

КИНЕТИКА ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ  
ПЛОСКИХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В последние годы на основе работ академика А.В.Лыкова и его учеников [1 - 5] в кинетических расчетах процесса сушки стала широко использоваться приближенная инженерная методика, основанная на числе Ребиндера ( $Rb$ ) и относительном температурном коэффициенте сушки ( $B$ ). Введение числа Ребиндера позволило полностью выявить кинетику теплообмена при сушке по данным кинетики влагообмена и тем самым устранить необходимость в определении коэффициентов теплообмена, вычисление которых для периода падающей скорости представляет значительные трудности.

Основное уравнение кинетики сушки, устанавливающее связь между теплообменом и влагообменом, можно записать в безразмерном виде:

$$q^* = \frac{q(\tau)}{q(0)} = N^* [1 + Rb], \quad (1)$$

где  $q^*$  — отношение потока тепла в период падающей скорости сушки к потоку в период постоянной скорости;  $N = \frac{100}{N} \left( \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)$  — относительная (безразмерная) скорость сушки;  $N$  — скорость сушки в 1-ом периоде;  $Rb = \frac{c \cdot b}{r}$  — число Ребиндера, представляющее важнейшую характеристику процесса сушки ( $c$  — теплоемкость влажного материала,  $r$  — теплота парообразования,  $b = \frac{dT}{du}$  — температурный коэффициент сушки).

Безразмерный температурный коэффициент сушки вводится по отношению

$$B = \frac{d(\bar{t} / T_c)}{d(\bar{u} / \bar{u}_{кр1})} = b \frac{\bar{u}_{кр1}}{T_c}, \quad (2)$$



где  $T_c$  -- абсолютная температура среды;  $\bar{u}_{кр1}$  -- первое критическое влагосодержание;  $b = -\frac{dt}{d\bar{u}}$  -- температурный коэффициент сушки. При определении интенсивности теплообмена и температуры материала в процессе сушки необходимо знать зависимости числа  $Rb$  и  $B$  от влагосодержания  $\bar{u}$ , которые устанавливаются экспериментально. Для большинства капиллярно-пористых коллоидных материалов зависимости  $Rb = f(u)$  и  $B = f(u)$  выражаются эмпирическими формулами:

$$Rb = A \exp[-n(\bar{u} - u_p)] ; \quad (3)$$

$$B = a \exp[-m(\bar{u} - u_p)] , \quad (4)$$

где  $A, a$  и  $n, m$  -- постоянные, определяемые из опыта;  $\bar{u}$  и  $u_p$  -- текущее и равновесное влагосодержание.

Экспериментальные данные авторов статьи и других исследователей [1-5] показали, что применение числа  $Rb$  и  $B$  для расчета кинетики сушки значительно упростило его.

Исследование тепломассообмена при сушке древесины (сосны) проведено в Институте тепло- и массообмена АН БССР на рециркуляционной конвективной сушильной установке с вынужденным движением теплоносителя (воздуха), оборудованной приборами и приспособлениями, необходимыми для регулирования, измерения и изменения режимных параметров процесса сушки.

Образцы для проведения опытов выпиливались из сосновых досок (140 x 85 мм) с гладкой поверхностью без пороков (гнили, сучьев, трещин) толщиной 10 ÷ 50 мм. Торцевые поверхности образцов толщиной более 15 мм теплоизолировались слоем асбеста и фольги, что исключало приток тепла и сток вещества с них. Перед сушкой образцы помещались в воду для искусственного увлажнения, а затем выдерживались в эксикаторе в течение нескольких суток для выравнивания полей влажности.

Обработка экспериментальных данных по сушке древесины позволила получить основные характеристики кинетики теплообмена (интенсивности теплообмена и температуры  $t$  материала).

Для более полного выявления влияния режимных параметров ( $v, t_c$ ) и толщины материала на  $Rb$  и  $B$  эксперименты проводились в интервале изменения скорости движения воз-



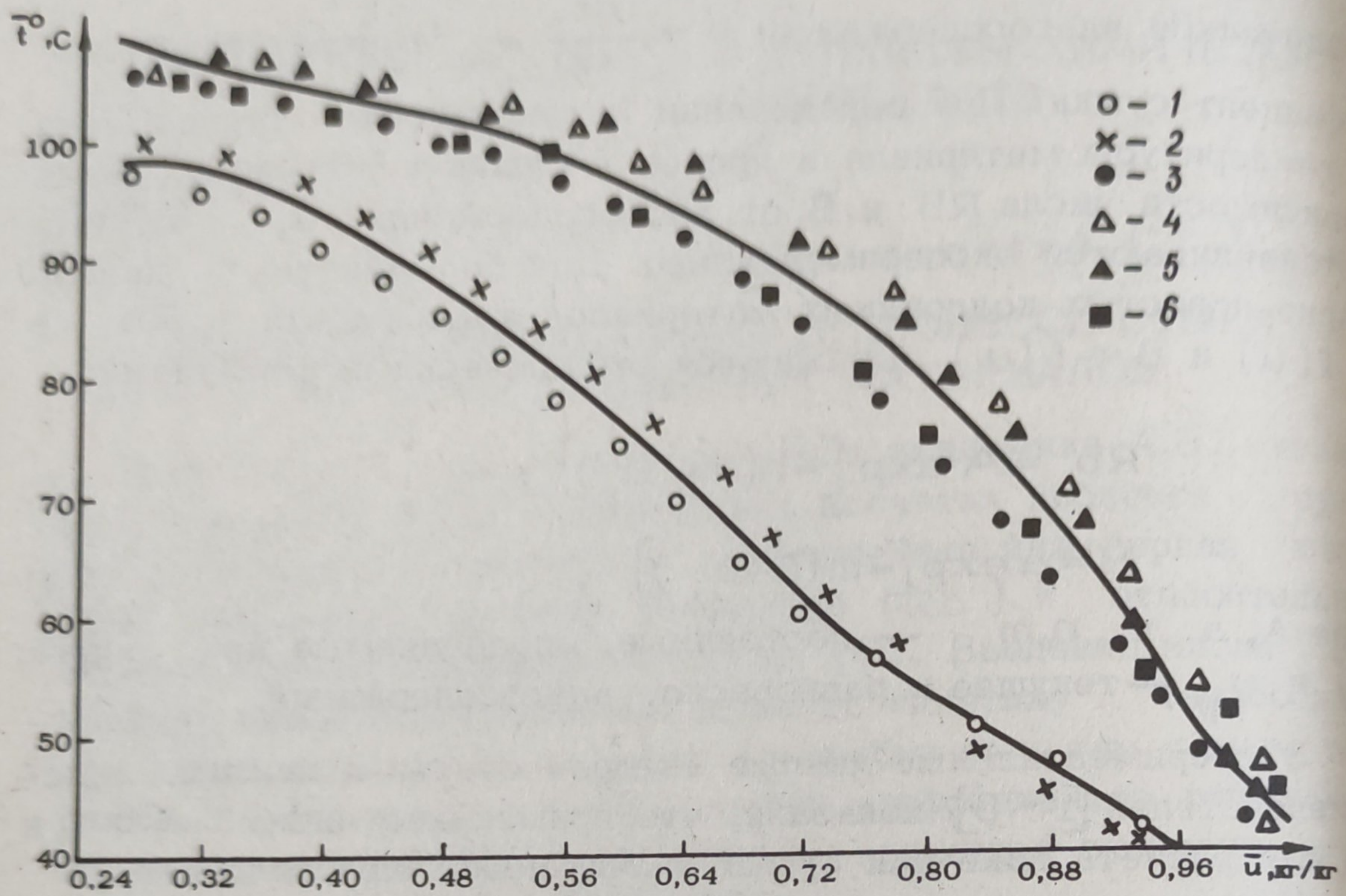


Рис. 1. Зависимость между средней температурой и влажностью в процессе сушки дерева (сосна). (Режим сушки:  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 5\%$ ,  $\delta = 20 \text{ мм}/v = 1 - 3 \text{ м/с}$ ; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 15; 5 - 20; 6 - 25 м/с).

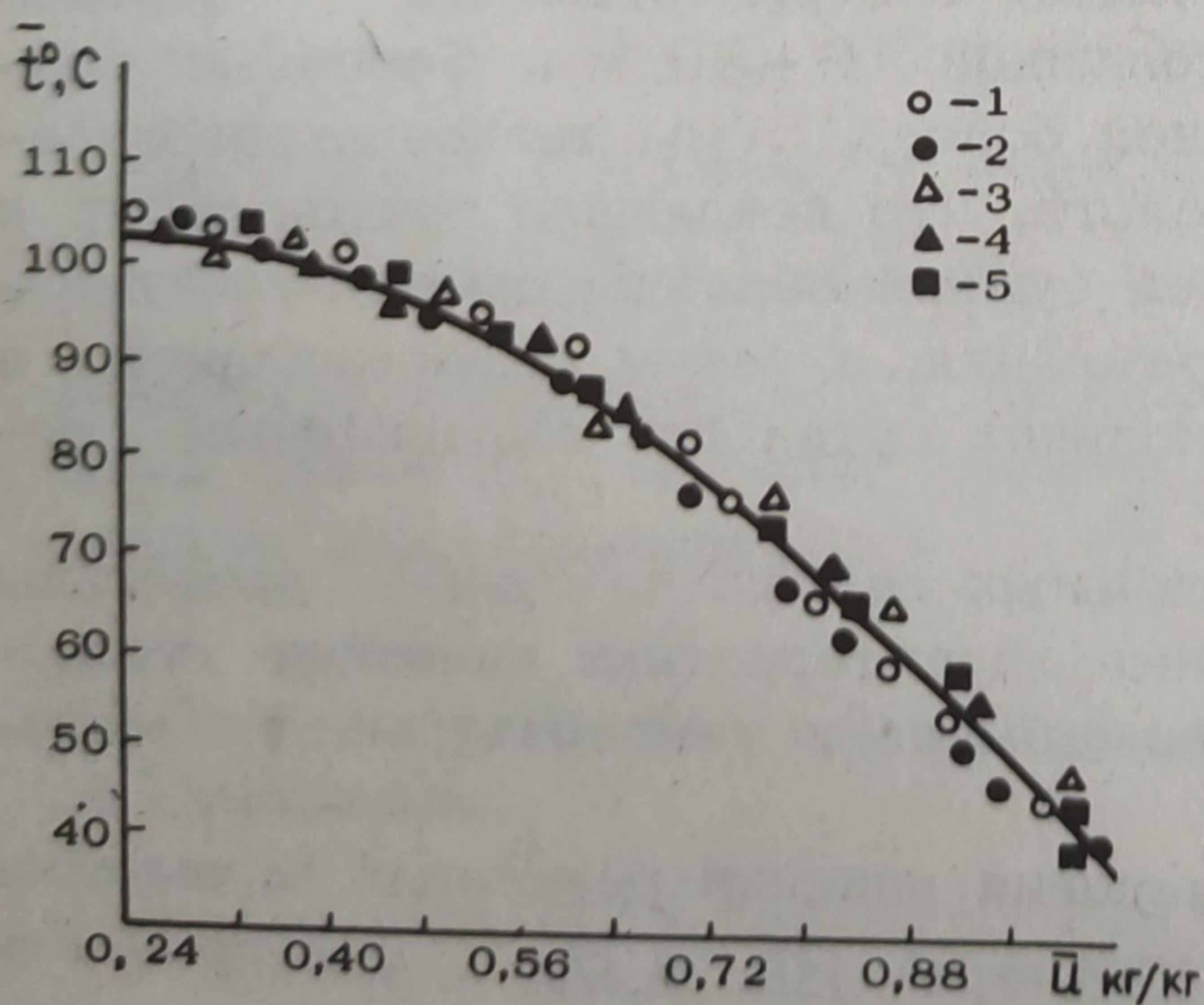


Рис. 2. Зависимость  $\bar{t} = f(u)$  при сушке плоских древесных образцов из сосны различной толщины. (Режим сушки:  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 5\%$ ,  $v = 10 \text{ м/с}$ ;  $\delta = 1 - 10 \text{ мм}$ ; 2 - 15; 3 - 20; 4 - 35; 5 - 50 мм).



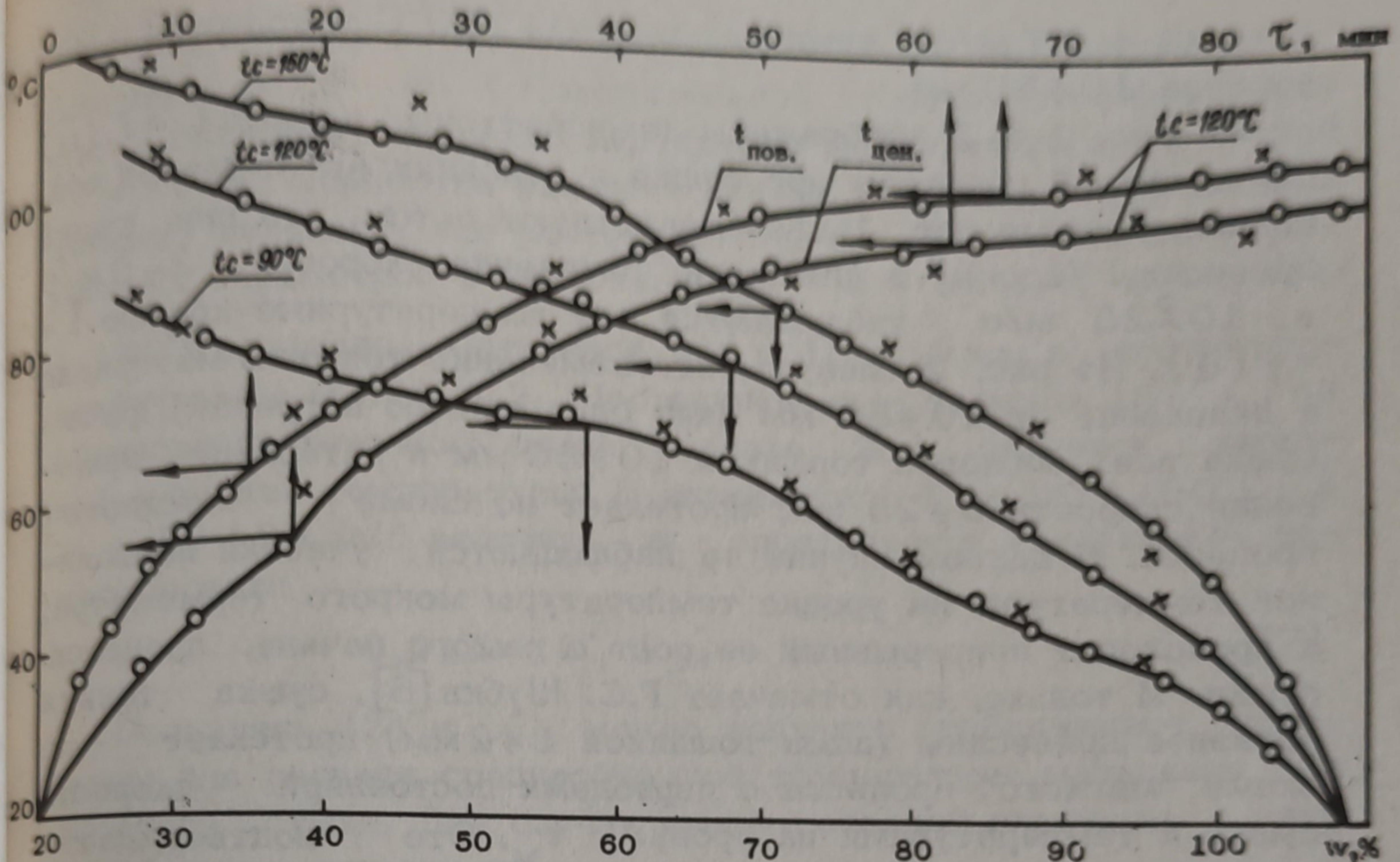


Рис. 3. Зависимости  $\bar{t} = f(w)$  и  $t = f(\tau)$  для сосновой пластины при сушке в условиях вынужденной конвекции. X — расчетные точки, полученные по формулам (8), (9) и (10).

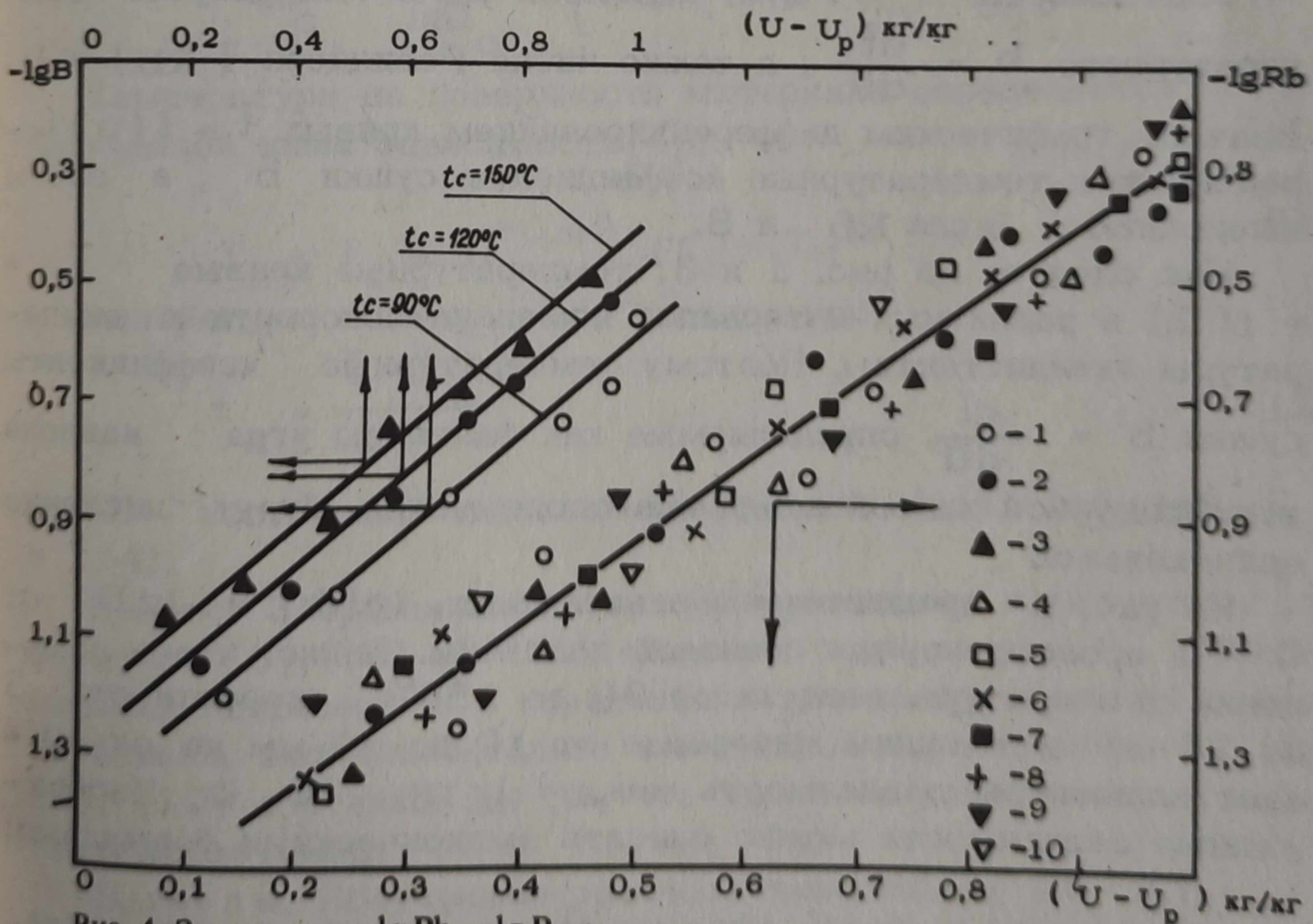


Рис. 4. Зависимости  $\lg R_b$  и  $\lg B$  от влагосодержания в процессе сушки сосновой пластины  $t$ : 1—90°C, 2—120, 3—150 (при  $v = 10$  м/с,  $\varphi = 5\%$ ,  $\delta = 20$  мм);  $v$ : 4—3 м/с, 5—7—25 м/с (при  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 5\%$ ,  $\delta = 20$  мм);  $\delta$ : 8—10 мм, 9—35, 10—50 мм (при  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ;  $v = 10$  м/с,  $\varphi = 5\%$ ).



духа ( $3 \div 25$  м/с), температуры  $90 \div 150^\circ\text{C}$  и толщины материала  $10 \div 50$  мм.

На рис. 1 и 2 изображены температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  для сосновой пластины при сушке в условиях вынужденной конвекции. Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что при сушке древесины (сосны) в интервале изменения скорости  $3 \div 5$  м/с и  $10 \div 25$  м/с наблюдаются две температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Из рис. 2 следует, что изменение толщины материала в диапазоне от  $10 \div 50$  мм дает одну кривую нагрева. При этом сушка всех образцов толщиной  $10 \div 50$  мм в интервале изменения скорости  $3 \div 25$  м/с протекает по схеме "жесткого" процесса. В данном случае не наблюдаются участки постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра, а происходит непрерывный ее рост с самого начала процесса сушки. И только, как отмечает Г.С. Шубин [6], сушка тонких образцов древесины (шпон толщиной  $1 \div 2$  мм) протекает по схеме "мягкого" процесса с периодами постоянной скорости сушки и температурами на уровне  $t_M$ . Это подтверждается также данными рис. 3, на котором представлены зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  и  $t = f(\tau)$  для основной пластины.

Зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  являются базой для расчета температурного  $b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}$ , а также числа Ребиндера ( $Rb$ ) и  $B$ . Вначале графическим дифференцированием кривых  $\bar{t} = f(\bar{u})$  определяются температурные коэффициенты сушки  $b$ , а затем вычисляются числа  $Rb$  и  $B$ .

Как следует из рис. 1 и 3, температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  в различных интервалах изменения скорости и температуры эквидистантны. Поэтому температурные коэффициенты сушки  $b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}$ , определяемые как тангенсы угла наклона температурной кривой к оси влагосодержания, будут численно одинаковыми.

На рис. 4 представлены зависимости  $\lg Rb$  и  $\lg B$  от  $\bar{u}$  в процессе сушки сосновой пластины. Видно, что изменение температуры воздуха от  $90$  до  $150^\circ\text{C}$ , скорости от  $3$  до  $25$  м/с и толщины материала от  $10$  до  $50$  мм не оказывает влияния на зависимость между  $\lg Rb$  и  $\bar{u}$ . Изображенные зависимости можно описать эмпирическими формулами:

$$Rb = A \exp [n (\bar{u} - u_p)]; \quad (5)$$

$$B = a \exp [m (\bar{u} - u_p)]. \quad (6)$$



формулы (5) и (6) отличаются от (3) и (4) знаком по постоянных  $n$  и  $m$ . Положительная степень постоянных для сосны объясняется только характером температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Обработка опытных данных по сушке древесины (сосны) показала, что постоянные  $A$ ,  $n$  не зависят от режимных параметров в интервале  $v = 3 \div 25$  м/с;  $t_c = 90 \div 150^\circ\text{C}$ ; толщины материала  $\delta = 10 \div 50$  мм и соответственно равны 0,025 и 3. Постоянная  $m$  в формуле (6) не обусловлена режимом сушки и равна 2;  $a$  является линейной функцией температуры. В интервале  $t_c = 90 \div 150^\circ\text{C}$  и  $v = 10 \div 25$  м/с величина  $a$  определяется следующей зависимостью:

$$a = 0,215 \cdot 10^3 \cdot T_c. \quad (7)$$

Пользуясь (2) и (6), можно получить приближенное уравнение для расчета среднеобъемной температуры материала в процессе сушки. Для случая сушки сосновой пластины эта зависимость примет вид:

$$t = t_c - \frac{a T_c}{m \bar{u}_0} \left\{ \exp [m(\bar{u} - u_p) - 1] \right\}. \quad (8)$$

Температура на поверхности материала определяется из полученной нами зависимости [4]:

$$T_{\Pi} = T_c - N^{*0,43} (T_c - T_M), \quad (9)$$

а температура в центре - по соотношению

$$t_{\text{ц}} = \frac{\bar{t} - \bar{t}_{\Pi}}{1 - \Pi}, \quad (10)$$

где  $\Pi$  - постоянный числовой коэффициент (для пластины  $\Pi = 1/4$ ).

На рис. 3 сравниваются экспериментальные и расчетные (по формулам (8), (9) и (10)) значения температуры. Максимальная погрешность в определении температуры между действительной, экспериментально замеренной и расчетной по (8), (9), (10) составила  $6 \div 8\%$ , что является допустимым в инженерных расчетах.

Выводы. Полученные опытные зависимости  $Rb = f(\bar{u})$  и  $V = f(\bar{u})$  совместно с уравнениями (1) и (8), (9), (10) позволяют определять плотность потока тепла и температуру материала в процессе сушки древесины в любой момент. Этот



расчет дает возможность отказаться от использования коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , определение которого в период падающей скорости сушки очень сложно. Нахождение эмпирических формул  $Rb = f(\bar{u})$  и  $V = f(\bar{u})$  представляет большой интерес не только для расчета кинетики процесса сушки, но и для ее технологии.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лыков А.В. Теория сушки. М., 1968, с. 125.
2. Лыков А.В. и др. Приближенный метод расчета кинетики процесса сушки. - ИФЖ, 1967, 13, № 5, с. 430.
3. Лыков А.А. и др. Приближенный метод расчета температуры материала в процессе сушки. - В сб.: Тепло- и массообмен, 6, № 1, 1968, с. 536.
4. Лыков А.В., Куц П.С., Ольшанский А.И. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов. - ИФЖ, 1972, 23, № 3, с. 231.
5. Куц П.С., Ольшанский А.И. Экспериментальное исследование зависимостей критерия Ребиндера от режимных параметров. - Тр. III конференции по сушке. Будапешт, 1971.
6. Шубин Г.С. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при высокотемпературной конвективной сушке плоских древесных материалов. - В сб.: Тепло- и массоперенос, вып. 4, 1963, с. 315.