

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА СВОЙСТВА КРАХМАЛЬНОЙ ШЛИХТЫ

*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

### Введение

Качество ошлихтованной пряжи зависит от многочисленных факторов, среди которых можно отметить тип и качество клеящих материалов, рецепт шлихты, методику ее приготовления, характеристики шлихты и др. [1; 2]. Хотя все более расширяется область использования синтетических клеящих материалов, для хлопкобумажной пряжи и близких к ней материалов главными остаются натуральный и модифицированный крахмал или смесь клеящих материалов. На характеристики шлихты, изготовленной из указанных типов клеящих материалов, большое влияние оказывает технологический метод ее приготовления. Качество шлихты, изготовленной из натурального крахмала, в большой степени зависит от используемого метода расщепления.

Среди нетрадиционных методов упоминается и технология расщепления крахмала под воздействием ультразвука, которая обеспечивает быстрое уменьшение макромолекулярных натуральных связей, без использования химических реагентов расщепления [2]. В этой работе излагаются полученные результаты по воздействию ультразвуковой кавитации на процесс приготовления крахмальной шлихты.

### Экспериментальные условия

Главными технологическими параметрами при обработке шлихты с расщеплением крахмала ультразвуковой кавитацией являются: амплитуда ультразвуковых колебаний; температура шлихты; средняя скорость расщепления; время обработки шлихты ультразвуковой кавитацией.

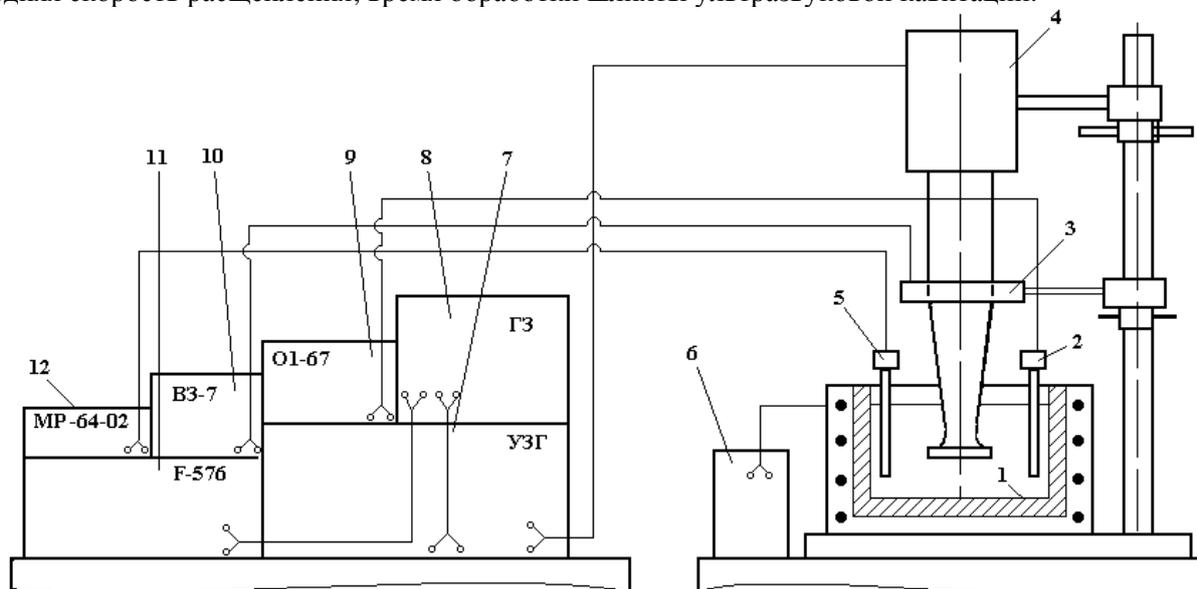


Рис. 1. Схема установки для расщепления крахмала ультразвуковой кавитацией.

1 – ванна для приготовления крахмальной шлихты; 2 – датчик-индикатор кавитации; 3 – датчик для измерения амплитуд колебаний; 4 – преобразователь пьезокерамический; 5 – датчик для измерения температуры; 6 – стабилизатор напряжения; 7–8 – генераторы ультразвука; 9 – осциллограф; 10 – вольтметр; 11 – частотомер; 12 – реле температуры

Полученная шлихта характеризуется: концентрацией  $C$ , %; вязкостью  $\eta$ , с; приклеем пряжи шлихтой  $P_{ш}$ , %.

На лабораторной установке (рис. 1) готовилась крахмальная шлихта в следующих вариантах: концентрация  $C$ , %: 4–5; амплитуда ультразвуковых волн  $\xi$ , мкм: 3; 6; 9; 12; 15; температура приготовления шлихты  $T^{\circ}\text{C}$ : 70; 75; 80; 85.

Метод обработки шлихты включает в себя нагрев воды до 25–30 $^{\circ}\text{C}$ , загрузку крахмала и гомогенизацию полученной дисперсии ультразвуковой кавитацией до достижения программированной температуры и относительно постоянной минимальной вязкости. Вязкость определялась временем истечения одного литра шлихты через отверстие диаметром 5 мм, а доля расщепленного крахмала и соответственно средняя скорость расщепления – расчетом в процентном отношении крахмала, растворенного в дистиллированной воде.

При выполнении необходимых расчетов для установления уравнения регрессии коэффициента и критерии подтверждения математической модели использовалась специализированная программа Текспро [3].

### Результаты и их технологическая интерпретация

Проведенными исследованиями преследовалось определение изменения постоянной средней вязкости и времени обработки ультразвуковой кавитацией соответственно средней скорости расщепления и изменения приклея пряжи с шлихтой в зависимости от амплитуды колебания для различных концентраций и температур шлихты (табл. 1–4).

Таблица 1. Минимальная вязкость шлихты  $t_c$  в (с) в зависимости от амплитуды ультразвуковых колебаний  $\xi$  для различных концентраций  $C$  и температур  $T$

Амплитуда $\xi$ , мкм	Время истечения 1000 см <sup>3</sup> шлихты $t_c$ , с											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	31	30	28	27	31	30	28	27	32	31	29	28
6	29	27	26	24	30	29	26	25	31	29	28	27
9	28	26	25	24	29	27	25	24	29	29	28	26
12	28	26	25	24	29	28	25	24	30	29	28	26
15	29	26	25	24	30	27	25	24	30	29	28	26

Таблица 2. Время обработки ультразвуковой кавитацией  $t_{узк}$  для понижения вязкости до постоянно-го значения в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда $\xi$ , мкм	Время обработки $t_{узк}$ , мин											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	20	22	17	16	19	19	18	17	20	21	20	18
6	13	18	12	11	16	14	12	12	16	16	14	12
9	12	10	10	8	12	11	10	9	15	15	12	10
12	10	10	9	8	11	10	9	8	14	14	12	10
15	9	9	9	8	11	10	9	8	14	14	11	9

Таблица 3. Средняя скорость расщепления крахмала  $V_p$  в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда $\xi$ , мкм	Скорость расщепления $V_p$ , %/мин											
	$C = 4\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 5\%; T, ^{\circ}\text{C}$				$C = 6\%; T, ^{\circ}\text{C}$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	3	3	5	5	4	4	4	5	3	4	4	4
6	6	5	7	8	5	5	7	7	4	5	6	7
9	7	8	9	12	6	7	9	10	5	6	7	9
12	9	9	9	12	8	8	10	12	5	6	8	9
15	10	10	10	12	7	8	10	12	5	6	8	11

Таблица 4. Приклей пряжи  $P_u$  в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Амплитуда $\xi$ , мкм	Приклей $P_u$ , %											
	$C = 4\%; T, ^\circ C$				$C = 5\%; T, ^\circ C$				$C = 6\%; T, ^\circ C$			
	70	75	80	85	70	75	80	85	70	75	80	85
3	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	6
6	5	5	4	4	6	5	5	5	7	6	6	6
9	5	5	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6
12	5	5	4	4	5	5	5	5	6	6	5	5
15	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6

В результате математической обработки результатов получены уравнения технологических параметров (табл. 5–8), графически представленные на рис. 2–5. Из анализа данных таблиц, уравнений и графиков вырисовываются некоторые технологические выводы, касающиеся влияния параметров расщепления на свойства и характеристики шлихты. Известно, что уменьшение вязкости шлихты – это отражение эффекта расщепления крахмала, а стабилизация вязкости свидетельствует о прекращении процесса расщепления крахмала. Минимальная вязкость, относительно стабильная, достигнутая шлихтой, полученной из расщепленного крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации, изменяется в зависимости от концентрации, температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний.

Таблица 5. Уравнения времен истечения шлихты  $t_u$  (минимальная вязкость) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ C$	Уравнение времени $t_u$ , сек, в функции от $\xi$ , мкм
4	70	$t_u = (0,035 - 0,025/\xi^2)^{-1}$ $C r^2 = 0,894$
	75	$t_u = 26,054 + 36,475/\xi^2$ $C r^2 = 0,987$
	80	$t_u = (0,039 - 0,046/\xi^2)^{-1}$ $C r^2 = 0,986$
	85	$t_u = (4,878 + 3,381/\xi^2)^2$ $C r^2 = 0,994$
5	70	$t_u = (874,93 + 1138,52/\xi^2)^{0,5}$ $C r^2 = 0,726$
	75	$t_u = (748,848 + 1052,238/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,931$
	80	$t_u = 23,87 + 14,26/\xi$ $C r^2 = 0,969$
	85	$t_u = (570,95 + 827,74/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,985$
6	70	$t_u = 30,119 + 19,695/\xi^2$ $C r^2 = 0,72$
	75	$t_u = (850,579 + 1052,872/\xi^2)^{0,5}$ $C r^2 = 0,918$
	80	$t_u = (0,036 - 0,006/\xi)^{-1}$ $C r^2 = 0,976$
	85	$t_u = (674,84 + 350,59/\xi)^{0,5}$ $C r^2 = 0,929$

Таблица 6. Уравнения времени обработки ультразвуковой кавитацией  $t_{узк}$  для достижения минимальной постоянной вязкости в функции от амплитуды  $\xi$  для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ C$	Уравнение времени обработки ультразвуковой кавитацией $t_{узк}$ , мин в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний $\xi$ , мкм
4	70	$t_p = 6,753 + 39,725/\xi$ ; $C r^2 = 0,987$
	75	$t_p = 107,664 - 77,047/\xi^{0,095}$ $C r^2 = 0,969$
	80	$t_p = (56,398 + 1217,198/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,997$
	85	$t_p = (35,815 + 1136,987/\xi^{1,5})^{0,5}$ $C r^2 = 0,977$
5	70	$t_p = (0,0175 + 0,0198/\xi^{0,5})^{-1}$ $C r^2 = 0,954$
	75	$t_p = (2,062 + 3,987/\xi^{0,5})^2$ $C r^2 = 0,988$
	80	$t_p = (2,643 + 4,807/\xi)^2$ $C r^2 = 0,997$
	85	$t_p = (1,643 + 4,308/\xi^{0,5})^2$ $C r^2 = 0,988$
6	70	$t_p = (3,54 + 2,79/\xi)^2$ $C r^2 = 0,996$
	75	$t_p = (0,077 + 0,09/\xi)^{-1}$ $C r^2 = 0,997$
	80	$t_p = 10,409 + 50,038/\xi^{1,5}$ $C r^2 = 0,994$
	85	$t_p = (0,152 - 0,167/\xi^{0,5})^{-1}$ $C r^2 = 0,994$

Таблица 7. Уравнения скорости расщепления крахмала  $V_p$  в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний  $\xi$  для различных концентраций и температур

Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Уравнение скоростей расщепления, $V_p, \%/мин$
4	70	$V_p = (-54,179 + 39,482 \xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,984$
	75	$V_p = -6,316 + 6,66 \xi^{0,343}; \quad C r^2 = 0,938$
	80	$V_p = (-43,406 + 40,190 \xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,992$
	85	$V_p = (0,067 + 0,574/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,923$
5	70	$V_p = (0,096 + 0,469/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,853$
	75	$V_p = (0,08 + 0,468/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,972$
	80	$V_p = (0,062 + 0,413/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,989$
	85	$V_p = (0,051 + 0,393/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,964$
6	70	$V_p = (0,175 + 0,75/\xi^2)^{-1}; \quad C r^2 = 0,921$
	75	$V_p = (0,147 + 0,541/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,998$
	80	$V_p = (0,11 + 0,605/\xi^{1,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,99$
	85	$V_p = (4,239 - 3,632/\xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,985$

Таблица 8. Уравнения приклея пряжи шликтой  $\Pi_{ш}$  (в %) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний  $\xi$  (в мкм)

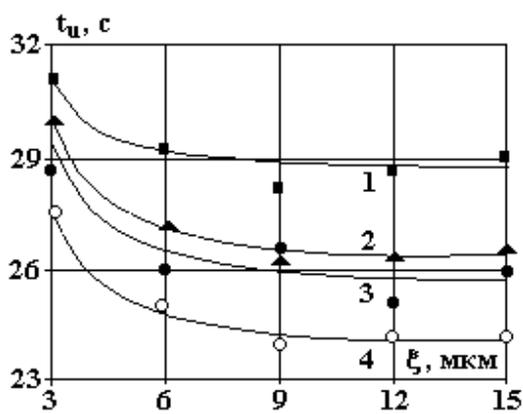
Концентрация крахмала в суспензии $C, \%$	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Уравнение приклея пряжи шликтой – $\Pi_{ш}, \%$
4	70	$\Pi_{ш} = (0,21 - 0,113/\xi)^{-1}; \quad C r^2 = 0,992$
	75	$\Pi_{ш} = 6,36 - 0,578 \xi^{0,376}; \quad C r^2 = 0,947$
	80	$\Pi_{ш} = 4,79 + 4,57/\xi^2; \quad C r^2 = 0,978$
	85	$\Pi_{ш} = (16,02 + 17,386/\xi^{0,5})^{0,5}; \quad C r^2 = 0,99$
5	70	$\Pi_{ш} = 6,97 - 0,675/\xi^{0,221}; \quad C r^2 = 0,845$
	75	$\Pi_{ш} = 12,975 - 5,8 \xi^{0,105}; \quad C r^2 = 0,988$
	80	$\Pi_{ш} = (20,494 + 31,758/\xi^{0,5})^{0,5}; \quad C r^2 = 0,953$
	85	$\Pi_{ш} = (1,956 + 1,036/\xi^{0,5})^2; \quad C r^2 = 0,962$
6	70	$\Pi_{ш} = (33,949 + 85,584/\xi)^{0,5}; \quad C r^2 = 0,991$
	75	$\Pi_{ш} = (0,1222 + 0,011/\xi^{0,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,827$
	80	$\Pi_{ш} = (20,936 + 50,315/\xi^{0,5})^{-1}; \quad C r^2 = 0,774$
	85	$\Pi_{ш} = 5,644 + 3,784/\xi; \quad C r^2 = 0,946$

Данные табл. 1, уравнения (табл. 5) и кривые рис. 2 изображают зависимость минимальной вязкости, которую возможно достигнуть в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных температур и концентраций. Изменение минимальной вязкости относительно постоянной величины, достигнутой при обработке ультразвуковой кавитацией, имеет следующие характеристики:

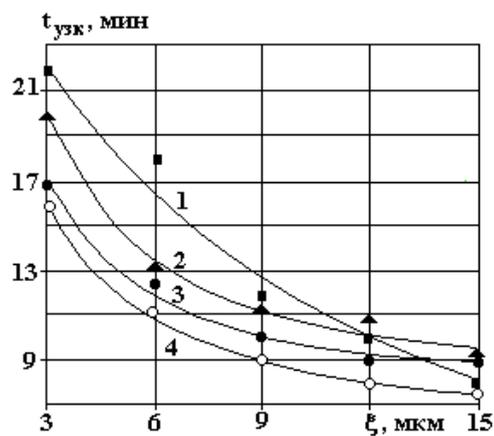
1. Уменьшается с повышением температуры для всех концентраций и амплитуд ультразвуковых колебаний. Например, при возрастании температуры от 70 до 85 $^\circ\text{C}$  вязкость снижается от 32,3 до 28,15 с, для  $C = 6\%$  и  $\xi = 3$  мкм и от 30,8 до 26,6 с для  $C = 6\%$  и  $\xi = 15$  мкм.

2. Возрастает с повышением концентрации шликты для всех температур и амплитуд ультразвуковых колебаний. Например, при возрастании концентрации шликты от 4 до 6% минимальная вязкость, которую возможно достигнуть, возрастает от 24,8 до 27,2 с при амплитуде колебаний  $\xi = 6$  мкм и температуре 85 $^\circ\text{C}$ .

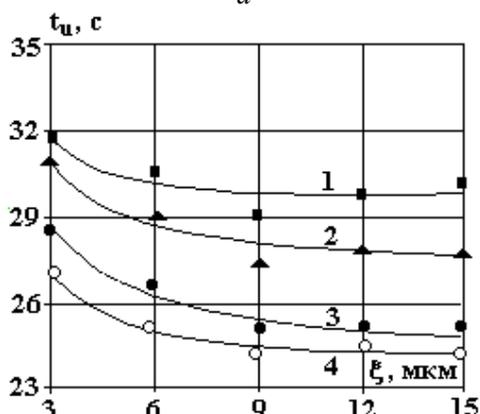
3. Уменьшается с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний при мало отличающихся минимальных значениях вязкости. Например, при возрастании амплитуды колебаний от 3 до 15 мкм достигнутая минимальная вязкость при ультразвуковой кавитационной обработке уменьшалась от 31 до 29 с, соответствующая концентрации  $C = 4\%$  и температуре 70 $^\circ\text{C}$ .



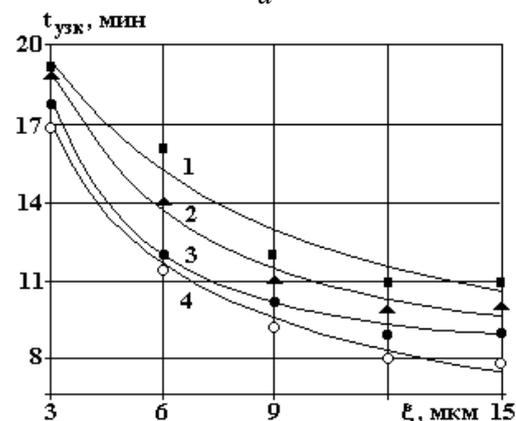
а



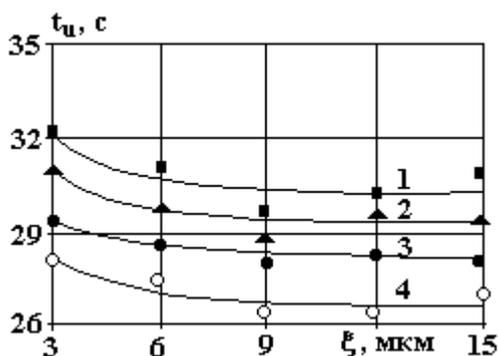
а



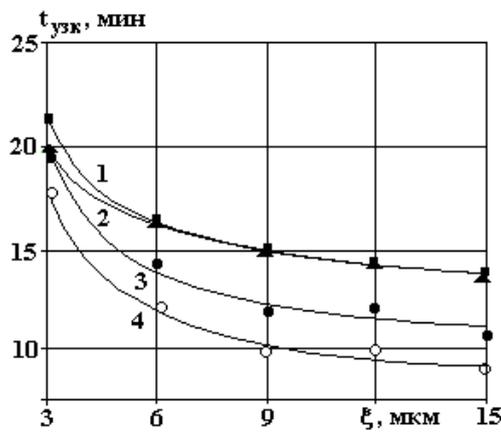
б



б



в



в

Рис. 2. Время истечения шликты (вязкость) в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний. а – С = 4%; б – 5%; в – 6%. Т, °С: 1 – 70; 2 – 75; 3 – 80; 4 – 85

Рис. 3. Время ультразвуковой кавитационной обработки шликты для достижения постоянной минимальной вязкости. а – С = 4%; б – 5%; в – 6%. Т, °С: 1 – 70; 2 – 75; 3 – 80; 4 – 85

Время обработки крахмального коллоида под воздействием ультразвука есть другой важный технологический параметр, в функции от которого можно установить необходимую продолжительность процесса расщепления и, следовательно, периода для получения крахмальной шликты. Уравнения из табл. 6 и графические зависимости (рис. 3) воспроизводят влияние амплитуды ультразвуковых колебаний, концентрации и температуры при обработке крахмального коллоида. Из табл. 2, уравнения (табл. 6) и кривых рис. 3 выделяются следующие возможные изменения времени обработки ультразвуковой кавитацией для уменьшения вязкости до минимально возможного технологического значения для конкретной концентрации и температуры шликты:

1. Уменьшается с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний при всех экспериментальных концентрациях и температурах. При концентрации 4% и температуре 70°С время обра-

ботки ультразвуковой кавитацией уменьшается от 20 до 9 мин, соответственно повышению амплитуды колебаний от 3 до 15 мкм.

2. Возрастает с увеличением концентрации при всех температурах и амплитудах колебаний. Например, продолжительность ультразвуковой кавитационной обработки увеличилась от 9 до 14 мин при повышении концентрации от 4 до 6%, температуре  $70^{\circ}\text{C}$  и амплитуде ультразвуковых колебаний 15 мкм.

3. Уменьшается с повышением температуры шликты при всех концентрациях и амплитудах ультразвуковых колебаний. Например, время кавитационной обработки уменьшилось от 20 до 16 мин при повышении температуры крахмальной шликты от  $70$  до  $85^{\circ}\text{C}$  и амплитуде колебаний 3 мкм.

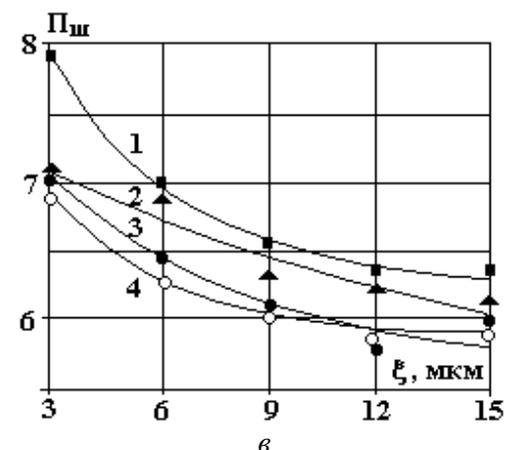
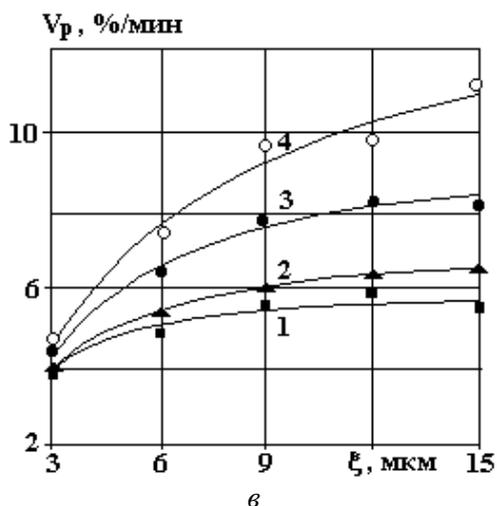
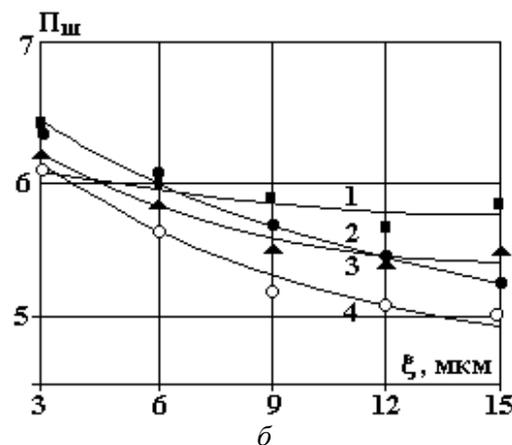
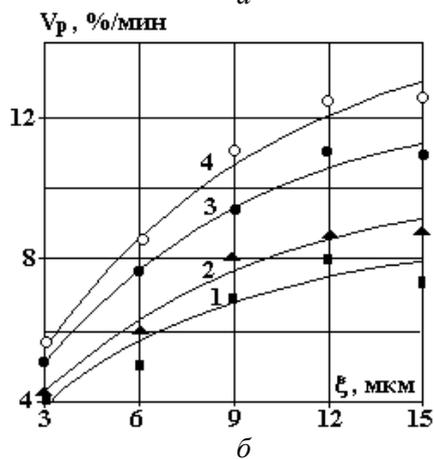
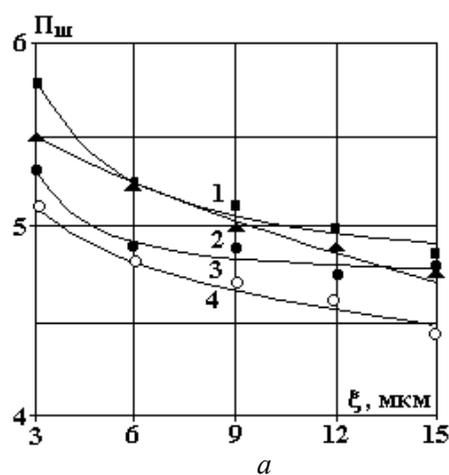
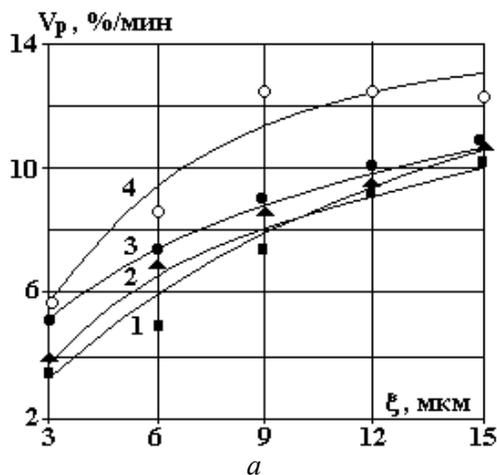


Рис. 4. Средняя скорость расщепления в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний. а -  $C = 4\%$ ; б -  $5\%$ ; в -  $6\%$ .  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 -  $70$ ; 2 -  $75$ ; 3 -  $80$ ; 4 -  $85$

Рис. 5. Приклей пряжи шликтой в функции от амплитуды ультразвуковой колебаний. а -  $C = 4\%$ ; б -  $5\%$ ; в -  $6\%$ .  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 -  $70$ ; 2 -  $75$ ; 3 -  $80$ ; 4 -  $85$

Время расщепления под воздействием ультразвуковой кавитации и процент расщепленного крахмала дают возможность определить среднюю скорость расщепления крахмала, которая является другим важным параметром предлагаемой технологии. Средняя скорость расщепления, определяемая долей расщепленного крахмала в минуту, исследовалась в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний для различных концентраций и температур. Экспериментальные данные табл. 3, уравнения (табл. 7) и кривые, изображенные на рис. 4, показывают влияние амплитуды колебаний на скорость расщепления крахмала при различных концентрациях и температурах крахмальной шлихты. Скорость расщепления крахмала характеризуется следующими изменениями:

1. Растет с возрастанием амплитуды ультразвуковых колебаний для любой исследуемой концентрации и температуры. Например, средняя скорость расщепления растет от 3,75 до 10,22%/мин соответственно росту амплитуды ультразвуковых колебаний от 3 до 15 мкм при 4% концентрации и температуре 70<sup>0</sup>С.

2. Уменьшается с ростом концентрации крахмала в коллоидной крахмальной смеси независимо от температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний. Например, средняя скорость расщепления уменьшается от 10,22 до 5,33 %/мин соответственно росту концентрации от 4 до 6% при температуре крахмального коллоида 70<sup>0</sup>С и амплитуде ультразвуковых колебаний 15 мкм.

3. Растет с ростом температуры крахмального коллоида при всех концентрациях и амплитудах ультразвуковых колебаний. Например, средняя скорость расщепления крахмала растет с 3,75 до 5,56%/мин соответственно росту температуры от 70 до 85<sup>0</sup>С при 4% концентрации и амплитуде ультразвуковых колебаний 3 мкм.

Приклея пряхи шлихтой существенно зависит от вязкости шлихты и от степени расщепления крахмала. В этих условиях технологические параметры расщепления ультразвуковой кавитацией могут существенно повлиять и на приклея пряхи шлихтой. Экспериментальные данные, касающиеся приклея пряхи шлихтой в функции от амплитуды ультразвуковых колебаний при различных концентрациях и температурах, а также уравнения кривых представлены в табл. 4, 8 и на рис. 5. Из этих результатов можно констатировать, что приклея пряхи шлихтой имеет следующие зависимости:

1. Уменьшается с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний как следствие повышения степени расщепления и текучести шлихты при всех исследованных концентрациях и температурах.

2. Уменьшается с ростом температуры как следствие роста текучести шлихты.

3. Растет с повышением концентрации как следствие увеличения вязкости при неизменных условиях расщепления ультразвуковой кавитацией.

#### **Заключение**

В порядке обобщения результатов можно отметить:

1. Время ультразвуковой кавитационной обработки крахмальной шлихты при уменьшении вязкости до минимальных относительно постоянных значений уменьшается с ростом амплитуды колебаний, температуры и растет с увеличением концентрации.

2. Постоянная минимальная вязкость шлихты из расщепленного крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации зависит как от концентрации и температуры шлихты, так и от амплитуды ультразвуковых колебаний.

3. Средняя скорость расщепления крахмала под воздействием ультразвуковой кавитации растет с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний и температуры шлихты и уменьшается с ростом концентрации.

4. Приклея пряхи шлихтой из крахмала, расщепленного ультразвуковой кавитацией, уменьшается с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний и температурой расщепления и растет с увеличением концентрации.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Liuțe D.* Procese și mașini de prelucrat fire. Vol. II. Editura tehnica. București, 1992.

2. *Андреева Н.В.* Текстильное производство. М., 1988.

3. *Ciociu M.* Modelarea matematică a procesului de încleiere. Industria Ușoară, România, nr. 10, 1983.

*Поступила 09.07.04*

#### **Summary**

The results of investigations of the ultrasonic cavitation influence on the process of starch decomposition with the aim to obtain the gluing mass for textile yarn sizing are presented. It is found that the using of ultrasonic cavitation allows excluding the application of chemical reagents and the process becomes ecological friendly. The results can be used at the development of technological process of sizing preparation in the industrial conditions.