

DOI:10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Основан в 1833 г.

2

2022



УДК 62-784.43

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ БУМАГ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Н.А. Криницин¹, аспирант; *ResearcherID: AAX-7163-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2185-2734>

В.К. Дубовый¹, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: W-1235-2017*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

К.В. Полякова², химик группы производственного контроля;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2332-6260>

И.Н. Ковернинский³, д-р техн. наук, проф.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-6790>

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

e-mail: krinnikita@yandex.ru, dubovy2004@mail.ru

²Фармацевтическая компания АО «Фармасинтез-Норд», ул. Дорога в Каменку, д. 74, Санкт-Петербург, Россия, 194356

³ИП «Ковернинский И.Н.», ул. Дубнинская, д. 40 а, корп. 1, кв. 11, Москва, Россия, 127591; e-mail: kovern@list.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 15.10.20 / Принята к печати 20.01.21

Аннотация. На данный момент существует большое количество материалов для фильтрации воздуха. Однако есть необходимость разработки новых более эффективных и экономически выгодных материалов. Многочисленные исследования показали, что в целях получения высокоэффективного фильтровального материала для тонкой очистки воздуха от частиц размером 0,1...0,5 мкм в композицию необходимо вводить ультра- и микротонкие стеклянные волокна. Стеклянные волокна характеризуются целым комплексом уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкостью, высокими удельной поверхностью, фильтрующей способностью и прочностью, устойчивостью к действию агрессивных сред. При этом стеклянные волокна в отличие от волокон растительного происхождения не обладают способностью к фибриллированию, набуханию и связеобразованию. Таким образом, для получения прочного фильтровального материала требуется связующее, которое обеспечило бы необходимую технологическую прочность с сохранением заданных фильтрующих характеристик. Проведено исследование композиционного материала на основе минерального волокна, в качестве связующих использованы полиядерные комплексы алюминия, термомеханическая масса, поливинилацетат и полиэтилен. Основными показателями выбраны предел прочности при растяжении, капиллярная впитываемость, сопротивление потоку воздуха и коэффициент проницаемости. Новизна работы заключается в применении как связующих в композиционном материале на основе стеклянных волокон термомеханической массы и полиэтилена. Добавление связующего на основе термомеханической массы в композицию целесообразно в количестве 5...30 % от массы волокна, для полиэтилена этот

диапазон составляет 2...10 %. Композиционный материал, в который в качестве связующего добавлен полиэтилен, обладает достаточной технологической прочностью, низкими коэффициентом проницаемости и сопротивлением потоку воздуха. Применение полиэтилена как связующего в предназначенных для очистки воздуха композиционных фильтровальных материалах на основе стеклянных волокон является перспективным.

Для цитирования: Криницин Н.А., Дубовый В.К., Полякова К.В., Ковернинский И.Н. Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолокнистых бумаг для очистки воздуха // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

Ключевые слова: стекловолокно, фильтровальные материалы, очистка воздуха, капиллярная впитываемость, прочность при растяжении, сопротивление потоку воздуха, коэффициент проницаемости, полиэтилен, термомеханическая масса, поливинилацетат, связующий материал.

STUDY OF THE INFLUENCE OF BINDER TYPE ON THE PROPERTIES OF GLASS FIBER FILTER PAPER FOR AIR PURIFICATION

Nikita A. Krinitsin¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAX-7163-2021](#).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2185-2734>

Vladimir K. Dubovy¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [W-1235-2017](#).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Kseniya V. Polyakova², Production Control Chemist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2332-6260>

Ivan N. Koverninsky³, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-6790>

¹Sankt-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: krinnikita@yandex.ru, dubovy2004@mail.ru

²Pharmaceutical Company AO “Pharmasyntez-Nord”, ul. Doroga v Kamenku, 74, Saint Petersburg, 194356, Russian Federation

³IP “Koverninsky I.N.”, ul. Dubninskaya, 40 a, korp. 1, kv. 11, Moscow, 127591, Russian Federation; e-mail: kovern@list.ru

Original article / Received on October 15, 2020 / Accepted on January 20, 2021

Abstract. At the moment, there is a wide variety of materials for air filtration, however, it is necessary to develop new, more efficient and cost-effective materials. Numerous studies have shown that in order to obtain a highly effective filter material for fine air purification from particles of 0.1–0.5 μm , ultrafine and microfine glass fibers should be introduced into the composition. Glass fibers have a whole complex of unique properties: thermal, chemical and biological resistance, high specific surface area, filtering ability, strength and resistance to aggressive media. At the same time, glass fibers, unlike fibers of plant origin, do not have the ability to fibrillate, swell and bond formation. Therefore, a strong filter material requires a binder that provides the necessary technological strength while maintaining the specified filtering characteristics. The study of composite material based on mineral fiber was carried out, polyadherical complexes of aluminum, thermomechanical pulp (TMP), polyvinyl acetate (PVA) and polyethylene (PE) were used as binders. The main indicators are the tensile strength, capillary absorption, resistance to air flow and permeability coefficient. The novelty of this work lies in the application of TMP and PE as binders in the composite material based

on glass fibers. The addition of a binder based on TMP to the composition is advisable in the range of 5–30 % of the fiber mass, for PE this range is 2–10 %. The studied composite material with the addition of PE as a binder has sufficient technological strength, a low coefficient of permeability and resistance to air flow. PE can be used as a promising binder for composite filter materials based on glass fibers for air purification.

For citation: Krinitzin N.A., Dubovy V.K., Polyakova K.V., Koverninsky I.N. Study of the Influence of Binder Type on the Properties of Glass Fiber Filter Paper for Air Purification. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

Keywords: glass fiber, filter materials, air purification, capillary absorbency, tensile strength, airflow resistance, permeability coefficient, polyethylene, thermomechanical mass, polyvinyl acetate, binding material.

Введение

Существует большое количество материалов, предназначенных для фильтрации воздуха. Однако поиск и разработка новых более эффективных и экономически выгодных материалов продолжают. Многочисленные исследования показали, что для получения высокоэффективного фильтровального материала, очищающего воздух от частиц размером 0,1...0,5 мкм, необходимо введение в композицию ультра- и микротонких стеклянных волокон [4, 5, 10, 25]. Стеклянные волокна имеют целый комплекс уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкость, высокие удельную поверхность, фильтрующую способность и прочность, устойчивость к действию агрессивных сред [2, 3, 14, 16]. При этом следует отметить, что стеклянные волокна в отличие от волокон растительного происхождения не способны к фибриллированию, набуханию и связеобразованию [11, 17].

Стеклянные волокна являются гидрофильными, их поверхность покрыта монослоем гидроксильных групп, обуславливающих гигроскопичность в пределах 7...20 %. Несмотря на относительно высокую удельную поверхность и наличие гидроксильных групп, силы межволоконного взаимодействия в бумагоподобных материалах из стеклянных волокон крайне малы, из-за чего и прочность самого материала очень низкая. С этим связана необходимость введения связующих веществ в композицию фильтровального материала на основе стеклянных волокон [7, 9, 15, 20–24].

Использование неорганических связующих обеспечивает устойчивость фильтровальных материалов при высоких температурах (до 700 °С). Органические связующие в зависимости от химического состава дают возможность фильтровать воздушные среды при нормальных температурах. В качестве органических связующих были выбраны поливинилацетатная дисперсия и мелкодиспергированный водный раствор полиэтилена, обладающие хорошей адгезией к стеклянным волокнам. Водные дисперсии этих компонентов позволяют применять их по бумажной технологии. Также в качестве органического связующего используют волокна растительного сырья, т. к. они способны к связеобразованию и дают возможность создания взаимопроникающей сетчатой структуры «стеклянное волокно – растительное волокно». В качестве растительного волокнистого полуфабриката взята термомеханическая масса (ТММ) [6, 8]; неорганического связующего – сульфат алюминия как традиционный

химикат целлюлозно-бумажной промышленности. Полиядерные комплексы алюминия обладают высокой связеобразующей способностью по отношению к стеклянным волокнам и достаточно хорошими сорбционными характеристиками [12, 13, 18, 19].

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны три марки стекловолокна: М20-МТВ-0,25 (ТУ 6-19-062-63–87) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,25 мкм; М20-МТВ-0,40 (ТУ 6-11-483–79) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,40 мкм; М20-УТВ-0,60 (ТУ 6-11-389–76) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,60 мкм.

Взяты четыре вида связующих: сульфат алюминия – ч.д.а, ГОСТ 3758–75; термомеханическая масса – волокно производства АО «Волга», средняя длина волокна – 1,37 мм, разрывная длина – 4500 м, белизна – 64 %; полиэтилен (ПЭ) – водная дисперсия, экспериментальный образец; поливинилацетат (ПВА) – дисперсия, марка Д51С, ГОСТ 18992–80.

Исследование физико-механических показателей композиционных материалов и подготовка к нему выполнены с применением аппаратов, приборов и методик, описанных в источнике [1].

Лабораторные образцы стекловолокнистой бумаги листовой формы изготавливали из стекловолокна с добавками связующего в заданных соотношениях. Исследования проводили на образцах массой 80 г/м².

Для получения образцов стекловолокнистую суспензию готовили с учетом свойств стеклянного волокна – большой длины и хрупкости. Роспуск минерального волокна производили в воде на быстроходной мешалке при скорости 800 об./мин. Время диспергирования определено экспериментально – 8 мин. Концентрация массы составила 0,3 %. Образцы с упрочняющими агентами получали добавлением к суспензии волокна предварительно рассчитанного количества связующего.

Подготовленную композицию для равномерного распределения всех компонентов в массе перемешивали в течение 5 мин. Лабораторные образцы изготавливали на листоотливном аппарате Rapid-Kothen. Волокнистую массу разбавляли в формующей колбе до 8 л. Полученный образец помещали в сушильную камеру аппарата Rapid-Kothen и сушили до постоянной массы 1 м².

Образцы кондиционировали (по ГОСТ 13523–78) и устанавливали их толщину (по ГОСТ 27015–86). С ее учетом пересчитывали в мегапаскали разрывное усилие образцов, измеренное в ньютонах на вертикальной разрывной машине Hounsfield (ГОСТ ИСО 1924-1–96). Предел прочности при растяжении (технологическая прочность) вычисляли в мегапаскалях с учетом массы 1 м² образцов.

Сопротивление образцов потоку воздуха (перепад давления) и коэффициент проницаемости определяли согласно ГОСТ Р ЕН 1822-3–2012 и ГОСТ Р ЕН 1822-5–2014 на фильтр-тестере 3160-TSI. Капиллярную впитываемость устанавливали методом Клемма (ГОСТ 12602–93), массу 1 м² – по ГОСТ 13199–88. Классификация фильтров приведена согласно ГОСТ Р ЕН 779–2007.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе изучали влияние дисперсии ПВА на прочностные и фильтрующие характеристики стекловолоконистых бумаг. На втором рассматривали свойства стекловолоконистых бумаг, в качестве связующего в которых был использован мелкодисперсный водный раствор ПЭ. На третьем этапе определяли влияние ТММ и сульфата алюминия на показатели качества стекловолоконистых бумаг.

Первый этап. В качестве связующего использовали ПВА марки Д51С. ПВА обладает хорошей адгезионной способностью по отношению к стеклянным волокнам, поэтому применение его в качестве связующего должно привести к увеличению прочности получаемого продукта. На рис. 1 представлены результаты исследований влияния расхода ПВА на предел прочности при растяжении у стекловолоконистых бумаг.

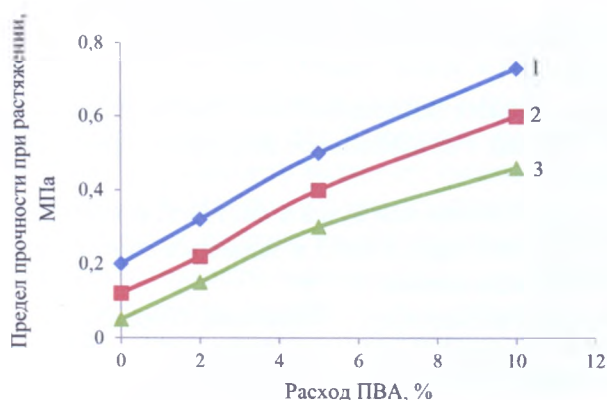


Рис. 1. Влияние расхода ПВА на предел прочности при растяжении для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 1. Influence of PVA consumption on tensile strength for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Результаты свидетельствуют о том, что с ростом расхода связующего предел прочности при растяжении увеличивается, а диаметр волокна уменьшается. Прочность достигает максимальных значений при расходе 10 % ПВА: для УТВ-0,60 – 0,46 МПа, для МТВ-0,40 – 0,60 МПа, для МТВ-0,25 – 0,73 МПа.

Для максимальных значений прочности при расходе связующего 10 % была исследована по Клемму капиллярная впитываемость образцов стекловолоконистой бумаги (рис. 2).

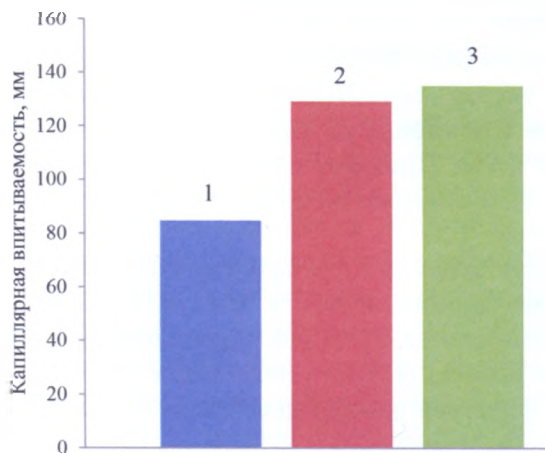


Рис. 2. Капиллярная впитываемость при расходе ПВА 10 % для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 2. Capillary absorbency at PVA consumption of 10 % for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

С увеличением диаметра волокна капиллярная впитываемость возрастает и достигает максимума для марки волокна УТВ-0,60 135 мм за 10 мин. При этом с увеличением диаметра волокна от 0,25 мкм до 0,40 мкм она растет существенно – от 85 мм до 129 мм, а при увеличении диаметра волокна от 0,40 мкм до 0,60 мкм прирост составляет всего 6 мм.

Представленные на рис. 1 и 2 данные позволяют сделать вывод о достаточной технологической прочности и развитой капиллярно-пористой структуре полученных образцов фильтровальной бумаги.

У фильтровальных материалов для очистки воздуха определяющими являются два показателя: коэффициент проницаемости (обратная величина эффективности очистки) и сопротивление потоку воздуха. Результаты исследований влияния расхода связующего ПВА на эти показатели представлены в табл. 1 и на рис. 3.

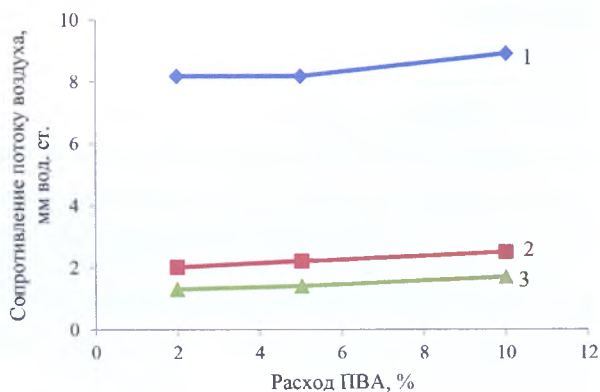
Таблица 1

Влияние расхода ПВА на коэффициент проницаемости

Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
	МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
2	0,02	0,5	4,2
5	0,05	0,7	4,5
10	0,10	0,9	4,7

Рис. 3. Влияние расхода ПВА на сопротивление потоку воздуха для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 3. Influence of PVA consumption on air flow resistance for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60



Полученные результаты говорят о том, что с увеличением расхода связующего коэффициент проницаемости и сопротивление потоку воздуха изменяются незначительно. С уменьшением диаметра волокна сопротивление потоку воздуха увеличивается, а коэффициент проницаемости снижается. Это объясняется ростом плотности капиллярно-пористой структуры из-за уменьшения диаметра волокна.

Можно сделать вывод, что полученные образцы бумаги с расходом связующего 10 % применимы в качестве очищающих воздух фильтровальных материалов класса очистки ЕРА Е11 и ЕРА Е12, которые характеризуются коэффициентом проницаемости 5 и 0,5 % соответственно, сопротивлением потоку воздуха не более 10 мм вод. ст. и технологической прочностью не менее 0,4 МПа.

Второй этап. Влияние дисперсии ПЭ на образцы бумаги из стекловолокон оценивали по следующим показателям: прочности образцов, капиллярной

впитываемости, сопротивлению потоку воздуха и коэффициенту проницаемости. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода связующего представлена на рис. 4.

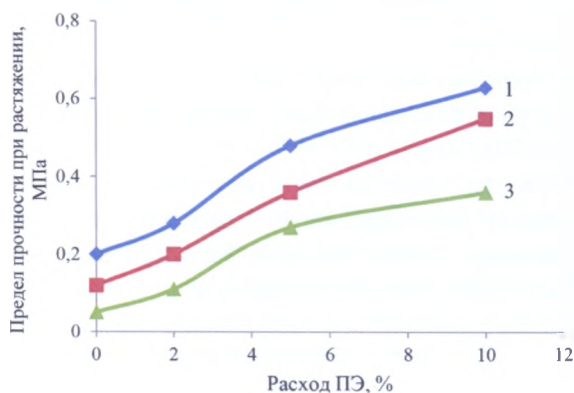


Рис. 4. Влияние расхода ПЭ на предел прочности при растяжении для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 4. Influence of PE consumption on tensile strength for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Как видно из рис. 4, с увеличением расхода ПЭ предел прочности при растяжении растет, что сопровождается уменьшением диаметра волокна, и достигает максимальных значений при расходе 10 % ПЭ: для УТВ-0,60 – 0,36 МПа, для МТВ-0,40 – 0,55 МПа, для МТВ-0,25 – 0,63 МПа.

На рис. 5 представлены результаты исследования влияния расхода водной дисперсии ПЭ на капиллярную впитываемость образцов стекловолнистой бумаги. С увеличением расхода связующего капиллярная впитываемость образцов изменяется незначительно. При этом с ростом диаметра волокна капиллярная впитываемость повышается. При расходе связующего 10 % она составляет для УТВ-0,60 – 186 мм, для МТВ-0,40 – 163 мм, для МТВ-0,25 – 118 мм. Характер полученных зависимостей можно объяснить особенностями капиллярно-пористой структуры образцов бумаги.

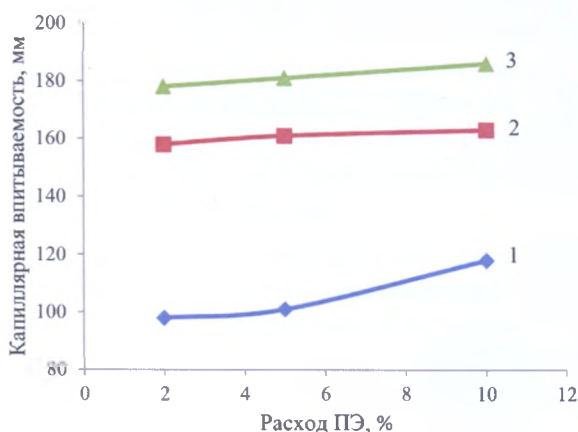


Рис. 5. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода ПЭ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 5. Dependence of capillary absorbcency on PE consumption for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Данные о влиянии расхода связующего на коэффициент проницаемости и сопротивление потоку воздуха представлены в табл. 2 и на рис. 6 соответственно. С увеличением расхода связующего коэффициент проницаемости уменьшается. Если сравнить показатели по диаметрам волокон, то можно сделать вывод, что показатели существенно снижаются. Так, при расходе ПЭ 10 % коэффициент проницаемости для УТВ-0,60 составляет 1,2 %, для МТВ-0,40 – 0,02 %, для МТВ-0,25 – 0,0004 %. Сопротивление

потоку воздуха с увеличением расхода связующего увеличивается незначительно. Это объясняется формированием полиэтиленового пленочного покрытия при конечной сушке и более плотной структурой материала, образующейся с уменьшением диаметра волокна. Данные два фактора способствуют увеличению сопротивления потоку воздуха.

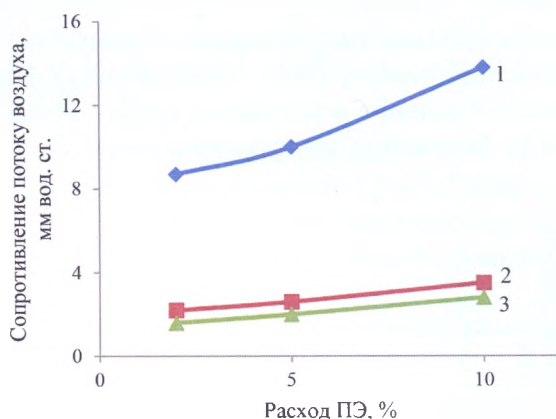
Таблица 2

Зависимость коэффициента проницаемости от расхода ПЭ

Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
	МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
2	0,0006	0,06	1,8
5	0,0005	0,04	1,5
10	0,0004	0,02	1,2

Рис. 6. Зависимость сопротивления потоку воздуха от расхода ПЭ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 6. Dependence of air flow resistance on PE consumption for fiber: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,600

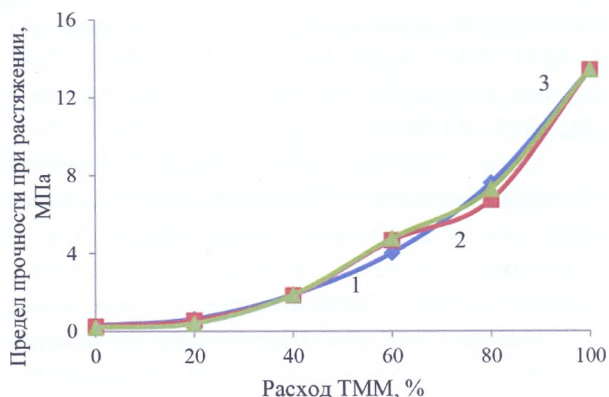


Фильтровальные материалы, получаемые при расходе связующего 5 и 10 % и при использовании в композиции волокон МТВ-0,25 и МТВ-0,40, могут быть применены для сверхвысокой очистки классов ULPA U15, HEPA H13.

Третий этап. Для изучения влияния волокон растительного происхождения на качество материала для фильтрации воздуха как связующее была использована ТММ. Исследовано влияние расхода ТММ на предел прочности при растяжении. Результаты показаны на рис. 7.

Рис. 7. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода ТММ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 7. Dependence of tensile strength on TMP consumption for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60



С увеличением расхода ТММ до 40 % предел прочности образцов бумаги независимо от диаметра волокна изменяется одинаково: возрастает от 0,2...0,3 до 1,8...1,9 МПа. При дальнейшем увеличении расхода связующего предел прочности возрастает резко. Так, при 60 % он составляет 4,0...4,7 МПа, а при 80 % – 6,7...7,6 МПа в зависимости от диаметра волокна. То есть ТММ является высокоэффективным связующим для стеклянных волокон различных диаметров, что объясняется наличием на поверхности волокон большого количества гидроксильных групп, способных образовывать водородные связи, которые становятся определяющими видами связей при формировании прочности бумаги.

Использование в качестве связующего сульфата алюминия, а именно полиядерных комплексов алюминия, которые образуются в результате гидролиза солей алюминия при активном регулировании pH среды, также дает большое увеличение гидроксильных групп, способствующих образованию водородных связей, а следовательно, и прочности образцов бумаги. Применение сульфата алюминия как неорганического связующего позволяет повысить барьерные свойства (термо-, хемо-, биостойкость) фильтровальных материалов при их использовании в агрессивных средах. Расход связующего варьировали от 5 до 30 %. Результаты представлены на рис. 8.

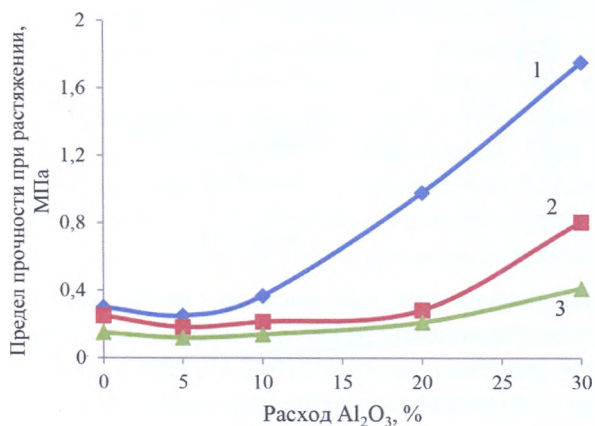


Рис. 8. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода Al_2O_3 для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 8. Dependence of tensile strength on Al_2O_3 consumption for fiber: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

С увеличением расхода связующего до 20 % для волокон МТВ-0,40 и УТВ-0,60 и до 10 % для волокон МТВ-0,25 прочность не изменяется. При дальнейшем росте расхода связующего для волокон МТВ-0,40 и УТВ-0,60 предел прочности при растяжении увеличивается и составляет при расходе 30 % для МТВ-0,40 – 0,807 МПа, для УТВ-0,60 – 0,413 МПа. Для волокон МТВ-0,25 с ростом расхода от 10 до 30 % предел прочности значительно возрастает – от 0,369 до 1,753 МПа.

Также в рамках третьего этапа были проведены исследования сочетания в составе связующего ТММ и сульфата алюминия в композиции бумаги в зависимости от диаметра волокна. В качестве исследуемых композиций взяты следующие сочетания: 10 % сульфата алюминия и 50 % ТММ, 20 % сульфата алюминия и 40 % ТММ. Результаты представлены на рис. 9.

Использование в композиции сочетания связующих ТММ и сульфата алюминия существенно увеличивает прочность образцов. Так, при расходе ТММ 40 % прочность составляет порядка 1,8 МПа, а при 50 % ТММ – 3 МПа.

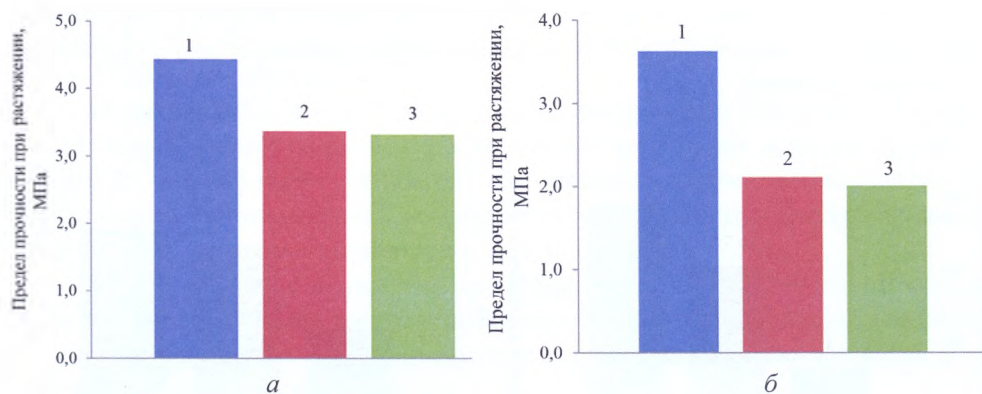


Рис. 9. Зависимость предела прочности от расхода смесей 40 % ТММ + 20 % $Al_2(SO_4)_3$ (а) и 50 % ТММ + 10 % $Al_2(SO_4)_3$ (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 9. Dependence of tensile strength on consumption of a mixture of 40 % TMP + 20 % $Al_2(SO_4)_3$ (a) and 50 % TMP + 10 % $Al_2(SO_4)_3$ (b) for fibers: 1 – MTB-0,25; 2 – MTB-0,40; 3 – УТВ-0,60

При расходе ТММ 40 и 50 % в сочетании с сульфатом алюминия 20 и 10 % соответственно для волокон МТВ-0,25 прочность составляет 4,4 и 3,6 МПа соответственно. Таким образом, сульфат алюминия проявляет синергизм по отношению к ТММ как связующему и в целом способствует увеличению прочности фильтровального материала.

Для оценки капиллярно-пористой структуры исследовано влияние расхода ТММ на капиллярную впитываемость (рис.10, а).

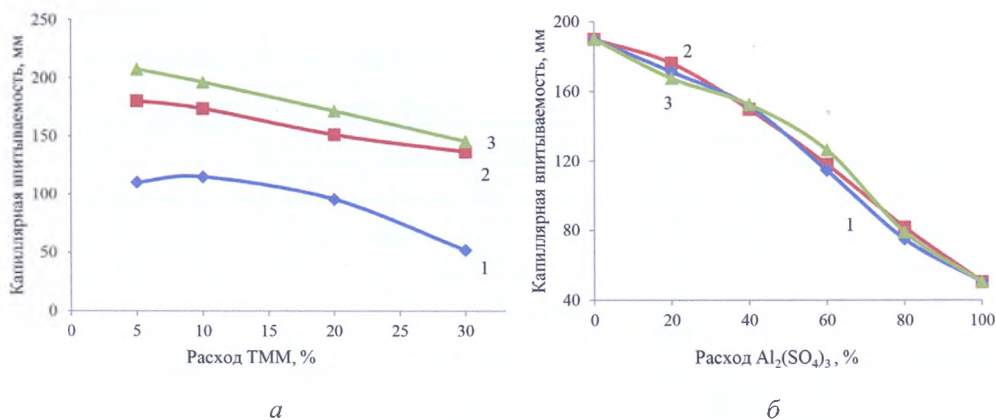


Рис. 10. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода ТММ (а) и $Al_2(SO_4)_3$ (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 10. Dependence of capillary absorbency on consumption of TMP (a) and $Al_2(SO_4)_3$ (b) for fibers: 1 – MTB-0,25; 2 – MTB-0,40; 3 – УТВ-0,60

На рис. 10, б и 11 видно, что с увеличением расхода связующего капиллярная впитываемость существенно снижается. Это свидетельствует об образовании более плотной структуры бумаги. С увеличением расхода сульфата алюминия капиллярная впитываемость уменьшается и при расходе 30 % составляет

для МТВ-0,25 – 52 мм, для МТВ-0,40 – 136 мм, для УТВ-0,60 – 146 мм. Для композиции связующих ТММ + сульфат алюминия она возрастает с увеличением диаметра волокна.

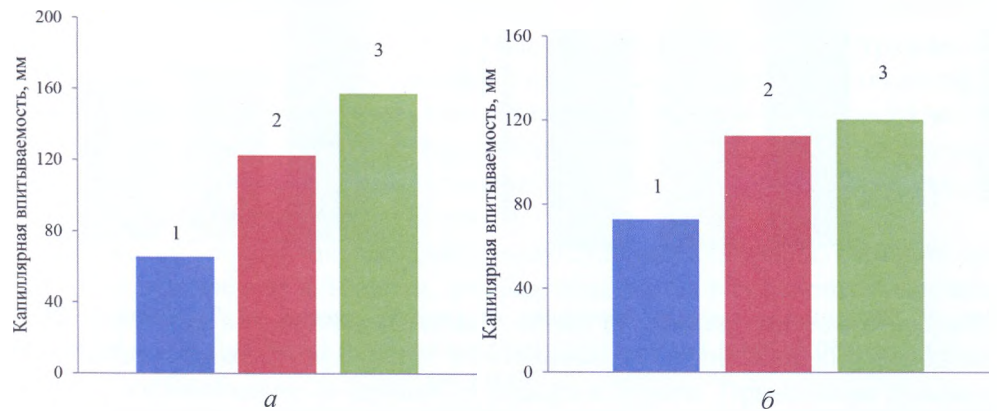


Рис. 11. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода смесей 40 % ТММ + 20 % $Al_2(SO_4)_3$ (а) и 50 % ТММ + 10 % $Al_2(SO_4)_3$ (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 11. Dependence of capillary absorbcency on consumption of a mixture of 40 % TMP + 20 % $Al_2(SO_4)_3$ (a) and 50 % TMP + 10 % $Al_2(SO_4)_3$ (b) for fibers: 1– МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Для композиций, в качестве связующих в которых использованы ТММ, сульфат алюминия и их сочетания, были проведены исследования по влиянию расхода связующего на коэффициент проницаемости. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние расхода и вида связующего на коэффициент проницаемости

Связующее	Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
		МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
ТММ	20	0,30	0,06	5,17
	40	0,01	0,43	6,33
	60	0,01	0,84	4,87
	80	0,01	1,17	4,47
	100	1,33		
Сульфат алюминия	5	2,30	3,20	5,01
	10	1,55	2,82	4,81
	20	1,35	1,62	4,13
	30	1,12	1,43	2,37
ТММ + сульфат алюминия	40 + 20 %	0,07	0,50	2,97
	50 + 10 %	0,05	0,40	1,33

С увеличением в композиции количества связующего ТММ до 60 % для волокон МТВ-0,25 коэффициент проницаемости уменьшается и составляет 0,01 %. В дальнейшем с увеличением расхода связующего коэффициент про-

ницаемости растёт. С увеличением в композиции количества связующего для волокон МТВ-0,40 коэффициент проницаемости становится больше, а для волокон УТВ-0,60 – меньше.

С увеличением в композиции количества сульфата алюминия коэффициент проницаемости уменьшается для волокон всех марок и возрастает в ряду МТВ-0,25 – МТВ-0,40 – УТВ-0,60. У смешанных композиций связующего коэффициент проницаемости возрастает с увеличением диаметра волокна и уменьшается с увеличением процентного содержания ТММ.

Представленные зависимости коэффициента проницаемости от расхода и вида связующего имеют достаточно сложный характер и обусловлены особенностями волокнистых полуфабрикатов и в целом капиллярно-пористой структурой фильтровальных материалов.

С увеличением в композиции количества связующего до 40 % для волокон МТВ-0,25, МТВ-0,40 и УТВ-0,60 сопротивление потоку воздуха уменьшается и составляет 8 мм вод. ст., 6 мм вод. ст. и 3 мм вод. ст. соответственно (табл. 4). В дальнейшем с увеличением расхода связующего сопротивление потоку воздуха растёт.

Таблица 4

Влияние расхода и вида связующих на сопротивление потоку воздуха

Связующее	Расход связующего, %	Сопротивление потоку воздуха, мм вод. ст.		
		МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
ТММ	20	11	26	27
	40	8	6	3
	60	23	17	8
	80	47	29	16
	100	66		
Сульфат алюминия	5	24	14	8
	10	42	35	19
	20	120	68	37
	30	182	103	51
ТММ + сульфат алюминия	40 + 20 %	194	39	21
	50 + 10 %	117	32	14

С увеличением содержания в композиции сульфата алюминия сопротивление потоку воздуха возрастает для волокон всех марок и в ряду УТВ-0,60 – МТВ-0,40 – МТВ-0,25. Для смешанных композиций связующего сопротивление потоку воздуха уменьшается с увеличением диаметра волокна и растёт с увеличением процентного содержания сульфата алюминия.

Выводы

1. С увеличением расхода связующего прочность при растяжении возрастает, фильтрующая способность сохраняется на требуемом уровне. С увеличением диаметра волокна предел прочности при растяжении снижается, фильтрующие характеристики ухудшаются.

2. Полученные образцы стекловолокнистой бумаги могут быть использованы в качестве фильтровальных материалов разных классов очистки.

3. Добавление в композицию термомеханической массы приводит к существенному увеличению прочности образцов, но при этом показатели капиллярной впитываемости снижаются.

4. Наилучшими характеристиками обладает композиция бумаги, в которой в качестве связующего использованы полиэтилен и волокна МТВ-0,25, МТВ-0,40: коэффициент проницаемости – 0,0004 и 0,02 %, сопротивление потоку воздуха – 14 и 4 мм вод. ст. соответственно. Полученный материал на основе стеклянных волокон можно применять как фильтрующий для очистки воздуха классов ULPA U15 и HEPA H13.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гурьев А.В., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона. СПб.: Политехн. ун-т, 2006. 229 с. Gur'yev A.V., Dubovyy V.K., Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Laboratory workshop on paper and cardboard technology*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2006. 229 p.

2. Загрязнение атмосферного воздуха: воздействие на здоровье // Всемирная организация здравоохранения. Режим доступа: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/ru/> (дата обращения: 29.01.21). Atmospheric Air Pollution: Health Effects. *World Health Organization*.

3. Значение чистого воздуха для человека // Вент-очистка. Режим доступа: <https://xn----8sbeinqmsj2ageld.xn--plai/news/znachenie-chistogo-vozdukha-dlya-cheloveka/> (дата обращения: 29.01.21). The Importance of Clean Air for Humans. *Vent-ochistka*.

4. Классификация воздушных фильтров для вентиляционных устройств: фильтры класса G, фильтры класса F, HEPA, ULPA // Brizex. Режим доступа: <https://xn--90aifdm6al.xn--plai/blog/klassifikacija-filtrov-dla-vent-ustroystv-g-f-h-u> (дата обращения: 18.02.21). Classification of Air Filters for Ventilation Devices: Class G Filters, Class F Filters, HEPA, ULPA. *Brizex*.

5. Конструктивные типы воздушных фильтров // Классификация воздушных фильтров. Режим доступа: <https://teplo-spb.ru/stati/kak-vybrat/klassifikatsiya-vozdushnykh-filtrov.html#5> (дата обращения: 18.02.21) Design Types of Air Filters. *Classification of Air Filters*.

6. Лантев В.Н. Производство древесной массы / СПбГТУП. СПб., 2009. 48 с. Laptev V.N. *Production of Wood Pulp*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2009. 48 p.

7. Оболенская А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с. Obolenskaya A.V. *Laboratory Work on the Chemistry of Wood and Cellulose*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p.

8. Пестова Н.Ф. Производство древесной массы. Сыктывкар, 2013. 101 с. Pestova N.F. *Production of Wood Pulp*. Syktyvkar, 2013. 101 p.

9. Свиридов Е.Б., Дубовый В.К. Книга о полимерах: свойства и применение, история и сегодняшний день материалов на основе высокомолекулярных соединений. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: САФУ, 2016. 392 с. Sviridov E.B., Dubovy V.K. *The Book about Polymers: Properties and Application, History and Present Day of Materials Based on High-Molecular Compounds*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 392 p.

10. Свиридов Е.Б., Щербак Н.В., Дубовой Е.В. Энергосберегающая экологически безопасная технология охлаждения воздуха аппаратами испарительного типа. СПб.: Политех. ун-т, 2017. 286 с. Sviridov E.B., Shcherbak N.V., Dubovoy E.V. *Energy-*

Saving Environmentally Safe Technology of Air Cooling by Evaporative Type Devices. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2017. 286 p.

11. Смирнова Е.Г., Лоцманова Е.М., Журавлева Н.М., Резник А.С., Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Минакова А.Н., Симонова Е.И., Сиваков В.П., Первова И.Г., Маслакова Т.И., Казаков Я.В., Севастьянова Ю.В., Коптяев В.В., Дернова Е.В., Канарский А.В., Дулькин Д.А., Щербак Н.В., Дубовый В.К. Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 252 с. Smirnova E.G., Lotsmanova E.M., Zhuravleva N.M., Reznik A.S., Vurasko A.V., Driker B.N., Minakova A.N., Simonova E.I., Sivakov V.P., Pervova I.G., Maslakova T.I., Kazakov Ya.V., Sevast'yanova Yu.V., Koptayayev V.V., Dernova E.V., Kanarskiy A.V., Dul'kin D.A., Shcherbak N.V., Dubovyy V.K. *Materials from Non-Traditional Types of Fibers: Production Technologies, Properties and Application Prospects*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 252 p.

12. Смолин А.С., Криницин Н.А., Суслов Г.А. Исследование прочности сорбционных композиционных материалов на основе микротонких стеклянных волокон // Химические волокна. 2018. № 5. С. 18. Smolin A.S., Krinitsin N.A., Suslov G.A. The Study of the Strength of Sorption Composite Materials Based on Microfine Glass Fibers. *Khimicheskije volokna* [Fibre Chemistry], 2018, no. 5, p. 18.

13. Смолин А.С., Щербак Н.В., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А. Оценка эффективности очистки воздуха минеральноволокнистыми сепараторными бумагами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 126–134. Smolin A.S., Shcherbak N.V., Lorengel M.A., Dubovoy E.V. Estimating Efficiency of Air Cleaning by Mineral Fiber Separator Papers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.126>

14. Стекловолокно: способ получения, свойства, применение // Helpiks.org. Режим доступа: <https://helpiks.org/8-90835.html> (дата обращения: 29.11.20). Glass Fiber: Method of production, Properties and Application. *Helpiks.org*.

15. Технологии производства базальтовых волокон // Basalt fiber & composite materials technology development. Режим доступа: <http://basaltm.com/tehnologii/technology-of-production-basalt-fiber.html> (дата обращения: 06.11.20). Basalt Fiber Production Technologies. *Basalt Fiber & Composite Materials: Technology Development*.

16. Типы стеклянных волокон // Sammas. Режим доступа: <http://sammas.ru/tehnologii-i-terminologiya/typy-steklyannykh-volokon.html> (дата обращения: 29.10.20). Types of Glass Fibers. *Sammas*.

17. Характеристика стекловолокна // АО «Новгородский завод стекловолокна». Режим доступа: <http://nzs.ru/products/m20mtv0-25/> (дата обращения: 10.03.21). Characteristics of Glass Fiber. АО "Novgorod Glass fiber Plant".

18. Чижов Г.И. Соединения алюминия в производстве бумаги: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1975. 320 с. Chizhov G.I. *Aluminum Compounds in Paper Production*: Dr. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1975. 320 p.

19. Щербак Н.В., Елукова Н.А. Влияние условий проведения испытания на прочность фильтровальной бумаги из стекловолокна // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2021. С. 389–392. Shcherbak N.V., Elukova N.A. Influence of Testing Conditions on the Strength of Glass Fiber Filter Paper. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 6th International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2021, pp. 389–392.

20. Щербак Н.В., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А., Смолин А.С. Моделирование композиции сепараторной бумаги из минерального и растительного сырья для повышения прочности и впитывающей способности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018.

№ 1. С. 120–129. Shcherbak N.V., Dubovoy E.V., Lorengel M.A., Smolin A.S. Simulation of Separator Paper Composition from Mineral and Vegetable Raw Material for Hardening and Absorbency. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.120>

21. Binetruy C., Michaud V. Emerging, Hybrid & Smart Composites. *Functional Composite Materials*, 2021, vol. 2, art. 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42252-021-00028-y>

22. Moelter W., Fissan H. Structure of a High Efficiency Glass Fiber Filter Medium. *Aerosol Science and Technology*, 1997, vol. 27, iss. 3, pp. 447–461. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786829708965484>

23. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 33, iss. 13, pp. 1258–1275. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>

24. Thomas A.W. Solutions of Basic Salts of Aluminum. *Paper Trade Journal*, 1935, vol. 100, no. 6, pp. 36–39.

25. Zheng X.-M., Wang H.-Y. Effect of Fiber Diameter on the Structure and Properties of Glass Fiber Paper. *China National Pulp and Paper Research Institute*. 2016, vol. 35, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.11980/j.issn.0254-508X.2016.05.004>