

УДК 678.8

Г.Н. Петрова¹, Д.Н. Перфилова¹, С.В. Малышенков¹, К.Р. Кузнецова¹**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА
НА УРОВЕНЬ СВОЙСТВ ПЕНОПОЛИАКРИЛИМИДА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-39-47

Приведены результаты исследований по оценке влияния масштабного фактора на уровень физико-механических свойств жесткого листового пеноакрилимиды марки ВПП-5, изготовленного из листового форполимера на основе акрилимиды.

Рассмотрены зависимости значений кажущейся плотности, прочности при растяжении и коэффициентов их вариации от габаритов пеноблока. Установлено, что коэффициент вариации имеет значения меньше 10%, а степень рассеивания полученных данных незначительна.

Результаты проведенной работы позволят прогнозировать свойства блоков пенополиакрилимиды различных габаритов.

Ключевые слова: термопласты, пеноматериал, пенополиакрилимид, жесткий, вспенивание, габариты, свойства, прогнозирование.

G.N. Petrova¹, D.N. Perfilova¹, S.V. Malyshekov¹, K.R. Kuznetsova¹**INFLUENCE OF THE LARGE-SCALE FACTOR
ON LEVEL OF PROPERTIES OF FOAMED POLYACRYLIMIDE**

In article results of researches on impact assessment of large-scale factor on level of the physical and mechanical properties rigid foamed polyacrylimide sheet brands VPP-5, made of sheet prepolymer on basis acrylimide are given.

Dependences of values of apparent density, durability are considered at stretching and factors of their variation from overall dimensions foam concrete block. It is established that the factor of variation has values less than 10%, and extent of dispersion of the obtained data is insignificant.

Results of the carried-out work will allow to predict properties of blocks foamed polyacrylimide different dimensions.

Keywords: thermoplastics, cellular foam, foamed polyacrylimide, rigid, foaming, dimensions, properties, forecasting.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В современном авиастроении в элементах конструкций лопастей вертолетов широко используются трехслойные панели конструкционного назначения, состоящие из двух тонкослойных панелей из стекло- или углепластика и сотового заполнителя [1–5].

Однако сотовый заполнитель обладает рядом технологических и эксплуатационных недостатков:

- трудоемкость изготовления (операции вулканизации, сваривания), что увеличивает стоимость;
- препятствия при формовании деталей сложной конфигурации;
- относительно высокое влагопоглощение трехслойных панелей и т. д.

Опыт зарубежных авиастроителей показал, что указанные недостатки могут быть устранены при замене заполнителя в виде сот на альтернативный заполнитель – вспененный жесткий пластик [1, 4, 6–11].

Такие материалы получают из большинства известных полимеров [4, 11–22]. Основу промышленного ассортимента составляют пенопласты на основе полистирола (ПС), полиэтилена (ПЭ), поливинилхлорида (ПВХ), полиуретанов (ПУ), полипропилена (ПП), фенольных, эпоксидных, карбамидных и кремнийорганических смол. Они имеют малую плотность (0,01–0,2 г/см³), хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, высокие диэлектрические качества, легко обрабатываются резанием и хорошо склеиваются [16, 21, 23–26].

Однако этим материалам присущ и ряд недостатков: их механические свойства существенно зависят от плотности, они горючи, обладают сравнительно низкой тепло- и морозостойкостью. Это значительно ограничивает области их применения [23–26]. В связи с этим возникла необходимость разработки новых пеноматериалов с более высоким уровнем эксплуатационных характеристик.

В данном направлении представляют интерес работы по созданию пеноматериалов на основе полиимидов [1, 4, 6, 11, 27–31]. Полиимиды относятся к полимерным материалам нового поколения, которые обладают комплексом уникальных эксплуатационных свойств, таких как пожаробезопасность, высокие прочностные характеристики, низкая газопроницаемость, коррозионная инертность, грибостойкость, устойчивость к радиационному воздействию и УФ-лучам, прекрасные диэлектрические свойства, работоспособность в интервале температур от -196 до +(250–350)°С.

Уникальный комплекс свойств полиимидов обусловлен жесткой структурой, которая состоит из бензольного кольца, прочно соединенного с двумя пятичленными азотсодержащими циклами.

На протяжении нескольких десятилетий полимеры этого класса удерживают первенство среди материалов, из которых в настоящее время произведен огромный ассортимент изделий для всех отраслей науки и техники. На основе полиимидов получают пленки, волокна, покрытия, лаки, пластмассы, мембраны, композиты, связующие, пено- и пороматериалы. Каждый из этих видов материалов может работать в термоэкстремальных условиях [11, 27, 32–38].

В настоящее время за рубежом для изготовления лопастей вертолетов (лопасти для вертолетов EH101, Eurocopter, SikorskyS-61 фирмы DucommunAeroStructures, новой модели EC-135 и будущего NH90, лопасти для японского вертолета OH1) за один цикл вместо сот широко применяют метакрилимидные пенопласты марки Rohacell WF с плотностью 51 и 71 кг/м³ и температурой формования до 180°С при давлении переработки – до 0,7 МПа, которые обладают такими важными свойствами, как высокое сопротивление компрессионной ползучести и превосходная стабильность размеров. На сегодня это самые крупные лопасти с сердцевинной из пены длиной ~8,5 м. Благодаря их высокому качеству достигается эксплуатационный ресурс в 10 тыс. летных часов, что соответствует сроку службы вертолета, в то время как обычные лопасти служат ~1,5 тыс. летных часов.

Пенопласты марки Rohacell WF принадлежат классу полиметакрилимидов (ПМИ). Эти продукты относятся к газонаполненным полимерам ячеистого типа, которые содержат изолированные (закрытые) не сообщающиеся между собой газоструктурные элементы (газовые полости), называемые ячейками, разделенные прослойками полимера.

Пеноматериалы с замкнутыми ячейками широко используются для практических целей, так как эти материалы обладают жесткой закрытой структурой и

комплексом температурно-деформационных параметров, позволяющим найти применение в различных технологических процессах склейки и формования многослойных конструкций.

Получают такие пенопласты в результате термообработки листовых сополимеров метакрилонитрила (МАН) с метакриловой кислотой (МАК), полученных полимеризацией в массе с введением функциональных добавок (вспенивателей, стабилизаторов, инициаторов и т. п.).

В России производство метакрилимидных пенопластов отсутствует.

В данной статье приведены результаты исследований по оценке влияния масштабного фактора на уровень физико-механических свойств жесткого пеноакрилимидного листового марки ВПП-5, изготовленного из листового форполимера на основе акрилимидного производства ФГУП «НИИ полимеров» [29–31].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 16. «Сверхлегкие пеноматериалы» комплексной проблемы 16.1. «Полимерные синтактические и пеноматериалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3, 39].

Материалы и методы

Известно, что возможность использования того или иного пеноматериала при изготовлении трехслойных панелей конструкционного назначения для элементов конструкций лопастей вертолетов зависит не только от рецептуры исходного полуфабриката (форполимера) и структуры полученной из него пены, но и от стабильности и величины значений кажущейся плотности и прочности при сжатии. В данной статье представлены результаты исследований по оценке влияния масштабного фактора изготавливаемых пеноблоков на уровень свойств модельного листового пеноакрилимидного марки ВПП-5.

Листовой пеноакрилимид марки ВПП-5 изготовлен из листового форполимера на основе акрилимидного по ТУ2216-558-00208947–2014 производства ФГУП «НИИ полимеров».

Испытания проводили на модельных блоках, изготовленных на специальной оснастке по разработанному режиму. По двухстадийному технологическому процессу (вспенивание+имидизация) из форполимера получали модельные блоки толщиной 50 мм и площадью 300×500; 500×1000 и 800×1600 мм.

Далее путем механической обработки на разработанном авторами устройстве [40] изготавливали образцы: снимали «корку», нарезали пластины необходимой толщины, а затем вырезали образцы размером 50×50×50 мм по периметру блока и из его средней части (рис. 1).



Рис. 1. Расположение на пеноблоке образцов для испытаний

Исследования свойств пеноакрилимидного проводили по стандартным методикам:

- плотность (кг/м^3) определяли по ГОСТ 409–78;
- прочность при сжатии (МПа) оценивали в соответствии с ГОСТ 23206–78;

– модуль упругости при сжатии (МПа) определяли по ГОСТ 23206–78.

Коэффициент вариации, характеризующий относительную меру отклонения измеренных значений от среднеарифметического, рассчитывали по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{a} \cdot 100\% ,$$

где V – коэффициент вариации; σ – среднеквадратическое отклонение; a – среднее арифметическое значение.

Чем больше значение коэффициента вариации, тем больше разброс и меньше выравненность исследуемых значений. Если коэффициент вариации <10%, то изменчивость вариационного ряда принято считать незначительной; от 10 до 20% – относится к средней; больше 20 и меньше 33% – к значительной, а если коэффициент вариации превышает 33%, то это свидетельствует о неоднородности информации и необходимости исключения самых больших и самых маленьких значений.

Результаты и обсуждение

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработаны два вида пеноматериалов на основе полиимидов:

- жесткие (листовые) – листовой пеноакрилимид марки ВПП-5;
- мягкие (эластичные) – полиимид трудносгорающий эластичный марок ВПП-1 и ВПП-1с [1, 4, 6].

Жесткие пены имеют изотропную ячеистую структуру – они выполняют роль каркаса в ходе вспенивания и сборки. Высокое сопротивление этих материалов компрессионной ползучести и превосходная стабильность размеров в ходе вспенивания позволяют применять экономичный одноступенчатый процесс.

Мягкие эластичные пены обладают малой плотностью, устойчивостью к горению, высокими показателями по тепло- и звукоизоляции, широким диапазоном рабочих температур – от -193 до +250°C.

Совместно с ФГУП «НИИ полимеров» разработаны технологии получения жесткого пенопласта с закрытыми порами марки ВПП-5 и мягкой эластичной пены марок ВПП-1 (совместно с ИВС РАН) и ВПП-1с на основе полиимидов, выпущены опытно-экспериментальные партии материалов и проведены исследования их свойств.

Жесткий листовой пеноакрилимид марки ВПП-5 представляет собой продукт вспенивания и отверждения форполимера. Разработанный жесткий пенопласт марки ВПП-5 рекомендован для применения в качестве радиопрозрачного, тепло- и звукоизолирующего заполнителя в слабо- и средненагруженных плоских конструкциях, а также в конструкциях одинарной и двойной кривизны.

Мягкая эластичная пена – полиимид трудносгорающий эластичный марок ВПП-1 и ВПП-1с – продукт вспенивания полиимидного форполимера.

Разработанная мягкая эластичная пена обладает способностью восстановления после сжатия и может быть использована (чистая или облицованная пленкой) в качестве теплоизолирующего материала пневмо-, масло- и гидротрубопроводов с рабочей температурой до 200°C.

Исследования свойств разработанных пеноматериалов показали, что по своим характеристикам они находятся на уровне зарубежных аналогов.

Оценку влияния масштабного фактора на уровень свойств модельного пеноакрилимидового листового марки ВПП-5 проводили на модельных блоках толщиной 50 мм и площадью 300×500; 500×1000 и 800×1600 мм.

Результаты исследований по влиянию масштабного фактора (габаритов блоков модельного пенополиакрилимиды) на значения кажущейся плотности и прочностных характеристик приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Влияние масштабного фактора на физико-механические свойства модельного листового пеноакрилимиды марки ВПП-5 (размер блока 300×500×50 мм)

Условный номер участка испытаний	Прочность при сжатии*, МПа	Модуль упругости при сжатии*, МПа	Кажущаяся плотность, кг/м ³
1	<u>0,73–0,85</u> 0,78	<u>14,2–16,4</u> 15,8	51,5–52,5
2	<u>0,69–0,78</u> 0,72	<u>12,9–15,5</u> 14,0	50,0–51,0
3	<u>0,75–0,89</u> 0,81	<u>14,5–16,9</u> 16,0	51,0–52,0

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Из полученных результатов видно, что у образцов, вырезанных из блока пеноакрилимиды габаритом 300×500×50 мм, разброс значений кажущейся плотности незначительный – от 50,0 до 52,5 кг/м³, коэффициент вариации составляет 1,7%. Разброс значений прочности при сжатии составил от 0,69 до 0,89 МПа и коэффициент вариации равен 7,4%.

Таблица 2

Влияние масштабного фактора на физико-механические свойства модельного листового пеноакрилимиды марки ВПП-5 (размер блока 500×1000×50 мм)

Условный номер участка испытаний	Прочность при сжатии*, МПа	Модуль упругости при сжатии*, МПа	Кажущаяся плотность, кг/м ³
1	<u>0,79–0,89</u> 0,83	<u>15,0–16,8</u> 16,0	54,0–56,0
2	<u>0,75–0,88</u> 0,80	<u>15,2–16,7</u> 16,2	52,0–54,5
3	<u>0,70–0,81</u> 0,76	<u>13,9–16,0</u> 15,5	49,5–54,0
4	<u>0,74–0,84</u> 0,77	<u>14,4–16,0</u> 15,6	52,5–55,5
5	<u>0,77–0,89</u> 0,82	<u>15,4–16,7</u> 16,0	54,0–56,5

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Из данных табл. 2 видно, что у образцов, вырезанных из блока пеноакрилимиды габаритом 500×1000×50 мм, разброс значений кажущейся плотности увеличивается и составляет от 49,5 до 56,5 кг/м³, коэффициент вариации равен 4,1%. Разброс значений прочности при сжатии составил от 0,70 до 0,89 МПа, коэффициент вариации равен 8,1%.

В табл. 3 приведены результаты исследований по влиянию масштабного фактора на физико-механические свойства крупногабаритного модельного пеноакрилимиды (размер блока 800×1600×50 мм).

Влияние масштабного фактора на физико-механические свойства модельного листового пеноакрилимиды марки ВПП-5 (размер блока 800×1600×50 мм)

Условный номер участка испытаний	Прочность при сжатии*, МПа	Модуль упругости при сжатии*, МПа	Кажущаяся плотность, кг/м ³
1	<u>0,78–0,86</u> 0,82	<u>15,3–16,2</u> 15,8	52,0–57,0
2	<u>0,78–0,84</u> 0,81	<u>14,8–16,3</u> 16,0	51,5–56,0
3	<u>0,75–0,83</u> 0,78	<u>14,8–16,2</u> 15,7	49,0–53,0
4	<u>0,75–0,82</u> 0,76	<u>14,0–16,1</u> 15,7	50,0–54,0
5	<u>0,79–0,90</u> 0,85	<u>15,8–17,0</u> 16,0	52,0–56,0
6	<u>0,80–0,92</u> 0,87	<u>15,5–17,2</u> 16,2	53,5–57,0

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Из данных табл. 3 видно, что с повышением размера блока до 800×1600×50 мм, увеличивается количество образцов и увеличивается разброс значений кажущейся плотности – от 49,0 до 57,0 кг/м³, коэффициент вариации составляет 4,9%. Разброс значений прочности при сжатии составил от 0,75 до 0,92 МПа, коэффициент вариации равен 8,3%.

На рис. 2 и в табл. 4 приведены результаты по влиянию масштабного фактора на коэффициент вариации значений прочности при сжатии и кажущейся плотности. Видно, что разброс значений кажущейся плотности и прочности при сжатии исследуемых блоков модельного листового пеноакрилимиды марки ВПП-5 увеличивается с увеличением размеров блока, но разброс значений незначительный.

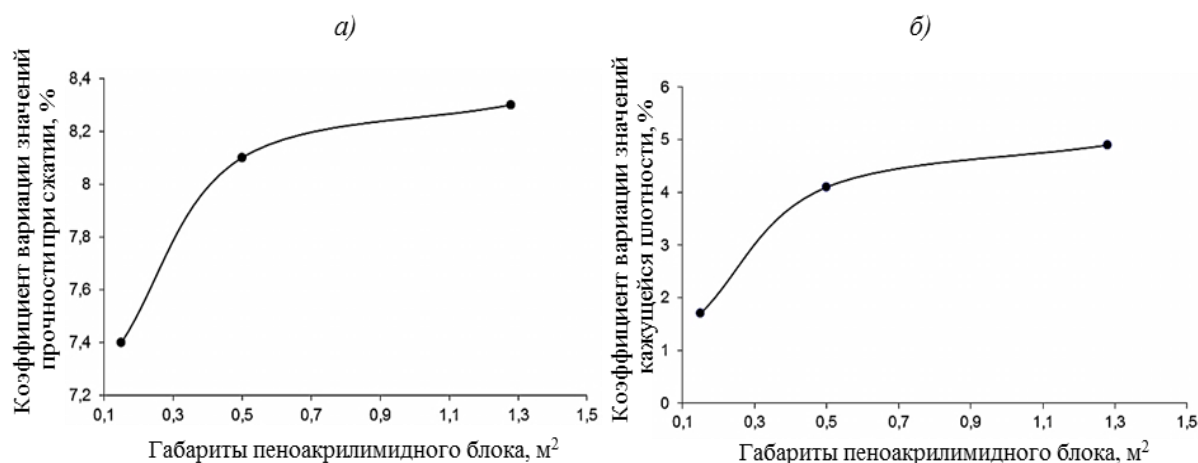


Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации значений прочности при сжатии (а) и кажущейся плотности (б) от габаритов пеноакрилимидного блока

Таблица 4

Влияние масштабного фактора на коэффициент вариации значений прочности при сжатии и кажущейся плотности модельного листового пеноакрилимиды марки ВПП-5

Размер пеноблока, мм	Разброс значений прочности при сжатии, МПа	Коэффициент вариации для значений прочности при сжатии, %	Разброс значений кажущейся плотности, кг/м ³	Коэффициент вариации для значений кажущейся плотности, %
300×500×50	От 0,69 до 0,89	7,4	От 50,0 до 52,5	1,7
500×1000×50	От 0,70 до 0,89	8,1	От 52,0 до 56,5	4,1
800×1600×50	От 0,75 до 0,92	8,3	От 49,0 до 57,0	4,9

Исследования показали, что все значения коэффициента вариации <10%, т. е. степень рассеивания данных незначительна. Однако при сравнении полученных данных относительно друг друга видно, что при меньшем габарите блока коэффициент вариации значений кажущейся плотности ниже, при большем – выше. По величине прочности при сжатии коэффициент вариации отличается незначительно.

Заключения

Проведена оценка влияния масштабного фактора на уровень свойств модельного пеноакрилимиды толщиной 50 мм и площадью 300×500; 500×1000 и 800×1600 мм.

В результате исследований установлено, что при меньшем габарите пеноблока (300×500×50 мм) разброс значений кажущейся плотности незначительный – от 50,0 до 52,5 кг/м³.

С увеличением размеров блока разброс значений увеличивается: на модельном пеноакрилимиде размером 800×1600×50 мм значения кажущейся плотности варьируются от 49,0 до 57,0 кг/м³.

Исследования показали, что плотность в середине блока ниже, чем плотность блока по периметру, что обусловлено образованием «корки» по краям пеноакрилимиды при вспенивании.

Величина прочности при сжатии пеноблока зависит от его плотности: чем выше плотность, тем больше прочностные свойства, т. е. тем большие усилия нужно приложить для разрыва связей между молекулами.

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующий вывод: начиная с размеров пеноблока ~0,5 м² коэффициент вариации изменяется незначительно, что позволяет использовать результаты испытаний блоков габаритами 0,5–1 м² для прогнозирования свойств блоков большего размера. При этом будет сохраняться общая тенденция к незначительному росту коэффициента вариации с увеличением размера блока. Оценочное значение прироста коэффициента вариации – порядка 0,5% на 1 м² пеноблока.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику ФГУП «ВИАМ» Ю.А. Сапего за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столянков Ю.В., Румянцева Т.В. Пенополиимиды // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.

2. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
4. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018).
5. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 16–18.
6. Бейдер Э.Я., Гуреева Е.В., Петрова Г.Н. Пенополиимиды // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №6. С. 2–8.
7. Полиимидные композиционные материалы: структура, свойства, технологии / под общ. ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 512 с.
8. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Платонов М.М. Полимерная композиционная звукопоглощающая панель // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №5 (53). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-7-7.
9. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Петрова А.П. Полимерный звукопоглощающий материал-конструкция для снижения шума на местности авиационных двигателей // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №2 (62). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-6-6.
10. Шашкеев К.А., Шульдешов Е.М., Попков О.В., Краев И.Д., Юрков Г.Ю. Пористые звукопоглощающие материалы (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №6 (42). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6.
11. ПМИ – пены с исключительными характеристиками // *Пластикс*. 2007. №10. С. 1–2.
12. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 623 с.
13. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
14. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
15. Грязнов В.И., Петрова Г.Н., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Смесевые термоэластопласты со специальными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 25–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-25-29.
16. Кравченко Т.П., Ермаков С.Н., Кербер М.Л., Костягина В.А. Научно-технические проблемы получения композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // *Пластические массы*. №10. 2010. С. 32–34
17. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
18. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2005. 240 с.
19. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литые термопласты для изделий авиационной техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №6. С. 10–15.
20. Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В., Сапего Ю.А. Эффективность повышения качества изделий из поликарбоната термообработкой // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6.
21. Тростянская Е.Б., Степанова М.И., Рассохин Г.И. Теплостойкие линейные полимеры. Ростов н/Д: РГАСХМ, 2002. С. 3–22.
22. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н., Румянцева Т.В. Пожаробезопасные литые термопласты и термоэластопласты // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018).

23. Берлин А.А., Шутков Ф.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров. М.: Наука, 1980. 504 с.
24. Парахин И.В., Туманов А.С. Фенолокаучуковый пенопласт повышенной пластичности // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4. С. 65–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-65-67.
25. Парахин И.В., Туманов А.С. Фенольно-каучуковый пенопласт марки ВРП-4 // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 42–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-42-46.
26. Клемпнер Д., Седжаревич В. Полимерные пены и технологии вспенивания. СПб.: Профессия, 2009. 604 с.
27. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р. Перспективные пути создания новых термостойких материалов на основе полиимидов // *Труды БГТУ*. 2013. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнологии. С. 145–149.
28. Доброхотова М.Л. и др. Полиимиды: справочник по пластическим массам. М: Химия, 1969. С. 317–325.
29. Корниенко П.В., Горелов Ю.П., Ширшин К.В. Получение и свойства вспененных материалов на основе сополимеров акрилонитрила и метакриловой кислоты // *Журнал прикладной химии*. 2013. Т. 86. №1. С. 96–100.
30. Корниенко П.В., Горелов Ю.П., Ширшин К.В. Получение конструкционных пенополиметакрилимидов на основе сшитых сополимеров акрилонитрила и метакриловой кислоты // *Журнал прикладной химии*. 2012. Т. 85. №11. С. 1842–1846.
31. Корниенко П.В., Ширшин К.В. и др. Получение вспененных полиимидных материалов на основе акрилонитрила и метакриловой кислоты // *Пластические массы*. 2013. №6. С. 4–17.
32. Сорокин А.Е., Платонов М.М., Малышенко С.В. Особенности вспенивания полиимидных смол при пониженном давлении // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-7-7.
33. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Полиимидный стеклотекстолит с пониженной температурой отверждения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №2. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-8-8.
34. Yontz D.J., Hsu S.L. A Mass Spectrometry Analysis of Hard Segment Length Distribution in Polyurethanes // *Macromolecules*. 2000. Vol. 33. P. 8415–8420.
35. Velankar S., Cooper S.L. Microphase Separation and Rheological Properties of Polyurethane Melts. 3. Effect of Block Incompatibility on the Viscoelastic Properties // *Ibid*. I. 395–403.
36. Артемьева В.Н., Кудрявцев В.В. и др. Эластичные пеноматериалы на основе полиимидов // *Пластические массы*. 1990. №4. С. 32–34.
37. Manzer L.E. North American Catalysis Society, Toronto // *Chem. and Eng. News*. 200m. September 03. P. 39.
38. Артемьева В.Н., Кудрявцев В.В. Об особенностях механизма получения полиимидов при термической имидизации различных форполимеров // *Журнал прикладной химии*. 2000. Т. 73. №4. С. 639–647.
39. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10/18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
40. Столянков Ю.В., Бейдер Э.Я., Платонов М.М., Петрова Г.Н. Устройство для механической обработки вспененных полимерных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №5. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-8-8.