

УДК 614.844.5:614.844.2

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РОЗЕТОЧНЫХ ОРОСИТЕЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ**

**Лихоманов А.О., Говор Э.Г., Камлюк А.Н.**

Произведены выбор и оценка свойств материала для изготовления оросителей при помощи 3D-печати; определены оптимальные параметры технологии печати; разработана сборная конструкция оросителя из взаимозаменяемых деталей; осуществлена оптимизация геометрии элементов, обеспечивающая требуемую надежность и функциональность и учитывающая ограничения технологии FDM-печати; изготовлен рабочий аналог металлического розеточного оросителя из термопластичного материала; проведено экспериментальное определение кратности и устойчивости воздушно-механической пены, полученной при помощи металлического оросителя и его аналога из термопластичного полимера путем подачи в систему растворов пенообразователей трех марок разных производителей. Произведен анализ полученных результатов.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, 3D-принтер, автоматическая установка пожаротушения, ороситель, прототип, розетка оросителя, воздушно-механическая пена, кратность пены, устойчивость пены.

(Поступила в редакцию 18 января 2018 г.)

**Введение.** В настоящее время автоматические установки пожаротушения набирают все большую популярность благодаря важному преимуществу в сравнении с иными способами тушения – быстрая (до 3 минут в зависимости от типа установки) автоматическая подача огнетушащего вещества в очаг пожара без участия человека. Практика показывает, что проектирование таких систем в помещениях различного назначения позволяет снизить гибель людей в семь и более раз, спасателей-пожарных при тушении пожара в три и более раз, а также уменьшить величину материального ущерба в 3–4 раза [1].

Наибольшее распространение по всему миру получили автоматические установки пожаротушения, в которых в качестве огнетушащего вещества применяются вода и пена. Данные огнетушащие вещества обладают рядом свойств, позволяющих эффективно ликвидировать горение широкого спектра горючих твердых, жидких и газообразных веществ.

Пенные автоматические установки пожаротушения в большинстве случаев используются для защиты объектов промышленных отраслей (энергетическая, нефтедобывающая, химическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, металлургическая и т. п.). В производственных помещениях предприятий, где находятся крупногабаритные емкости с горюче-смазочными материалами, различное оборудование, механизмы и машины, в которых обращаются легковоспламеняющиеся жидкости, а также в иных случаях, когда рекомендовано применение пены в качестве огнетушащего вещества, но использование пенных стволов или пенных генераторов большой производительности нецелесообразно, для генерирования и подачи пены в очаг пожара устанавливаются розеточные оросители.

Однако в настоящее время представленные на рынке розеточные оросители не позволяют получать пену кратностью более 5–7. Под кратностью понимают величину, равную отношению объемов пены и водного раствора, из которого она получена. Кратность пены в диапазоне 0–20 называют низкой [2]. Давно известно, что зависимость времени тушения от кратности пены достаточно существенна даже в диапазоне работы генераторов пены низкой кратности. Так, уже при применении пены кратностью 10 время тушения очага пожара при интенсивности подачи раствора пенообразователя 0,08 л/(м<sup>2</sup>·с) сокращается в 1,6 раза по сравнению с кратностью 8,1, в 2,5 раза по сравнению с кратностью пены 5,9 и в 3 раза по сравнению с кратностью 4,1 [3]. При уменьшении интенсивности подачи раствора пенообразователя данная разница становится еще больше [3]. Уменьшение времени тушения при применении меньшего количества огнетушащего вещества является главным фактором повышения эффективности тушения. Следовательно, невозможность получить большие значения кратности, чем позволяют получать современные розеточные оросители, существенно снижает эффективность пожаротушения.

В исследованиях [4] экспериментально было показано превалирующее влияние механического разбиения потока огнетушащего вещества о розетку оросителя на повышение кратности пены по сравнению с иными факторами. В настоящее время процесс генерирования пены в розеточных оросителях мало изучен, ввиду чего исследование данной проблемы и дальнейшая оптимизация конструкции розетки с целью получения пены более высокой кратности (до 20) требует проведения ряда экспериментальных исследований. Данные исследования не только способствуют повышению эффективности пожаротушения пенными автоматическими установками, но и позволят более экономно использовать дорогостоящее сырье для получения воздушно-механической пены.

Для обеспечения данных исследований главной задачей является создание оросителей с розетками, имеющими различную форму, способ расположения и крепления к корпусу. За всю многолетнюю историю применения розеточных оросителей их конструкция претерпела изменения, однако способ изготовления остался неизменным – путем литья из металлов. Металл в процессе литья при охлаждении в форме затвердевает, и получается готовая деталь или заготовка, которая далее для повышения точности размеров и снижения шероховатости поверхности подвергается последующей механической обработке. Для изготовления розеточных оросителей в абсолютном большинстве случаев применяются медные сплавы (латунь, бронза) либо нержавеющая сталь. Однако применение таких материалов для изготовления экспериментальных образцов оросителей способом отливки является нецелесообразным ввиду достаточной сложности и трудоемкости такого процесса, а также нерациональности использования ценных металлов.

Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало развитие аддитивных технологий (технологий 3D-печати). Аддитивные технологии предполагают изготовление физического объекта методом послойного нанесения (добавления) материала, в отличие от традиционных методов за счет удаления материала из массива заготовки.

Наиболее доступной и эффективной по технико-экономическим показателям является прототипирование методом послойного наплавления (Fused deposition modeling (FDM) [5]. Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет последовательного нанесения слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластичные полимеры различных видов, поставляемые в виде катушек нитей или прутьев.

Технология FDM отличается высокой гибкостью и применяется для быстрого прототипирования и производства. Быстрое прототипирование облегчает повторное тестирование с последовательной пошаговой модернизацией объекта. Быстрое производство служит в качестве недорогой альтернативы стандартным методам при создании мелкосерийных партий. Данная технология является одним из наименее дорогих методов печати, а 3D-принтеры, работающие по технологии FDM, могут применяться для создания самых разных объектов целевого назначения.

Таким образом, целесообразно применять возможности 3D-принтера при изготовлении изделий различной формы для проведения экспериментальных исследований. Данный способ позволит получить такие конструкции оросителей, которые позволят более детально изучить влияние параметров формы розетки, способа ее крепления и расположения на кратность получаемой пены при минимальных материальных и временных затратах.

Однако остается открытым вопрос о возможности применения экспериментальных образцов, выполненных из термопластичного полимера, взамен металлических. При реализации технологии FDM на перерабатываемый материал оказывает существенное влияние совокупность технологических факторов, которые приводят к изменению как фазового состояния, так и к структурным преобразованиям. В связи с данными явлениями неизбежны процессы, приводящие к потере эксплуатационных свойств конечного продукта. Основными недостатками при реализации FDM (и не только) технологии печати являются:

1. Наличие усадочных явлений в материале. Усадка происходит как вследствие фазовых переходов материала, изменения структуры, так и за счет удаления вспомогательных веществ или продуктов разложения. Усадочные явления приводят к неоднородности усадочных полей по объему изделия, что обеспечивает потерю эксплуатационных свойств изделия за счет возникновения исходного преднапряженного состояния в материале. В ряде случаев усадочные напряжения столь велики, что при определенных режимах печати происходит растрескивание слоев изделия в поперечном направлении. Усадка материала также является

причиной неравномерного искажения размеров конечного изделия за счет анизотропии синтезируемой структуры. Это приводит как к геометрическому несоответствию по отношению к исходной цифровой модели, так и в целом к потере формы за счет коробления.

2. Анизотропия свойств материала в конечном изделии. Послойный синтез геометрии изделий приводит к возникновению существенной анизотропии свойств материалов в конечном продукте. Причиной является величина адгезионной связи между слоями.

3. Неровность поверхности. При диаметре сопла экструдера 0,35 мм используют толщину слоя печати в диапазоне 0,05–0,35 мм. В случае печати наклонных элементов их поверхность получается ступенчатой, а размеры «ступеней» достигают величины толщины слоя (рисунок 1).

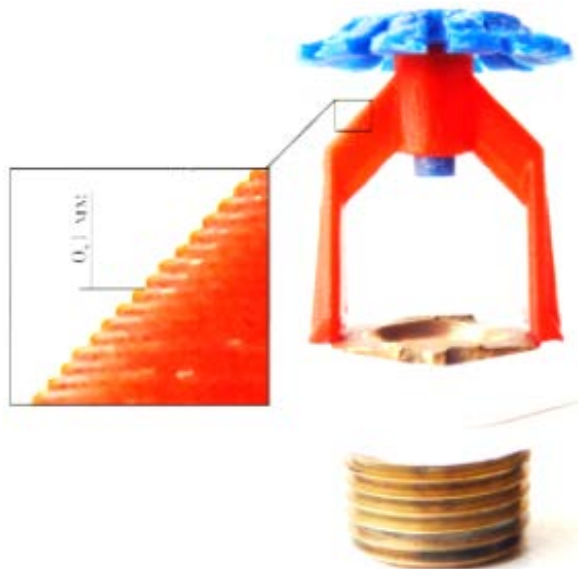


Рисунок 1. – Неровность поверхности оросителя при 3D-печати по технологии FDM

Оценка влияния данных недостатков на возможность использования оросителей из термопластичного полимера, выполненных при помощи 3D-печати, взамен металлических при исследовании процесса образования пены может быть произведена экспериментальным путем. Для этого необходимо произвести выбор и оценку свойств материала для производства изделий; установить оптимальные параметры технологии печати; разработать сборную конструкцию-аналог металлического оросителя из взаимозаменяемых деталей; осуществить оптимизацию геометрии элементов, обеспечивающую требуемую надежность и функциональность и учитывающую ограничения технологии FDM-печати; изготовить из термопластичных материалов рабочий аналог металлического розеточного оросителя, провести экспериментальное определение кратности и устойчивости пены, получаемой при помощи металлического оросителя и его аналога из термопластичного полимера путем подачи в систему растворов пенообразователей трех марок разных производителей по отдельности, сравнить и проанализировать полученные результаты.

**Оборудование и материал для 3D-печати.** Исследование материалов, технологии печати, а также изготовление прототипов оросителей для автоматической установки пожаротушения производилось на базе Белорусского государственного технологического университета на кафедре механики и конструирования факультета химической технологии и техники.

Для изготовления экспериментальных образцов применялся профессиональный 3D-принтер Sharebot Next Generation [6]. Отличительными особенностями данного принтера являются: наличие двух независимых экструдеров, способных печатать двумя видами материала одновременно; толщина слоя от 0,05 мм до 0,35 мм, что позволяет изготавливать модели высокой детализации; возможность печати большим выбором материалов, такими как PLA (полилактид), PLA wood (эффект дерева), PLA sand (эффект цементной поверхности), ABS, ABS Plus для плоских поверхностей, резина, нейлон, Crystal flex (полупрозрачная блестящая поверхность); возможность использования разнообразного программного обеспечения для подготовки и вывода модели на печать (Repetier, Slic3r, Simplify3D, Cura, MeshLab, Meshmixer и пр.). Данный принтер выбран в связи с наличием широкого диапазона регулировки основных технологических параметров процесса печати, что делает его

эффективным по отработке технологии, экспериментам с материалами различных составов, изучению анизотропии материалов в изделиях и пр.

После выбора оборудования важно грамотно подобрать материал для 3D-печати с учетом особенностей эксплуатации изготавливаемых из него изделий. Выбор производился из наиболее распространенных при реализации технологии FDM материалов, характеризующихся высокой прочностью, упругостью и стойкостью к агрессивным и жидким средам, так как экспериментальные образцы из данных материалов подвергаются воздействию водного раствора поверхностно-активных веществ под давлением до 0,4 МПа. Таким требованиям отвечают следующие материалы:

1. АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Изготавливается из нефтепродуктов. Нетоксичен при нормальных условиях. Стойкий к щелочам и моющим средствам. Имеет широкий диапазон эксплуатационных температур от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Плотность  $1,02\text{--}1,06\text{ г/см}^3$ .

2. PLA-пластик (полилактид) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный алифатический полиэфир, структурной единицей которого является молочная кислота. Изготавливается из продуктов сельского хозяйства – кукурузы, картофеля, сахарной свеклы и т. п. Стойкий к щелочам и моющим средствам. Диапазон эксплуатационных температур от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Плотность  $1,23\text{--}1,25\text{ г/см}^3$ .

3. RELAX (полиэтилентерефталат) – пластик для очень прочной 3D-печати. Обладает наименьшим показателем объемной усадки среди пластиков, предназначенных для FDM-печати. Характеризуется высокой ударопрочностью и широким температурным диапазоном применения от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Стойкий к воздействию жиров, щелочей и минеральных кислот. Плотность  $1,3\text{--}1,4\text{ г/см}^3$ .

Так как все описанные материалы обладают стойкостью к воздействию агрессивных и жидких сред, а также имеют достаточно широкий диапазон эксплуатационных температур, выбор материала для печати основывался на наибольших показателях прочностных и упругих характеристик при растяжении образцов, изготовленных при помощи 3D-печати из представленных термопластичных материалов. Определение данных показателей производилось согласно [7].

Для исследования материалов были изготовлены образцы с определенным направлением слоев по отношению к вектору действия растягивающей нагрузки (рисунок 2, размеры указаны в миллиметрах), размеры и форма которых соответствовали требованиям [7]. Режим печати образцов был следующим: толщина слоя печати  $h = 0,2\text{ мм}$ , температура экструдера  $T_3 = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость печати (в долях от средней рекомендуемой производителем для определенного материала)  $v = 1$ . Растяжение образцов производилось на испытательной машине MTS 43 [8] при параметрах нагружения согласно [7] не менее пяти раз для каждого.

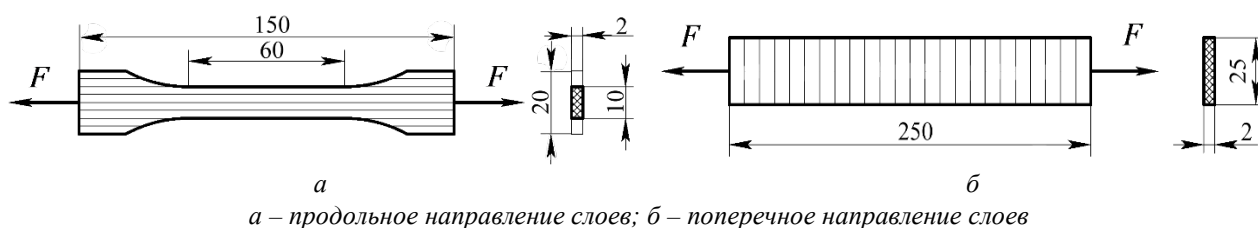
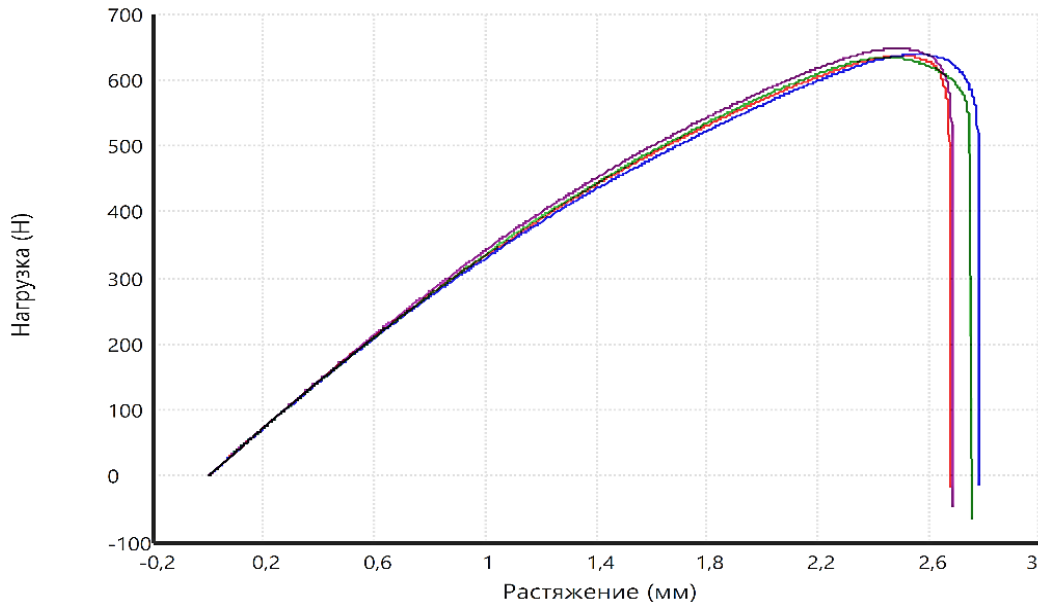


Рисунок 2. – Ориентация слоев печати по направлению нагрузки

В результате испытаний на растяжение были составлены диаграммы «нагрузка-растяжение» (к примеру, такая диаграмма для АБС-пластика при продольном направлении слоев печати представлена на рисунке 3). Предельное усилие при растяжении, когда наступало разрушение образца, определялось как величина силы в наивысшей точке графика.



**Рисунок 3. – Диаграмма «нагрузка-растяжение» для АБС-пластика при продольном направлении печати слоев**

Далее определялся предел прочности  $\sigma$  при растяжении для каждого образца по формуле [7]

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

где  $F$  – усилие, при котором происходило разрушение образца, Н;  $A_0$  – начальное поперечное сечение образца,  $\text{мм}^2$ .

Модуль упругости  $E$  определялся по абсолютному удлинению образцов  $\Delta l$  в момент максимальной нагрузки ( $F$ ) по формуле

$$E = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l_0}{\Delta l}, \quad (2)$$

где  $l_0$  – начальная длина образца, мм.

Объемная усадка материала определялась путем сравнения объемов цифровой модели, созданной при помощи ПЭВМ, и напечатанного по данной модели образца. Значение объемной усадки  $S$  рассчитывалось по формуле:

$$S = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $V_1$  – объем цифровой модели,  $\text{мм}^3$ ;  $V_2$  – объем образца, напечатанного по данной цифровой модели,  $\text{мм}^3$ .

Нагружение элементов конструкции оросителя при подаче огнетушащего вещества происходит в разных направлениях, следовательно, прототипы, выполненные из термопластичных полимеров при помощи 3D-печати, должны обладать как можно более низким коэффициентом анизотропии прочностных свойств. Коэффициент анизотропии определялся по формуле:

$$C = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4)$$

где  $P_1$  – показатель прочности для образцов с поперечным направлением слоев печати (рисунок 2б);  $P_2$  – показатель прочности для образцов с продольным направлением слоев печати (рисунок 2а).

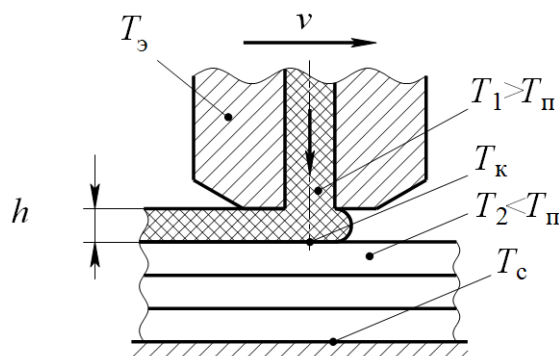
Показатели свойств, определенные по формулам 1–4 для всех испытанных материалов, представлены в таблице 1. Дополнительно в таблице 1 показана оптовая цена одной катушки нити каждого материала массой 750 г.

**Таблица 1. – Показатели физико-механических свойств и цена термопластичных полимеров**

Материал	Предел прочности при растяжении (продольное направление слоев) $\sigma$ , МПа	Модуль продольной упругости (продольное направление слоев) $E$ , ГПа	Объемная усадка $S$ , %	Коэффициент анизотропии свойств $C$	Цена (2017 г.) катушки нити материала массой 750 г, BYN
АБС-пластик (ABS)	40	1,8	3,2	7	35
Полилактид (PLA)	64	2,5	0,8	2,8	65
RELAX	52	2,8	0,4	14	128

По полученным данным видно, что наиболее высокими показателями физико-механических свойств обладают полилактид (PLA) и полиэтилентерефталат (RELAX), при этом они имеют низкие значения объемной усадки, что увеличивает точность размеров изготавливаемых изделий и снижает риск образования усадочных напряжений. Однако пластик RELAX имеет высокий коэффициент анизотропии свойств, что существенно снижает показатель прочности в перпендикулярном слоям печати направлении. Использование его при печати силовых элементов не рекомендовано, однако он предпочтителен при печати декоративных конструкций с наличием мелких геометрических элементов (например, резьбы) благодаря малой величине объемной усадки. В свою очередь полилактид имеет наибольшие значения прочности и жесткости при удовлетворительной объемной усадке. Также данный материал имеет наименьший коэффициент анизотропии свойств. Таким образом, для реализации прототипирования оросителей для автоматической установки пожаротушения принят полилактид (PLA).

**Параметры технологии 3D-печати.** К основным технологическим параметрам FDM-печати относят толщину наносимого слоя  $h$ , температуру экструдера  $T_3$ , скорость перемещения экструдера  $v$  и температуру рабочего стола  $T_c$  (рисунок 4). Данные параметры влияют на скорость печати, качество и адгезионную связь между слоями в обоих поперечных направлениях.



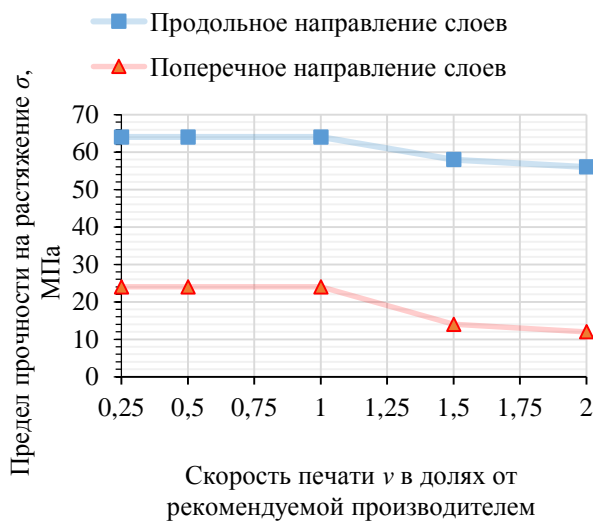
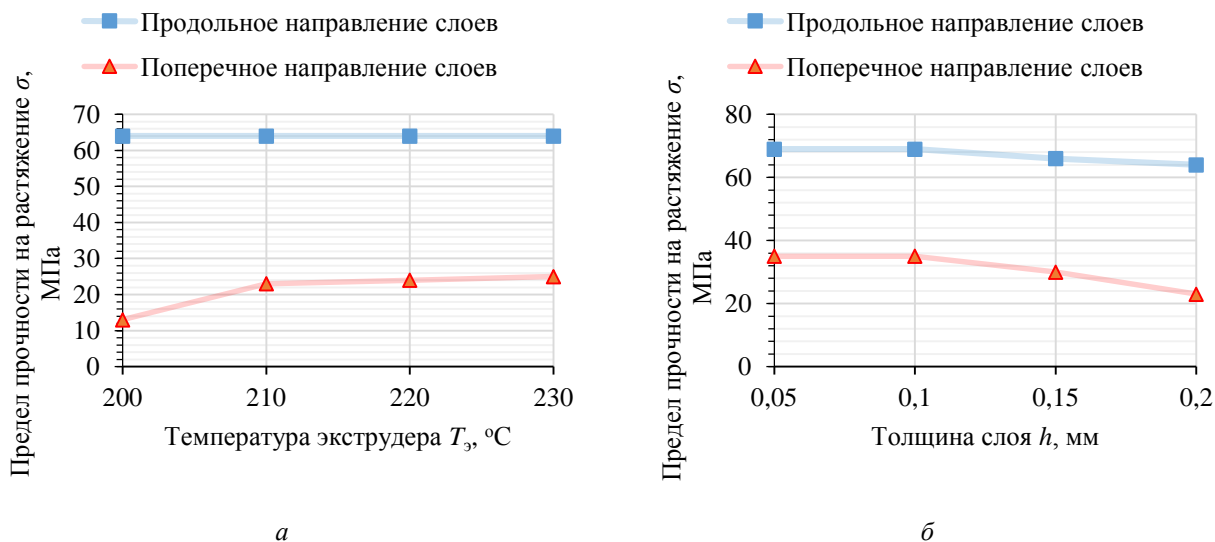
**Рисунок 4. – Схема нанесения слоев**

С целью определения оптимальных параметров печати была произведена практическая отработка процесса синтеза образцов из полилактида в диапазонах значений данных параметров, рекомендуемых изготовителем оборудования 3D-печати [6]. Значения параметров печати представлены в таблице 2. Результаты проведенной отработки представлены на рисунке 5.

**Таблица 2. – Параметры печати при практической отработке процесса синтеза**

Материал	Толщина слоя $h$ , мм	Температура экструдера $T_3$ , °C	Скорость печати $v$ в долях от рекомендованной по [5] (80 мм/с)
Полилактид (PLA)	0,05	200	0,25
	0,10	210	0,50
	0,15	220	1,00
	0,2	230	1,50
			2,00





*а* – при постоянных параметрах  $v = 1$  и  $T_3 = 230$  °C; *б* – при постоянных параметрах  $v = 1$  и  $h = 0,1$  мм; *в* – при постоянных параметрах  $T_3 = 210$  °C и  $h = 0,1$  мм

**Рисунок 5. – Зависимость предела прочности при растяжении образцов из полилактида в зависимости от  $T_3$ ,  $h$  и  $v$  соответственно**

Из графиков на рисунке 5 видно, что при любых значениях параметров печати образцы с продольным направлением слоев имеют значительно больший показатель прочности по сравнению с образцами с поперечным направлением слоев, а именно: в среднем при различной толщине слоя печати в 2,2 раза, при различной температуре экструдера в 3,0 раза, при различной скорости печати в 3,1 раза. Следовательно, выбор оптимальных параметров будет производиться по изменению предела прочности образцов с поперечным направлением слоев, так как исходя из вышесказанного элементы прототипа оросителя, получающие нагрузку поперек слоев, будут иметь наибольшую вероятность потери прочности.

Следует отметить и тот факт, что хотя на элементы оросителя при исследованиях будет воздействовать давление жидкой фазы не более 0,4 МПа, необходимо определить такие параметры технологии печати, при которых прочность на растяжение будет максимально возможной ввиду того, что обработка технологии производится на образцах прямоугольной формы, в то время как элементы прототипа оросителя (розетка, дужки, элементы крепежа) будут иметь значительно большее количество концентраторов напряжений (в областях резких изменений формы, а также в зонах контакта элементов), которые могут в разы снизить прочность конечного изделия.

Первым определяемым параметром была толщина слоя печати  $h$ . Для этого задались

постоянными значениями температуры экструдера и скорости печати, а толщину слоя меняли. Толщина слоя  $h$  обычно задается в зависимости от диаметра сопла экструдера. При диаметре сопла 0,35 мм возможно использовать толщины слоя печати в диапазоне 0,05–0,35 мм [6]. Чем тоньше слой, тем меньше объем наносимого материала и тем самым меньше количество тепла, подаваемого в зону контакта, т. е. ниже температура зоны контакта слоев  $T_k$  (рисунок 4). При уменьшении толщины слоя печати возрастает прочность поперек слоев и уровень детализации изделия, однако увеличивается время печати. Однако, как видно на рисунке 5а, при толщине слоя менее 0,1 мм прочность образцов снижается незначительно, поэтому уменьшение величины  $h$  менее 0,1 мм нецелесообразно. Следовательно, для печати элементов прототипа оросителя из полилактида принята толщина слоя 0,1 мм, так как при этом будет обеспечена необходимая прочность и детализация прототипа по сравнению с оригиналом, а изготовление займет в два раза меньше времени, нежели в случае применения минимальной толщиной слоя (0,05 мм).

Далее определяли оптимальное значение температуры экструдера  $T_3$  при постоянных значениях скорости печати и толщины слоя. На рисунке 5б отчетливо видно, что температура экструдера в значительной степени оказывает влияние на прочность образца только при нагружении поперек слоев печати, а при нагружении вдоль слоев прочность изменяется незначительно. Это объясняется тем, что при испытании образцов на растяжение вдоль слоев возникают лишь продольные напряжения, которые параллельны слоям печати, ввиду чего показатели прочности не зависят от сил адгезионного взаимодействия между ними. Следует отметить и то, что с увеличением температуры выдавливаемого через сопло расплава возрастает прочность изделия в поперечном слоем направлении, однако существенно ухудшается качество изделий за счет образования наплывов и мостиков перехода, а также увеличения степени термической деструкции, что обуславливает падение физико-механических характеристик материала в образце. На рисунке 5б можно заметить, что резкое повышение прочности образца происходит при температуре экструдера 210 °С, а далее прочность увеличивается незначительно, из чего следует, что данная температура является оптимальной в данных условиях, когда необходимо получить прочное изделие, но при этом не ухудшить его качество путем дальнейшего повышения температуры.

Следующим определяемым параметром была скорость печати  $v$ . При уже установленных оптимальных значениях температуры экструдера и толщины слоя синтезировались образцы при разных скоростях печати. Скорость печати в использованном 3D-принтере [6] задавалась автоматически производителем и равнялась 1, а регулировка могла быть осуществлена путем поворота тумблера в меньшую либо большую сторону по отношению к рекомендуемому значению (1), поэтому для отработки выбраны не конкретные значения скорости, а в долях от рекомендуемой производителем. Анализируя рисунок 5в, можно заметить, что чем ниже скорость печати, тем выше прочность конечного изделия и наоборот. Однако следует отметить, что при уменьшении скорости ниже 1 прочность перестает увеличиваться. Это происходит вследствие того, что при данном значении скорости печати проходящий через экструдер пруток полилактида уже успевает расплавиться и нагреться до оптимальной температуры 210 °С, при дальнейшем же уменьшении скорости большего нагрева не происходит. В случае превышения данной скорости происходит обратное – пластик не нагревается должным образом, адгезия между слоями уменьшается, и прочность изделия падает. Следовательно, в качестве оптимальной скорости печати при заданных параметрах толщины слоя и температуры экструдера можно принять рекомендуемую производителем – 80 мм/с.

При печати изделий на 3D-принтере возникает явление, получившее название «деламинация» – отлипание углов изделия от стола. Происходит это вследствие усадки материала. Усадка есть уменьшение линейных размеров детали после остывания пластика. В точке нанесения материала он находится в определенных условиях, а по мере удаления от экструдера происходит изменение его состояния и объема. При переходе печати на последующий слой, рабочий инструмент движется по математической траектории соответствующей требуемой геометрии, однако предыдущий слой, на который поступает материал уже изменил свои размеры за счет усадки (рисунок 6).



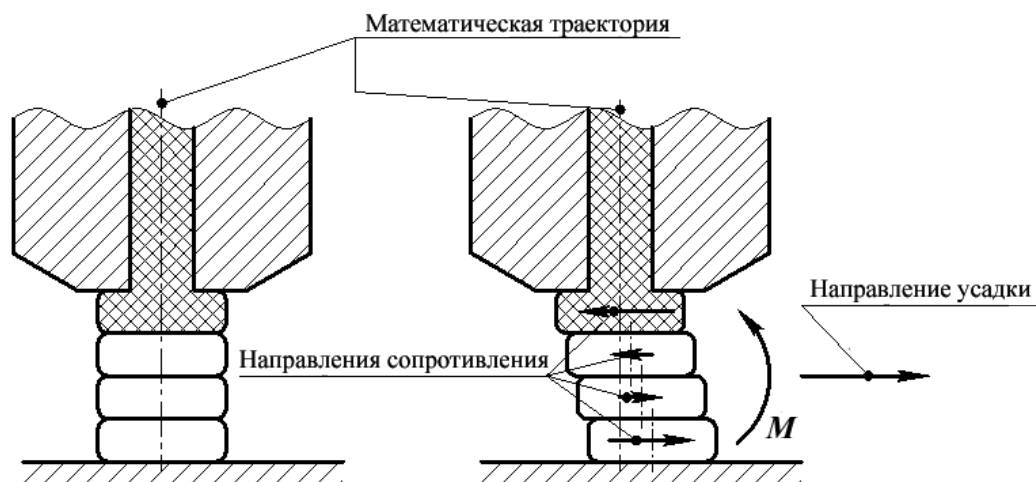


Рисунок 6. – Усадочное явление материала при печати с использованием технологии FDM

За счет действия адгезионной связи между слоями при усадке текущего слоя имеет место дополнительное деформирование предыдущего. И так происходит последовательно для всех слоев. В каждом слое возникают силы сопротивления усадочным деформациям, величина которых увеличивается, а направление меняется по мере увеличения количества слоев. Это приводит к возникновению и постоянному увеличению внутреннего изгибающего момента  $M$  в материале по высоте изделия. При этом возникают нормальные напряжения между слоями в направлении синтеза изделия. Когда величина усадочных напряжений превышает показатель прочности в поперечном слоям направлении, происходит отрыв слоев.

В современных 3D-принтерах данная проблема решается путем нагрева рабочего стола до определенных температур в зависимости от применяемого материала. Чем ниже усадка материала, тем меньше температура нагрева рабочего стола  $T_c$ . В случае применения полилактида с объемной усадкой не более 0,8 % (таблица 1) производителем оборудования для печати рекомендуется нагревать рабочий стол до температуры не более 90 °С [6]. При этом чем больше размер печатаемого изделия, тем выше должна быть данная температура  $T_c$ . В результате практической отработки печати элементов прототипа розеточного оросителя определена оптимальная температура нагрева – 70 °С.

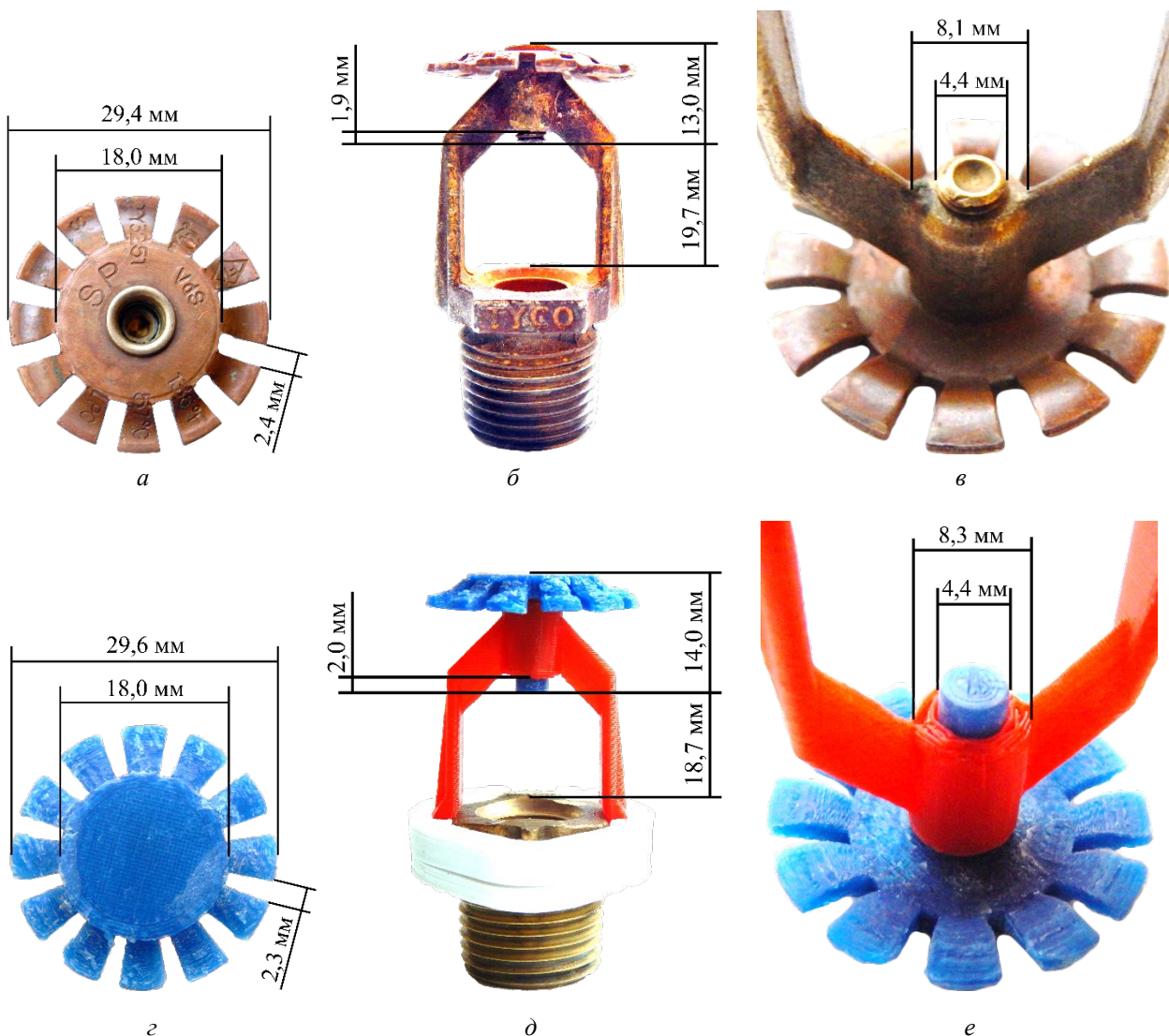
Оптимальные режимы печати элементов прототипа оросителя, определенные в ходе опытной отработки технологии, представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Параметры технологического процесса печати

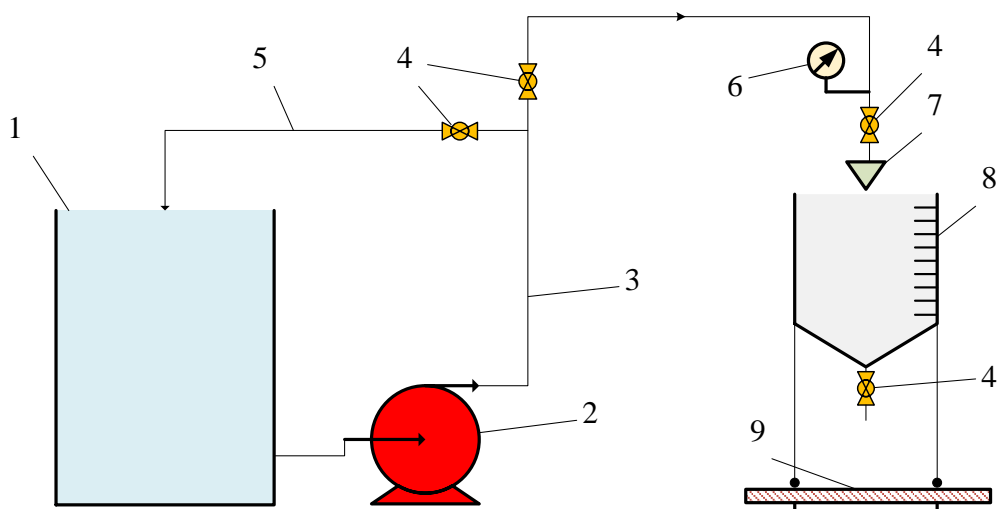
Параметр процесса	Значение параметра
Толщина слоя ( $h$ , мм)	0,1
Температура экструдера ( $T_3$ , °С)	210
Скорость печати ( $v$ , мм/с)	80
Температура рабочего стола ( $T_c$ , °С)	70

**Конструкция прототипа оросителя, экспериментальная установка и методика эксперимента.** За основу конструкции выбран распространенный розеточный ороситель ГУСО 3251 (рисунок 7а–в). Для обеспечения гибкости смены элементов оросителя при проведении исследований предложена разборная конструкция (рисунок 7г–е). Выполненная из полилактида конструкция идентична конструкции оригинального металлического оросителя ГУСО 3251 (отклонение размеров элементов от оригинала составляет не более 7,7 %, рисунок 7). Монтаж элементов из полилактида осуществляется на металлическом штуцере, взятом от эталонного оросителя с конической дюймовой резьбой (1/2").

Экспериментальные исследования качественных характеристик пены проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 8.



а, г – вид сверху; б, д – вид сбоку; в, е – крупный план места крепления розетки и установки винта  
**Рисунок 7. – Внешний вид розеточного оросителя TYCO 3251 (а, б, в) и его аналога (г, д, е), элементы которого выполнены из полилактида**



1 – емкость для хранения и приготовления раствора пенообразователя; 2 – насосное оборудование;  
 3 – основной трубопровод; 4 – шаровый кран; 5 – обводной трубопровод; 6 – манометр; 7 – ороситель;  
 8 – установка для измерения кратности и устойчивости пены; 9 – электронные весы

**Рисунок 8. – Схема экспериментальной установки**

Для обеспечения эксперимента применялись средства измерений и оборудование, представленные в таблице 4.

**Таблица 4. – Средства измерений и оборудование**

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Класс точности
Весы (электронные) для статического взвешивания типа ВЛК-500	(0–50) кг	–	средний (по ГОСТ 24104)
Секундомер СОПр-2а-3-000	(0–30) мин	0,2 сек	3
Термометр лабораторный по ГОСТ 28498	(–30 ÷ +70) °С	1°С	2
Манометр МПТИ-УЗ	(0–0,25) МПа	0,005 МПа	0,4
Установка для измерения кратности и устойчивости пены ( $V = 0,05 \text{ м}^3$ )	–	–	–

Получение воздушно-механической пены осуществлялось при использовании водных растворов пенообразователей трех марок разных производителей: Синтек 6НС, ПО-6РЗ, ПО-РЗФ. Синтек 6НС был выбран исходя из того факта, что данный пенообразователь является продуктом отечественного производителя и широко распространен на территории нашей страны. Пенообразователь ПО-6РЗ российского производства является конкурентным аналогом отечественного пенообразователя марки Синтек, а ПО-РЗФ является фторсодержащим пленкообразующим пенообразователем целевого назначения и позволит дополнительно оценить влияние соединений фтора как на качественные характеристики получаемой пены, так и на сам термопластичный материал. Характеристики пенообразователей для эксперимента приведены в таблице 5.

**Таблица 5. – Нормативы показателей качества пенообразователей**

Наименование показателя	Марка пенообразователя		
	Синтек 6НС (6 %)	ПО-6РЗ (6 %)	ПО-РЗФ (6 %)
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	1,00–1,10	1,2	1,1
Водородный показатель рН	7,0–10,0	6,5–8,5	6,5–8,5
Кратность пены низкой кратности, не более	20	20	20
Устойчивость пены низкой кратности, с, не менее	–	200	120

Порядок проведения эксперимента был следующий: емкость 1 заполнялась 350 л воды и 22,4 л пенообразователя для получения 6 %-ого раствора пенообразователя (отношение 15,6:1). При помощи лабораторного термометра определялась температура полученного раствора (норма температуры составляет 10÷30 °С). Далее открывался кран 4 на обводном трубопроводе 5, включался насос 2 и производилась циркуляция раствора по замкнутому контуру экспериментальной установки в течение 20–30 минут с целью равномерного перемешивания воды и пенообразователя. Далее кран 4 на обводном трубопроводе 5 закрывался. Затем путем открытия крана 4 на основном трубопроводе перемешанный раствор подавался к оросителю 7. Установка для измерения кратности и устойчивости пены 8 устанавливалась таким образом, чтобы розетка оросителя 7 находилась на 2–3 см ниже верхней кромки установки 8, чтобы вся сгенерированная пена поступала в нее. После открывался кран 4 перед оросителем 7 и производилась подача огнетушащего вещества при заданном давлении  $0,1 \pm 0,01 \text{ МПа}$  (регулировалось путем частичного открытия/закрытия крана 4 на основном трубопроводе и определялось по манометру 6) в установку 8 до момента, когда она полностью заполнилась. Далее кран 4 перед оросителем 7 закрывался, включался секундомер и производился замер веса заполненной установки 8 на электронных весах 9. По завершении измерения устойчивости полученной пены секундомер выключался.

Данный порядок измерения массы заполненной пеной установки и устойчивости пены осуществлялся для металлического оросителя и оросителя из полилактида по пять раз для каждого с одним пенообразователем. Затем в той же последовательности и в том же количестве проводились измерения с двумя другими пенообразователями.

Кратность полученной пены определялась объемным методом по формуле [2]

$$K = \frac{V_y}{m_2 - m_1} \cdot \rho_{\text{п-ра}}, \quad (5)$$

где  $V_y$  – объем установки для измерения кратности и устойчивости пены, м<sup>3</sup>;  $m_2$  – масса установки для измерения кратности и устойчивости пены, заполненной пеной, кг;  $m_1$  –

масса установки для измерения кратности и устойчивости пены, кг;  $\rho_{p-pa}$  – плотность раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>.

Устойчивость пены определялась как время выделения из нее 50 % жидкой фазы (раствора пенообразователя). В данном случае после заполнения установки 8 пеной включался секундомер и устанавливалось время, когда объем пены станет в 2 раза меньше, т. е. она будет заполнять установку ровно наполовину. Жидкая фаза при этом постепенно сливалась через отверстие в дне емкости путем открытия шарового крана 4.

Обработка полученных экспериментальных данных производилась согласно [10].

**Результаты экспериментальных исследований и выводы.** В результате экспериментальных исследований получены значения массы пены, по которым далее по формуле 5 определена ее кратность, а также временные отрезки выделения 50 % жидкой фазы из объема пены, которые определяют ее устойчивость. Результаты отображены в таблицах 6 и 7.

**Таблица 6. – Кратность пены**

Номер эксперимента	Кратность пены					
	Металл			Полилактид (пластик)		
	Синтек 6НС	ПО-6РЗ	ПО-РЗФ	Синтек 6НС	ПО-6РЗ	ПО-РЗФ
1	5,48	8,02	5,13	5,85	8,15	5,28
2	6,06	8,28	5,37	6,13	8,28	5,13
3	5,59	8,15	5,48	5,66	8,15	5,42
4	5,79	8,42	5,23	5,59	8,15	5,37
5	6,13	8,15	5,48	6,28	7,89	5,32
Среднее значение	5,79	8,19	5,33	5,89	8,12	5,30

**Таблица 7. – Устойчивость пены**

Номер эксперимента	Устойчивость пены, с					
	Металл			Полилактид (пластик)		
	Синтек 6НС	ПО-6РЗ	ПО-РЗФ	Синтек 6НС	ПО-6РЗ	ПО-РЗФ
1	90	182	156	94	185	161
2	100	195	163	101	196	155
3	93	185	165	95	189	163
4	95	204	157	92	192	162
5	102	189	164	106	178	161
Среднее значение	96	191	161	98	188	160

Экспериментально установленные значения кратности пены при использовании пенообразователей всех трех марок производителей показали, что разница при использовании металлического оросителя и оросителя из полилактида, элементы которого выполнены при помощи 3D-печати, составляет не более 1,7 %. Так при использовании пенообразователя Синтек 6НС кратность пены с металлическим и с оросителем из полилактида различается на 1,7 %. В случае с пенообразователем ПО-6РЗ такая разница составляет 0,9 %, а при применении пенообразователя ПО-РЗФ – 0,6 %.

Отличие значений устойчивости пены также находится в пределах погрешности измерений и составляют не более 2,1 %. Так различие в устойчивости пены с оросителем из металла и из полилактида составляет 2,1 % при использовании пенообразователя Синтек 6НС. Данная разница при применении пенообразователя ПО-6РЗ составляет 1,6 %, а с пенообразователем ПО-РЗФ устойчивость пены для оросителей из разных материалов различается на 0,6 %.

Полученные экспериментальные данные согласуются с выводами авторов [11] и показывают, что повышение скорости перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный в случае применения оросителя из полилактида, где неровность поверхности достигает значений 0,1 мм, не оказывает существенного влияния на степень дезинтеграции потока огнетушащего вещества и, как следствие, не отображается на изменении качественных характеристик пены (кратности и устойчивости) в пределах погрешности измерений).

Также по результатам эксперимента видно, что свойства полилактида не влияют на процесс генерирования пены при использовании пенообразователей разных марок производителей с различным химическим составом в сколько-нибудь значимой степени. При этом ороситель, изготовленный из данного материала при помощи аддитивных технологий, сохранил свою целостность при давлении перед ним вплоть до 0,4 МПа, что говорит о до-

статочном запасе прочности для проведения исследований качественных характеристик воздушно-механической пены низкой кратности.

Следует отметить тот факт, что значения кратности и устойчивости пены при использовании разных пенообразователей отличаются друг от друга. Так кратность пены при использовании пенообразователя ПО-6РЗ больше, чем у пенообразователя Синтек 6НС, на 41,5 % и ПО-РЗФ на 53,7 %, а устойчивость больше на 98,9 % и 18,6 % соответственно. Это можно объяснить большей плотностью пенообразователя ПО-6РЗ на 15–20 %, а также наличием определенных стабилизаторов пены, повышающих ее качественные характеристики. Большая устойчивость пены при применении пенообразователя ПО-РЗФ по сравнению с Синтек 6НС на 67,7 % может быть объяснено тем, что ПО-РЗФ содержит в своем составе химические соединения фтора и является пленкообразующим пенообразователем целевого назначения. Однако, как было отмечено ранее, пенообразователи ПО-6РЗ и ПО-РЗФ импортного производства, стоимость которых более чем в 1,4 раза превышает стоимость Синтек 6НС. Для проведения дальнейших исследований будет применяться пенообразователь отечественного производства Синтек 6НС, так как он является пенообразователем общего назначения и получил наибольшее распространение на территории нашей страны, а повышение качественных характеристик пены низкой кратности, получаемой в оросителях автоматических установок пожаротушения, при применении данного пенообразователя будет иметь положительный экономический эффект ввиду сокращения закупки зарубежных аналогов.

Таким образом, можно сделать вывод, что выбранное оборудование, технология печати и материал для производства экспериментальных образцов (полилактид), а также разработанная сборная конструкция оросителя, элементы которой выполнены посредством 3D-печати, позволяют применять данную технологию для прототипирования элементов автоматических установок пожаротушения, в частности розеточных оросителей, а полученные изделия обладают необходимой прочностью и упругостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. John, R. Hall. JR. NFPA USA. U.S. Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment / John R. Hall. – July, 2017. – 35 p.
2. Государственный стандарт Республики Беларусь. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ ГОСТ Р 50588-99. – Введ. 30.12.1999 г. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 1999. – 18 с.
3. Котов, А.А. Применение высокократной пены при тушении пожаров / А.А. Котов, И.И. Петров, В.Ч. Реутт. – М.: Стройиздат, 1972. – 112 с.
4. Камлюк, А.Н. Экспериментальные исследования влияния конструктивных элементов оросителей на кратность воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1. – № 2. – С. 167–177.
5. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 219 с.
6. Sharebot Next Generation. User's manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.sharebot.it/downloads/NG/Manual\\_EN.pdf](https://www.sharebot.it/downloads/NG/Manual_EN.pdf). – Дата доступа: 15.01.2018.
7. Государственный стандарт Союза ССР. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-80. – Введ. 01.12.1980. – М.: Гос. комитет СССР, 1980. – 16 с.
8. MTS Exceed Series 40 Electromechanical Universal Test Systems [Электронный ресурс] / MTS Systems Corporation. – Режим доступа: [https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts\\_2011071.pdf](https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2011071.pdf). – Дата доступа: 15.01.2018.
9. Официальный сайт REC [Электронный ресурс] / ООО «Русская Экструзионная Компания». – Режим доступа: <https://rec3d.ru>. – Дата доступа: 15.01.2018.
10. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207–76. – Введ. 01.01.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 9 с. – (Государственная система обеспечения единства измерений).
11. Batchelor, G.K., Gill, A.E. Analysis of the stability of axisymmetric jets // Journal of fluid mechanics. – 1962. – Vol. 14. – 23 p.

## THE SUBSTANTIATION OF THE APPLICATION OF DEFLECTOR SPRINKLERS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES IN EXPERIMENTAL STUDIES OF QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF THE LOW-EXPANSION AIR-MECHANICAL FOAM

**Aliaksei Likhmanau**

**Eduard Govor**

**Andrei Kamluk**, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

The State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

*Purpose.* Selection and evaluation of the material properties of the plastic prototype of the metal sprinkler manufacturing, the optimal parameters of the printing technology establishment, the development of a prefabricated analog of the metal sprinkler from interchangeable parts, the optimization of its elements geometry, taking into account the required reliability, functionality and the limitations of FDM printing technology, manufacturing of thermoplastic working analog of the metal sprinkler, the experimental determination of the expansion rate and stability obtained with a metal sprinkler and its thermoplastic analog by applying a solution of foaming agent of three brands from different manufacturers separately, comparison and analysis of the results.

*Methods.* Conducting experimental studies of the process of 3D-printing and formation of low expansion air-mechanical foam with sprinklers.

*Findings.* It is most expedient to use polylactide for the automatic firefighting installations sprinkler prototyping, since it has the greatest strength and rigidity values with satisfactory volumetric shrinkage, and also has the lowest anisotropy coefficient of properties compared to other materials for 3D-printing.

The optimal parameters of the printing technology for the sprinkler analog elements are: layer thickness  $h - 0,1$  mm, extruder temperature  $T_e - 210$  °C, extruder speed  $v - 80$  mm/s, and working table temperature  $T_t - 70$  °C.

Experimentally established values of the foam expansion rate using foaming agents of all three brands of different manufacturers showed that the difference in using a metal sprinkler and a thermoplastic sprinkler is not more than 1,7 %. The difference in the stability of the foam values is also within the measurement error and is not more than 2,1 %. This implies that the properties of the polylactide and the features of the 3D printing technology do not substantially distort the original design of the metal sprinkler and do not have a significant effect on the quality characteristics of the foam.

*Application field of research.* The obtained results of experimental studies can be used to improve the efficiency of firefighting with sprinklers in foam automatic firefighting installations by determining the optimal parameters of the sprinkler deflector construction.

*Conclusions.* The selected equipment, printing technology and material (polylactide) for the manufacturing of experimental samples, as well as the developed prefabricated design of the sprinkler prototype, which elements are made by 3D-printing, allow this technology to be used for prototyping elements of automatic fire extinguishing systems, in particular sprinkler's deflector, with the end items having the necessary strength and rigidity.

*Keywords:* additive technologies, 3D printer, automatic firefighting installation, sprinkler, prototype, sprinkler's deflector, air-mechanical foam, foam expansion rate, foam stability.

(The date of submitting: January 18, 2018)

### REFERENCES

1. John R. Hall. JR. NFPA USA. U.S. *Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment*, July, 2017. 35 p.
2. Gosudarstvennyy standart Respubliki Belarus'. Penobrazovateli dlya tusheniya pozharov. *Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Foaming agents for firefighting. General technical requirements and test methods]. STB GOST R 50588-99. Minsk, Gosstandart Respubliki Belarus', 1999. 18 p. (rus)
3. Kotov A.A., Petrov I.I., Reutt V.Ch. *Primenenie vysokokratnoy peny pri tushenii pozharov* [High-expansion foam implementation for fire extinguishing]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 112 p. (rus)
4. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Experimental investigations of the influence of the structural elements of sprinklers on the expansion rate of air-mechanical foam. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi*, 2017. Vol. 1. No. 1. Pp. 167–177. (rus)

5. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii. Posobie dlya inzhenerov* [Additive technologies in mechanical engineering. Allowance for engineers.] Moscow: GNTs RF FGUP «NAMI», 2015. 219 p. (rus)
6. *Sharebot Next Generation. User's manual*, available at: [https://www.sharebot.it/downloads/NG/Manual\\_EN.pdf](https://www.sharebot.it/downloads/NG/Manual_EN.pdf) (accessed : January 15, 2018).
7. *Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie* [Plastics. Tensile test method]. GOST 11262-80. Enter 01-12-1980. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR, 1980. 16 p. (rus)
8. *MTS Exceed Series 40 Electromechanical Universal Test Systems*, available at: [https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts\\_2011071.pdf](https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2011071.pdf) (accessed: January 15, 2018).
9. *Ofitsial'nyy sayt REC* [Official Website REC], available at: <https://rec3d.ru/> (accessed: January 15, 2018). (rus)
10. *Pryamye izmereniya s mnogokratnymi nablyudenyami. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudeny. Osnovnye polozeniya* [Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of observations. Basic provisions]. GOST 8.207-76. Enter 01-01-1977. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1976. 9 p. (rus)
11. Batchelor G.K., Gill A.E. Analysis of the stability of axisymmetric jets. *Journal of fluid mechanics*, 1962. Vol. 14. 23 p.