

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРЕССОВАННОЙ БУМАГИ И КАРТОНА

В процессе сушки важнейшее значение имеет определение его продолжительности, так как качество готовой продукции и расход тепла на сушку существенно зависят от времени протекания процесса обезвоживания материала.

Аналитические решения системы дифференциальных уравнений тепло- и массообмена для конкретных практических случаев затруднительны, особенно если учесть, что кинетические коэффициенты, входящие в уравнения, в процессе сушки изменяются. Поэтому актуальной задачей является увязка инженерных расчетов с кинетикой процесса сушки на основе приближенных, достаточно надежных соотношений с минимальным количеством постоянных, определяемых экспериментально.

Обработка опытных данных [1] показала, что с достаточной для инженерных расчетов точностью плотность потока тепла в периоде убывающей скорости сушки изменяется во времени по экспоненциальному закону

$$q(\tau) = q(0) \exp(-m_1 \tau). \quad (1)$$

Выражение (1) можно представить в безразмерном виде:

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q(0)} = \exp\left(-m \frac{\tau}{\tau_0}\right) = \exp(-m \tau^*), \quad (2)$$

где q^* — отношение потока тепла в периоде падающей скорости сушки к потоку тепла в периоде постоянной скорости; τ_0 — время сушки в первом периоде; τ — время сушки в периоде падающей скорости, отсчитываемое от нуля; τ^* — отношение времени сушки в этих периодах; m_1 и m — постоянные, определяемые из опыта.

С другой стороны, основное уравнение кинетики процесса сушки [1, 2], устанавливающее взаимосвязь между теплообменом q^* и влагообменом N^* , имеет вид

$$q^*(\tau) = N^*(1+Rb), \quad (3)$$

где $N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau}$ - относительная скорость сушки во втором периоде (N - скорость сушки в первом периоде; $dW/d\tau$ - во втором).

В процессе сушки различных материалов численные значения критерия Ребиндера изменяются от 0,05 до 0,3. Например, при конвективной сушке плотного картона Rb это изменение составляло от 0,05 до 0,26; целлюлозы - от 0,05 до 0,3 во всем интервале изменения влагосодержания материала. Пренебрегая числом Rb при малых его значениях [3], можно записать следующее:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = \exp(-m\tau^*). \quad (4)$$

Таким образом, интенсивность теплообмена при сушке можно рассчитать по данным влагообмена и числу Ребиндера.

Рассмотрим еще один метод обработки экспериментальных данных, основанный на использовании понятий относительной скорости сушки N^* и обобщенного времени сушки $N\tau$.

Величина N^* не зависит от режима сушки и для конкретного материала при данном методе сушки является лишь функцией влагосодержания. Переменная $N\tau$ представляет собой устойчивый комплекс величин, характерных для процесса сушки и придает исследованию кинетики процесса обобщенный характер. Метод обобщенных кривых сушки позволяет перейти от единичного конкретного опыта к множеству случаев, отвечающих различным режимам, что значительно сокращает время и число экспериментов, необходимых для исследования процесса [1].

Из метода обобщения кривых сушки следует, что обобщенное время $N\tau$, как и относительная скорость сушки N^* , является функцией влагосодержания W , т.е. $N^* = f(W)$; $N\tau = f(W)$ и, следовательно, $N^* = f(N\tau)$. Известно [1], что относительная скорость сушки N^* изменяется от влагосодержания W по закону экспоненты. Поэтому зависимость $N^* = f(N\tau)$ можно представить в виде

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = \exp(-a N\tau). \quad (5)$$

Из метода обобщения кривых сушки вытекают два способа обработки экспериментальных данных, позволяющих получить расчетные соотношения для определения продолжительности

процесса сушки. На рис. 1, а приведена обобщенная кривая сушки для прессованной бумаги по данным Г.К.Филоненко [1], на основе которой получена обобщенная кривая скорости сушки (рис. 1, б) путем графического дифференцирования кривой $(W - W_p) = f(N\tau)$. Тогда дальнейшая обработка опытных данных по выражениям (4) и (5) с использованием обобщенных кривых должна производиться в виде зависимостей

$$\lg N^* = f\left(\frac{\tau W - \tau_0}{\tau_0}\right) = f(\tau^*) \quad \text{и} \quad \lg N^* = f[N(\tau_W - \tau_0)] = f(N\tau),$$

где τ_W и τ_0 - время сушки при данном влагосодержании и время сушки в первом периоде; $\tau = \tau_W - \tau_0$ - время сушки в периоде падающей скорости. На рис. 2 изображены зависимости между $\lg N^* = f(\tau^*)$ и $\lg N^* = f(N\tau)$ для прессованной бумаги при сушке в условиях вынужденной конвекции. Видно, что опытные точки ложатся на прямые во всем интервале изменения режимных параметров процесса сушки.

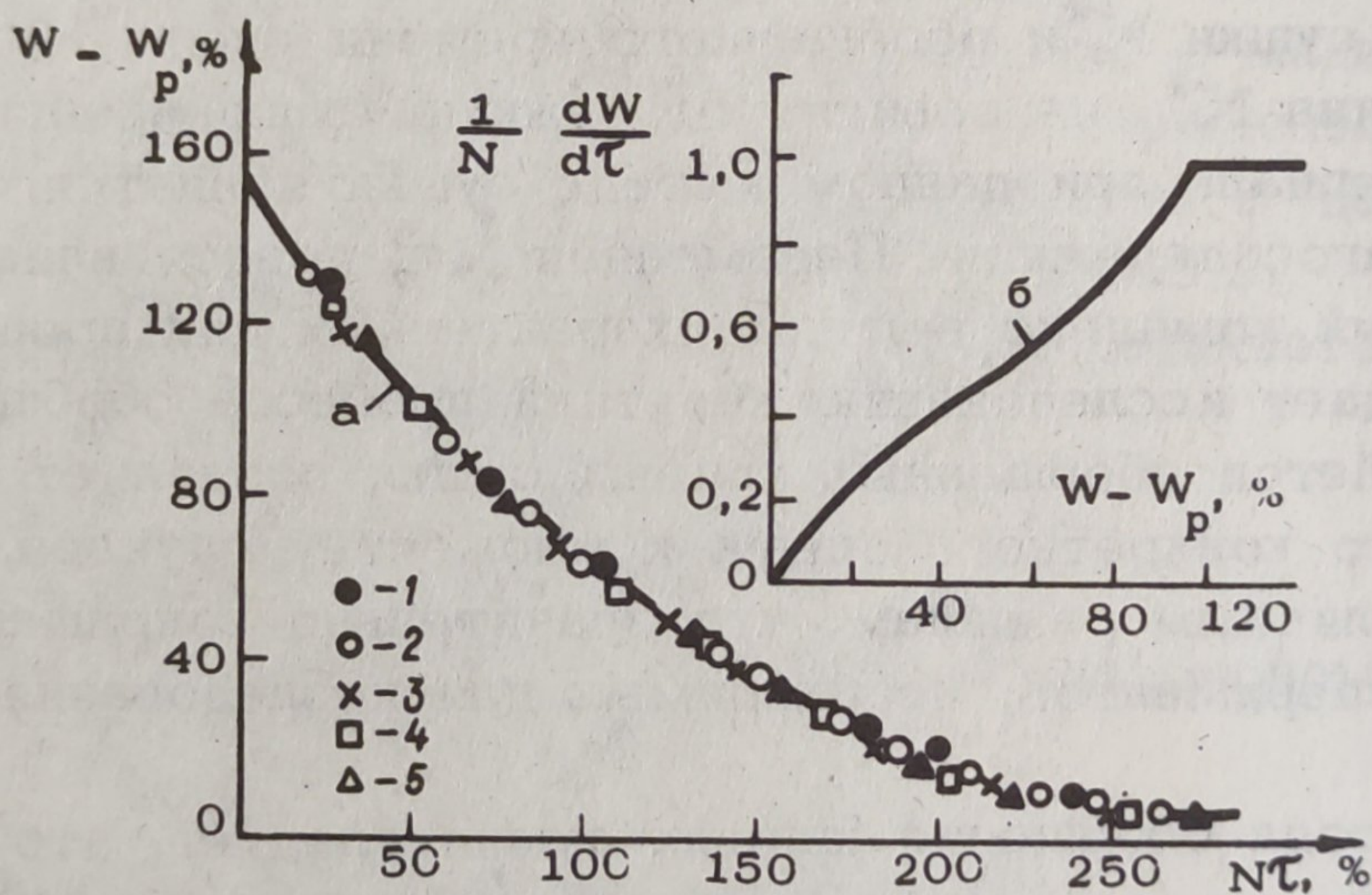


Рис. 1. Обобщенная кривая сушки прессованной бумаги по данным Г.К.Филипенко (а) и обобщенная кривая скорости сушки (б): 1 - $t_c = 91^\circ\text{C}$; $\varphi = 3,8\%$; 2 - $t_c = 78,5^\circ\text{C}$; $\varphi = 6,1\%$; 3 - $t_c = 70^\circ\text{C}$; $\varphi = 11,2\%$; 4 - $t_c = 59,5^\circ\text{C}$; $\varphi = 12,9\%$; 5 - $t_c = 61^\circ\text{C}$; $\varphi = 20,6\%$.

Интегрирование уравнений (4) и (5) в заданных пределах с учетом времени сушки в первом периоде дает общую продолжительность процесса:

$$\tau = \frac{W_0 - W_{кр}}{N} \left\{ 1 - \frac{2,3}{m} \lg \left[1 - \frac{(W_{кр} - W)m}{W_0 - W_{кр}} \right] \right\}; \quad (6)$$

$$\tau = \frac{1}{N} \left\{ (W_0 - W_{кр}) - \frac{2,3}{a} \lg [1 - a(W_{кр} - W)] \right\}, \quad (7)$$

где W_0 , $W_{кр}$, W – соответственно начальное, критическое и текущее влагосодержание материала. Значения постоянных m и a , входящих в уравнения (4) – (7), зависят только от рода материала, т.е. от формы связи влаги с ним. Эти значения численно равны: для прессованной бумаги $m = 0,54$, $a = 0,0095$;

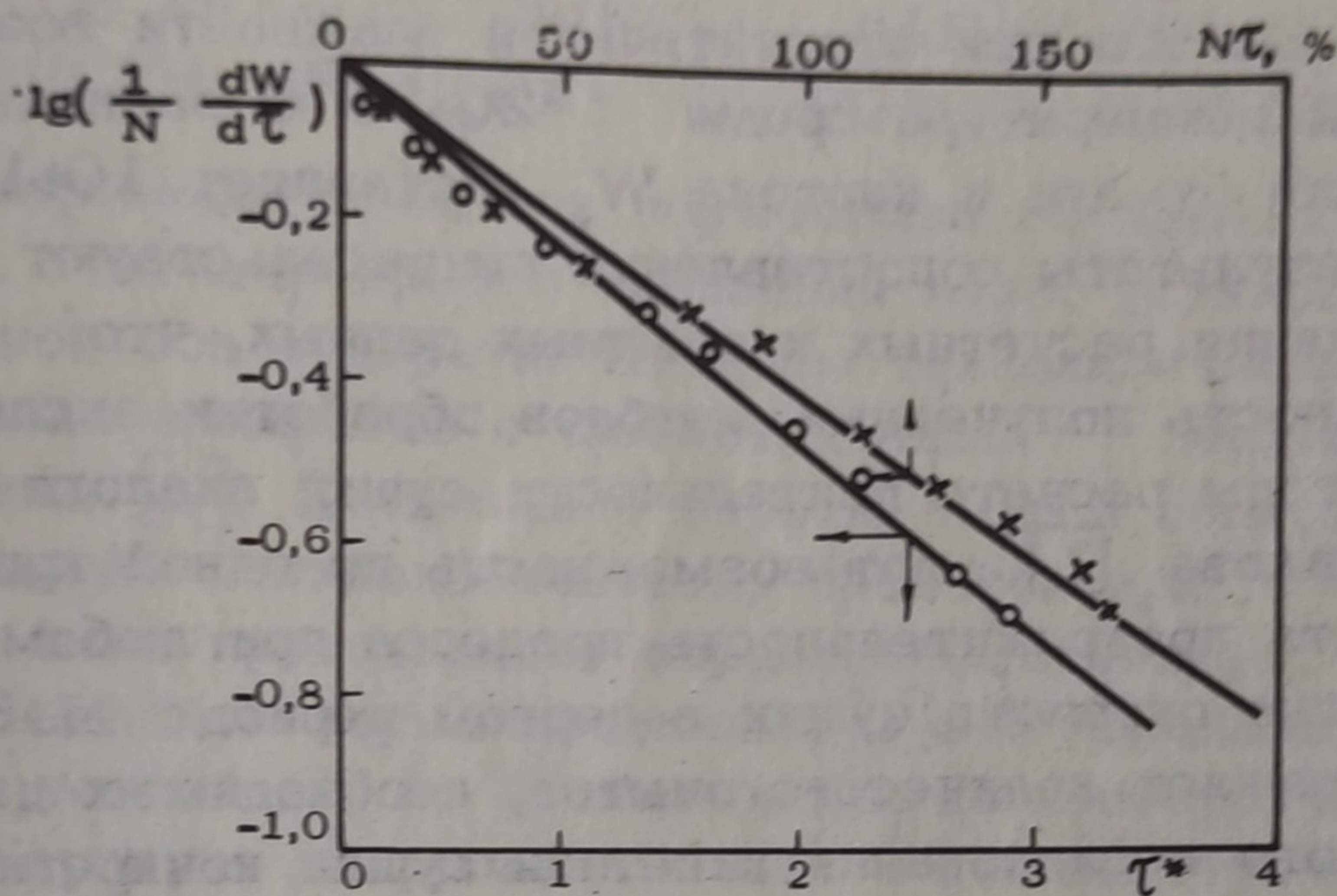


Рис. 2. Зависимость $\lg \left(\frac{1}{N} \frac{dw}{d\tau} \right)$ от безразмерного времени τ^* и обобщенного времени $N\tau$ в процессе сушки прессованной бумаги.

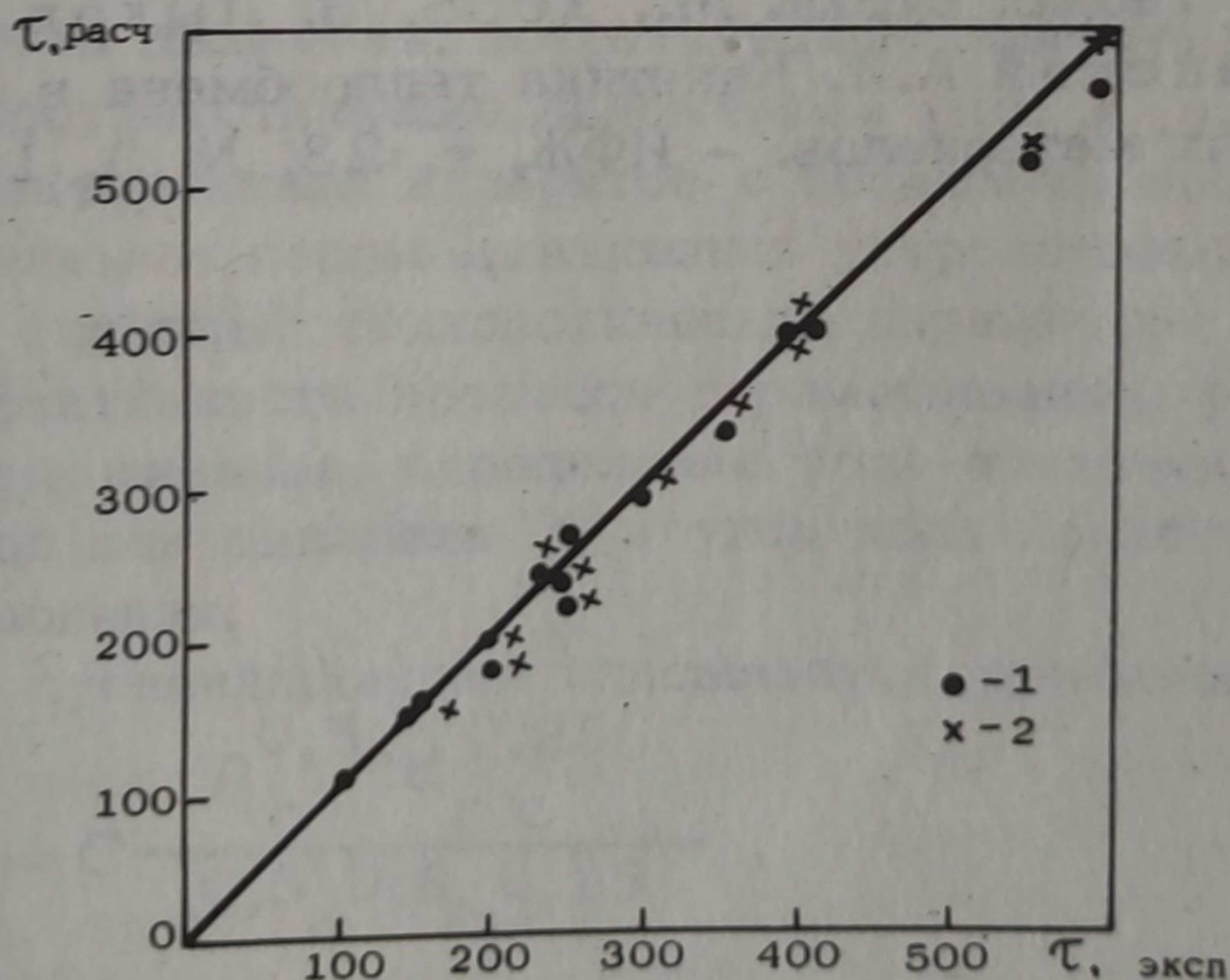


Рис. 3. Сопоставление опытной и расчетной продолжительности процесса сушки прессованной бумаги: расчетные точки, полученные по формуле (6) – 1; по формуле (7) – 2.

для плотного картона $m = 2$, $a = 0,025$. Результаты расчета длительности процесса сушки по уравнениям (6) и (7) могут быть проверены по экспериментальным кривым сушки. На рис. 3 дано сравнение расчетных значений $\tau_{расч}$ с экспериментом $\tau_{эксп}$ при сушке прессованной бумаги. Из рисунка следует, что расчетные точки располагаются вблизи опытной прямой, причем разброс точек не превышает $10 \div 12\%$. Полученные зависимости справедливы до влагосодержания $W \approx 10 \div 20\%$, т.е. практически вплоть до равновесного влагосодержания W_p , так как при относительной влажности воздуха $\varphi = 0,7 \div 0,9$ и температуре среды $t = 20 \div 25^\circ\text{C}$ равновесное влагосодержание бумаги и картона W_p составляет $10 \div 15\%$. Таким образом, результаты сопоставления свидетельствуют о хорошем совпадении расчетных и опытных данных, что подтверждает надежность полученных методов обработки экспериментов. Данные методы расчета длительности сушки аналогично методу В.В. Красникова [1] дают возможность по одной кривой сушки вычислить продолжительность процесса при любом режиме, если известна скорость сушки в первом периоде N . Это значительно сокращает количество опытов, необходимых для экспериментального исследования кинетики сушки конкретного материала.

Л и т е р а т у р а

1. Красников В.В. Кондуктивная сушка. М., 1973.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М., 1968.
3. Лыков А.В., Куц П.С., Ольшанский А.И. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов. - ИФЖ, т. 23, № 3, 1972.