Оригинальное практическое исследование
УДК 621.7.04
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31

РАЗРАБОТКА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЗАГЛУШКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ГЕРМЕТИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИИ

Николай Петрович Мидуков, Дмитрий Владиславович Худницкий, Елизавета Артемовна Портнягина

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., Портнягина Е. А., 2026

Автор-корреспондент: Н. П. Мидуков, e-mail: mnp83@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты проектирования и изготовления герметичных заглушек, эксплуатируемых в условиях вибрации, с применением аддитивных технологий. Рассмотрены недостатки изделий из мономатериалов: жесткие пластики не обеспечивают полной герметизации из-за высокого модуля упругости, а эластичные материалы не обладают необходимой несущей способностью и теряют геометрическую стабильность под рабочим давлением. В качестве решения предложена технология создания двухкомпонентного изделия, сочетающего жесткий каркас из полилактида (PLA), воспринимающий механическую нагрузку и обеспечивающий надежность резьбового соединения, и интегрированные уплотнительные элементы из термопластичного полиуретана (TPU), выполняющие функцию герметика и демпфера. Проведен обзор конструкции 3D-принтера Sovol SV04 с системой независимых двойных экструдеров (IDEX), позволяющей печатать разнородными полимерами в едином цикле без замены филамента. Описан процесс калибровки системы по осям X, Y и Z, а также подбора параметров печати TPU, включая корректировку коэффициента подачи до 120 % для компенсации микропроскальзывания гибкой нити и обеспечения монолитности уплотнительного слоя. Освещены этапы 3D-моделирования и подготовки G-кода с учетом специфики адгезии между слоями разнородных материалов. Представлены методика и результаты экспериментальной проверки изготовленного образца на сохранение герметичности при вибрационных нагрузках (частота 50 Гц, ускорения до 9g): протечки по контуру примыкания заглушки отсутствуют. Полученные данные подтверждают эффективность комбинированной экструзионной 3D-печати для изготовления функциональных вибростойких уплотнений, что особенно актуально для задач мелкосерийного производства и оперативного ремонта оборудования.

Ключевые слова: 3D-печать, двухкомпонентная печать, полилактид, термопластичный полиуретан, двухэкструдерный принтер, заглушка, герметичность, вибростойкость

Для цитирования: Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., Портнягина Е. А. Разработка двухкомпонентной заглушки с возможностью герметизации в условиях вибрации // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 25–31. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31.

DEVELOPMENT OF A TWO-COMPONENT PLUG WITH SEALING CAPABILITY UNDER VIBRATION

Nikolay Petrovich Midukov, Dmitriy Vladislavovich Khudnitsky, Elizaveta Artemovna Portnyagina

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: N. P. Midukov, e-mail: mnp83@mail.ru

ABSTRACT

The article presents the results of designing and manufacturing hermetic plugs operated under vibration conditions using additive technologies. The disadvantages of articles manufactured from single materials are examined: rigid plastics do not provide hermetic sealing due to their high elastic modulus, while elastic materials do not exhibit the requisite load-bearing capacity and lose geometric stability under operating pressure. A technology has been proposed as a solution for creating a two-component article that combines a rigid PLA (polylactide) framework, which takes up the mechanical load and provides the reliability of the threaded connection, and integrated TPU (thermoplastic polyurethane) sealing elements serving as a sealant and a vibration damper. The design of the Sovol SV04 3D printer with an independent dual extruder (IDEX) system is reviewed; this system enables printing with dissimilar polymers in a single cycle without changing filament. In order to compensate for micro-slippage of the flexible filament and to ensure the integrity of the sealing layer, the calibration process for the X, Y, and Z axes is described, as is the selection of TPU printing parameters, including correction of the feed coefficient up to 120%. The paper covers the stages of 3D modeling and G-code preparation, with due regard for the specific adhesion between layers of dissimilar materials. The paper presents the methodology and results of experimental testing of the fabricated sample for sealing retention under vibration (50 Hz, accelerations up to 9g): no leakage along the plug's contact contour was detected. The findings confirm the effectiveness of combined extrusion 3D printing for functional vibration-resistant seals, especially relevant for small-batch production and rapid equipment repair.

Keywords: 3D printing, dual-material printing, polylactide, thermoplastic polyurethane, dual-extruder printer, plug, hermeticity, vibration resistance

For citation: Midukov N. P., Khudnitsky D. V., Portnyagina E. A. (2026) 'Development of a two-component plug with sealing capability under vibration', Technology and Energy, vol. 3, no. 3, pp. 25–31. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении и приборостроении аддитивные технологии (3D-печать) перешли из разряда инструментов для прототипирования в способ изготовления функциональных конечных изделий. Технология послойного наплавления, экструзии (FDM/FFF) [1] остается наиболее доступной и распространенной, однако печать одним материалом связана с ограничениями на эксплуатационные характеристики деталей. В связи с этим особый интерес представляет печать сразу из нескольких материалов, позволяющая комбинировать в одном изделии свойства различных полимеров [2], например, жесткость конструкционных пластиков и эластичность полиуретана.

Одной из актуальных инженерных задач для химической технологии является обеспечение герметичности технологических корпусов и узлов, работающих в условиях динамических нагрузок. Стандартные методы герметизации, такие как использование резиновых прокладок или литых заглушек, требуют наличия широкой номенклатуры комплектующих или дорогостоящего изготовления пресс-форм. В условиях мелкосерийного производства или необходимости оперативного ремонта 3D-печать становится безальтернативным решением по скорости и стоимости.

Жесткие термопласты (такие как полилактид, полиэтилен, ABS) обеспечивают необходимую конструкционную прочность и надежность резьбового соединения [3]. Однако из-за высокого модуля упругости они не способны компенсировать неровности сопрягаемых поверхностей, что препятствует достижению полной герметичности. В свою очередь, эластичные материалы (термопластичный полиуретан TPU) эффективно выполняют функцию уплотнителей и демпферов. Тем не менее изготовление заглушки целиком из полиуретана нецелесообразно из-за недостаточной жесткости материала: под воздействием рабочего давления деталь подвергается критической деформации, теряет геометрическую стабильность и не может надежно удерживаться.

Решением является создание композитных (двухкомпонентных) изделий, где жесткий каркас из PLA несет механическую нагрузку [4], а интегрированные элементы из TPU обеспечивают герметизацию.

Тем не менее печать комбинацией PLA и TPU сопряжена с рядом технологических трудностей. К ним относятся различия в температурах плавления, сложности адгезии между различными материалами, а также необходимость точной калибровки двухэкструдерных систем для печати гибкими филаментами.

Настоящая работа посвящена разработке технологии изготовления заглушки, способной сохранять герметичность при воздействии вибрации, используя FDM-принтер [5].

Целью работы является изготовление двухкомпонентной заглушки с возможностью герметизации в условиях вибрации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:
1. Провести обзор существующих конструкций 3D-принтеров, позволяющих создавать детали из нескольких компонентов, одним из которых является термопластичный полиуретан [6].
2. Выполнить подготовку и калибровку двухэкструдерного принтера для изготовления многокомпонентных изделий, обеспечив стабильную подачу полиуретана.
3. Создать 3D-модель и подготовить «G-code» изделия, учитывающего особенности адгезии материалов, изготовить образец на 3D-принтере [7].
4. Провести экспериментальную проверку герметичности конструкции с использованием заглушки, изготовленной по предлагаемой технологии, в условиях имитации вибрационных нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На начальном этапе работы были разработаны технические эскизы и построена твердотельная трехмерная модель двухкомпонентной заглушки для элемента рамы SUZUKI GSX-S750, GSR750 (рисунок 1) в системе автоматизированного проектирования (рисунок 2). Проектирование велось с учетом функционального разделения изделия на две зоны: жесткий корпус с резьбовым элементом для механической фиксации и эластичный контур для обеспечения герметичности. Финальные модели компонентов были экспортированы в формат STL.

Изготовление опытных образцов производилось методом послойного наплавления [8] (FDM/FFF) на принтере Sovol SV04 (рисунок 3). Его ключевой особенностью является модульная конструкция и система IDEX (Independent Dual EXtruder), обеспечивающая независимость двух экструдеров по оси X. Это позволяет реализовывать режим печати изделий из двух материалов (включая резину) без необходимости смены катушки пластика в процессе работы. Более подробные характеристики принтера представлены в таблице 1.

Обязательным условием успешной реализации двухкомпонентной печати является калибровка системы 3D-принтера по осям X, Y и Z.

На первом этапе производилась настройка по Z. Для обеспечения равномерной экструзии и надежной адгезии первого слоя по всей площади рабочей зоны выполнялось многоточечное выравнивание печатной платформы (Bed leveling). Данная процедура позволила компенсировать геометрические погрешности стола и установить оптимальную величину зазора между соплами и платформой (Z-offset).

Следующим важным этапом стало точное совмещение двух независимых экструдеров по осям абсцисс (X) и ординат (Y). Точная настройка этих параметров необходима для идеального совпадения двух разнородных материалов в соответствии с цифровой 3D-моделью,



Рисунок 1. Клетка на мотоцикл SUZUKI GSX-S750, GSR750 (Пример конструкции рамы, которая контактирует с окружающей средой и испытывает вибрационные нагрузки

Figure 1. Motorcycle cage for SUZUKI GSX-S750, GSR750 (An example of a frame structure in contact with the environment and subjected to vibration loads.

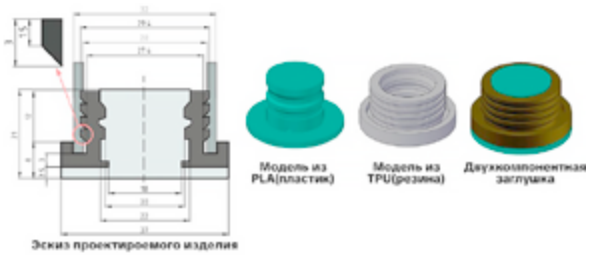


Рисунок 2. Эскиз изделия и результат моделирования

Figure 2. Product sketch and simulation result

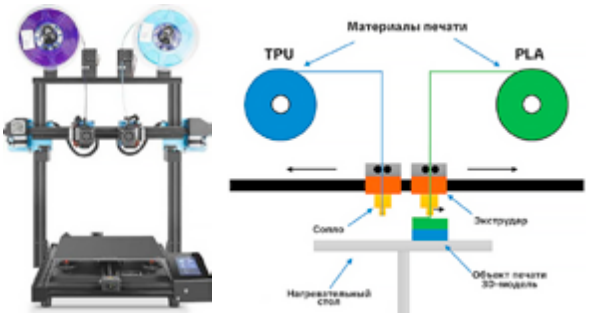


Рисунок 3. 3D-принтер Sovol SV04

Figure 3. 3D printer Sovol SV04

Таблица 1. Характеристики принтера Sovol SV04
Table 1. Sovol SV04 printer characteristics

Параметр	Характеристика
Технология построения	Послойное наплавление (FDM/FFF)
Рабочая область (XYZ)	300 × 300 × 400 мм
Конфигурация экструдеров	2 независимых экструдера (IDEX)
Технология печати	Пластиковая нить (FDM/FFF)
Поддерживаемые материалы	TPU, PLA, ABS, PETG, WOOD
Система управления	32-разрядная плата Creality V5.2.1 с драйверами шаговых двигателей TMC2209 (режим StealthChop)
Интерфейс управления	Цветной сенсорный дисплей
Подключение и управление	USB, SD карта

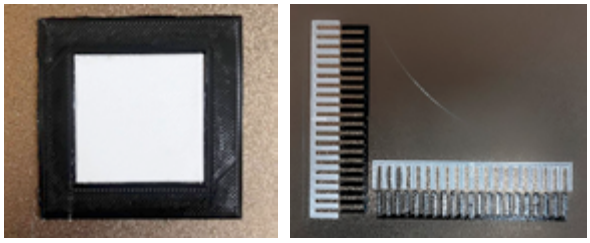


Рисунок 4. Результат калибровки
Figure 4. Calibration result

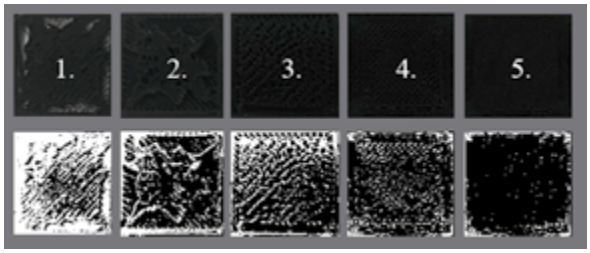


Рисунок 5. Результат подбора параметров печати: 1 — коэффициент подачи 100%, заполнение 5%, 2 — коэффициент подачи 100%, заполнение 10%, 3 — коэффициент подачи 100%, заполнение 100%; 4 — коэффициент подачи 105%, заполнение 100%; 5 — увеличение коэффициента подачи до 120%, заполнение 100%

Figure 5. Result of selecting printing parameters: 1 — feed rate 100%, fill 5%; 2 — feed rate 100%, fill 10%; 3 — feed rate 100%, fill 100%; 4 — feed rate 105%, fill 100%; 5 — increase in feed rate up to 120%, fill 100%

исключая образование зазоров или нахлестов на границе сред.

После внесения вычисленных поправок в настройки принтера была проведена повторная контрольная печать. Оценка финальных тестовых образцов подтвердила высокую точность позиционирования сопел. Результат успешной калибровки экструдеров представлен на рисунке 4.

Следующим этапом исследования стала оптимизация параметров 3D-печати для эластичного материала (TPU). На основе анализа профильной литературы и серии натурных экспериментов были определены настройки «слайсера», напрямую влияющие на качество изделия.

Было установлено, что использование низкого коэффициента внутреннего заполнения (infill) приводит к деформации детали. При заполнении на уровне 10% (рисунок 5, образцы 1 и 2) наблюдается провисание верхних сплошных слоев и образование впадин из-за недостаточной площади внутренней опоры для мягкого пластика.

Другой существенной проблемой стало образование микропустот в структуре детали. Это явление обусловлено высокой эластичностью TPU, которая вызывает микропроскальзывание филамента в подающем механизме экструдера. Для компенсации этого эффекта требуется корректировка коэффициента подачи пластика (Flow Rate) (рисунок 5, образец 3). Стандартные рекомендации для TPU предполагают увеличение потока до 105–115%, однако в рамках нашего эксперимента этого оказалось недостаточно: на образце 4 (рисунок 5), напечатанном с потоком 105%, дефекты сохранились.

Таким образом, увеличение коэффициента подачи до 120% позволило полностью компенсировать проскальзывание нити. Как видно на последнем образце (рисунок 5, образец 5), такое значение параметра значительно уменьшило количество пустот и обеспечило необходимую монолитность уплотнительного слоя.

После подбора оптимальных параметров печати TPU был подготовлен «G-code» в специализированном программном обеспечении (слайсере) Sovol 3D Cura, поддерживающем режим двухкомпонентной печати. Для каждого экструдера были заданы индивидуальные

Таблица 2. Параметры двухэкструдерной печати
Table 2. Parameters of dual-extruder printing

Наименование	ед. изм.	Левый экструдер (TPU)	Правый экструдер (PLA)
Высота слоя	мм	0,2	0,2
Высота первого слоя	мм	0,2	0,2
Толщина стенок	мм	0,4	1,6
Заполнение	%	100	40
Температура экструдера	°C	230	220
Температура стола	°C	80	80
Поток	%	120	100
Скорость	мм/с	20	40
Охлаждение	%	30	100
Поддержки		нет	нет

температурные профили, соответствующие свойствам материалов (PLA и TPU), представленные в таблице 2.

Изготовление заглушки выполнялось методом 3D-печати (FDM/FFF) на оборудовании с двумя независимыми экструдерами (система IDEX). Наличие двух отдельных печатающих головок позволило в едином рабочем цикле использовать жесткий пластик (PLA) для создания прочного корпуса и эластичный полиуретан (TPU) для формирования уплотнителя. Такой подход избавил от необходимости останавливать печать для замены филамента и исключил риск смешивания материалов в сопле [9].

В процессе работы осуществлялся контроль за равномерной подачей гибкой нити TPU, а также за качеством сплавления слоев в местах контакта жесткой и эластичной частей детали, поскольку от этого напрямую зависит прочность и целостность изделия.

По итогам производственного цикла был получен качественный опытный образец (рисунок 6): деталь сформирована без дефектов экструзии, ее геометрия полностью соответствует заданной 3D-модели, а разнородные полимеры (PLA и TPU) продемонстрировали высокую степень межслойного сцепления (адгезии) [10].

Для экспериментальной оценки эксплуатационных характеристик и подтверждения надежности уплотнения в условиях динамических нагрузок была проведена серия испытаний. Целью данного этапа являлась проверка способности эластичного материала (TPU) сохранять герметичность при воздействии вибрации, имитирующей реальные условия работы механизма [11].

Испытуемый образец двухкомпонентной заглушки устанавливался в тестовый резервуар, заполненный водой. Для создания необходимых динамических нагрузок резервуар фиксировался на рабочей платформе лабораторного вибростола модели JG-201 (рисунок 7).



Рисунок 6. Результат 3D-печати проектируемого изделия
Figure 6. Result of 3D printing of the designed product

Выбор данного оборудования обусловлен наличием функции плавной регулировки амплитуды вибрации, что позволяет точно моделировать различные режимы механического воздействия на деталь и выявлять потенциальные резонансные явления, ведущие к разгерметизации. В ходе эксперимента фиксировалось отсутствие протечек по контуру примыкания заглушки к посадочному месту.

Основные технические характеристики применяемого вибрационного оборудования представлены в таблице 3.

Для объективной фиксации результатов испытаний на герметичность была применена методика визуального контроля. На рабочую платформу вибростолика укладывался сухой контрольный лист бумаги, на который устанавливалась испытательная сборка, представляющая собой имитатор рабочего узла, заполненный жидкостью с плотно зафиксированной в ней напечатанной заглушкой (рисунок 7).

В ходе вибрационного воздействия лист бумаги выполнял функцию индикатора влаги: малейшее нарушение герметичности уплотнительного контура из TPU

Таблица 3. Характеристики вибростола
Table 3. Characteristics of the vibration table

Наименование параметра	Значение
Модель	JG-201 (арт. TEX000111)
Производитель	OEM-Китай
Потребляемая мощность	100 Вт
Диаметр рабочей поверхности	110 мм
Частота колебаний	50 Гц
Регулируемый диапазон колебаний (ускорений)	1...9 g
Режимы работы	1 режим интенсивности (с плавной регулировкой амплитуды)
Габаритные размеры (Д × Ш × В)	140 × 150 × 120 мм

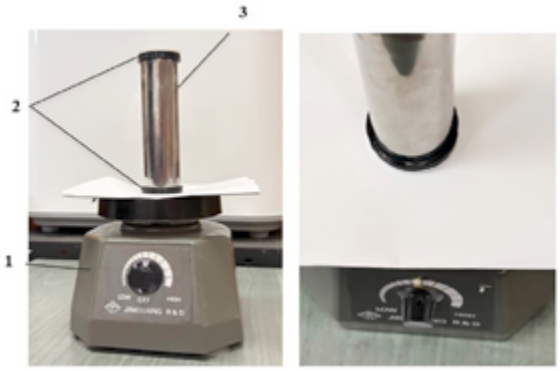


Рисунок 7. Проверка изделия на герметичность: 1 — вибростол; 2 — изготовленные заглушки; 3 — труба
Figure 7. Leak test of the product: 1 — vibration table; 2 — manufactured plugs; 3 — pipe

и просачивание жидкости немедленно привели бы к образованию видимых мокрых следов на бумаге. По завершении цикла испытаний контрольный лист остался абсолютно сухим, что наглядно подтвердило надежность спроектированного двухкомпонентного уплотнения в условиях динамических нагрузок [12].

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования была успешно разработана и практически реализована технология изготовления двухкомпонентной заглушки, способной обеспечивать надежную герметизацию в условиях вибрационных нагрузок. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Комбинирование жесткого полилактида (PLA) и термопластичного эластомера (TPU) в одной детали позволило нивелировать недостатки мономатериалов. PLA обеспечил необходимую конструкционную прочность и надежность резьбового соединения, а интегрированный контур из TPU выполнил функцию демпфера и герметика.

Использование 3D-принтера с системой независимых двойных экструдеров (IDEX) оказалось оптимальным решением для печати разнородными полимерами в едином цикле. Тщательная калибровка и корректный подбор параметров печати (скорости, температурных режимов и др.) обеспечили стабильную подачу гибкого филамента и высокую межслойную адгезию на границе раздела жесткого и эластичного пластиков.

Доказана эксплуатационная надежность изделия. Стендовые испытания опытного образца с применением вибростола (при частоте 50 Гц и ускорениях до 9g) показали отсутствие протечек. Эластичный уплотнитель успешно компенсировал микронеровности и динамические колебания.

Предложенный подход демонстрирует высокую перспективность применения двухкомпонентной FDM-печати для оперативного производства сложных функциональных уплотнений. Данный метод позволяет отказаться от дорогостоящего изготовления пресс-форм и этапа ручной сборки деталей, что особенно актуально для задач мелкосерийного производства и ремонта оборудования химических заводов.

Исследования проводились в рамках научно-технического проекта, выполняемого образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь. Тема: «Модель машинно-аналитического комплекса и ее реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов». Финансовое обеспечение проекта организуют Комитет по науке и высшей школе Правительства Санкт Петербурга и Государственный комитет науки и технологии Республики Беларусь.

Список литературы / References

1. Kruth J. P., Leu M. C. and Nakagawa T. (1998) 'Progress in additive manufacturing and rapid prototyping', CIRP Annals — Manufacturing Technology, 47, pp. 525–540.
2. Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. (2010) 'The use of multiple materials in additive manufacturing', in Additive Manufacturing Technologies. Springer US, pp. 436–449.
3. Wozniak M., Krason J., Kosucki A., Rylski A. and Siczek K. (2025) 'The effect of 3D printer head extruder design on dynamics and print quality', Applied Sciences, 15, 131406 https://doi. org/10.3390/app152413140.
4. Kim H., Park E., Kim S., Park B., Kim N. and Lee S. (2017) 'Experimental study on mechanical properties of single- and

dual-material 3D printed products', Procedia Manufacturing, 10, pp. 887–897.
5. Cahyati S. and Satriawan B. (2019) 'Ketelitian dimensi produk hasil proses modifikasi mesin FDM dual extruder', Prosiding Seminar Nasional Pakar, pp. 1–7, DOI: 10.25105/pakar. v0i0.4185.
6. Harris C. G., Jursik N. J. S., Rochefort W. E. and Walker T. W. (2019) 'Additive manufacturing with soft TPU — adhesion strength in multimaterial flexible joints', Frontiers in Mechanical Engineering, 5, 37, https://doi. org/10.3389/fmech. 2019.00037.
7. Espalin D., Muse D. W., MacDonald E. and Wicker R. B. (2014) '3D printing multifunctionality: structures with electronics', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 72, pp. 963–978.
8. Brancewicz-Steinmetz E., Valverde Vergara R., Buzalski V. H. and Sawicki J. (2022) 'Study of the adhesion between TPU and PLA in multi-material 3D printing', Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 115 (2), pp. 49–56.
9. Singh R., Kumar R., Farina I., Colangelo F., Feo L. and Fraternali F. (2019) 'Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures', Materials, 12 (1), 152.
10. Tarrés N., Garcia-Romeu M. L. and Ferrer I. (2025) 'On the interlaminar bonding adhesion of the PLA-TPU printed multimaterial', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
11. Haryńska A., Gubanska I., Kucinska-Lipka J. and Janik H. (2018) 'Fabrication and characterization of flexible medical-grade TPU filament for fused deposition modeling 3DP technology', Polymers, 10 (12), 1304.
12. Lei I. M., Sheng Y., Lei C. L., Leow C. and Huang Y. Y. S. (2022) 'A hackable, multi-functional, and modular extrusion 3D printer for soft materials', Scientific Reports, 12, 20165.

Информация об авторах

Мидуков Николай Петрович, *доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SCOPUS Author ID: 56530759600, Researcher ID: H-2514-2019; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266, e-mail: mnp83@mail.ru.*

Худницкий Дмитрий Владиславович, *студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-code (РИНЦ): 3086–9764.*

Портнягина Елизавета Артёмовна, *студентка, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198095, ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-code (РИНЦ): 6338–9305.*

Information about the authors

Nikolai Petrovich Midukov, *Dr. Sci in Engeering, Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology Processes and Apparatus, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SCOPUS Author ID: 56530759600, Researcher ID: H-2514-2019; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code: 1021–6266, e-mail: mnp83@mail.ru.*

Dmitry Vladislavovich Khudnitsky, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-code: 3086–9764.*

Elizaveta Artemovna Portnyagina, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-code: 6338–9305.*