

Используя зависимости (10), (11), предполагается разработать алгоритм расчета габаритов плотов в динамике спада уровней в реке за весеннее половодье, что позволит организовать подготовку и буксировку плотов по оптимальной технологии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драчев У. С., Соколов О. М., Федоров Н. А. Научно-техническая политика и инновационная деятельность в химико-лесном комплексе Архангельской области: Тез. докл. науч.-практ. конф. «Научно-техническая политика и развитие новых отраслей экономики Архангельской области». – Архангельск, 1998. – С. 14–15.

2. Харитонов В. Я., Вихарев А. Н., Главатских Н. С. Метод приближенной оценки лесотранспортных возможностей равнинных рек // Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск, 1998. – С. 232–240.

Архангельский государственный технический университет

Поступила 19.01.99

*V.Ya. Kharitonov, N.S. Glavatskikh*

### **Mathematical Simulation of the Cross Section for Small and Medium Lowland Rivers**

The natural cross sections for small and medium rivers of the Severodvinsk basin on reaches and rifts have been studied. The analytical dependencies have been selected for building the theoretical cross section of the river. The formulas for the dependence of the river width on its depth have been obtained.

УДК 676. 017

*В.И. Комаров, М.Ю. Кузнецова*

Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор 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.



Кузнецова Мария Юрьевна родилась в 1974 г., окончила в 1997 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Область научных интересов – исследование деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ НАПОЛНЕНИЯ БУМАГИ НА ЕЕ ВЯЗКОУПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Показано, что переменные факторы наполнения бумаги неоднозначно влияют на ее вязкоупругие свойства.

Введение наполнителя в сложную гетерогенную структуру бумаги приводит к возникновению дополнительной неравномерности связей между элементами структуры [1, 8]. Эта неравномерность – одна из причин высокой вариации физико-механических характеристик бумажного листа. Бумага, как и большинство реальных тел, проявляет в зависимости от условий как вязкие, так и упругие свойства, обладает свойствами жидкостей и твердых тел, т. е. является вязкоупругим материалом, в котором наряду с мгновенными упругими деформациями развиваются мгновенные неупругие, величины которых зависят от времени или скорости нагружения [4, 7].

Нами исследовано совместное влияние переменных факторов наполнения бумаги (т. е. соотношения целлюлозного волокна, наполнителя и сернокислого алюминия) на ее вязкоупругие и прочностные свойства.

В лабораторных условиях были изготовлены четыре серии образцов из лиственной беленой сульфатной целлюлозы, размолотой до 35° ШР:

1 – с различным содержанием каолина; зольность образцов изменялась от 0,4 (у бумаги без наполнителя) до 22,4 %; масса  $1 \text{ м}^2$  постоянная и равна  $75 \text{ г/м}^2$ , т. е. количество волокна  $m$  снижалось с увеличением содержания наполнителя, расход глинозема при этом увеличивался;

2 – с различным содержанием каолина; содержание наполнителя соответствовало образцам серии 1, но при этом масса волокна постоянная, т. е. возрастала масса  $1 \text{ м}^2$ ;

3 – без наполнителя с различным количеством волокна, соответствующим по массе волокна образцам серии 1;

4 – без наполнителя с различными количеством волокна и расходом глинозема на отливку; расход глинозема соответствовал образцам серии 1.

Образцы исследованы при приложении растягивающей нагрузки (скорость 50 мм/мин) с получением и обработкой кривой зависимости напряжение – деформация ( $\sigma - \epsilon$ ); определены межволоконные силы связи по Иванову  $F_{св}$ , нулевая разрывная длина  $L_0$ , сопротивления раздиранию  $R$  и продавливанию  $P$ . Используются методики испытаний работ [3, 5].

Результаты экспериментов приведены в таблице и на рисунке, где величины характеристик представлены в процентах (за 100 % принята величина соответствующего показателя для образца, изготовленного из волокна без добавок, масса  $1 \text{ м}^2 - 75 \text{ г}$ ). Для серий 1, 3, 4 построены зависимости характеристик от величины, обратной массе волокна, для серии 2 (с постоянной массой волокна) – от зольности.

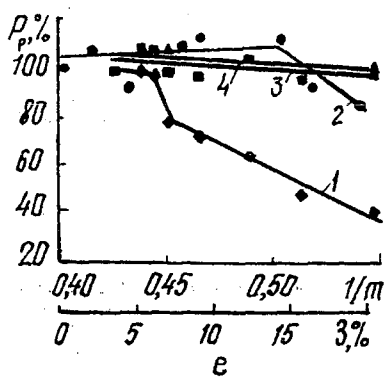
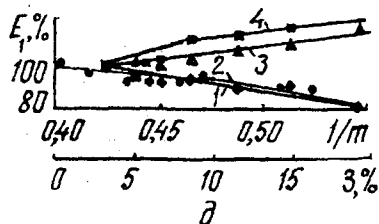
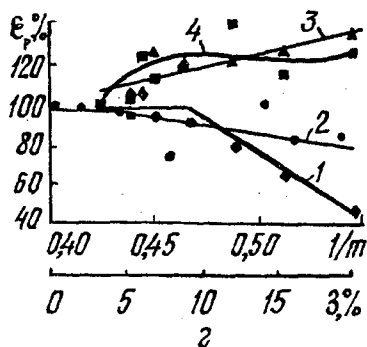
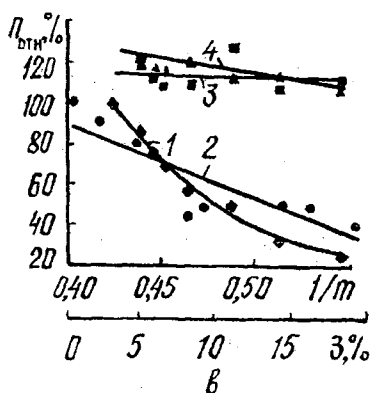
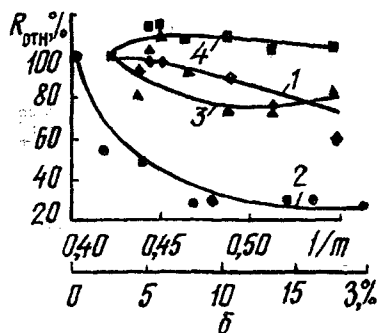
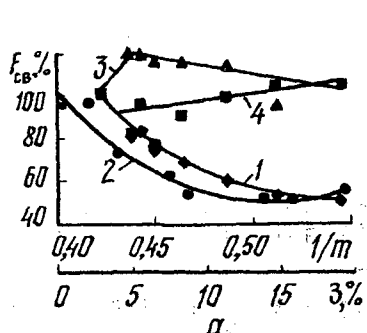
**Прочностные и вязкоупругие показатели образцов бумаги**

Номер серии	Зольность* или количество глинозема**	Масса волокна, г	$F_{св}$ , МПа	$L_0$ , м	$P_p$ , Н	$L$ , м	$R_{отн}$ , мН	$P_{отн}$ , кПа	$E_1$ , МПа	%					
										$\epsilon_p$	$\epsilon_1/\epsilon_p$	$E_2/E_1$	$E_3/E_1$	$E_4/E_1$	$\sigma_p/E_1$
1	0,4	2,36	<b>1,59***</b>	8 500	<b>84,9</b>	7 400	<b>799</b>	<b>468</b>	<b>4 750</b>	<b>2,15</b>	24,2	43,8	29,2	14,9	1,78
	3,6	2,28	1,28	8 200	82,8	7 300	749	408	4 600	2,55	20,6	38,7	25,8	12,7	1,40
	4,4	2,25	1,33	8 300	80,6	7 100	779	356	4 450	2,23	23,7	36,2	29,0	12,8	1,41
	5,8	2,22	1,16	7 600	66,8	5 900	774	324	4 450	2,00	17,8	39,6	28,3	12,8	1,14
	8,3	2,15	1,10	7 900	60,8	5 400	741	265	4 500	2,10	24,8	47,4	31,6	15,0	1,03
	12,2	2,05	0,94	6 800	54,9	4 900	724	232	4 300	1,67	25,9	47,6	31,8	15,4	0,97
	15,8	1,95	0,83	5 900	41,2	3 800	611	151	4 300	1,38	27,3	48,1	34,0	17,2	0,74
	20,3	1,83	0,82	5 700	36,6	3 300	478	114	3 850	1,01	24,8	53,0	35,3	20,1	0,72
	2	2,2	2,36	1,53	9 000	73,1	8 700	730	424	6 300	2,14	43,7	40,8	40,8	18,6
4,7		2,36	1,16	10 300	63,2	7 500	748	382	5 750	2,07	40,4	48,1	28,8	15,6	1,17
8,1		2,36	0,97	9 100	76,6	6 400	838	219	4 100	1,61	59,6	69,7	69,7	47,8	1,32
9,3		2,36	0,85	8 600	80,9	6 400	729	232	3 700	1,97	57,4	37,3	49,7	26,8	1,43
14,5		2,36	0,82	8 500	82,1	6 300	765	240	2 450	2,14	55,4	45,9	34,4	17,2	1,44
16,4		2,36	0,82	8 800	72,5	5 300	723	230	3 350	1,77	60,7	48,7	24,3	18,7	1,26
19,6		2,36	0,87	8 300	71,9	4 900	779	193	3 100	1,78	57,7	62,1	37,3	30,1	1,30
3	–	2,28	1,92	7 800	93,0	8 700	854	555	4 850	2,22	48,5	58,0	46,4	25,2	1,51
	–	2,25	1,90	8 200	91,0	8 600	907	551	4 750	2,28	49,3	57,6	47,1	24,7	1,54
	–	2,22	1,86	7 900	92,9	8 800	914	548	4 750	2,70	37,6	58,4	48,7	21,6	1,54
	–	2,15	1,84	7 400	89,0	9 000	856	562	4 900	2,59	40,1	50,8	40,7	21,1	1,55
	–	2,05	1,82	7 500	89,1	9 100	863	532	5 050	2,63	38,4	48,5	38,8	21,4	1,49
	–	1,95	1,53	7 000	84,8	9 100	816	534	5 200	2,72	35,1	50,1	35,2	18,9	1,45
	–	1,83	1,72	7 100	86,3	9 700	837	507	5 600	2,89	29,8	51,9	34,6	18,8	1,46
4	0,09	2,28	1,3	9 400	94,2	8 600	662	567	4 550	1,99	73,3	54,9	27,5	18,1	1,60
	0,19	2,25	1,51	8 800	93,0	8 800	828	522	4 800	2,62	43,2	51,4	30,8	12,7	1,58
	0,32	2,22	1,21	8 800	84,5	8 900	873	501	4 850	2,42	50,1	55,4	26,1	16,5	1,57
	0,42	2,15	1,44	8 300	83,3	8 700	738	511	5 300	2,54	39,0	46,4	24,5	17,0	1,43
	0,78	2,05	1,58	8 100	90,2	9 700	598	597	5 400	2,99	35,4	43,5	35,5	17,9	1,56
	1,02	1,95	1,67	8 200	81,5	9 100	587	500	5 350	2,44	40,7	48,3	38,9	19,5	1,39
	1,64	1,83	1,66	7 800	84,1	9 900	670	524	5 450	2,67	34,0	46,4	37,1	18,9	1,45

\* Серия 1, 2 в процентах

\*\* Серия 4 в г  $Al_2(SO_4)_3$  / г волокна.

\*\*\* Величины, выделенные жирным шрифтом, приняты за 100 % при построении кривых на рисунке.



Зависимость величины межволоконных сил связи  $F_{св}$  (а), относительных: сопротивлений раздиранию  $R_{отн}$  (б) и продавливанию  $\Pi_{отн}$  (г), деформации разрушения  $\epsilon_p$  (з), начального модуля упругости  $E_1$  (д), показателя разрушающего усилия  $P_p$  (е) образцов серий 1 – 4 от количества волокна в отливке  $1/m$  (1, 3, 4) и зольности 3 (2) бумаги (номер кривой совпадает с номером серии)

На рисунке а показано изменение межволоконных сил связи – фундаментальной характеристики, которая во многом определяет вязкоупругие и прочностные свойства материала.

С введением наполнителя величина межволоконных сил связи снижается для серий 1 и 2 примерно одинаково – на 35 %. При увеличении

расхода глинозема межволоконные силы связи растут (в данном случае глинозем оказывает некоторое упрочняющее воздействие, хотя в зависимости от условий он может вести себя и как инертный наполнитель [9]). У образцов серии 3 со снижением массы  $1 \text{ м}^2$  межволоконные силы связи изменяются незначительно, в пределах ошибки опыта. Закон аддитивности при действии различных переменных факторов наполнения на межволоконные силы связи не соблюдается. Наибольшее снижение этого показателя вызывает введение наполнителя в бумагу как при постоянной (серия 1), так и при возрастающей (серия 2) массе  $1 \text{ м}^2$ .

Представленные на рисунках б, в изменения относительных показателей сопротивления раздиранию  $R_{\text{отн}}$  и сопротивления продавливанию  $P_{\text{отн}}$  во многом аналогичны тенденции изменения  $F_{\text{св}}$ .

Величина  $P_{\text{отн}}$  у образцов серии 3 при снижении массы  $1 \text{ м}^2$  практически остается на одном уровне, у образцов серии 4, несмотря на рост межволоконных сил связи, данный показатель также не претерпевает значительных изменений. В образцах с наполнителем при росте зольности показатели  $P_{\text{отн}}$  и  $R_{\text{отн}}$  резко снижаются.  $P_{\text{отн}}$  для серий 1 и 2 снижается пропорционально величине деформации разрушения (рисунок г). Это происходит вследствие уменьшения растяжимости бумаги. Упругие и деформационные свойства материала в значительной степени определяются однородностью структуры. Из графиков, приведенных на рисунках г, д, видно, что для серий 3 и 4 начальный модуль упругости  $E_1$  и деформация разрушения  $\epsilon_p$  несколько возрастают со снижением массы  $1 \text{ м}^2$  волокна при отливе в исследованных нами пределах, так как при этом образуется более однородная структура. Для образцов с наполнителем показатели  $\epsilon_p$  и  $E_1$  с ростом зольности, а следовательно, и с ростом гетерогенности структуры понижаются.

Введение в структуру бумаги наполнителя оказывает значительное влияние на прочность. Процесс наполнения бумаги наряду с разломом вносит наибольшие изменения в структуру бумаги. У наполненных образцов серии 1 с постоянной массой  $1 \text{ м}^2$  происходит скачкообразное уменьшение разрушающего усилия  $P_p$  (рисунок е). Ярко выраженное понижение прочности наблюдается при переходе от образцов с зольностью 4,4 % к образцам с зольностью 6,0 %. Разрушающее усилие снижается на 20 %. У образцов с наполнителем (серия 2) наибольшее снижение статической прочности наблюдается при зольности 14 ... 16 %. В соответствии с теорией протекания [2] при изменении структуры материала возможно скачкообразное изменение механических свойств. Вероятно, в данном случае скачки снижения прочности можно объяснить с позиций этой теории. При достижении критических условий (в данном случае – определенного значения зольности, соответствующего порогу протекания (перколяции)) происходит резкое изменение свойств. Для серий 3 и 4 снижение массы  $1 \text{ м}^2$  и увеличение расхода сернокислого глинозема приводит к незначительному уменьшению  $P_p$ .

Для полной оценки бумаги как вязкоупругого материала недостаточно использовать только характеристику начального модуля упругости [6]. В таблице приведены некоторые из определяемых нами показателей

вязкоупругости, которые были рассчитаны по кривым зависимости напряжение – деформация. Из характеристик вязкоупругости использованы отношения разрушающего напряжения и модулей упругости в характерных точках зависимости напряжение – деформация к начальному модулю упругости –  $E_2/E_1$ ,  $E_n/E_1$ ,  $E_2/E_1$ ,  $\sigma_p/E_1$ , а также вклад упругой деформации в общую деформацию разрушения  $\varepsilon_1/\varepsilon_p$ .

Величина относительного вклада (доли) упругой деформации в деформацию разрушения для серий 1 и 2 с ростом зольности возрастает вследствие увеличения хрупкости бумаги. Для серий 3 и 4 со снижением массы волокна этот показатель уменьшается. Значения характеристики  $\varepsilon_1/\varepsilon_p$  у всех четырех серий различны, наименьшие – у образцов серии 1. Рост неоднородности структуры (для серий 1 и 2 – при увеличении зольности, для серий 3 и 4 – при увеличении массы  $1 \text{ м}^2$ ) приводит к повышению хрупкости бумаги, характеризуемой снижением деформации разрушения и повышением вклада упругой деформации в общую.

С ростом зольности в образцах серий 1 и 2 снижение упругих свойств материала менее ощутимо – отношения  $E_2/E_1$ ,  $E_n/E_1$ ,  $E_2/E_1$  растут. Для серий 3 и 4 со снижением массы волокна наблюдается обратная картина. Самые низкие по величине значения отношений  $E_2/E_1$ ,  $E_n/E_1$ ,  $E_2/E_1$  отмечены у образцов серии 1, т. е. в присутствии минерального наполнителя и при одновременном снижении количества волокна в бумаге в большей степени развиваются пластические деформации по всему объему.

#### Выводы

1. Сопоставив влияние каждого из переменных факторов наполнения на прочностные и вязкоупругие показатели с их суммарным влиянием, можно отметить, что закон аддитивности не соблюдается.

2. Для образцов с наполнителем при достижении определенного значения зольности наблюдается скачкообразное понижение статической прочности  $P_p$ , которое описывает теория протекания. Значение зольности, при котором достигается скачок, можно считать порогом протекания (перколяции). Порог протекания не является постоянной величиной, а зависит в нашем случае от массы  $1 \text{ м}^2$  бумаги.

3. Из всех исследованных факторов наибольшие изменения прочности и деформации разрушения вызывает введение наполнителя. Характеристики вязкоупругости зависят как от изменения зольности, так и количества волокна в отливке.

4. Наблюдается избирательность влияния различных переменных факторов наполнения на показатели вязкоупругости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабурин С.В., Киприанов А.И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 192 с.
2. Займан Дж. Модели беспорядка. – М.: Мир, 1982. – 592 с.