

DOI 10.15593/2409-5125/2017.02.10

УДК 676.273

Е.В. Дубовой¹, И.Н. Ковернинский², А.С. Смолин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ СТЕКЛОВОЛОКНА НА МЕХАНИКУ И КАПИЛЛЯРНУЮ ВПИТЫВАЕМОСТЬ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ БУМАГИ ДЛЯ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

В статье представлены исследования влияния свойств стекловолокна – ресурсосберегающего материала в производстве бумаги из целлюлозы – на механические и впитывающие свойства бумаги. По ресурсосбережению, эффективности прямого испарительного охлаждения, экологической безопасности стекловолокнистая бумага стала перспективной для использования в аппаратах испарительного охлаждения воздуха. Для нее важны такие свойства: механическая прочность – не менее 1 МПа по показателю «прочность на разрыв»; скорость капиллярного подъема воды – не менее 18 см за 30 мин; водопоглощение – предельная масса воды, которую способен удерживать 1 г материала – не менее 100 %. При отливе бумаги отношение длины волокна к диаметру обычно находится в пределах (350–1500):1. Если средний диаметр волокна, например, 0,7 мкм, то его средняя длина 0,65 мм. Очевидно, что при отливе листа хаотическое распределение жестких несминаемых, негибких и несжимаемых стеклянных «волосков» создает структуру листа, в которой только малая доля ОН-групп поверхности волокна контактирует с сопредельными волокнами на расстоянии возможного образования Н-связи с длиной 0,25–0,27 нм. Плотность связи минимальна, а прочность бумаги низкая.

Установлены закономерности влияния четырех марок стеклянного волокна: НТВ-0,10; МТВ-0,25; МТВ-0,40; УТВ-0,60, отличающихся диаметром, на сопротивление разрыву и впитываемость капиллярную – по мере увеличения диаметра волокна сопротивление разрыву и впитываемость капиллярная снижаются. Для исследованных марок волокна вычислены величины модуля упругости, характеризующие жесткость стекловолокнистой бумаги; по убыванию они располагаются в ряд $E_1 > E_2 > E_3$ и E_4 и подтверждают, что жесткость и, следовательно, прочность бумаги повышаются по мере уменьшения диаметра волокна, особенно эта закономерность справедлива в интервале размеров волокна 100–400 нм. Полученные закономерности объясняются удельной плотностью связей между волокнами в стекловолокнистой бумаге. При примерно одинаковой плотности бумаги 0,24–0,25 г/см³, за счет прироста Н-связи, жесткость и прочность больше при использовании более тонкого волокна; уплотне-

Дубовой Е.В., Ковернинский И.Н., Смолин А.С. Исследования влияния свойств стекловолокна на механику и капиллярную впитываемость бумаги для испарительных элементов охлаждения воздуха // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 2. – С. 114–122. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.10

Dubovoy E.V., Koverninsky I.N., Smolin A.S. Study of the influence of glass fiber properties on mechanics and paper capillary rise for evaporative air cooling solutions. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2017. No. 2. Pp. 114-122. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.10

ние структуры бумаги уменьшает диаметр образующихся капилляров, повышая свойство капиллярности бумаги.

Ключевые слова: стеклянное волокно, стекловолокнистая бумага, диаметр волокна, пористость, капиллярная впитываемость, напряжение, деформация, жесткость, модуль упругости, механическая прочность, экологическая безопасность, ресурсосбережение.

Введение. Гидрофильные микропористые материалы широко используются в охладителях воздуха (кондиционерах), для которых важно применение ресурсосберегающих материалов и технологий. По ресурсосбережению, эффективности прямого испарительного охлаждения, экологической безопасности перспективным материалом стали материалы из стекловолокна [1]. Они представляют собой бумагоподобные материалы, изготавливаемые по бумагоделательной технологии [2], и по существу являются стекловолокнистой бумагой со многими подобными бумаге из целлюлозы свойствами [3]. Для того чтобы использовать стекловолокнистую бумагу в качестве высокопористых испарительных элементов в аппаратах охлаждения воздуха, важно найти оптимальную композицию бумаги по диаметру волокна и связующему, обеспечивающую следующие свойства (по методикам работы [4]):

- а) механическая прочность – не менее 1 МПа по показателю «прочность на разрыв»;
- б) скорость капиллярного подъема воды – не менее 18 см за 30 мин;
- в) водопоглощение – предельная масса воды, которую способен удерживать 1 г материала, не менее 100 %.

В процессе формирования в изготовленной бумаге установлено действие следующих типов сил связи (в скобках приводится условное обозначение): капиллярные (F_k), водородные (F_H), трения (F_T) [3, 5, 6], электростатические (F_3) [7, 8]. К ним добавим силы связи связующим (F_c), всегда добавляемым для повышения прочности стекловолокнистой бумаги. Тогда баланс силы связи в структуре бумаги, отражающий механическую прочность (F_p) можно записать уравнением

$$F_p = F_k + F_H + F_T + F_3 + F_c.$$

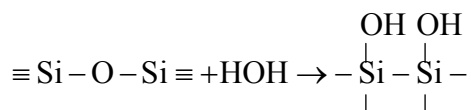
Общая сила связи между волокнами представляется комбинированной из действующих типов связи на конкретной стадии готовности бумаги. Каждый тип связи вносит определенную долю в прочность структуры листа. Силы определяют прочность и жесткость листа, фактически являясь лимитирующим (наиболее слабым) элементом прочности структуры.

Цель исследования – установление закономерностей влияния свойств стекловолокна различных марок на механическую прочность, же-

сткость и капиллярную впитываемость стекловолоконистой бумаги при производстве ее по ресурсосберегающей высокопроизводительной и экологически безопасной бумагоделательной технологии.

Исследования. Капиллярные силы F_k создаются поверхностным натяжением воды, имеют важнейшее значение при образовании структуры бумаги в процессе отлива, но практически сводятся к нулю в готовой бумаге [9]. Прочность бумаги определяется остальными слагаемыми силы связи, среди которых превалирует F_H [3–6].

Поверхность стекловолокна отличается определенной гидрофильностью, обусловливаемой силоксановыми группами. Они обуславливают гигроскопичность волокна 7–20 %, создающую на поверхности волокна монослой ОН-групп [10, 11]. Контакт с водой усиливает гидролиз силоксановых групп ($\equiv\text{S}-\text{O}-\text{S}\equiv$) с образованием силаноловых групп по схеме [12]



Силаноловые группы образуют водородные (Н-связи) с окружающей водой, а затем по мере удаления воды образуют Н-связи непосредственно между волокнами. Схема перехода стягивающей волокна силы F_k в водородную связь показана на рис. 1. На расстоянии между поверхностями волокон d можно видеть Н-связи между молекулами воды и поверхности волокна. На расстоянии d_1 устанавливаются Н-связи непосредственно между контактирующими поверхностями волокна. Этот вид связи признается собственно межволоконной водородной связью (Н-связь) в произведенной бумаге.

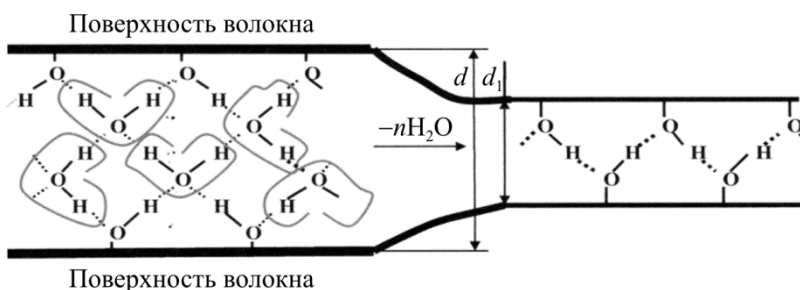


Рис. 1. Действующие виды Н-связей в структуре стекловолоконистой бумаги на различных стадиях формирования: d – связи между волокнами через водяные прослойки; d_1 – связи волокон посредством поверхностных ОН-групп

По существу сила Н-связи в стекловолоконистой бумаге, без добавления связующего, всецело определяется удельным содержанием (плотностью) по-

верхностных силиконовых групп [11]. По количеству связанной воды на поверхности волокна 7–20 % и монослойному распределению можно обоснованно ожидать высокой плотности Н-связи между волокнами и прочной бумаги. Но фактически стекловолокнистая бумага отличается крайне низкой механической прочностью [12]. Объясняется это свойствами волокна.

Стекловолоконное волокно изотропно, отличается высокой жесткостью и хрупкостью (не сжимается), ему характерны прямолинейные участки в пределах длины 6–10 мм, в воде не набухает, внутренняя структура и поверхность не фибриллируются. При отливе бумаги соотношение длины волокна и диаметра обычно составляет (350–1500):1. Если средний диаметр волокна, например, 0,7 мкм, то его средняя длина 0,65 мм. Очевидно, что при отливе листа хаотическое распределение жестких несминаемых, негибких и несжимаемых стеклянных «волосков» создает структуру листа, в которой только малая доля ОН-групп поверхности волокна контактирует с сопредельными волокнами на расстоянии возможного образования Н-связи с длиной 0,25–0,27 нм. Плотность связи минимальна, а прочность бумаги низкая. Наглядно подтверждается низкая плотность структуры бумаги электронными микрофотографиями (рис. 2) [12].

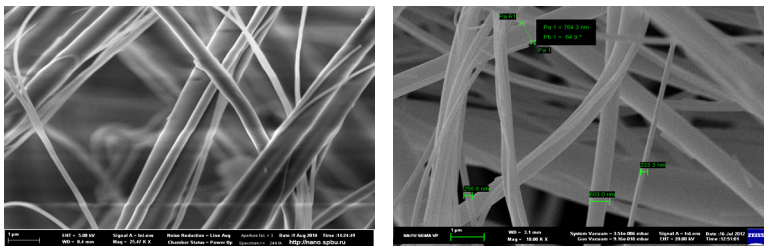


Рис. 2. Электронные микрофотографии структуры стекловолокнистой бумаги

Проведенные ранее автором [12] расчеты дали величину пористости 7,77 для композиции бумаги из стекловолокна: 25 % – 0,1 мкм; 25 % – 0,25 мкм; 25 % – 0,4 мкм; 25 % – 0,6 мкм, полученную с низким расходом связующего (5 % Al_2O_3) и массой 1 м² 200 г, толщиной 0,8 мм. Объем пор составил 88,6 %. Эти данные подтверждают низкую плотность структуры стекловолокнистой бумаги. Но именно такая структура, сформованная в режиме мягкого прессования, является высокопористой, влагоемкой, с требуемой капиллярностью (высота подъема воды в капиллярах), удовлетворяет требованиям к элементам испарителей.

Для количественной характеристики прочности стекловолокнистой бумаги была проведена серия опытов по изготовлению образцов бумаги примерно равной плотности из четырех марок стекловолокна и определе-

ны прочность на разрыв и впитываемость капиллярная. Для этих образцов бумаги исследованы диаграммы напряжение–деформация [13]. Данные представлены в таблице и на рис. 3.

Влияние марки стекловолокна на свойства бумаги

Номер композиции	Стекловолокно: марка, содержание в бумаге, %, номинальный диаметр, мкм				Плотность, г/см ³	Прочность на разрыв, МПа	Впитываемость капиллярная, мм
	НТВ-0,10	МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60			
1	100	–	–	–	0,25	1,03	147
2	–	100	–	–	0,24	0,71	145
3	–	–	100	–	0,24	0,48	102
4	–	–	–	100	0,25	0,42	100

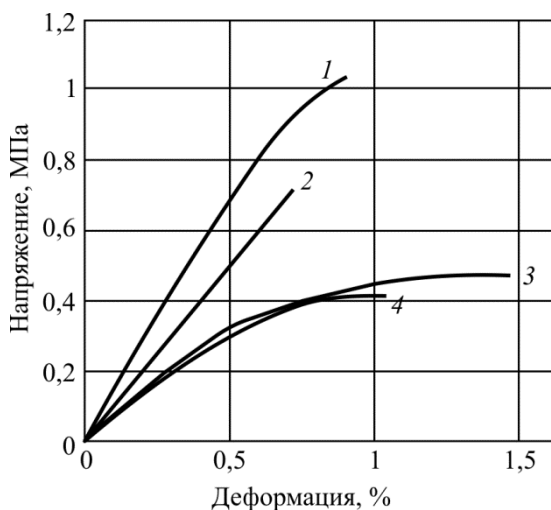


Рис. 3. Диаграмма напряжение–деформация для волокна: 1 – НТВ-0,10; 2 – МТВ-0,25; 3 – МТВ-0,40; 4 – УТВ-0,60

Как можно судить по данным эксперимента, прочность на разрыв бумаги наибольшая из волокна с меньшим диаметром, и с увеличением диаметра волокна прочность заметно уменьшается. Так, волокно диаметром 0,4–0,6 мкм обуславливает прочность бумаги 0,48–0,42 МПа, против 1,03 МПа при диаметре 0,1 мкм. При анализе диаграммы напряжение–деформация установлено, что при приложении напряжения σ относительная деформация ϵ стекловолнистой бумаги для разных марок волокна, различающихся диаметром, практически подчиняется закону Гука [13]:

$$\sigma = E\epsilon. \tag{1}$$

Используя графики рис. 3, по уравнению (1) определим модуль упругости E . Получим: для нанотонкого НТВ-0,10 (\varnothing 100 нм) $E_1 = 1,29 \text{ МН/м}^2$;

для микротонкого МТВ-0,25 (\varnothing 250 нм) $E_2 = 1,01$ МН/м²; для микротонкого МТВ-0,40 (\varnothing 400 нм) $E_3 = 0,32$ МН/м²; для ультратонкого УТВ-0,60 (\varnothing 600 нм) $E_4 = 0,38$ МН/м². Вычисленные величины модуля упругости, характеризующие жесткость стекловолоконной бумаги, по убыванию можно расположить в ряд: $E_1 > E_2 > E_3$ и E_4 . Таким образом, жесткость и, следовательно, прочность бумаги повышаются по мере уменьшения диаметра волокна. Особенно эта закономерность справедлива в интервале размеров волокна 100–400 нм. Объясняется данная закономерность удельной плотностью связей между волокнами. Более тонкие волокна упаковываются плотнее с большей удельной площадью контакта сопряженных поверхностей волокна. При примерно одинаковой плотности бумаги 0,24–0,25 г/см³, за счет прироста Н-связи жесткость и прочность больше. Кроме того, уплотнение структуры бумаги уменьшает диаметр образующихся капилляров, повышая свойство капиллярности бумаги. Это подтверждено данными эксперимента (см. таблицу). Впитываемость капиллярная меньше у бумаги с большим диаметром волокна. Увеличение диаметра волокна с 0,1 до 0,6 мкм вызывает снижение впитываемости со 147 до 100 мм. Наблюдаемое снижение является существенным, что можно объяснить увеличением диаметра капилляров и пор и снижением капиллярного давления в капиллярно-пористой структуре бумаги [14, 15].

Полученные результаты полностью подтверждают вышеприведенные аргументы о малой удельной плотности межволоконных контактов и, как следствие, слабых силах Н-связей в стекловолоконной бумаге. Что касается сил трения и электростатических ($F_T + F_3$), то им будет посвящено дополнительное исследование. В силу свойств стекловолокна без применения специальных методов его обработки или применения связующих повышение прочности стекловолоконной бумаги не представляется возможным. Результаты исследования влияния связующего на прочность и впитываемость капиллярную (F_c) будут впоследствии опубликованы.

Выводы:

1. Использование стеклянного волокна – это положительный фактор сбережения лесных ресурсов, так как стеклянные волокна получают из силикатов (по существу из песка), а заменять они могут древесное волокно в композиции бумаги, вплоть до 100 %.

2. Установлены закономерности влияния четырех марок стеклянного волокна: НТВ-0,10; МТВ-0,25; МТВ-0,40; УТВ-0,60, отличающихся диаметром, на сопротивление разрыву и впитываемость капиллярную; по мере увеличения диаметра волокна, сопротивление разрыву и впитываемость капиллярная снижается.

3. По данным эксперимента для исследованных марок волокна вычислены величины модуля упругости, характеризующие жесткость стекловолоконной бумаги; по убыванию они располагаются в ряд $E_1 > E_2 > E_3$ и E_4 и подтверждают, что жесткость и, следовательно, прочность бумаги повышаются по мере уменьшения диаметра волокна, особенно эта закономерность справедлива в интервале размеров волокна 100–400 нм.

4. Полученные закономерности объясняются удельной плотностью связей между волокнами в стекловолоконной бумаге; при примерно одинаковой плотности бумаги $0,24\text{--}0,25 \text{ г/см}^3$, за счет прироста Н-связи, жесткость и прочность больше при использовании более тонкого волокна; уплотнение структуры бумаги уменьшает диаметр образующихся капилляров, повышая свойство капиллярности бумаги; впитываемость капиллярная меньше у бумаги с большим диаметром волокна, увеличение диаметра волокна от 0,1 до 0,6 мкм, вызывает снижение впитываемости со 147 до 100 мм.

Библиографический список

1. Природный потенциал охлаждения. Энергосберегающая экологически безопасная технология охлаждения воздуха широкомасштабного применения / Е.Б. Свиридов, Н.В. Сысоева, В.К. Дубовый, А.И. Безлаковский. – 2-е изд., доп. – СПб., 2015. – 256 с.
2. Иванов С.Н. Технология бумаги. – М.: Лесн. промышленность, 1970. – 696 с.
3. Фляте Д.М. Свойства бумаги. – М.: Лесн. промышленность, 1986. – 680 с.
4. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона / В.К. Дубовый, А.В. Гурьев, Я.В. Казаков, В.И. Комаров, Г.Н. Коновалова, А.С. Смолин, В.В. Хованский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 230 с.
5. Комплексная химическая переработка древесины: учеб. для вузов / И.Н. Ковернинский, В.И. Комаров, С.И. Третьяков, Н.И. Богданович, О.М. Соколов, Н.А. Кутакова, Л.И. Селянина, Е.В. Дьякова. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2006. – 374 с.
6. Комаров В.И. Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. – 171 с.
7. Фролов М.В. О природе межволоконных связей в бумаге // Бумажная промышленность. – 1980. – № 3. – С. 15–17.
8. Фролов М.В. Роль электростатических сил в механизме прочности бумаги // Бумажная промышленность. – 1979. – № 4. – С. 3–6; № 5. – С. 5–7; № 8. – С. 17–18.
9. Бабурин С.В. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства. – М.: Лесн. промышленность, 1983. – 192 с.
10. Сиркар А. Знакомство со стекловолокном и технологией его производства с использованием процесса создания нетканых материалов // TAPPI JOURNAL. – 1993. – Vol. 76, № 4. – С. 167–175.
11. Дубовый В.К. Стеклые волокна. Свойства и применение. – СПб.: Нестор, 2003. – 130 с.
12. Дубовый В.К. Бумагоподобные композиционные материалы на основе минеральных волокон: дис. ... д-ра техн. наук / С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. – СПб., 2006. – 180 с.
13. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. – 2-е изд. – М., 1979. – 153 с.
14. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
15. Сид Дж.В., Этвуд Дж.Л. Супрамолекулярная химия: в 2 т. – М.: Академкнига, 2007. – Т. 1. – 479 с.

References

1. Sviridov E.B., Sysoev N.V., Dubovy V.K., Bezlakovskiy A.I. Prirodnyi potentsial okhlazhdeniia. Energoberegaiushchaia ekologicheski bezopasnaia tekhnologiia okhlazhdeniia vozdukhа shirokomasshtabnogo primeneniia [Natural cooling potential. Energy saving environmentally friendly technology air cooling large-scale application]. 2nd ed., Saint Petersburg, 2015, 256 p.
2. Ivanov S.N. Tekhnologiia bumagi [Technology of paper]. Moscow, Lesnaia promyshlennost', 1970, 696 p.
3. Plate D.M. Svoistva bumagi [Properties of paper]. Moscow, Lesnaia promyshlennost', 1986, 680 p.
4. Dubovy V.K., Guriev A.V., Kazakov I.V., Komarov V.I., Kononov G.N., Smolin A.A., Khovansky V. Laboratornyi praktikum po tekhnologii bumagi i kartona [Laboratory workshop on the technology of paper and cardboard]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnikeskogo Universiteta, 2006, 230 p.
5. Koverninskiy I.N. Kompleksnaia khimicheskaiа pererabotka drevesynei [Complex chemical processing of wood]. Arkhangel'sk, Izdatel'stvo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, 374 p.
6. Komarov V.I. Mekhanika deformirovaniia tselliuloznykh taroupakovochnykh materialov [Mechanics of deformation in cellulose packaging materials]. Arkhangel'sk, Izdatel'stvo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2002, 171 p.
7. Frolov M.V. O prirode mezhvolokonnykh svyazei v bumage [On the nature of the interfiber bonds in the paper]. *Bumazhnaia promyshlennost'*, 1980, no. 3, pp. 15-17.
8. Frolov M.V. Rol' elektrostati cheskikh sil v mekhanizme prochnosti bumagi [Role of electrostatic forces in the mechanism of paper strength]. *Bumazhnaia promyshlennost'*, 1979, no. 4, pp. 3-6; no. 5, pp. 5-7; no. 8. pp. 17-18.
9. Baburin S.V. Reologicheskie osnovy protsessov tselliulozno-bumazhnogo proizvodstva [Rheological bases of processes of pulp and paper production]. Moscow, Lesnaia promyshlennost', 1983, 192 p.
10. Sirkar A. Znakomstvo so steklovoloknom i tekhnologii e ego proizvodstva s ispol'zovaniem protsessa sozdaniia netkanykh materialov [A. reed's familiarity with the optical fiber and its production technology with the use of the process of creating nonwovens]. *TAPPI JOURNAL*, 1993, vol. 76, no. 4, pp. 167-175.
11. Dubovy V.K. Stekliannye volokna. Svoistva i primeneni e [Glass fibre. Properties and applications]. Saint Petersburg, Nestor, 2003, 130 p.
12. Dubovy V.K. Bumagopodobnye kompozitsionnye materialy na osnove mineral'nykh volokon [Paper-like composite materials based on mineral fibers]. Abstract of Ph. D. thesis, Saint Petersburg, 2006.
13. Timoshenko S.P., Gudier J. Teoriia uprugosti [Theory of elasticity]. 2nd ed., Moscow, 1979, 153 p.
14. Summ B.D., Goryunov Yu.V. Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniia i rastekaniia [Physical-chemical fundamentals of wetting and spreading]. Moscow, Khimiia, 1976, 232 p.
15. Stid D.V., Etvud D.L. Supramolekuliarnaia khimiia [Supramolecular chemistry]. Moscow, Akademkniga, 2007, vol. 1, 479 p.

Получено 29.03.2017

E. Dubovoy, I. Koverninsky, A. Smolin

**STUDY OF THE INFLUENCE
OF GLASS FIBER PROPERTIES ON MECHANICS AND PAPER
CAPILLARY RISE FOR EVAPORATIVE AIR COOLING SOLUTIONS**

In this article the results of the study of glass fiber properties' influence on mechanical and absorbing properties of paper are presented. Glass fiber is a resource-saving material used in the production of paper from cellulose. Materials made of glass fiber or fiberglass paper are promising in terms of resource-saving, efficiency of direct evaporative cooling and environmental safety. For a

glass fiber the following properties are of the highest importance: mechanical tensile strength of at least 1 MPa; the rate of capillary rise of water, not less than 18 cm in 30 minutes; water absorption, i.e. the maximum mass of water that 1 g of material can retain, not less than 100 %. During the sheet formation the ratio of fiber length to its diameter is usually in the range (350-1500): 1. If the average fiber diameter is, for example, 0.7 microns, then its average length is 0.65 mm. It is obvious that when the sheet is being formed, the chaotic distribution of rigid, non-creased, unbending and non-compressible glass "hairs" creates a sheet structure in which only a small fraction of fiber surface OH-groups come in contacts with adjacent fibers at a distance of possible formation of an H-bond with a length of 0.25 –0.27 nm. The bond density is minimal, and the strength of the paper is low.

The influence patterns of four grades of glass fiber have been determined: NTF (nano thin finer) 0.10; MTF (micro thin fiber) –0.25; MTF-0.40; UTF (ultra thin fiber) –0.60. These four influence patterns differ in diameter, tear resistance and capillary absorption; as the fiber diameter increases, tear resistance and capillary absorption decreases. For the studied fiber grades, the values of the modulus of elasticity characterizing the stiffness of glass-fiber paper have been calculated; in descending order they are arranged in a row: E1> E2> E3 and E4. It confirms that the rigidity and accordingly the strength of the paper increase as the diameter of the fiber decreases. This regularity is especially valid in the fiber size range of 100-400 nm. The obtained regularities are explained by the specific density of bonds between the fibers in fiberglass paper; at approximately the same paper weight of 0.24-0.25 g/cm³, due to the increase in H-bond, the stiffness and strength is greater when using a thinner fiber; the compaction of the paper structure reduces the diameter of the capillaries formed, increasing paper capillarity.

Keywords: glass fiber, fiberglass paper, fiber diameter, porosity, capillary absorption, tension, deformation, stiffness, modulus of elasticity, mechanical strength, environmental safety, resource-saving.

Дубовой Евгений Владимирович (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант, С.-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого (198095, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: dubovoy.evgeniy@gmail.com).

Ковернинский Иван Николаевич (Санкт-Петербург, Россия) – д-р техн. наук, профессор, независимый консультант и эксперт ЦБП (e-mail: kovern@list.ru).

Смолин Александр Семенович (Санкт-Петербург, Россия) – д-р техн. наук, профессор, С.-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, e-mail: smolin@gturp.spb.ru).

Dubovoy Evgeniy (Saint Petersburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (198095, St. Petersburg, Polytechnic str., 29, e-mail: dubovoy.evgeniy@gmail.com).

Koverninsky Ivan (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Research and production cluster "Paper and Cardboard" (e-mail: kovern@list.ru).

Smolin Alexander (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg state University of industrial technology and design (198095, St. Petersburg, Ivan Chernykh str., 4, e-mail: smolin@gturp.spb.ru).