

Исследование потерь давления при движении колбасных фаршей в трубах с обогреваемой стенкой

В.М.ГОРБАТОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт мясной промышленности, Москва, СССР

А.В.ГОРБАТОВ и М.Б.СМИРНОВ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, Москва, СССР

Изучено движение колбасного фарша при температуре стенки трубы от 11 до 50°C. Нагрев трубопровода осуществляли гибкими ленточными электронагревателями; давление измеряли потенциометрическими датчиками, температуру - термомпарами с автоматической записью показаний; среднюю скорость вычисляли по массовому расходу; эпюры деформаций определяли с помощью разрезной по оси трубы.

Обобщения экспериментов позволили установить инженерные расчетные зависимости для вычисления: потерь давления по длине фаршепровода на основе модели степенной жидкости, теплопередачи на основе степенной зависимости между критериями Нуссельта и Гретца. Кроме того, разработана методика графоаналитического расчета потерь давления при различных температурных режимах стенки трубы.

Практическая зависимость работы заключается в том, что а) обоснован способ существенного снижения давления транспортировки фарша при несущественном повышении температуры всей его массы (1 - 2°C), б) исключается внутреннее осаливание трубопровода и в) возможно получение гладкой наружной поверхности фаршевого жгута.

A study into pressure losses during sausage mince movement along wall-heated pipes

Sausage minced meat movement was studied at pipe wall temperatures of 11-50°C. The experimental data obtained allowed to find engineering estimated relationships for pressure losses along the pipe by a power model, for heat transfer on the basis of a power relation between Nusselt and Gratz criteria. Besides, a procedure for grapho-analytical calculations of pressure losses at different pipe wall temperatures has been developed.

Вопросы передачи тепла от стенки к движущемуся фаршу имеют большое практическое значение как в случае межоперационного транспорта, так и при термической обработке колбасных изделий [1]. В первом случае при нагреве на внутренней поверхности трубы образуется тонкая пленка расплавленного жира, способствующая снижению сопротивлений при течении фарша. Во втором случае осуществляют нагрев всей массы продукта, что имеет место при термической обработке колбасных изделий. Во избежание "заклинивания" трубопровода при нагревании белковых денатурируемых систем температура не должна быть выше температуры денатурации.

В соответствии с этим, в качестве экспериментальных температур были приняты технологические температуры в диапазоне от  $11^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . Опыты проводили последовательно при нагреве трубопровода от наименьшей температуры к наибольшей.

Поскольку структурно-механические характеристики колбасного фарша изменяются при изменении температуры, одним из условий постановки опыта было обеспечение изотермичности процесса при определенной, заданной температуре.

При выборе методики проведения экспериментальных работ и создания установки основ-

ным условием являлось максимальное приближение постановки опытов к конкретным производственным условиям.

Установка состоит из побудителя движения, измерительной системы, которая представляет собой набор труб из нержавеющей стали с диаметрами 0,035, 0,050 и 0,060 м, длиной 7,585, 5,99 и 7,28 м соответственно, потенциметрических датчиков давления и термопар.

Измерительная система состоит из двух участков: 1 - входной участок для стабилизации течения; 2 - экспериментальный участок для измерения температур и давлений.

Подвод тепла к трубопроводу осуществляли гибкими ленточными электронагревателями типа ЭНГЛ-180 [2]. Нагреватели имеют наружную герметичную оболочку из кремнийорганической резины, что позволяет использовать их при относительной влажности до 100%.

На экспериментальной установке исследовали влияние температуры наружной стенки трубопровода на процессы течения фаршей сосисок молочных, колбас молочной, столовой и диетической. В общей сложности было проведено около 400 опытов.

При обработке опытных данных определяли среднюю скорость течения фарша в трубе

$$w = 4G / (\pi d^2 \rho \tau), \quad (1)$$

где  $G$  - вес продукта в мерной емкости, кг;

$d$  - внутренний диаметр трубы, м;

$\rho$  - плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - время наполнения мерной емкости, с.

Критерий Гретца

$$Gz = Mc \cdot c / (\lambda \cdot l), \quad (2)$$

где  $M_c$  — массовая подача, кг/с;

$C$  — удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг·К);

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности продукта, Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта

$$Nu = \alpha \cdot d / \lambda, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

На рис. I представлены графические результаты опытов для фарша колбасы молочной в виде зависимостей изменения давления по длине обогреваемой трубы. Для других видов фаршей характер изменения давления аналогичен.

На основе анализа графических зависимостей установлено, что повышение температуры стенки трубопровода вызывает уменьшение потерь давления за счет изменения вязкостных характеристик пристенного слоя. В интервале температур 32–36°C происходит резкое изменение давления (~ в 1,5 раза). Это вызвано плавлением жировой пленки и уменьшением сопротивлений течению. Следовательно, перекачка фарша по трубам должна производиться при наивысшей допустимой температуре (не превышающей температуры денатурации).

В результате обработки данных эксперимента получено уравнение для определения давления, которое имеет вид

$$p = p_0 \exp(\beta l / d), \quad (4)$$

где  $p_0$  — давление на выходе из трубы, Па;

$l$  — длина трубы, м;

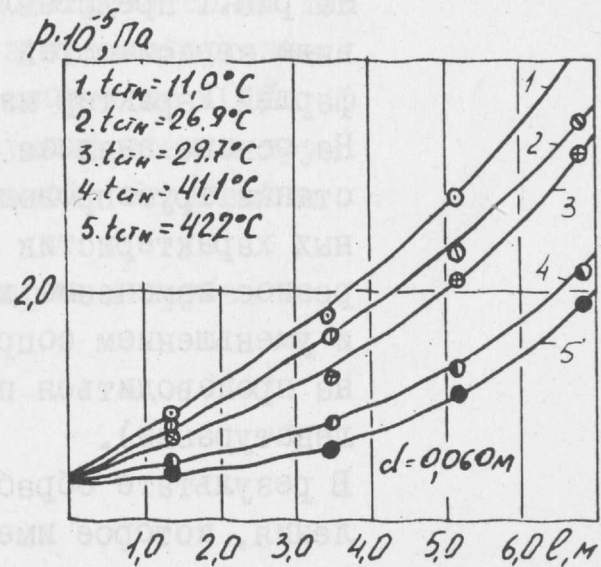
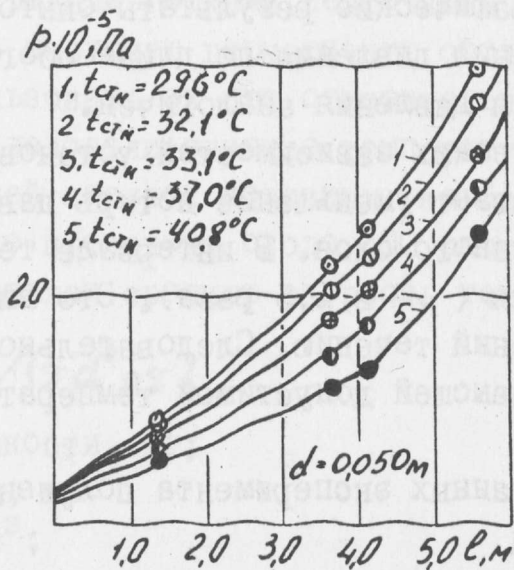
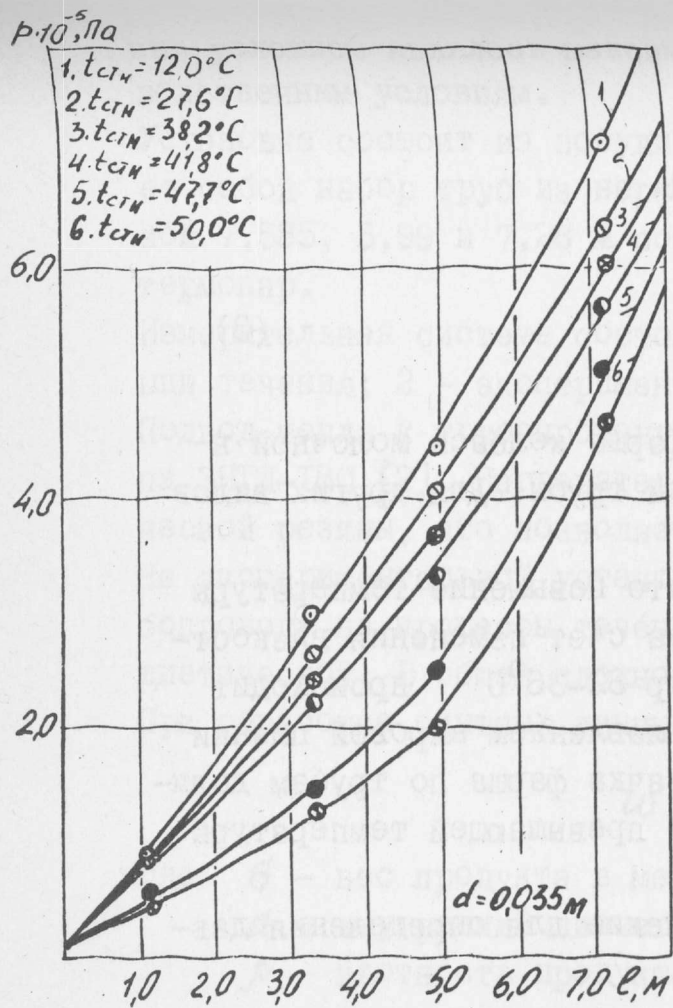


Fig. 1. Pressure changes along a minced meat pipe with a heated wall (for Molotchnaya sausage)

Рис. I. Изменение давления по длине фаршепровода с обогреваемой стенкой (для колбасы молочной).

$d$  - внутренний диаметр трубы, м;

$b$  - коэффициент.

Эмпирические коэффициенты  $b_0$  и  $b$  находили после обработки данных всей серии экспериментов для всех исследуемых продуктов по методу наименьших квадратов.

Зависимость давления на выходе из трубы от температуры  $p_0 = f(T)$  задана в виде опытной кривой (рис.2).

Значение коэффициента " $b$ " определяют из зависимости

$$b = 0,31 d, \quad (5)$$

где 0,31 - коэффициент,  $m^{-1}$ , полученный в результате графоаналитической обработки опытных данных.

Проверку величины давления фарша проводили по зависимостям, представленным в консистентных переменных [1]

$$\frac{pd}{4\ell} = B_0^* \gamma_1 \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \cdot \left(\frac{8w}{\gamma_1 d}\right)^n, \quad (6)$$

или

$$\frac{pd}{4\ell} = A_1 \cdot \left(\frac{8w}{\gamma_1 d}\right)^n, \quad (7)$$

где  $d$  - внутренний диаметр трубопровода, м;

$\ell$  - длина трубопровода, м;

$B_0^*$  - единичная вязкость, Па.с;

$\gamma_1$  - градиент скорости, равный единице,  $s^{-1}$ ;

$w$  - средняя скорость потока, м/с;

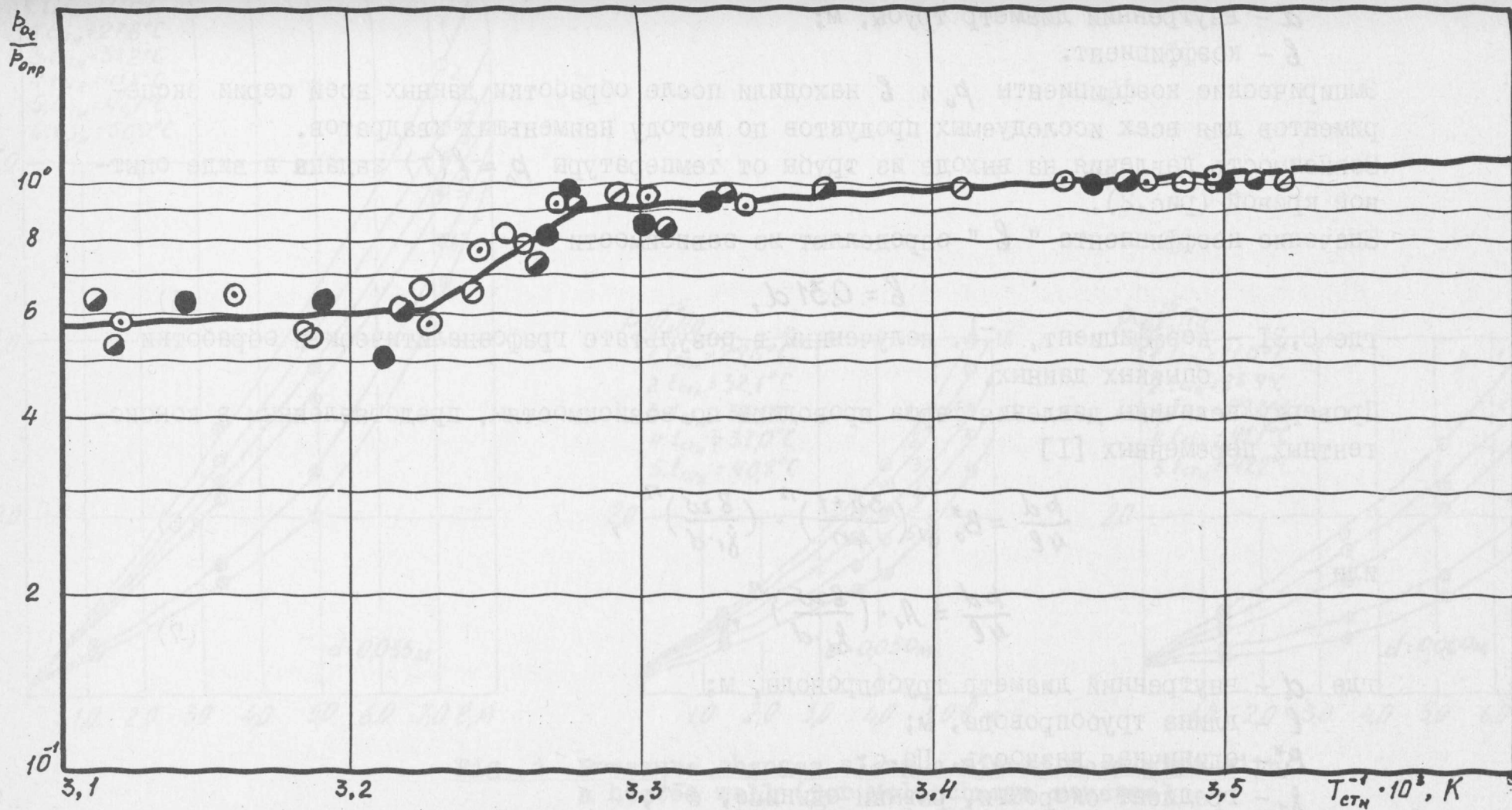


Fig. 2. The pressure at the pipe outlet as related to temperature  
 Рис. 2. Зависимость давления на выходе из трубы от температуры

$A_1$  - напряжение сдвига при единичном значении градиента скорости, Па;

$n$  - индекс течения.

Коэффициенты  $A_1$  и  $n$  могут быть определены по табл. I.

Таблица I

Ф а р ш	Значения величин для расчета трубопроводов	
	$A_1$	$n$
Сосисок молочных	340	0,23
Колбас: молочной	340	0,23
столовой	450	0,19
диетической	330	0,21

Для определения коэффициента теплоотдачи методом графического дифференцирования рассчитывали количество тепла, переданного от стенки к фаршу.

Кроме этого, коэффициент теплоотдачи может быть определен из основных соотношений:

$$Q = M_c \cdot c (t_o - t_i), \quad (8)$$

$$Q = 2\pi c \rho \int_0^R r u (t_o - t_i) dr, \quad (9) \quad \alpha = \frac{Q}{\pi d l [t_{стен} - 1/2(t_{стен} + t_i)]}, \quad (10)$$

где  $Q$  - количество тепла, передаваемое от стенки к движущемуся фаршу, Вт;

$t_i$  - температура фарша на входе в измерительную секцию, °С;

$t_o$  - температура фарша на выходе из измерительной секции, °С;

$t_{стен}$  - температура внутренней поверхности трубы, °С.

Значения удельной теплоемкости  $c$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , входящие в выражение (2) и (3) выбирали при температуре [3]

$$t = t_{стен} - 1/2(t_{стен} + t_i). \quad (II)$$



Результаты исследований передачи тепла от стенки к движущемуся фаршу представлены графически зависимостью критерия Нуссельта от критерия Гретца (рис. 3). Критериальная зависимость теплообмена между стенкой трубы и фаршем имеет вид

$$Nu = 1,4 Gz^{0,33} \quad (12)$$

Эмпирический коэффициент 1,4 в уравнении (12) может быть представлен выражением

$$1,4 = \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{B_{от}^*}{B_{ост}^*} \right)^{0,14} \quad (13)$$

В формуле (13)  $\left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{0,33}$  можно рассматривать как коэффициент неньютоновского поведения колбасного фарша. Этот коэффициент учитывает изменение интенсивности теплового переноса, обусловленное различием градиента скорости на стенке для неньютоновских жидкостей по сравнению с ньютоновскими.

Эмпирический поправочный коэффициент  $(B_{от}^* / B_{ост}^*)$  представляет собой обобщение поправки Сидера-Тейта, широко используемой в формулах теплообмена для ньютоновской жидкости. Этим коэффициентом учитывается искажение профиля скорости, вызванное изменением вязкости за счет наличия радиальных температурных градиентов в пристенном слое.

Величины  $B_{от}^*$  и  $B_{ост}^*$  представляют собой единичные вязкости, вычисленные при температуре фарша в пристенном слое и температуре стенки.

Окончательная формула для расчета критерия Нуссельта с учетом зависимости (13) принимает вид

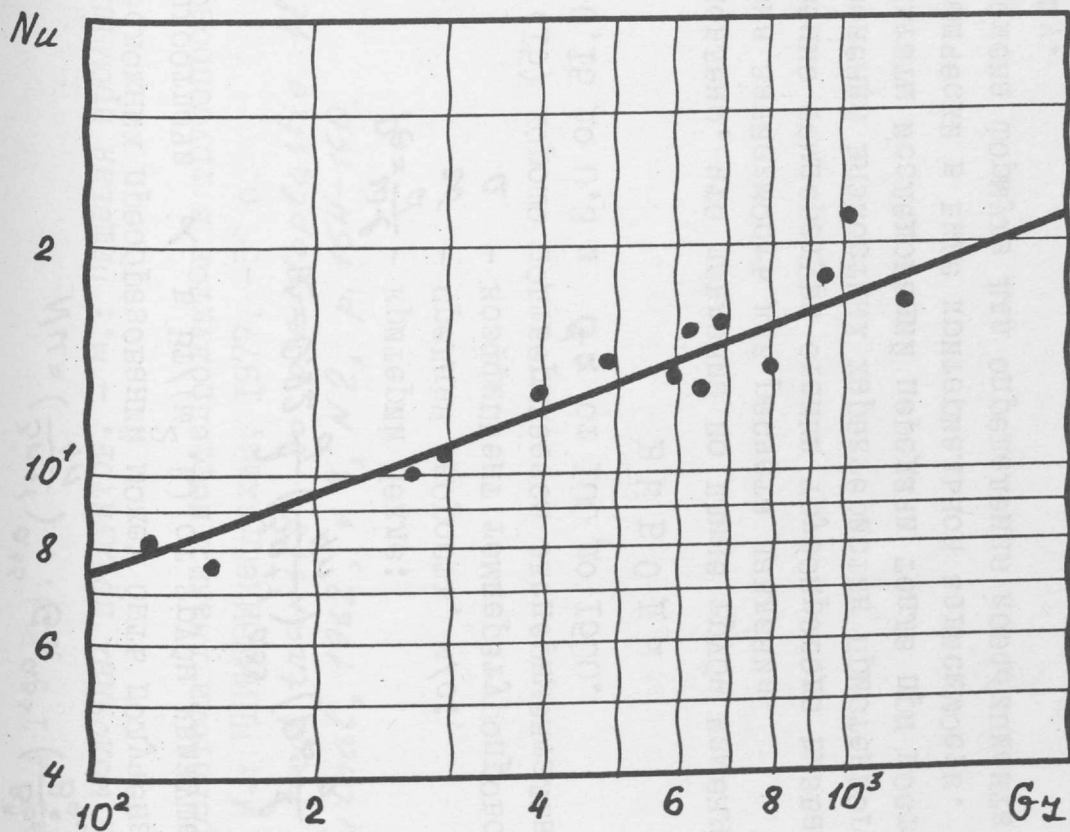


Fig. 3. A criterial relationship to calculate heat removal from the wall to the minced meat

Рис. 3. Критериальная зависимость для расчета теплоотдачи от стенки фаршу

$$Nu = \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^{0,33} \cdot Gz^{0,33} \cdot \left(\frac{Bo_t^*}{Bo_{cr}^*}\right)^{0,14}$$

После несложных преобразований может быть получена зависимость для коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в Вт/(м<sup>2</sup>·К) от трубы движущемуся фаршу

$$\alpha = 0,92 \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^{0,33} \cdot \left(Re \frac{l}{d}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{Bo_t^*}{Bo_{cr}^*}\right)^{0,14},$$

где

$Re = \frac{w \cdot l}{a}$  — критерий Пекле;

$w$  — средняя скорость, м/с;

$a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Формула (15) хорошо подтверждается экспериментальными данными в пределах  $n$  от 0,15 до 0,3 и  $Gz$  от 100 до 1500.

#### ВЫВОДЫ

1. Установлено, что давление по длине трубы изменяется по нелинейной зависимости. Предложена зависимость для расчета давления.
2. Повышение температуры стенки трубопровода вызвало уменьшение потерь на счет изменения вязкостных характеристик пристенного слоя и основного потока.
3. Результаты исследований передачи тепла при постоянной температуре фарша представлены графически в виде критериальной зависимости.
4. Предложена формула для определения коэффициента теплоотдачи от движущегося фаршу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1979. -384 с.
2. Фонарев В.И. Гибкие электронагреватели вязких нефтепродуктов в трубопроводах и технологическом оборудовании. - М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1977. -56 с.
3. *Cristiansen E.B., Craig S.E., Heat transfer to pseudoplastic fluids in laminar flow. - AIChE journal, 1962, v. 8, N2, p. 154-160.*