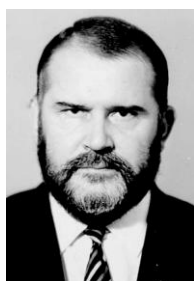


УДК 676.017

И.Б. ФИЛИППОВ, В.И. КОМАРОВ



Филиппов Илья Борисович родился в 1969 г., окончил в 1992 г. Архангельский лесотехнический институт, старший преподаватель кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 20 научных работ в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 160 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

Влияние некоторых параметров работы БДМ и суперкаландра на деформативность и прочность бумаги для офсетного способа печати

Установлено, что изменения структуры, возникающие в процессе производства бумаги, оказывают избирательное влияние на величину показателей, описывающих механическое поведение на различных этапах нагружения, и их корреляцию с динамической прочностью материала.

It has been stated that changes of structure occurring in paper making process exert some selective influence on the value of indices describing mechanical behavior at different loading stages and their correlation to dynamic strength of material.

Эффективное управление качеством целлюлозно-бумажной продукции является одним из важнейших аспектов технологии. При этом особое значение приобретают вопросы оценки качества, так как целлюлозно-

бумажные материалы по своей природе обладают высокой неоднородностью [1,13], что затрудняет перенос данных, полученных в лаборатории, в производственные условия [13]. Поэтому изучение факторов, влияющих на качество продукции, непосредственно в условиях производства представляется необходимым. Кроме того, это позволяет критически оценить действующий режим производства, найти пути его улучшения. Отметим и проблему, имеющуюся на сегодняшний день в области оценки качества целлюлозно-бумажных материалов – это методы и характеристики, применяемые для отражения потребительских свойств бумаги и картона. Так, стандартными показателями качества для офсетной бумаги являются разрывная длина, сопротивление излому и стойкость поверхности бумаги к выщипыванию (СПВ). Указанные характеристики оценивают поведение материала в момент разрушения, а величина их в значительной степени зависит от дефектности структуры испытываемого образца. В реальном печатном процессе бумажное полотно претерпевает нагрузки, составляющие порядка 1/3 от разрушающей, а его поведение во многом определяется упругими свойствами [7, 9]. Увеличение абсолютных значений таких характеристик бумаги, как начальный модуль упругости и предел упругой деформации, повышает устойчивость полотна к образованию морщин и биению. Однако эти характеристики для оценки качества офсетной бумаги в настоящее время на практике не используют. Кроме того, сведения о законах формирования деформационных свойств в процессе производства бумаги весьма ограничены и носят разрозненный характер [3,14,15]. Таким образом, исследование влияния производственных факторов на вязкоупругие свойства бумаги весьма актуально.

Данная публикация является шестой из серии работ, посвященных исследованию влияния технологических факторов производства на деформативность и прочность книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати [4, 5, 10–12]. В ней рассмотрена зависимость деформационных и прочностных характеристик офсетной бумаги с высоким содержанием различных механических масс от некоторых параметров работы БДМ и суперкаландра.

При выполнении исследований были выделены два этапа. На первом этапе проводили пассивный эксперимент, главными задачами которого являлись:

- а) исследование стабильности параметров работы БДМ, выбранных для текущего контроля технологического процесса;
- б) оценка стабильности стандартных и перспективных показателей качества офсетной бумаги;
- в) исследование корреляции параметров работы БДМ и характеристик качества бумаги;
- г) изучение динамики изменения свойств деформативности в ряду напорный ящик – накат БДМ – суперкаландр;
- д) оценка влияния изменений структуры на корреляцию характеристик деформативности и прочности.

На втором этапе путем активного воздействия исследовали влияние на деформационные свойства офсетной бумаги таких переменных факторов процесса производства, как соотношение скоростей струи массы и сетки БДМ, массы 1 м^2 бумаги и натяжения сушильного сукна в третьей сушильной группе.

Первый этап (пассивный эксперимент). Одно из важнейших условий повышения качества продукции – стабильность параметров работы БДМ. В ЦБП принято считать стабильными те технологические параметры и характеристики, коэффициент вариации которых не превышает 5 %. При проведении эксперимента статистической обработке подвергались данные производственного контроля, соответствующие по времени отборам проб для изучения фундаментальных [2], деформационных и прочностных свойств бумажной массы и готовой бумаги. В течении квартала было произведено 20 отборов проб с одновременной регистрацией параметров работы БДМ. Результаты статистической обработки полученных данных представлены в табл.1, из которой следует, что большинство из контролируемых в данном эксперименте параметров имеют коэффициенты вариации выше 5 %. Обращает на себя внимание низкая стабильность величины вакуума в камерах формующего и гауч-вала. Нестабильность качества исходных полуфабрикатов [4], параметров работы РПО [11,12] и БДМ обусловила высокое варьирование характеристик качества бумаги как на накате, так и после суперкаландрирования. Наибольший коэффициент вариации наблюдался у начального модуля упругости E_1 , что обусловлено наибольшей чувствительностью этой характеристики к изменениям, вносимым в структуру материала при нестабильной работе БДМ. Некоторый рост степени изменчивости начального модуля упругости после суперкаландрирования объясняется увеличением разброса значений исследуемой характеристики (2260 и 3560 МПа – соответственно до и после суперкаландрирования). Это свидетельствует о неоднозначном влиянии процесса обработки в суперкаландре на бумагу машинной гладкости, обладающую различными исходными свойствами, а также о низкой стабильности работы суперкаландра. Значительное уплотнение структуры бумажного полотна после суперкаландрирования обусловило увеличение начального модуля упругости несмотря на пластические деформации, возникающие в поверхностных слоях под воздействием валов.

Таблица 1

Основные технологические параметры работы БДМ

Параметры	\bar{X}	max	min	СКО	V, %
Скорость дуоформера, м/мин	770	810	730	27,0	3,5
Соотношение скоростей струя массы–сетка БДМ	0,95	0,99	0,95	0,01	1,4

Вакуум, бар:					
а) формующий вал по вакуум-камерам:					
1	0,30	0,80	0,23	0,13	44,1
2	0,22	0,28	0,15	0,05	22,9
б) гауч-вал по вакуум-камерам:					
1	0,22	0,30	0,13	0,01	32,1
2	0,43	0,51	0,36	0,01	9,6
3	0,50	0,63	0,40	0,12	24,8
Давление прессования по зонам, кН/м:					
1	64,0	65,5	61,0	1,5	2,3
2	81,0	84,5	75,0	4,4	5,5
3	111	124	96	11,0	10,2
Температура общего пара, °С	141	145	135	14,0	10,3
Давление общего пара, бар	3,0	3,2	2,1	0,3	9,2
Давление пара в 5-й сушильной группе, бар	2,2	2,7	1,2	0,4	19,5
Характеристики качества бумаги:					
L , м	<u>5650</u>	<u>7050</u>	<u>4040</u>	<u>825</u>	<u>14,6</u>
	5230	6470	3830	746	14,3
P_{zg} , м/с	<u>2,10</u>	<u>2,42</u>	<u>1,36</u>	<u>0,22</u>	<u>10,5</u>
	1,38	1,42	1,22	0,05	3,5
P_{zc} , м/с	<u>2,44</u>	<u>2,60</u>	<u>2,00</u>	<u>0,17</u>	<u>6,8</u>
	1,99	2,06	1,80	0,05	2,7
E_1 , МПа	<u>3860</u>	<u>5300</u>	<u>3040</u>	<u>650</u>	<u>16,8</u>
	5340	7520	3960	922	17,3

Примечание. В числителе приведены данные для бумаги на накате, в знаменателе – после суперкаландра.

Стойкость поверхности к выщипыванию (СПВ) с внешней стороны листа P_{zg} отличается более высокой степенью изменчивости, чем с сеточной P_{zc} . Это явление представляется вполне закономерным. Внешняя сторона бумаги, имея большее содержание коротких волокон и большую однородность поверхности, наиболее чувствительна к колебаниям фракционного состава по длине волокна и изменениям условий отлива в отличие от сеточной стороны, где происходит промой короткого волокна. Значительное снижение вариации СПВ после суперкаландрирования обусловлено падением абсолютных величин прочности поверхности, которое возникает в результате ослабления межволоконных связей в поверхностных слоях бумаги и выглаживания ее поверхности. Причем прочность поверхности как с внешней, так и с сеточной стороны листа во всех отборах снижалась практически до одинакового уровня.

Таблица 2

**Корреляция технологических параметров работы БДМ
и показателей качества бумаги**

Параметры	L	P_{zb}	P_{zc}	E_1	EI
Скорость дуоформера	<u>-0,490</u>	<u>-0,608</u>	<u>-0,574</u>	<u>-0,769</u>	<u>-0,662</u>
	-0,602	-0,303	0,404	-0,726	-0,690

Соотношение скоростей струя массы–сетка БДМ	...	<u>0,230</u>	<u>0,350</u>	<u>-0,193</u>	<u>-0,241</u>
	-0,483	-0,129	-0,188	-0,092	-0,008
Вакуум на гауч-валу по вакуум-камерам:					
1	<u>0,269</u>	<u>-0,283</u>	<u>-0,290</u>	<u>0,554</u>	0,676
	0,468	0,185	0,123	0,396	0,681
2	<u>-0,504</u>	<u>-0,069</u>	<u>-0,036</u>	<u>0,080</u>	<u>0,222</u>
	-0,100	0,159	0,293	-0,066	0,292
3	<u>-0,158</u>	<u>0,157</u>	<u>0,020</u>	<u>0,207</u>	<u>-0,178</u>
	0,019	0,095	-0,164	-0,120	-0,040
Давление прессования по зонам:					
1	<u>0,328</u>	<u>-0,195</u>	<u>-0,131</u>	<u>0,274</u>	<u>-0,442</u>
	0,094	0,305	-0,622	-0,028	-0,052
2	<u>-0,576</u>	<u>-0,344</u>	<u>-0,286</u>	<u>0,442</u>	<u>0,459</u>
	0,354	-0,328	0,230	0,129	-0,036
3	<u>-0,662</u>	<u>-0,424</u>	<u>-0,390</u>	<u>-0,700</u>	<u>-0,884</u>
	<u>-0,793</u>	-0,302	0,153	<u>-0,778</u>	<u>-0,778</u>
Температура общего пара	<u>-0,407</u>	<u>-0,234</u>	<u>-0,219</u>	<u>-0,457</u>	<u>-0,067</u>
	-0,395	-0,416	0,430	-0,016	-0,496
Давление общего пара	<u>-0,186</u>	<u>-0,118</u>	<u>-0,098</u>	<u>-0,077</u>	0,639
	0,021	-0,420	0,694	-0,054	0,504
Давление пара в 5-й сушильной группе	<u>0,245</u>	<u>0,028</u>	<u>0,612</u>	<u>0,071</u>	0,869
	0,270	0,313	0,612	0,208	0,531

Примечания. 1. В числителе приведены данные для бумаги на накате; в знаменателе – после суперкаландра. 2. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции ($r \geq 0,662$).

Одной из задач эксперимента являлось исследование возможности прогнозирования качества продукции при контроле технологических параметров работы БДМ, представленных в табл. 1. Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляции параметров, выбранных для контроля, со стандартными (L , P_{zc} , P_{ze}) и некоторыми деформационными (E_1 , EI) характеристиками бумаги. Из приведенных в табл. 2 данных следует, что ни один из контролируемых при производстве бумаги параметров не имеет значимой корреляции с такой важной для офсетной бумаги характеристикой, как стойкость поверхности к выщипыванию.

Для прочности при растяжении L значимая связь обнаружена лишь с величиной линейного давления прессования на последнем прессе. Обработка бумаги в суперкаландре способствует увеличению тесноты корреляции этих характеристик.

Величина начального модуля упругости E_1 , кроме того, значимо коррелирует со скоростью дуоформера, что можно объяснить изменениями в структуре листа, в частности ростом степени ориентации волокон в машинном направлении при увеличении скорости сетки. Теснота данной корреляции после суперкаландрирования незначительно снижается.

Жесткость бумаги при изгибе EI значимо связана не только с указанными выше параметрами, но и с величиной вакуума в первой камере гауч-вала и давлением пара в пятой (последней) сушильной группе. В послед-

нем случае это обусловлено увеличением толщины и пухлости материала при интенсификации режима сушки. Однако суперкаландрирование делает эту связь незначимой.

С точки зрения прогнозирования деформативности и прочности бумаги определенный интерес представляет динамика изменения свойств исследуемого материала в ряду напорный ящик–накат–суперкаландр, а также влияние возникающих при этом изменений в структуре материала на корреляцию характеристик деформативности и прочности.

В табл. 3 представлены усредненные по 20 отборам данные, характеризующие динамику изменения фундаментальных, прочностных и деформационных характеристик при прохождении бумаги через БДМ и суперкаландр. Отметим, что представленные в табл. 3 образцы имеют

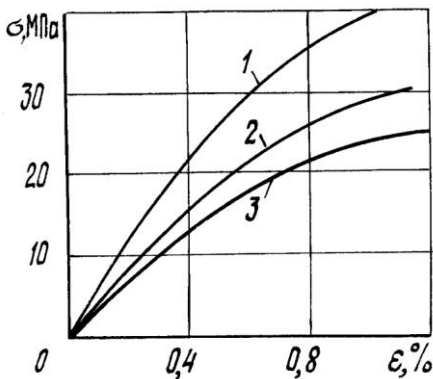
Таблица 3

Изменение физико-механических характеристик бумажной массы и бумаги в процессе производства

Характеристики	Численные значения характеристик					
	Масса из напорного ящика		Бумага на накате БДМ		Бумага после суперкаландра	
	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %
Фундаментальные:						
$V, \text{ см}^3/\text{г}$	1,79	3,61	1,87	4,6	1,23	5,9
$F_z, \text{ Дж}/\text{м}^2$	145	10,0	143	13,7	141	13,0
Деформационные:						
$E_1, \text{ МПа}$	3390	15,0	3860	16,8	5340	17,3
$E_3, \text{ МПа}$	1930	13,5	2490	24,8	3400	18,4
$E_2, \text{ МПа}$	830	20,3	1080	22,4	1620	36,1
$\sigma_1, \text{ МПа}$	12,2	12,5	15,3	17,0	21,5	31,8
$\sigma_3, \text{ МПа}$	17,1	13,4	23,4	19,6	30,2	17,6
$\sigma_p, \text{ МПа}$	25,5	11,1	30,3	16,6	41,2	17,3
$\varepsilon_1, \%$	0,37	9,7	0,41	13,8	0,40	9,1
$\varepsilon_3, \%$	0,59	11,7	0,68	17,2	0,64	10,9
$\varepsilon_p, \%$	1,36	6,9	1,16	14,9	1,14	12,0
$EI, \text{ мН}\cdot\text{см}^2$	30,6	26,3	67,4	25,8	38,5	36,3
Прочностные:						
$L, \text{ м}$	4510	7,8	5650	14,6	5230	14,3
$A_p, \text{ мДж}$	30,6	12,8	37,0	24,1	33,0	22,8
$P_{zc}, \text{ м/с}$	2,36	4,0	2,44	6,8	1,99	2,7
$P_{z\theta}, \text{ м/с}$	2,03	7,7	2,10	10,5	1,38	3,5

значительные отличия в структуре. Так, из-за промоя мелких волокон и воздействия процесса сушки образцы бумаги на накате отличаются более высокой пухлостью по сравнению с образцами бумажной массы из напорного ящика. Кроме того, бумага машинной выработки обладает преимущественной ориентацией волокон в машинном направлении. Для суперкаландрированной бумаги характерны более плотная структура и наличие необратимых пластических деформаций (возникающих при прохождении бумаги через суперкаландр) в поверхностных слоях.

Как видно из табл. 3 и рисунка, способность сопротивляться внешней растягивающей нагрузке у образцов бумаги машинной гладкости выше по сравнению с образцами лабораторного изготовления (бумажная масса из напорного ящика).



Влияние процессов производства бумаги на БДМ и суперкаландрирования: 1 – бумага после суперкаландрирования; 2 – бумага на накате; 3 – бумажная масса из напорного ящика

Образцы бумаги на накате, несмотря на более высокую пухлость, отличаются большей величиной пороговых напряжений (σ_1 , σ_3 , σ_p) и модулей упругости на различных этапах нагружения (E_1 , E_3 , E_2) по сравнению с лабораторными отливками. Абсолютные значения упругой ϵ_1 и эффективной ϵ_3 деформаций у этих образцов также выше. В тоже время, при развитии интенсивных пластических деформаций на завершающем этапе нагружения разрушение образцов происходит при меньшей вели-

чине деформации. Рост жесткости и прочности при растяжении в данном случае можно отнести на счет возникающей при машинном отливе ориентации волокон в продольном направлении. По той же причине наблюдается значительный прирост жесткости при изгибе. Известно [6], что с ростом пухлости однородность и гладкость поверхности бумаги снижаются. Результат этого – сокращение площади контакта между поверхностями образца и печатной формы при испытаниях, и, как следствие, возникновение массового выщипывания происходит при более высоких скоростях.

Результатом уплотнения структуры и снижения толщины бумажного листа после суперкаландрирования является рост величины пороговых напряжений, возникающих в образце в процессе приложения к нему нагрузки, при практически не меняющихся деформациях на различных этапах нагружения, т. е. наблюдается увеличение жесткости при растяжении (см. рисунок).

Необходимо отметить значительное снижение после суперкаландрирования жесткости бумаги при изгибе и прочности ее поверхности. В первом случае это обусловлено сокращением толщины материала при уплотнении структуры бумаги. Снижение величины СПВ происходит как из-за уменьшения пухлости и выглаживания поверхности бумаги, так и из-за частичного разрушения межволоконных связей в поверхностных слоях.

Отметим, что при прохождении бумаги через БДМ коэффициент вариации возрастает практически у всех представленных характеристик. Это может быть обусловлено недостаточно высокой стабильностью параметров

работы БДМ и свидетельствует о важности правильного выбора технологических параметров, непрерывный контроль и регулирование которых позволяют производить бумагу стабильного качества. Обработка бумаги в суперкаландре в целом незначительно сказывается на величине коэффициента вариации исследуемых характеристик. Исключение в данном случае составляют модуль упругости в области предразрушения E_2 , предел упругости σ_1 , жесткость при изгибе EI (коэффициенты вариации для этих характеристик возрастают) и СПВ (снижение степени изменчивости обусловлено значительным падением прочности поверхности).

В целях определения влияния структуры бумаги на взаимосвязь основных физико-механических характеристик был проведен корреляционный анализ, в ходе которого оценена теснота связи между наиболее важными прочностными и деформационными свойствами исследуемых материалов. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 4.

Из данных табл. 4 следует, что коэффициенты корреляции характеристик прочности поверхности с характеристиками деформативности незначимы.

Таблица 4

Корреляция характеристик прочности и деформативности

Характеристики	E_1	E_3	E_2	σ_1	σ_3	σ_p	ε_p	EI
Бумажная масса из напорного ящика								
L	0,655	0,706	0,348	0,648	0,570	0,814	0,249	0,444
A_p	0,379	0,237	-0,288	0,621	0,625	0,715	0,678	0,478
P_{zc}	-0,140	-0,167	-0,261	0,090	0,227	0,035	0,074	-0,074
P_{zg}	0,066	0,251	0,446	0,001	0,086	0,138	-0,262	-0,085
Бумага на накате								
L	0,627	0,733	0,429	0,431	0,669	0,821	0,250	0,388
A_p	0,090	0,182	0,112	0,210	0,634	0,780	0,843	0,268
P_{zc}	0,064	0,072	-0,208	0,256	0,256	0,173	0,046	0,110
P_{zg}	0,195	0,210	-0,180	0,279	0,324	0,292	0,073	0,208
Бумага после суперкаландра								
L	0,785	0,715	0,549	0,404	0,714	0,859	0,282	0,603
A_p	0,545	0,533	0,488	0,310	0,502	0,829	0,795	0,415
P_{zc}	0,304	0,169	-0,042	-0,022	-0,089	-0,209	-0,128	-0,554
P_{zg}	-0,231	-0,179	0,023	-0,325	0,010	-0,088	-0,030	-0,475

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции ($r \geq 0,627$).

Прочность при приложении растягивающей нагрузки определяли по двум характеристикам: разрывной длине L , учитывающей массу образца, и работе разрушения A_p , оценивающей динамическую прочность бумаги. Обращает на себя внимание, что образцы, отобранные на разных стадиях производства, имеют различные коэффициенты парной корреляции. Кроме того, исследуемые характеристики прочности либо не коррелируют с харак-

теристиками деформативности, либо коррелируют избирательно. Так, характеристики прочности не обнаруживают значимой корреляции с модулем упругости в области предразрушения и жесткостью при изгибе. Разрывная длина во всех случаях значимо коррелирует с начальным и эффективным модулями упругости и разрушающим напряжением. Для лабораторных образцов, в которых отсутствует ориентация волокон, характерна значимая корреляция с пределом упругости, а для бумаги машинного изготовления, отобранной на накате, – с эффективным напряжением. У исследуемых материалов обнаружена значимая корреляция работы разрушения с деформацией разрушения и пороговыми напряжениями на различных этапах нагружения. Характер и теснота корреляции последних претерпевают изменения при переходе от одного вида материала к другому. Для лабораторных образцов отмечена значимая корреляция со всеми пороговыми напряжениями; для бумаги, отобранной на накате, – с эффективным и разрушающим напряжениями, для суперкаландрированной бумаги – с разрушающим напряжением. Это свидетельствует об избирательности влияния механического поведения материалов различной структуры на их динамическую прочность.

Второй этап (активный эксперимент). Известно, что качество производимой бумаги в значительной степени зависит от соотношения скоростей поступающей бумажной массы и сетки БДМ [13]. При выработке большинства видов бумаги (на плоскосеточных машинах) рекомендуемое соотношение скоростей струи массы и сетки БДМ (K_n) составляет 0,94 ... 0,98.

При проведении эксперимента соотношение варьировали от 0,97 (оставание скорости струи на 25 м/мин) до 1,02 (скорость струи опережает скорость сетки на 15 м/мин). Такие пределы были определены условиями эксплуатации БДМ с двухсеточной системой формования. Изменение относительной скорости поступления массы на сетку осуществляли изменением скорости струи массы при постоянной скорости сетки, равной 770 м/мин. Остальные параметры были стабилизированы. В табл. 5, 6 представлены результаты микроскопических исследований и испытаний образцов суперкаландрированной бумаги, отобранной при различных соотношениях скоростей струи массы и сетки. Возрастание K_n вызывает изменение условий формования бумажного полотна и ориентации волокон, о чем свидетельствует сокращение промоя мелкого волокна (возрастает относительное содержание фракций с длиной волокна менее 1,8 мм и уменьшается средняя длина волокна l_{cp}) и снижение пухлости V . Изменения в ориентации волокон приводят к снижению нулевой разрывной длины L_0 . Величина межволоконных сил связи, характеризующаяся в данном эксперименте адгезией по Скотту F_z , практически не изменяется.

Таблица 5

**Относительное содержание (%) фракций волокон
в структуре бумаги**

Размер фракции, мм	Коэффициент напуска		
	0, 97	0, 99	1, 02
Менее 0,6	6,5	6,2	7,6

0,6...1,2	52,5	57,1	51,4
1,2...1,8	26,3	26,9	32,9
1,8...2,4	6,3	4,9	4,7
2,4...3,0	5,4	2,7	2,9
3,0...3,6	2,7	1,6	0,5
3,6...4,2	0,2	0,7	0,0
Более 4,2	0,0	0,0	0,0

При постоянстве скорости сетки и концентрации массы в напорном ящике увеличение скорости струи приводит к тому, что количество абсолютно сухого вещества, поступающего на сетку, возрастает. Этим объясняется тенденция к росту массы 1 м^2 при увеличении соотношения скоростей K_n .

Описанные выше изменения в структуре бумаги приводят к росту жесткости при растяжении, о чем можно судить по численным значениям модулей на различных этапах нагружения. В упругой области это явление объясняется повышением предела упругости, обусловленного уплотнением структуры и снижением степени ее анизотропности. В вязкоупругой и пластической областях увеличение способности материала сопротивляться внешней нагрузке, по всей видимости, вызвано как уплотнением структуры, так и сокращением относительного содержания длинноволокнистых фракций волокон.

Максимальная величина жесткости бумаги при изгибе наблюдалась при $K_n = 0,99$. Можно предположить, что в этом случае наиболее благоприятным оказалось сочетание факторов, влияющих на жесткость при изгибе (таких как пухлость и ориентация волокон в машинном направлении).

Обращает на себя внимание то, что, несмотря на рост жесткости, величины прочностных характеристик, полученных при испытаниях на растяжение, снижаются. Вероятнее всего, это обусловлено, во-первых, сокращением числа волокон, ориентированных вдоль оси приложения нагрузки и способных наиболее эффективно воспринимать ее (о чем свидетельствует и характер изменения нулевой разрывной длины, т. е. прочности волокна), во-вторых, увеличением дефектности структуры, связанной с «набеганием» массы на сетку при увеличении скорости струи. В пользу последнего утверждения свидетельствует тот факт, что при $K_n = 1,02$ коэффициенты вариации подавляющего большинства представленных в табл. 6 характеристик максимальны.

Сопротивление офсетной бумаги излому с ростом K_n снижается. Этот факт представляется вполне закономерным, если учесть, что доля

Таблица 6
Влияние величины K_n на характеристики офсетной бумаги

Характеристики	Численные значения характеристик при различных значениях K_n					
	0,97		0,99		1,02	
	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %
Фундаментальные:						

F_z , Дж/м ²	136	4,3	135	6,5	140	2,3
V , см ³ /г	1,46	5,7	1,39	3,6	1,35	4,4
L_0 , м	6540	1,9	6060	9,9	5550	13,2
l_{cp} , мм	1,26	7,9	1,19	1,4	1,17	5,7
d_{cp} , мкм	34,1	4,0	33,6	5,9	32,3	1,1
M^* , г	55,1	4,0	55,6	3,0	56,4	0,6
Деформационные:						
E_1 , МПа	8410	3,9	8720	3,1	9080	15,7
E_3 , МПа	3470	6,8	3810	2,4	4030	17,3
E_2 , МПа	1440	10,9	1660	7,2	1780	21,1
σ_1 , МПа	11,4	1,9	11,8	4,6	12,1	11,3
σ_3 , МПа	16,4	1,3	15,7	7,0	16,7	17,3
σ_p , МПа	35,5	2,8	34,5	10,7	35,5	13,4
ε_1 , %	0,14	3,3	0,14	5,8	0,14	5,8
ε_3 , %	0,28	7,4	0,24	7,2	0,25	24,4
ε_p , %	1,18	4,0	1,09	11,6	1,03	10,7
EJ , мН·см ²	28,7	2,0	29,6	13,6	26,1	0,8
Прочностные:						
P , Н	45,0	3,1	42,7	9,4	42,7	10,9
L , м	5440	2,3	5110	7,5	5060	11,2
A_p , мДж	33,1	5,4	29,2	20,3	27,1	21,0
N , ч. д. п.	22	4,2	19	15,5	18	7,9
P_{z6} , м/с	1,73	11,9	1,50	14,4
$P_{zс}$, м/с	2,13	15,5	2,13	4,4

* Здесь и далее, в табл. 8, M – масса 1 м² бумаги.

длинных волокон и степень их ориентации в машинном направлении с увеличением скорости струи уменьшаются.

СПВ с внешней стороны бумажного листа с увеличением относительной скорости поступления массы на сетку (в силу роста доли коротких волокон и уплотнения структуры) имеет тенденцию к снижению. С сеточной стороны изменения величины СПВ не наблюдается.

Представленные выше данные свидетельствуют об избирательности воздействия исследуемого фактора на характеристики деформативности и прочности, что позволяет путем варьирования K_n целенаправленно воздействовать на ту или иную группу характеристик.

Отметим, что выделить оптимальные (с точки зрения величин прочности и деформативности материала) условия напуска массы на сетку достаточно трудно, так как во всех трех случаях величины начального модуля упругости и разрывной длины значительно превышали нормируемые или минимально допустимые значения, которые составляют 4000 МПа для начального модуля [9] и 3700 м для разрывной длины [8]. Это делает приемлемыми все три варианта напуска массы. Однако, как видно из табл. 6, вариация представленных характеристик по ширине бумажного полотна возрастает по мере увеличения относительной скорости поступления массы на сетку БДМ, причем, когда величина K_n составляет 0,99 и, особенно, 1,02, коэффициенты вариации характеристик деформативности и прочности зна-

чительно выше 5 % (что можно считать нормой). Таким образом, с точки зрения стабильности свойств бумаги по ширине полотна оптимальным вариантом является выработка бумаги при относительной скорости поступления массы на сетку БДМ, равной 0,97.

Определенный интерес для управления качеством офсетной бумаги имеет динамика прочности и деформативности при варьировании массы 1 м^2 бумаги в рамках, допускаемых требованиями технических условий и технологического регламента. При проведении эксперимента изменение величины исследуемого параметра достигалось путем варьирования величины массы 1 м^2 в автоматической системе регулирования Аккурей.

Из табл. 7, где представлены результаты испытаний образцов бумаги с различной массой 1 м^2 , видно, что увеличение этого показателя (даже в небольшом интервале) сопровождается значительными структурными изменениями. Об этом свидетельствует снижение величины таких характеристик, как пухлость материала, средняя длина и ширина волокна. Прочность межволоконных связей, характеризуемая в данном эксперименте адгезией по Скотту, также снижалась. Эти факты представляются вполне закономерными, так как с увеличением массы 1 м^2 бумаги возрастает толщина папки волокон на сетке БДМ, через которую происходит фильтрация воды в подсеточное пространство. Это приводит к интенсификации удержания мелких волокон, основную массу из которых, по всей видимости, составляет слабо фибриллированная мелочь механических масс (ХТММ и ТММ).

Несмотря на последнее обстоятельство, увеличение числа контактов между волокнами, имеющее место при снижении пухлости, способствует росту большинства характеристик деформативности и прочности бумаги. Исключения составляют жесткость при изгибе, имеющая максимум при массе 1 м^2 , равной 57 г, и сопротивление излому (величина убывает).

Из-за повышенного содержания коротковолокнистых фракций, более низкой прочности межволоконных связей и пониженной пухлости образцы с массой 60 г/м^2 имели наиболее низкие значения СПВ, причем с внешней стороны листа значение этой характеристики оказалось меньше минимально допустимого.

Однозначной зависимости для динамики степени изменчивости исследуемых характеристик обнаружено не было. Отметим лишь, что минимальные значения коэффициентов вариации в большинстве случаев наблюдаются у образцов с массой 57 г/м^2 .

Влияние массы 1 м^2 на физико-механические характеристики офсетной бумаги

Характеристики	Численные значения характеристик при массе 1 м^2 , г					
	55		57		60	
	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %
Фундаментальные:						

F_z , Дж/м ²	170	...*	160	...	145	...
V , см ³ /г	1,50	...	1,47	...	1,20	...
L_0 , м	6740	...	7000	...	6190	...
l_{cp} , мм	1,12	...	1,14	...	1,03	...
d_{cp} , мкм	33,4	...	29,5	...	30,4	...
Деформационные:						
E_1 , МПа	7352	12,5	7770	6,6	8550	11,5
E_3 , МПа	3280	15,4	2840	-	3790	13,0
E_2 , МПа	1540	10,0	1250	-	1740	15,5
σ_1 , МПа	10,3	10,4	10,5	7,7	11,8	8,9
σ_3 , МПа	13,6	9,9	14,4	2,4	15,7	10,8
σ_p , МПа	30,9	11,0	34,1	1,6	41,3	6,7
ε_1 , %	0,15	7,4	0,14	6,2	0,14	4,7
ε_3 , %	0,23	13,9	0,26	-	0,24	22,6
ε_p , %	1,20	17,1	1,42	8,5	1,48	10,0
EI , мН·см ²	31,9	...	35,5		31,1	...
Прочностные:						
P , Н	40	9,1	45	5,0	47	5,8
L , м	4940	9,0	5240	4,5	5220	3,1
A_p , мДж	30,4	26,6	40,0	13,9	42,7	15,4
N , ч. д. п.	42	...	41	...	35	...
P_{z6} , м/с	1,60	...	1,70	...	1,30	...
$P_{zс}$, м/с	2,10	...	2,10	...	1,90	...

* Вариацию в данном эксперименте оценивали у характеристик, полученных при испытаниях на растяжение.

Представленные данные свидетельствуют о неоднозначном влиянии массы 1 м² бумаги на характеристики, определенные при приложении различных видов нагрузки. В частности, увеличение жесткости и прочности при растяжении сопровождается снижением прочности поверхности бумажного листа (вплоть до значений ниже нормируемых). Таким образом, выработка бумаги с повышенными показателями деформативности и прочности, обеспечиваемая увеличением массы 1 м² (в допустимых технических условиях рамках), требует принятия дополнительных мер по повышению прочности поверхности.

В качестве таковых могут быть предложены различные варианты проведения подготовки бумажной массы к отливу: размол целлюлозных полуфабрикатов при повышенных концентрациях и присадках, т. е. в условиях наиболее сильной фибриляции [12]; размол механических масс при пониженных концентрациях и средних присадках [11]; некоторое увеличение в композиции относительного содержания ТММ и снижение расхода флокулянта [13]. Последние три мероприятия приведут к повышению пухлости, следствием чего будет снижение площади контакта между поверхностью бумаги и печатной формы, что и будет способствовать повышению СПВ.

Наряду с условиями отлива существенное влияние на механическое поведение готовой бумаги оказывают условия ее сушки. При стабильном температурном режиме особый интерес представляет влияние факторов,

ограничивающих усадку бумаги, а именно натяжение бумажного полотна и сушильных сукон. Автор монографии [13], ссылаясь на работы А.Д. Абрамовича, Н.Г. Штольца, А.М. Рацкера и др., отмечает, что создание условий, ограничивающих усадку бумаги при сушке, приводит к снижению деформации разрушения (растяжимости бумаги), а также увеличению прочности при растяжении и снижению прочности при других типах нагружения (излом, продавливание).

При проведении эксперимента исследовали влияние натяжения сушильного сукна в третьей сушильной группе (исследуемая сушильная часть имеет 5 сушильных групп). Сухость бумажного полотна на этом участке превышает 60 %, т. е. процесс межволоконной усадки на данном этапе уже завершен. Усадка отдельных волокон вносит наиболее существенный вклад в общую усадку бумажного полотна и наиболее сильно проявляется в поперечном направлении. Таким образом, нам представилась возможность оценить влияние фактора, ограничивающего усадку бумаги в поперечном направлении и снижающего вклад усадки отдельных волокон в общий показатель.

Принимая во внимание этот факт, а также то, что в композиция исследуемой бумаги на 75 % состоит из механических масс (в литературе представлены результаты исследования бумаг из целлюлозы) и интервал варьирования натяжения сушильного сукна был небольшой, можно было предположить получение результатов, отличных от описанных в литературе.

По данным работы [14] усадка бумаги способствует наиболее полному проявлению всех видов связи между волокнами. Поэтому ужесточение условий, ограничивающих усадку полотна, должно ослаблять межволоконные связи в бумаге, что, хотя и в незначительной степени, имело место в данном эксперименте (табл. 8). Однако снижение прочности межволоконных связей не привело к адекватному снижению прочности при растяжении. Величины разрушающего усилия и разрывной длины остались практически неизменны и даже имели тенденцию к росту. Можно предположить, что последнее обстоятельство обусловлено ростом собственной прочности волокна. Соппротивление офсетной бумаги излому с увеличением степени натяжения сукна снижалось, что согласуется с данными других авторов. Прочность поверхности при более сильном натяжении сушильного сукна оказалась выше. Значимый рост имеет и величина работы разрушения, что объясняется ростом деформации разрушения.

11*

Таблица 8

Влияние натяжения сушильного сукна в третьей сушильной группе на физико-механические характеристики офсетной бумаги

Характеристики	Численные значения характеристик при натяжении сукна, кН/м			
	1,3		1,5	
	\bar{X}	V, %	\bar{X}	V, %
Фундаментальные: $F_z, \text{Дж/м}^2$	140	1,4	135	2,8

V , см ³ /г	1,33	1,9	1,34	2,2
L_0 , м	5960	5,3	6630	7,3
l_{cp} , мм	1,24	1,9	1,19	5,5
M , г	58,0	1,1	58,0	0,9
Деформационные:				
E_1 , МПа	8870	5,4	7630	5,8
E_3 , МПа	3470	6,2	3228	9,5
E_2 , МПа	1500	6,6	1410	14,7
σ_1 , МПа	11,6	3,8	11,6	2,9
σ_3 , МПа	15,3	2,0	15,1	2,3
σ_p , МПа	34,5	2,3	34,8	1,6
ε_1 , %	0,14	3,5	0,16	8,7
ε_3 , %	0,23	10,5	0,25	9,0
ε_p , %	1,23	1,6	1,39	2,3
EI , мН·см ²	25,8	9,6	30,8	6,7
Прочностные:				
P , Н	42	2,3	43	2,2
L , м	4850	1,9	4990	2,0
A_p , мДж	32,9	3,1	37,9	4,1
N , ч. д. п.	23	8,6	18	18,1
P_{z6} , м/с	1,30	5,8	1,80	2,3
$P_{zс}$, м/с	1,50	8,3	1,90	5,4

Снижение жесткости, наиболее ярко проявляющееся в упругой области, и рост доли пластической деформации представляются закономерными. Снижение числа межволоконных связей, которое может и, скорее всего, имеет место при ограничении усадки волокон (о чем свидетельствует снижение величины адгезии по Скотту), а также возникающие в процессе ограниченной усадки волокон напряжения в структуре бумажного листа привели к большей податливости связей и, как следствие, к снижению жесткости в начальный период нагружения.

Известно, что процесс пластической деформации обусловлен смещением структурных элементов относительно друг друга. Сокращение числа межволоконных контактов делает волокна более подвижными и дает им возможность в большей степени перемещаться относительно друг друга до наступления предела прочности при возникновении пластических деформаций. Увеличение прочности волокон усиливает этот эффект. Этим, видимо, объясняется увеличение общей деформации образцов до разрушения.

Кроме того, представленные в табл. 8 данные, характеризующие степень изменчивости исследуемых характеристик, свидетельствуют о снижении стабильности величин большинства показателей. Скорее всего, это связано с неравномерностью натяжения различных участков сукна по длине сушильных цилиндров БДМ, обрезная ширина которой составляет 8400 мм.

Как и в предыдущих случаях, изменение степени натяжения сушильного сукна вызывает различные по характеру изменения свойств деформативности и прочности.

Проделанная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Установлено высокое варьирование характеристик качества бумаги как на накате БДМ, так и после суперкаландрирования. Наибольший коэффициент вариации наблюдается у начального модуля упругости, который дополнительно возрастает после суперкаландрирования бумаги.

2. Показано, что стойкость поверхности к выщипыванию с внешней стороны листа имеет более высокий коэффициент вариации по сравнению с сеточной стороной.

3. Установлено, что в условиях заданного регламента производства значимо коррелируют следующие характеристики: разрывная длина – линейное давление прессования на последнем третьем прессе, начальный модуль упругости – линейное давление прессования на том же прессе и скорость дуоформера, жесткость при изгибе – два перечисленных выше показателя и вакуум в первой камере гауч-вала.

4. Показано, что у образцов, отобранных на накате БДМ, коэффициент вариации возрастает практически у всех исследуемых характеристик деформативности и прочности по сравнению с образцами, отобранными из напорного ящика, что свидетельствует о важности научно обоснованного выбора параметров производства, непрерывный контроль и регулирование которых позволят производить бумагу стабильного качества.

5. Суперкаландрирование бумаги вызывает возрастание коэффициентов вариации таких характеристик деформативности, как начальный модуль упругости, предел упругости и жесткость при изгибе. У остальных исследуемых характеристик коэффициент вариации изменяется незначительно.

6. Установлено, что изменения структуры, возникающие в процессе производства бумаги, оказывают избирательное влияние на характер и тесноту корреляции динамической прочности, характеризуемой работой разрушения, с показателями описывающими механическое поведение материала на различных этапах нагружения, что необходимо учитывать при переносе данных, полученных в лаборатории, в условия реального производства.

7. Разрывная длина вне зависимости от типа структуры обнаруживает значимую корреляцию с разрушающим напряжением, начальным и эффективным модулями упругости. Прочность поверхности значимо не коррелирует ни с одной из исследованных деформационных характеристик.

8. Установлено, что для повышения характеристик деформативности офсетной бумаги величина $K_{\text{н}}$ должна возрастать (в пределах от 0,97 до 1,02), а для повышения характеристик прочности – снижаться.

9. Показано, что увеличение массы 1 м² с 55 до 60 г способствует повышению жесткости при растяжении, прочностные характеристики при этом изменяются слабо.

10. Повышение степени натяжения сушильного сукна в третьей сушильной группе ведет к снижению жесткости и незначительному росту прочности при растяжении.

11. Показана избирательность влияния параметров работы БДМ на характеристики деформативности и прочности, что позволяет осуществлять целенаправленное воздействие на ту или иную группу характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Иванов С.Н. Технология бумаги. - М.: Лесн. пром-сть, 1970.- 696 с.
- [2]. Кларк Дж. Технология целлюлозы.- М.: Лесн. пром-сть, 1983. - 456 с. [3]. Комаров В.И. Влияние технологических факторов на характеристики деформативности и прочности сульфатной небеленой целлюлозы // Учеб. пособие. - Архангельск: РИО АГТУ, 1994.- 71 с. [4]. Комаров В.И., Филиппов И.Б. Деформативность и прочность полуфабрикатов, используемых для производства бумаги для офсетной печати// Лесн. журн. - 1995. - № 4 – 5. - С. 104 - 121. - (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Комаров В.И., Филиппов И.Б. Смеси волокнистых полуфабрикатов и их влияние на деформативность и прочность бумаги для офсетной печати// Лесн. журн. - 1997. - № 5. - С. 45-54.- (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Остреров М.А., Гончарова Т.И., Федорова Т.А. Стойкость поверхности бумаги к выщипыванию // Целлюлоза, бумага и картон. - 1994. - № 7 - 8. - С. 20-21. [7]. Силенко П. М. Динамика бумажного листа в транспортных системах полиграфических машин: Дис. ... д-ра техн. наук. - М., 1993. - 155 с. [8]. ТУ 13-0281020-111– 91. Бумага книжно-журнальная для офсетного способа печати. [9]. Факторы, определяющие качество прохождения бумаги через печатную машину/ М. А. Остреров, А. Б. Курятников, Т. И. Кудряшова и др. // Целлюлоза, бумага и картон. - 1993. - № 1. - С. 26-29. [10]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Влияние компонентов бумажной массы на деформативность и прочность книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати // Лесн. журн. - 1998. - № 1. - С. 66-83. - (Изв. высш. учеб. заведений). [11]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Влияние процесса размола на деформативность и прочность механических масс, используемых для производства книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати // Лесн. журн. - 1996. - № 6 - С. 111-123. - (Изв. высш. учеб. заведений). [12]. Филиппов И.Б., Комаров В.И. Влияние процесса размола на деформативность и прочность целлюлозных полуфабрикатов, используемых для производства книжно-журнальной бумаги для офсетного способа печати // Лесн. журн. - 1996. - № 3 - С. 96 - 113. - (Изв. высш. учеб. заведений). [13]. Фляте Д.М. Свойства бумаги.- 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Лесн. пром-сть, 1986. - 680 с. [14]. Фролов М.В. Структурная механика бумаги (бумажных текстильных материалов из химических и натуральных волокон).- М.: Лесн. пром-сть, 1982.- 272 с. [14]. Шустов А.Д. Процессы деформации бумажного полотна.- М.: Лесн. пром-сть, 1969 .- 200 с.

Поступила 7 мая 1998 г.