

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ (ХЛЕБНОГО ТЕСТА) В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

И.Н. ЛИТОВЧЕНКО, А.Т. ЛИСОВЕНКО,  
Е.В. НЕЧИПОРЕНКО

Киевский технологический институт  
пищевой промышленности

Определение рациональных параметров процесса замеса — геометрических и кинематических — позволит повысить качество приготовления теста, а следовательно, и хлеба. Результаты могут служить основой для проектно-конструкторского этапа создания новых смесителей.

К пограничному слою отнесем область теста, увлекаемую лопаткой при прохождении в массе, скорость которой отлична от нуля.

Рассмотрим случай замеса в цилиндрической камере с вращающимся вертикальным валом и закрепленной на нем лопаткой (рис. 1). По такой схеме построено большинство тестомесильных машин периодического и непрерывного действия. Она легко трансформируется в рабочие органы любой формы, совершающие вращательное движение.

Исследуем процесс передачи движения от лопатки к массе и связанное с этим тепловыделение.

Для одной лопатки связь между работой на замес и параметрами процесса выражается следующей зависимостью:

$$A = 124 \mu n \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{L} + R_2^2 \frac{b \sin \alpha}{f} \right) \text{ Дж/об, (1)}$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с,  
 $n$  — частота вращения, об/с;

$R_1, R_2$  — минимальные и максимальные размеры лопасти, м;

$L$  — толщина пограничного слоя, м;

$b$  — ширина лопатки, м;

$\alpha$  — угол наклона лопатки к плоскости движения, град.

При движении лопатки в вязкой неньютоновской жидкости с некоей постоянной скоростью в массе образуется пограничный слой, скорость в котором изменяется от 0 до скорости лопатки. Его толщина  $L$  зависит от скорости деформации массы  $V$ , динамической вязкости массы  $\mu$ , плотности массы  $\rho$  и геометрического параметра лопатки  $b$ .

На практике оптимальное расстояние между лопаткой и днищем месильной камеры  $l$  выбирается равным  $L$  и достигается в процессе настройки тестомесильных машин на рабочие режимы в производственных условиях. Точное определение  $l$  экспериментальным путем проблематично из-за сложности визуального контроля за ходом процесса.

Если в действительности зазор между лопаткой и днищем  $l$  равен  $L$ , то подведенная механическая энергия полностью превращается в тепловую

вследствие диссипационных процессов в вязкой массе, а также осуществляется развитие структуры теста. Если  $l$  меньше  $L$ , то происходит скольжение массы теста по стенке месильной камеры: энергия расходуется на трение скольжения, а не на диссипационные процессы, обусловленные относительным положением слоев теста, — не на пластификацию теста.

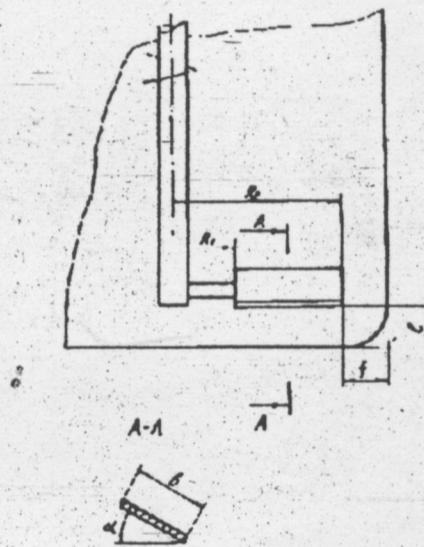


Рис. 1

Если  $l$  больше  $L$ , то на поверхности камеры остается слой неподвижного, непроработанного теста. Это можно определить визуально, поэтому на практике последний случай обычно устраняется при настройке.

Рассмотрим реальные случаи, когда на поверхности месильной камеры нет неподвижного теста, следовательно, лопатка расположена на расстоянии, несколько меньшем  $L$ .

Цель исследования — изучить характер изменения значения работы  $A$  в зависимости от зазора между лопаткой и днищем камеры  $l$ . Методики расчетов, позволяющие получать адекватное отражение реальных физических процессов, достаточно трудоемки, поэтому задача решается с помощью ЭВМ.

Диапазон изменения представим в безразмерных величинах: скорость движения теста изменяется от скорости лопатки  $V = 1$  на поверхности лопатки до 0 на расстоянии  $l = L = 1$ .

Следовательно, при  $V = 1$   $l = 0$ ,  
при  $V = 0$   $l = 1$ .

Профиль изменения скорости движения массы теста в этом зазоре можно определить из решения

задачи по обтеканию пластины вязкопластичной жидкостью (к которой в приближении можно отнести и хлебное тесто) Шведова—Бингама. Решение осуществлено для выбранных граничных условий [1]. Преобразовав результат для нашего случая, получим профиль скорости, выраженный в виде полинома третьей степени:

$$V = 1 - 1,5 \frac{V}{L} l + 0,5 \frac{V}{L^3} l^3 \quad (2)$$

или после подстановки

$$V = 1 - 1,5 l + 0,5 l^3 \quad (3)$$

Характер изменения скорости движения  $V$  и градиента скорости  $dV/dl$  в пограничном слое на различном расстоянии между лопаткой и дном представлен на рис. 2. Анализируя форму кривой,

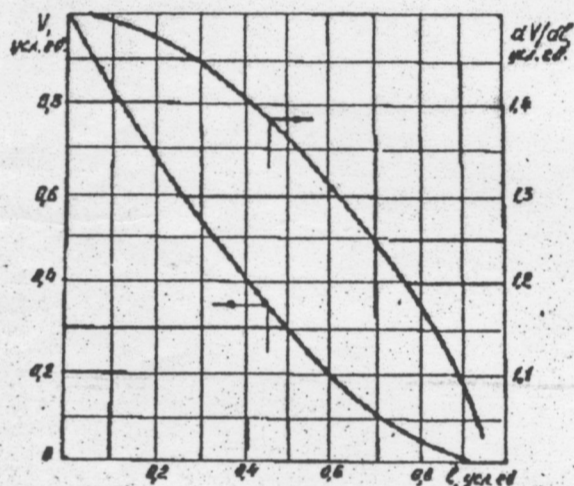


Рис. 2

можно сделать вывод, что зависимость  $V$  от  $l$  на первой половине расстояния от лопатки до точки  $V = 0$  почти линейная. Основной процесс затухания наблюдается на последней четверти кривой.

Рассмотрим теперь характер изменения градиента скорости деформации массы  $dV/dl$  в том же диапазоне изменения  $l$ .

Пусть лопатка в начальный момент времени находится вплотную к дну камеры ( $l = 0$ ), а затем начинает удаляться от него с шагом  $\Delta l = 0,05$  до момента, когда  $l$  станет равной 1. В нашем случае число шагов  $i = 20$ .

В выбранном диапазоне изменения параметров градиент скорости приближенно определяли по формуле:

$$\frac{dV}{dl} = \frac{V - V(i)}{i \Delta l} \quad (4)$$

Анализ кривой (рис. 2) показывает, что, поскольку толщина пограничного слоя  $L$  определяется реологическими свойствами вязкой массы и скоростью  $V$ , основным фактором, влияющим на градиент скорости, является проскальзывание теста по дну камеры. Эффективная составляющая скорости, определяющая величину  $dV/dl$ , выражается как  $[V - V(i)]$ . Взаимосвязанное изменение эффективной скорости и расстояния приводит к форме кривой, отраженной на рис. 2.

Численные значения всех величин расчета, определяемых комплексно, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Шаг изменения толщины пограничного слоя	$L$ , усл. ед.	$V$ , усл. ед.	$dV/dl$ , усл. ед.
0	0,00	1,000	—
1	0,05	0,925	1,499
2	0,10	0,851	1,495
3	0,15	0,777	1,489
4	0,20	0,704	1,480
5	0,25	0,633	1,469
6	0,30	0,564	1,455
7	0,35	0,496	1,439
8	0,40	0,432	1,420
9	0,45	0,371	1,399
10	0,50	0,313	1,375
11	0,55	0,258	1,349
12	0,60	0,208	1,320
13	0,65	0,162	1,289
14	0,70	0,122	1,255
15	0,75	0,086	1,219
16	0,80	0,056	1,180
17	0,85	0,032	1,139
18	0,90	0,014	1,095
19	0,95	0,004	1,049
20	1,00	0,000	—

При расчете работы на замес теста использовался показатель динамической вязкости, необходимость в котором возникает из-за зависимости численного значения вязкости массы от градиента скорости деформации  $\mu = f \left( \frac{dV}{dl} \right)$ .

Данные, отражающие зависимость динамической вязкости от градиента скорости, полученные



экспериментальным путем для хлебного теста [2], представлены в табл. 2.

Таблица 2

$dV/dl, с$	0,4	2,1	10,4	52,1	260,4	1300	3255
$\mu, Па \cdot с$	310	159	73,5	20,0	7,3	3,0	1,1

Общую функциональную зависимость этих величин рассчитывали по методу определения вязкости с помощью интерполяционного многочлена Лагранжа:

$$\mu = \sum_{k=0}^n f(x_k) \frac{(x-x_0) \dots (x-x_{k-1})}{(x_k-x_0) \dots (x_k-x_{k-1})} \times \frac{(x-x_{k+1}) \dots (x-x_n)}{(x_k-x_{k+1}) \dots (x_k-x_n)} \quad (6)$$

Зная общий закон изменения динамической вязкости  $\mu$ , можно представить ее зависимость для исследуемого случая (рис. 3).

Анализ формы кривой показывает, что если лопатка находится вблизи от стенки, то вследствие больших градиентов скорости динамическая вязкость будет малой. При расположении лопатки на больших расстояниях от дна, соизмеримых с глубиной распространения деформации, динамическая вязкость обрабатываемого слоя будет возрастать.

Зависимость работы на замес теста  $A$  от величины динамической вязкости является линейной, как следует из формулы (1), что отражено на рис. 3.

Анализируя форму кривой, можно сделать вывод, что  $A$  максимальна при толщине пограничного слоя  $L = l = 1$ . При  $l < L$  работа будет уменьшаться,

что объясняется взаимным изменением параметров скорости ( $V, dV/dl$ ) и динамической вязко-

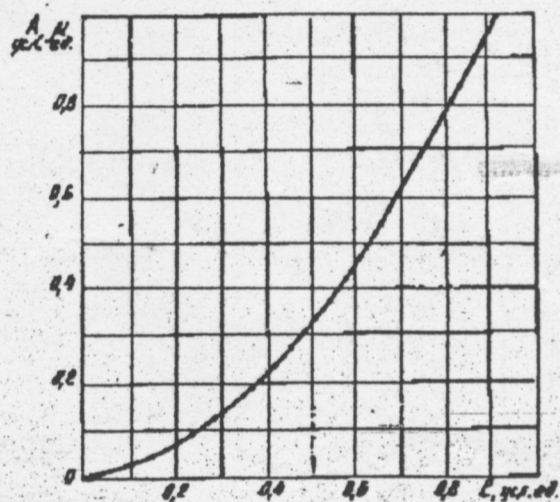


Рис. 3

сти теста.

Из этого следует, что и нагрев теста в результате диссипационных процессов, происходящих вследствие внутреннего трения в вязкой массе, при приближении лопатки к дну камеры в пределах пограничного слоя будет снижаться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Артюшков А.Ф. Динамика неньютоновской жидкости. — Л.: 1979. — 228 с.
2. Николаев Б.А. Структурно-механические свойства мучного теста. — М.: Пищ. пром-сть, 1974. — 248 с.

Кафедра машин и аппаратов хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств  
Поступила 12.02.93