

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРУДЕРА

М. А. Святский<sup>1</sup>, В. М. Святский<sup>2</sup>, М. В. Соколов<sup>3</sup>, Д. К. Чепурных<sup>1</sup>

*Кафедры: «Ракетостроение» (1);  
«Технология машиностроения и приборостроения» (2), sviatskiivm@yfistu.ru,  
Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный  
технический университет имени М. Т. Калашикова»,  
Воткинск, Удмуртская Республика, Россия;  
кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (3),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** лабораторный стенд «экструдер»; полимерные термопластичные материалы; тепловая мощность; шнек; электронагревательные элементы.

**Аннотация:** Представлена конструкция лабораторного стенда «экструдер», предназначенного для переработки первичных и вторичных термопластов, для которой разработана схема управления плавильным агрегатом. Представлены результаты инженерных расчетов, а именно, определены геометрические размеры и производительность создаваемого стенда; рассчитана тепловая энергия  $Q$ , затрачиваемая на нагрев экструдера, а также определены суммарная мощность  $W$  всех теплоэлектрических нагревателей и их количество.

---

### Введение

Постоянный рост производства и потребления изделий из термопластов (полиэтилентерефталата (ПЭТ), полипропилена (ПП) и др.), которые охватывают все отрасли народного хозяйства, подталкивает вузы к созданию лабораторных стендов для исследования процессов переработки первичных и вторичных термопластов в виде гранул, флексов, включая методы их плавления, с последующим получением из расплава изделий с заданными конструктивными или техническими свойствами. Например, из первичных или вторичных термопластичных материалов можно изготавливать волокно [1], маты, бонны и другие материалы, используемые в качестве теплоизоляционных и шумопоглощающих, а также как фильтры или бонны [2] для очистки сточных вод и открытых водоемов от нефти и нефтепродуктов при решении задач борьбы с экологическими катастрофами.

Из термопластического сырья методом плавления и последующего прессования в матрицу можно получать всевозможные детали и изделия для применения их в разных отраслях промышленности [3].

Один из основных элементов лабораторного стенда для переработки термопластов – плавильный агрегат (экструдер). При создании экструдеров требуются знания в области определения энергетических затрат (механических, тепловых и электрических), необходимых на переработку термопластичных материалов с учетом их эксплуатационных свойств.

С помощью лабораторного стенда при проведении работ студенты могут рассматривать, изучать и исследовать:

- 1) процесс переработки первичных или вторичных термопластов (ПП, ПЭТ и др.);
- 2) электрические, механические и тепловые затраты для оценки эксплуатационных характеристик плавильного агрегата (экструдера) при переработке термопластов;
- 3) механические усилия, возникающие при прессовании деталей из расплава полимера в форму, образованную матрицей;
- 4) затраты времени и производительности экструдера с учетом оценки качества получаемых деталей при переработке расплавов полимеров на экструдере.

Для решения данных задач предложен лабораторный стенд «экструдер» для использования в учебном процессе, например, по направлению 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль «Технология машиностроения». Студенты на данном стенде могут проводить лабораторные и практические работы по дисциплинам «Материаловедение», «Детали машин», «Оборудование машиностроительных производств» и др.

### Основная часть

Лабораторный стенд «экструдер» (рис. 1) для получения струи расплавленного полимера представляет собой плавильный агрегат с рабочим внутренним диаметром цилиндра и внешним диаметром шнека  $d_{\text{шн}} = 18$  мм, длиной рабочей части цилиндра  $L = 250$  мм, которые изготовлены из стали 38Х2МЮА ГОСТ4543–2016. Рабочие поверхности шнека и трубы необходимо [4] азотировать на глубину  $h = 0,3 \dots 0,5$  мм с твердостью HV 870...1050; поверхности после азотирования должны иметь шероховатость  $Ra = 0,2$  мкм; спираль шнека – однозаходная правая с углом наклона витка  $\alpha = 17^\circ 40'$ ; угол изменения глубины витка  $\beta = 1^\circ 15'$ . На внешней цилиндрической поверхности экструдера размещены три ТЭНа мощностью  $W = 350$  Вт каждый и один ТЭН мощностью 70 Вт, который расположен в головной части плавильного агрегата.

К элементам привода и автоматики для управления стендом «экструдер» относятся:

- электродвигатель 4ПАМ 6384 трехфазный асинхронный:  $W = 0,5$  кВт;  $n_{\text{дв}} = 1400$  об/мин;

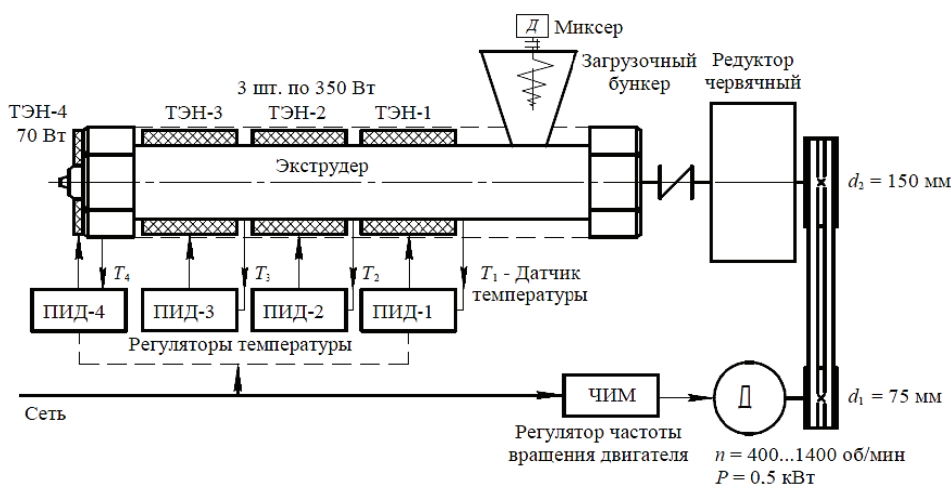
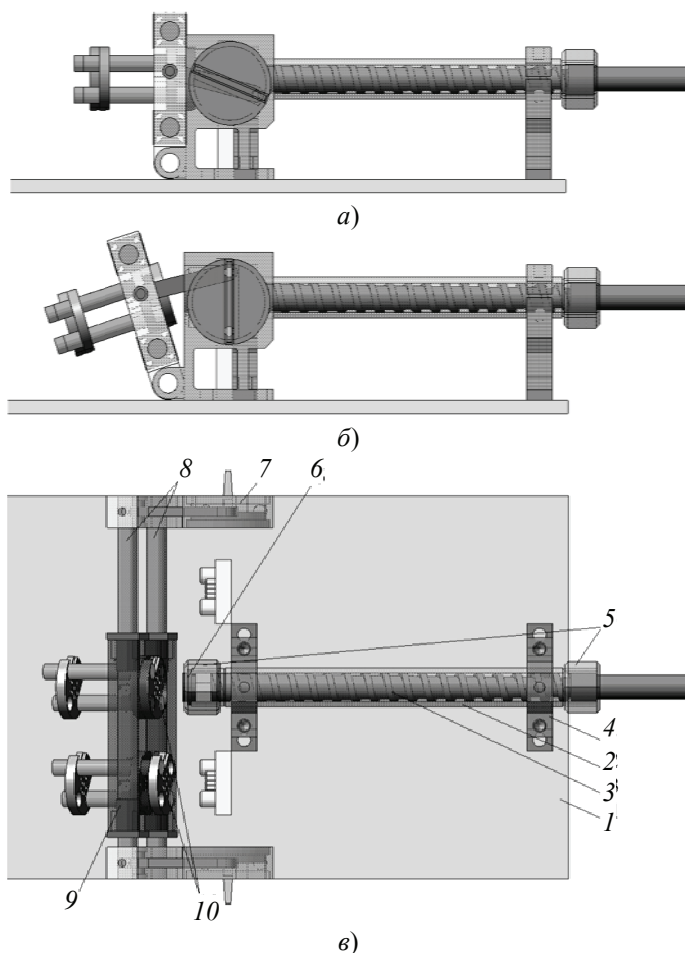


Рис. 1. Схема лабораторного стенда «экструдер»

- редуктор червячный с коэффициентом редукции  $K_{ред} = 40$ ;
- ЧИМ-регулятор (частотно-импульсный модулятор, модель E2-MINI), который преобразует входную однофазную цепь питания в трехфазную и предназначен для регулировки мощности (и числа оборотов) электродвигателя в диапазоне до 30 – 40 % от максимальной частоты вращения двигателя;
- ПИД-регуляторы (пропорционально-интегрально-дифференцирующие блоки) ОВЕН ТРМ500-Щ2,5А с датчиками температуры ОВЕН ДТПЛ124-00.032/1,6, которые предназначены для управления температурным режимом работы ТЭНов;
- термоэлектрические нагреватели (ТЭН-1, ТЭН-2, ТЭН-3) хомутовые, кольцевые с размерами  $d = 25$  мм,  $H = 50$  мм; мощностью  $W = 350$  Вт; температурой нагрева  $T_{max} = 500$  °С, удельной теплоотдачей  $\Delta P = 9$  Вт/см<sup>2</sup>. Регулируемый рабочий диапазон:  $W_1, \dots, W_3 = 250 \dots 320$  Вт;  $T_1 \dots T_3 = 200 \dots 400$  °С;
- общее энергопотребление малогабаритного стенда «экструдер»  $W$  не более 2 кВт.

Лабораторный стенд «экструдер» будет оснащен пресс-формой для получения малогабаритных деталей (массой до 5 г), например, имитация работы пресс-автомата, вариант конструкции которой показан на рис. 2.



**Рис. 2. Вариант конструкции пресс-автомата:**

*a* – в собранном состоянии, при формовании изделия; *б* и *в* – в разобранном состоянии, при съеме готовых полимерных изделий

Представленный лабораторный стенд «экструдер» содержит: 1 – основание; 2 – цилиндр; 3 – шнек; 4 – опоры (2 шт.); 5 – запорные гайки (2 шт.); 6 – экструзионную головку; 7 – стойки (левую и правую); 8 – направляющие оси; 9 – корпус пресс-формы; 10 – пресс-форму.

На основании рекомендаций [4, 5] разработан и на данный момент изготавливается лабораторный стенд «экструдер», основные элементы которого показаны на рис. 3 и 4. На рисунке 3 представлен экструдер на стадии комплектования и сборки. Процесс сборки производится с рабочего цилиндра 1, в который устанавливается шнек 2. Сам цилиндр фиксируется в опорах 3, жестко закрепленных на станине (основании). В головную часть экструдера устанавливается экструзионная головка 4, которая прижимается запорной гайкой 5. Другая запорная гайка 5 фиксирует шнек в цилиндре через упорную латунную втулку 6. На шнеке 2 располагаются подшипники 7, которые наружной обоймой устанавливаются в корпусе холодильников 8 и фиксируются крышками (на рисунке не представлены).

В качестве источников тепловой энергии в разработанной конструкции лабораторного стенда «экструдер» предложено использовать теплоэлектрические нагреватели (ТЭНы), которые производятся с заданным конструктивным исполнением (посадочный диаметр  $d$ , ширина  $H$  и мощность потребления  $W$ ) [5].

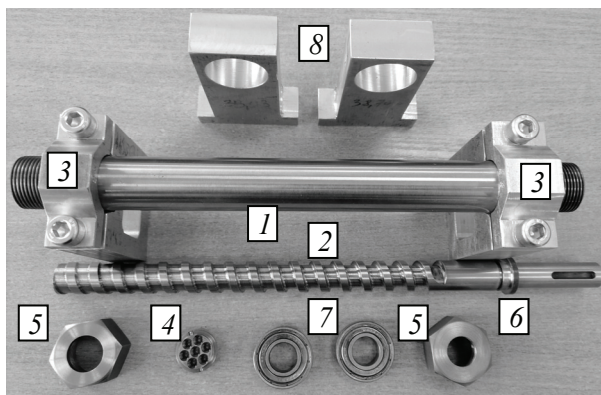


Рис. 3. Вид экструдера на стадии комплектования и сборки

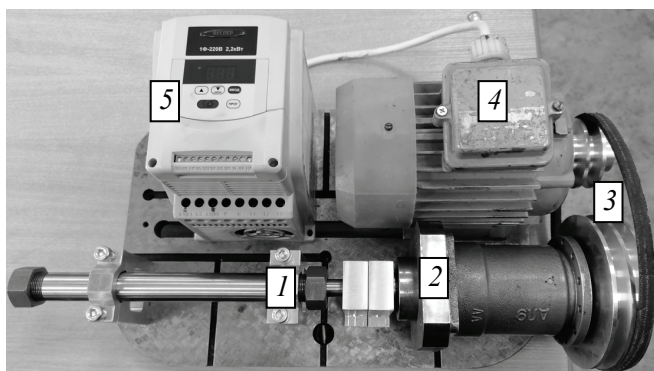


Рис. 4. Вид лабораторного стенда «экструдер» на стадии комплектования и сборки: 1 – экструдер; 2 – планетарный редуктор; 3 – ременный механизм; 4 – электродвигатель; 5 – регулятор частоты вращения двигателя (ЧИМ-регулятор)

Удобство практического использования промышленных ТЭНов в приведенном случае состоит в том, что их не требуется заново конструировать и рассчитывать – достаточно только определить число ТЭНов с учетом необходимой электрической мощности каждого ТЭНа.

Основная задача при оценке параметров «экструдера» с отдельными ТЭНами – нагрев заданного количества полимерного материала с известной теплоемкостью с учетом начальной температуры до определенной конечной температуры на участках цилиндра экструдера за заданный интервал времени [6].

В начальный период времени работы экструдера (в интервале  $t_{\text{нач}} = 20 \dots 25$  мин) все ТЭНа работают на 90 – 80 % от их максимально суммарной мощности, пока температура на заданных участках цилиндра экструдера, анализируемая и управляемая ПИД-регуляторами, не вырастет на стенках экструдера до  $T \approx 200$  °С, на которых установлены термодатчики обратной связи. После этого мощность, излучаемая ТЭНами, снижается до 60 – 70 % в зависимости от места их расположения на экструдере и алгоритма работы ПИД-регуляторов. Вне зависимости от конструкции ТЭНов и их алгоритма работы следует определить требуемую тепловую энергию (кДж), которая необходима для плавления сырья,

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – количество энергии, требуемой на нагрев до температуры плавления объема исходного сырья, загруженного в полость плавильного агрегата (экструдера) ( $1 \text{ кДж} = 0,0002777 \text{ кВт/ч}$ );  $Q_2$  – количество энергии, требуемой на поддержание заданного объема ПЭТ в расплавленном состоянии;  $Q_3$  – количество энергии, рассеиваемой вне зоны плавления, например, потери тепла вне экструдера.

Теплоизоляция ТЭНов выполнена из базальтового волокна толщиной 30 мм, выдерживающего нагрев до 700 °С, которая дополнительно экранирована кожей из алюминиевой фольги.

Необходимая тепловая энергия, затрачиваемая на нагрев, составит [7]:

$$Q_1 = [c_k \rho_k V_k + c_m \rho_m V_m] \Delta T; \quad (2)$$

$$Q_2 = \lambda \rho_m V_m, \quad (3)$$

где  $c_k$ ,  $c_m$  – удельные теплоемкости соответственно материала корпуса плавильного агрегата ( $c_k = 0,5 \text{ кДж/(кг К)}$ ) [8] и ПЭТ-материала; ( $c_m = 1,03 \text{ кДж/(кг К)}$ ) [9];  $\rho_k$ ,  $\rho_m$  – плотности соответственно материала корпуса плавильного агрегата ( $\rho_k = 7800 \text{ кг/м}^3$ ) и ПЭТ-материала ( $\rho_m = 1400 \text{ кг/м}^3$ ) [9];  $V_k$  – объем нагреваемых деталей корпуса плавильного агрегата ( $V_k = 0,0002 \text{ м}^3 = 0,2 \text{ л}$ );  $V_m$  – объем загруженного в плавильный агрегат ПЭТ материала ( $V_m = 0,0001 \text{ м}^3$ );  $\Delta T$  – разность между температурой плавления и комнатной ( $\Delta T = 320 - 20 = 300$  °С;  $\Delta T = 573 \text{ К}$ );  $\lambda$  – удельная температура плавления ПЭТ-материала ( $\lambda = 117,46 \text{ кДж/кг}$ ) [9].

С учетом толщины и плотности полотна базальта и плотности размещения ТЭН на экструдере, можно принять

$$Q_3 = (0,1 \dots 0,3)(Q_1 + Q_2). \quad (4)$$

Мощность ТЭНов  $W$  зависит от требуемого по технологическому процессу времени  $t$  на плавление ПЭТ-материала, загруженного в экструдер, с учетом его производительности  $G = 0,00014 \text{ кг/с} = 0,5 \text{ кг/ч}$ :

$$t = \frac{\rho_M V_M}{G} \quad (5)$$

При расчете электрической мощности ТЭНов учитывают физические свойства исходного сырья.

Используя выражения (1) – (5), мощность всех ТЭНов  $W$ , кВт/ч:

$$W = \frac{(c_K \rho_K V_K + 1,5 G c_M \rho_M V_M) \Delta T + \lambda \rho_M V_M}{\rho_M V_M} \quad (6)$$

Результаты расчетов плавильного агрегата:

Размеры рабочей части экструдера:

диаметр шнека $d_{\text{шн}}$ , мм .....	18
рабочая длина $L$ , мм .....	250

Расчетная производительность экструдера  $G$ , кг/ч .....

0,5

Количество энергии, кДж:

требуемой на нагрев до температуры плавления исходного сырья, загруженного в полость плавильной камеры (в экструдер) $Q_1$	529,666
направленной на плавление заданного объема исходного сырья $Q_2$	16,38
рассеиваемой вне зоны, например, потери тепла вне экструдера $Q_3$	109,209

Тепловая энергия, затрачиваемая на нагрев экструдера  $Q$ , кДж.....

655,255

Суммарная мощность всех ТЭНов  $W$ , кВт/ч .....

1,042

Расчет завершается выбором из соответствующих каталогов серийных ТЭНов, имеющих общую электрическую мощность  $W$ , близкую к расчетной.

Результаты расчетов параметров для четвертого ТЭНа показали удовлетворительную сходимость с известными характеристиками ТЭНов и подтвердили возможность нагревания экструдера до  $T = 300...330$  °С. Например, при расчетной мощности нагревательных элементов  $W = 330$  Вт при использовании проволоки материала Х23Ю5 ее расчетный диаметр  $d$  должен быть 0,00035 м, а длина  $B = 10$  м.

### Заключение

Представленная конструкция лабораторного стенда «экструдер» предназначена для использования в учебном процессе студентами технических специальностей и позволяет перерабатывать как первичные, так и вторичные термопласты (например, ПЭТ, ПП и др.) для получения продукции весом до 5 г.

Приведенный расчет нагревательных элементов экструдера позволяет определить оптимальную мощность, затрачиваемую на нагрев и плавление термопластического сырья, с учетом их теплоемкости, температуры и скорости плавления, а также скорости вращения шнека и затрачиваемой при этой мощности двигателя, что в целом позволит студентам анализировать производительность стенда при различных режимах расхода обрабатываемого термопласта.

При нагревании и плавлении термопластического полимерного сырья до  $T = 250...320$  °С получается целевой продукт прогнозируемого качества. Студенты наглядно знакомятся с используемыми средствами автоматического регулирования на стенде, алгоритмами поддержания температуры ТЭНов при помощи ПИД-регуляторов в совокупности с управлением электроприводом, оснащенным ШИМ-регулятором.

Приобретенный опыт переработки вторичных полимеров позволят нацелить студентов на решение задач защиты окружающей среды, находить и предлагать условия использования отходов из полимеров в иных производственных задачах.

#### *Список литературы*

1. Процессы получения и практического использования полиэтилентерефталатного волокна из вторичного сырья : монография / Б. А. Сентяков, К. П. Щиробоков, В. М. Святский [и др.]. – Старый Оскол : Изд-во ТНТ, 2014. – 152 с.
2. Испытания волокнистых сорбирующих бонов / Б. А. Сентяков, М. А. Святский, В. М. Святский, А. Р. Черезов // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 4(160). – С. 25–26.
3. Моделирование процесса формообразования холстов из волокнистых материалов / В. М. Святский, М. А. Святский, Б. А. Сентяков [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2015. – Т. 18, № 2 (66). – С. 17 – 20.
4. Полищук, В. Ю. Проектирование экструдеров для отраслей АПК : монография / В. Ю. Полищук, В. Г. Коротков, Т. М. Зубкова. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 201 с.
5. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.
6. Святский, М. А. Методика расчета электронагревательных элементов для плавления полимерного сырья / М. А. Святский, В. М. Святский, Б. А. Сентяков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 2(18). – С. 159 – 163.
7. Дьяков, В. И. Типовые расчеты по электрооборудованию / В. И. Дьяков. – 7-е изд., переб. и доп. – М. : Высшая школа, 1991. – 234 с.
8. Электротехнический справочник. В 4-х томах. Том 2. Электротехнические изделия и устройства / Под ред. В. Г. Герасимова. – 9-е изд. – М. : МЭИ, 2003. – 518 с.
9. Оссвальд, Т. А. Настольная книга переработчика пластмасс. Справочник по полимерным материалам : пер. с англ. / Т. А. Оссвальд, Э. Баур, Н. Рудольф ; под ред. Н. Н. Тихонова, М. А. Шерышева. – 5-е изд. (Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers). – СПб. : ЦОП Профессия, 2021. – 672 с.

---

## **The Development of a Laboratory Bench for Predicting the Quality of Processed Thermoplasts and Operating Characteristics of the Extruder**

**M. A. Sviatskii<sup>1</sup>, V. M. Sviatskii<sup>2</sup>, M. V. Sokolov<sup>3</sup>, D. K. Chepurnykh<sup>1</sup>**

*Departments: Rocket Science (1);*

*Technology of Mechanical Engineering and Instrumentation (2), sviatskiivm@yfistu.ru, Votkinsk branch "Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov, Votkinsk, Udmurt Republic, Russia;*

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (3), TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** laboratory bench “extruder”; polymeric thermo-plastic materials; thermal power; screw; electric heating elements.

**Abstract:** The laboratory bench “extruder” designed for processing primary and secondary thermoplastics is presented; a control diagram for the melting unit has been developed. The results of engineering calculations are presented, namely, the geometric dimensions and performance of the created bench are determined; the thermal energy  $Q$  spent on heating the extruder was calculated, and the total power  $W$  of all thermoelectric heaters and their number were determined.

#### References

1. Sentyakov B.A., Shchirobokov K.P., Svyatskiy V.M., Svyatskiy M.A., Fonareva K.A. *Protsessy polucheniya i prakticheskogo ispol'zovaniya polietilentereftalatnogo volokna iz vtorichnogo syr'ya : monografiya* [Processes for obtaining and practical use of polyethylene terephthalate fiber from recycled materials: monograph], Staryy Oskol: Izdatel'stvo TNT, 2014, 152 p. (In Russ.).
2. Sentyakov B.A., Svyatskiy M.A., Svyatskiy V.M., Cherezov A.R. [Tests of fibrous sorbing booms], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Safety of life], 2014, no. 4(160), pp. 25-26. (In Russ., abstract in Eng.).
3. Svyatskiy V.M., Svyatskiy M.A., Sentyakov B.A., Sentyakov K.B., Garayev S.A. [Modeling the process of shaping canvases from fibrous materials], *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhGTU im. M. T. Kalashnikov], 2015, vol. 18, no. 2(66), pp. 17-20. (In Russ., abstract in Eng.).
4. Polishchuk V.Yu., Korotkov V.G., Zubkova T.M. *Proyektirovaniye ekstruderov dlya otrasley APK: monografiya* [Designing extruders for the agro-industrial complex: monograph], Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2003, 201 p. (In Russ.).
5. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of integral quality criteria in the processing of polymeric materials by the screw-roller method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.).
6. Svyatskiy M.A., Svyatskiy V.M., Sentyakov B.A. [Methods for calculating electric heating elements for melting polymer raw materials], *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Production], 2011, no. № 2(18), pp. 159-163. (In Russ., abstract in Eng.).
7. D'yakov V.I. *Tipovyye raschety po elektrooborudovaniyu* [Typical calculations for electrical equipment], 7-ye izd., pereb. i dop. Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 234 p. (In Russ.).
8. Gerasimov V.G. (Ed.). *Elektrotekhnicheskyy spravochnik* [Electrotechnical reference book], In 4 vols., V. 2. *Elektrotekhnicheskkiye izdeliya i ustroystva* [Electrical products and devices], 9-ye izd. Moscow: MEI, 2003, 518 p. (In Russ.).
9. Osswald T.A., Baur E., Rudolph N. *Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2019, 704 p.

---

### Entwicklung des Standes für Prognose der Qualität der recyclebaren Thermoplaste und der Leistungsmerkmale des Extruders

**Zusammenfassung:** Es ist die Konstruktion des «Extruder»-Laborstandes vorgestellt, der für die Verarbeitung von primären und sekundären Thermoplasten bestimmt ist, für die ein Regelschema für die Schmelzeinheit entwickelt worden ist. Die Ergebnisse der technischen Berechnungen sind vorgestellt, nämlich die



geometrischen Abmessungen und die Leistung des zu erstellenden Standes sind bestimmt; die Wärmeenergie  $Q$ , die für die Erwärmung des Extruders benötigt wird, ist berechnet und die Gesamtleistung  $W$  aller thermoelektrischen Heizgeräte sowie deren Anzahl sind ermittelt.

---

### **Développement d'un stand pour la prévision de la qualité des thermoplastiques recyclés et des performances de l'extrudeuse**

**Résumé:** Est présentée la conception du stand de laboratoire «Extruder» destiné au traitement des thermoplastiques primaires et secondaires, pour lequel un schéma de commande de l'unité de fusion est élaborée. Sont présentés les résultats des calculs d'ingénierie (les dimensions géométriques et la capacité du stand); est calculée l'énergie thermique  $Q$  dépensée pour chauffer l'extrudeuse; sont déterminées la puissance totale  $W$  de tous les appareils de chauffage thermoélectrique et leur nombre.

---

**Авторы:** *Святский Михаил Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетостроение»; *Святский Владислав Михайлович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и приборостроения», Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», Воткинск, Удмуртская Республика, Россия; *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Чепурных Данил Константинович* – студент, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», Воткинск, Удмуртская Республика, Россия.

---