

Эпюры скоростей и деформаций при неизотермическом течении мясного фарша по трубам.

В.М.ГРЕБАТОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт мясной промышленности, Москва, СССР

А.В.ГРЕБАТОВ, М.В.СИМОНОВ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, Москва, СССР

Внедрение непрерывных схем в производство, широкое применение комплексно-механизированных линий, механизация и автоматизация различных технологических процессов как в мясной, так и в других отраслях пищевой промышленности, требует дальнейшего совершенствования межоперационного трубопроводного транспорта. В связи с этим напорное движение неньютоновских жидкостей представляет собой большой научный и практический интерес.

При движении мясного фарша существенное влияние на процесс течения оказывают граничные условия взаимодействия фарша со стенками трубы. Вследствии высокой адгезии жировых частиц между собой и стенками трубы, на внутренней поверхности трубопровода образуется пристенный слой с повышенным содержанием жира. Явление налипания жира оказывает отрицательное влияние на процесс течения, уменьшая живое сечение трубы. При этом повышаются сопротивления при транспортировке, снижается пропускная способность трубопровода.

Одним из способов уменьшения жирового слоя является нагрев стенок трубопровода 1,2. Расплавленная жировая пленка образует тонкий смазочный слой между внутренней стенкой трубопровода и поверхностью фарша, снижающий сопротивление движению. Отсутствие расчетных зависимостей и экспериментальных данных по течению мясного фарша в обогреваемых трубопроводах препятствует их широкому использованию. Основой для получения зависимостей, позволяющих рассчитать параметры трубопровода, служат эпюры деформаций, скоростей и градиентов скоростей по живому сечению потока.

Для изучения эпюр проведены экспериментальные исследования установившегося течения мясного фарша в круглой трубе с расномерно обогреваемой стенкой.

Эксперименты выполнены на разрезной по оси трубе диаметром 0,05 м, длиной 1,33 и 2,62 м. Температуру стенки трубы изменяли от 20 до 45°C. Исследование проводили в два этапа. На первом этапе установили влияние скорости, а на втором - влияние температуры стенки на характер распределения деформаций при течении мясного фарша. Опытные эпюры деформации (I) представлены на рис. 1.

На основании рассмотрения эпюр деформаций можно сделать следующие выводы. При течении мясного фарша к стенке прилипает слой малой толщины тонкодисперсного вещества, состоящий из мельчайших частичек фарша, жира и т.д. Затем движется промежуточный слой и, наконец, ядро потока в виде квазитвердого стержня.

С увеличением средней скорости (V) потока относительные сдвиги в ядре увеличиваются.

На рис. 1а, 1б, 1в, 1г, 1д приведены эпюры скоростей (II), рассчитанные по опытным эпюрам деформаций (I). Достаточно полно картина профиля скоростей характеризуется отношением U_{max}/w . Теоретически это отношение изменяется от единицы до трех в зависимости от режима течения. При структурном режиме, который наблюдается при течении мясного фарша, отношение максимальной опытной скорости (II) к средней составляет около 1,26. Для опытных эпюр скоростей (II), приведенных на рис. 1а-1д, объем тела вращения равен объемному секунднему расходу (V с, м³/с), т.е.

$$V_c = \pi R^2 w \quad (I)$$

где R - внутренний радиус трубы, м;
 w - средняя скорость потока, м/с.

При нагреве трубопровода, температура транспортируемой массы изменяется по радиусу трубы. Причем наибольшие изменения температуры происходят в пристенном слое, а температура основного потока практически не изменяется. Наличие температурного градиента в пристенном слое приводит к уменьшению его вязкости и, следовательно, повышению текучести в кольцевом слое по сравнению с текучестью в объеме. При этом происходит видоизменение опытных эпюр деформации и скоростей (рис. 1е, 1ж, 1з, 1и).

Наибольшие деформации мясной фарш испытывает в пристенном слое, где происходит резкое изменение скорости. Ядро потока движется в виде квазитвердого стержня. Объем тела вращения, образованный опытными эпюрами скоростей, оказывается больше, чем объемный секундный расход по формуле (I). Следовательно, нагрев трубопровода способствует увеличению его пропускной способности и снижению сопротивлений движению при прочих равных условиях.

Отношение U_{max}/w приблизительно равно 1,1, что свидетельствует о выравнивании профиля скоростей по живому сечению потока.

Анализ экспериментальных эпюр деформаций и скоростей позволяет отнести мясной фарш к "степенным жидкостям" и использовать для расчета его течения соответствующие уравнения.

Теоретические зависимости для описания процесса течения мясного фарша получены исходя из рассмотрения модели движения "степенной жидкости"

$$\frac{u}{w} = \frac{1 + 3n}{1 + n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (2)$$

где u - локальная скорость, т.е. скорость элементарного слоя, расположенного на расстоянии r от оси трубы, м/с;

n - индекс течения.

Индекс течения исследуемого мясного фарша имеет предел изменения от 0,2 до 0,3. Объемный секундный расход определяется по уравнению:

$$V_c = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{1}{2k_{эф}} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} \right)^{1/n} \cdot R^{\frac{3n+1}{n}} \quad (3)$$

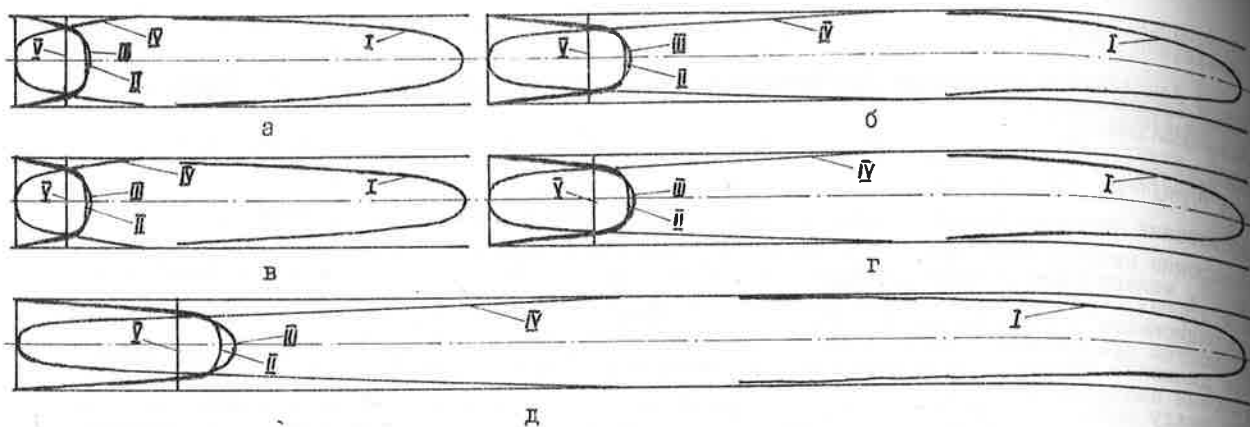
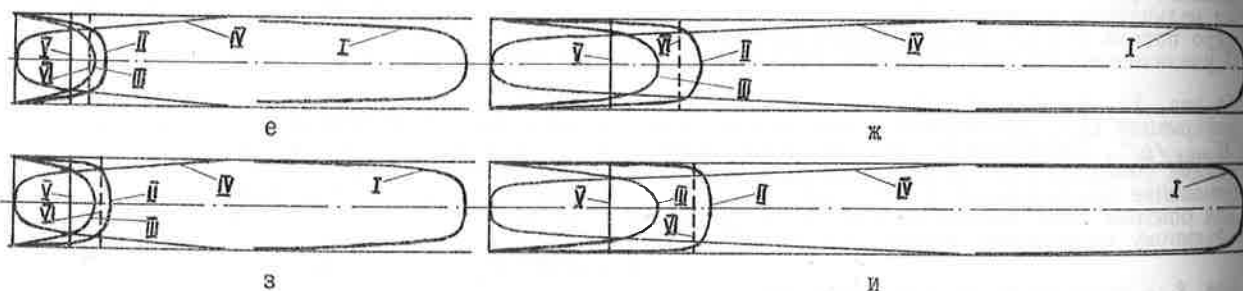


Рис. I Эпюры распределения деформаций, скоростей и градиентов скоростей мясного фарша по поперечному сечению потока: I - опытная эпюра деформаций; II - опытная эпюра скоростей; III - расчетная эпюра скоростей; IV - расчетная эпюра градиентов скоростей; V - средняя скорость потока в трубе без нагрева; VI - средняя скорость в трубе с равномерно обогреваемой стенкой.

Fig. I Epures of distribution of deformation, rates and rates gradients of comminuted meat by cross-section of stream: I - test epure of deformation; II - test epure of rates; III - calculated epure of rates; IV - calculated epure of rates gradients; V - average stream rate in the tube without heating; VI - average rate in the tube with uniformly heated wall.



Продолжение рис. I

где $\frac{\partial p}{\partial z}$ - градиент давления по длине трубы, Па/м;
 $\nu_{эф}$ - эффективная вязкость, Па·с.
 Уравнение для расчета градиента скорости ($\dot{\gamma}$, с⁻¹) имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial r} = \omega \cdot \frac{3n+1}{n} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{1/n} \cdot \frac{1}{R} \quad (4)$$

На рис. I показаны эпюры скоростей (III) и градиентов скоростей (IV), рассчитанные по уравнениям (2) и (4).

Опытные эпюры (II) на рис. Ia-Iд в пределах ошибки эксперимента хорошо согласуются с расчетными (III).

Основные параметры, характеризующие течение мясного фарша по рис. I, сведены в табл. Однако уравнения (2), (3) и (4) получены без учета пристенного эффекта, который оказывает существенное влияние на процесс течения, обуславливая увеличение расхода и не могут быть использованы для расчета неизотермического течения мясного фарша.

Количественную оценку величины дополнительного расхода можно дать, исходя из представления о двухслойном потоке в трубе (рис. 2). Опытные эпюры деформаций (I) и скоростей (II) (рис. Ia-Iи) подтверждают наличие двух зон - пристенного, кольцевого слоя толщиной $\delta = R - R_1$ и основного потока радиусом R_1 . Следовательно, общий секундный объемный расход (V с.) представляет собой сумму трех расходов (рис. 2): пристенного, кольцевого слоя (V п.с.), цилиндрической части основного потока (V ц) и вершины ядра потока (δV я).

Тогда

$$V = V_{п.с.} + V_{я} + \delta V_{я} \quad (5)$$

Причем расход цилиндрической части основного потока (V ц) представляет собой как бы пробку с основанием πR_1^2 , и высотой, равной скорости

$$V_{я} = \pi R_1^2 \cdot u_{ср} \quad (6)$$

Для определения составляющих общего расхода необходимо установить законы распределения скоростей при течении "степенной жидкости" с различными вязкостными свойствами в пристенном слое и основном потоке. Индекс течения (n) в диапазоне температур 20-45° в пределах опыта эксперимента считали постоянным.

$$b_{\text{ф.п.с.}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left[z \left(\frac{\partial u_{r_1}}{\partial r} \right)^n \right] = - \frac{\partial p}{\partial z}, R_1 < z < R \quad (7)$$

$$b_{\text{ф.п.с.}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left[z \left(\frac{\partial u_{r_2}}{\partial r} \right)^n \right] = - \frac{\partial p}{\partial z}, 0 < z < R_1 \quad (8)$$

$$u_{r_1} = 0, \text{ при } z = R \quad (9)$$

$$u_{r_1} = u_{r_2} \text{ при } z = R_1 \quad (10)$$

$$u_{r_2} = 0, \text{ при } z = R_1 \quad (11)$$

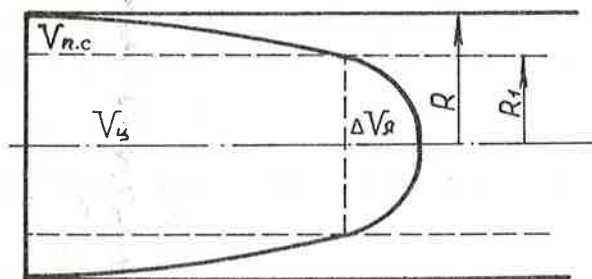


Рис.2 Схема течения мясного фарша в трубе с равномерно обогреваемой стенкой.

Fig. 2 Scheme of communitated meat stream in the tube with uniformly heated wall.

$$\frac{\partial u_{r_2}}{\partial z} = 0, \text{ при } z = 0 \quad (12)$$

Решая уравнения (7) и (8) при условиях (9), (10), (11) и (12), с учетом уравнений (5), (6), получим следующее выражение для определения расхода при наличии пристенного слоя:

$$V_c = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{1/n} \cdot \left(\frac{1}{2 b_{\text{ф.п.с.}}} \right)^{1/n} \cdot R_1^{\frac{3n+1}{n}} \left\{ \left(\frac{b_{\text{ф.п.с.}}}{b_{\text{ф.п.с.}}} \right)^{1/n} \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{3n+1}{n}} - 1 \right] + 1 \right\} \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), благодаря наличию пристенного слоя с вязкостью секундный объемный расход увеличивается на величину

$$\frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{1/n} \cdot \left(\frac{1}{2 b_{\text{ф.п.с.}}} \right)^{1/n} \cdot R_1^{\frac{3n+1}{n}} \cdot \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{3n+1}{n}} - 1 \right] \quad (14)$$

Представив общий расход в виде двух составляющих - расхода пристенного слоя ($V_{\text{п.с.}}$) и расхода ядра потока ($V_{\text{я}}$) и решив, соответствующие для этого случая уравнения, получим точно такую же зависимость для определения расхода как и выражение (13). При отсутствии пристенного эффекта, т.е. при $R_1 = R$, выражение (13) переходит в полученное ранее уравнение (3) для течения "Степенной жидкости" в круглой трубе.

Выводы

1. Экспериментальные энтропии деформаций (I) и скоростей (II) позволяют отнести мясной фарш к "степенным жидкостям" и использовать для расчета его течения соответствующие уравнения.
2. Установлено, что при неизотермическом течении мясного фарша в круглой трубе образуется пристенный слой с вязкостными свойствами, отличающимися от свойств ядра потока. Благодаря этому снижаются сопротивления движению массы и увеличивается пропускная способность трубопровода.
3. На основе двухслойной модели течения мясного фарша получена теоретическая зависимость для определения секундного объемного расхода в равномерно обогреваемой трубе.

Основные параметры потока
The main parameters of stream

Таблица № I Table I

Fig. I Рис. I Параметры Parameters	а	б	в	г	д	е	ж	з	и
Средняя скорость, м/с Average rate, m/sec.	0,3	0,59	0,3	0,61	0,91	0,43	1,09	0,49	1,17
Опытная максимальная скорость, м/с Test maxm. rate, m/sec.	0,38	0,76	0,36	0,79	1,11	0,49	1,20	0,53	1,23
Расчетная максимальная скорость, м/с Calculated maxm. rate, m/sec.	0,41	0,8	0,41	0,83	1,24	0,44	0,95	0,44	0,95
Наружная температура стенки, °C Temperature outside of the wall, t C	17,0	20,0	20,0	20,0	20,0	29,0	37,0	37,0	44,0
Расчетный максимальный градиент скорости, Calculated maxm. gra- dient of rate	45,3	89,0	45,3	92,0	137,0	48,3	106,0	48,3	106,0

Продолжение Таблицы № I
Cont. table I

Fig. I Рис. I Параметры Parameters	а	б	в	г	д	е	ж	з	и
Расстояние от входа в трубу до эяры деформации, м Distance from tube inlet to deformation epure, m	0,840	1,065	1,895	1,895	0,775	1,170	1,315	1,205	1,110
	1,27	1,29	1,20	1,30	1,22	1,14	1,1	1,08	1,05

Литература

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. М. Пищевая промышленность, 1979. - 384с.
2. Транспортировка мясного фарша по трубопроводам / А.В.Горбатов, В.Д.Косой, М.Б.Смирнов, О.В.Звонов, В.Н.Крючков. - Мясная индустрия СССР, 1978, № 7, с.18-20.