротивления обтеканию расплавом материала неподвижных штифтов СШУ, Н;  $\bar{R}_{2n}$  – среднее значение величины силы сопротивления одного вращающегося цилиндрического штифта, Н;  $\bar{R}_{2n-1}$  – среднее значение величины силы сопротивления одного неподвижного цилиндрического штифта, Н;  $S_3$  – площадь входного сечения СШУ, м<sup>2</sup>;  $\bar{v}$  – среднее значение скорости вращения подвижных штифтов, м/с;  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса СШУ с осью z;  $\mu$  – эффективная вязкость расплава материала, Па·с;  $\rho$  – плотность расплава материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{v}$  – вектор скорости движения расплава материала в СШУ, м/с;  $\bar{v}_{2n-1}$  – среднее значение скорости движения расплава материала вдоль образующей конуса СШУ, м/с;  $v_r, v_\phi$  и  $v_z$  – проекции вектора скорости на соответствующие оси цилиндрической системы координат;  $v_z^{(0)}$  – начальное значение составляющей скорости вдоль оси “oz”, м/с.

Подписано в печать  
Усл. печ. л. 1,2

Формат 60x84/16  
Тираж 100 экз.

Заказ № \_\_\_\_

---

Отпечатано в ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова»  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46