

Аналитические основы процесса вытопки пищевого жира из мягкого жirosыря в непрерывном потоке

А.Ф.САВЧЕНКО, И.В.ГУБАНОВ, В.М.МОРОЗОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт мясной промышленности, Москва, СССР

Н.Н.МИЗЕРЕЦКИЙ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, Москва, СССР

На основе анализа разработанной авторами математической модели показана возможность организации непрерывно-поточного процесса вытопки пищевого жира в аппарате барабанного типа. Оптимизация процесса достигается за счет совмещения операций механической и тепловой обработки сырья. Получены расчетные зависимости и определены количественные и качественные характеристики продукта.

Analytical and experimental fundamentals of continuous fat rendering from offals

The analysis of the mathematical model, developed by the authors, demonstrated a possibility of efficient continuous in-line fat rendering in a drum-type installation. The process is optimized due to combining mechanical and heat treatments of the raw material. Estimated relations have been derived, quantitative and qualitative characteristics of the product have been determined.

В настоящей работе развиваются основы технической теории обработки мягкого жирового сырья в роторных аппаратах-плавителях непрерывного действия. Все технологические процессы, осуществляемые в них, рассматриваются как вероятностные и протекающие с конечной скоростью. Аппараты-плавители относятся к оборудованию для разрушения структуры сырья и созданию структуры продукта.

Схема управления аппаратом-плавителем представлена на рис. I, где О - окружающая среда, I - система управления, II - продукт, III - аппарат-плавитель, IV - сырье. Вопросы управления аппаратом-плавителем достаточно подробно освещены Н.Н. Смирновым (1972) и в дальнейшем авторы на них не останавливаются. Основными элементами системы процессов обработки сырья в аппарате III являются механические, гидродинамические, тепловые, диффузионные и биохимические процессы. При теоретическом анализе этих процессов исходные уравнения связи могут быть сведены (в соответствие с принципом поэтапной редукции) к одномерному уравнению:

$$\left[ \frac{1}{m+1} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \int_a^z y_n^{m+1} dx - \int_a^z y_n^m \cdot \frac{\partial^2 y_n}{\partial x^2} dx \right] = 0$$

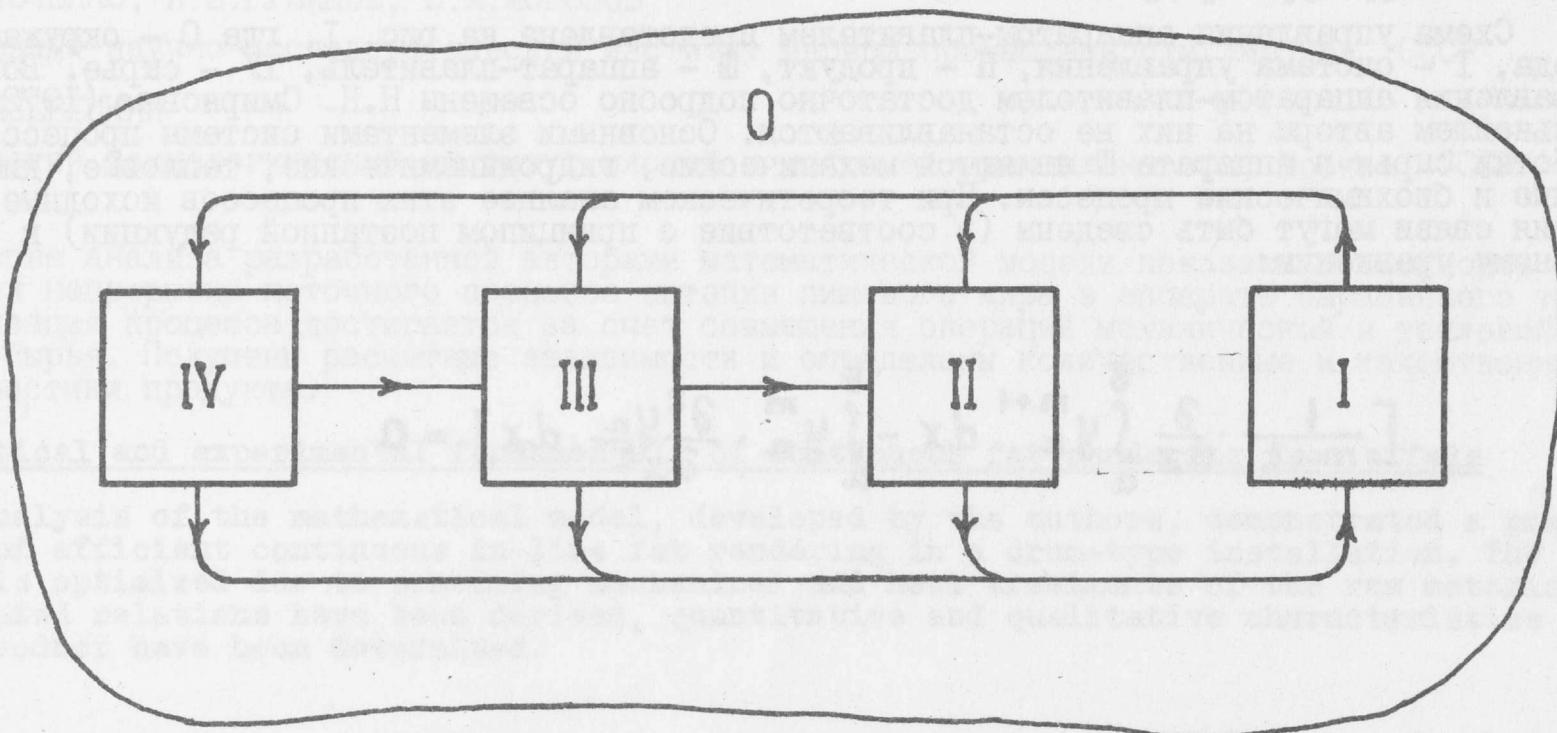


Рис. I

Схема управления аппаратом-плавителем.

Fig. 1. A scheme of controlling melter

где:  $y$  - распределение искомой величины (например, долговечности, импульса, температуры, концентрации и т.п.);  
 $x, z$  - независимые переменные (например, координата, время, напряжение и т.п.);  
 $a, b, m, n$  - постоянные.

Учитывая дискретный характер строения материи будем рассматривать все виды сырья, процессы и аппараты для вытопки пищевого жира из мягкого жиросырья как  $n$ -мерные решетчато-слоистые почтипериодические структуры, а величины, характеризующие физико-химические свойства сырья и готового продукта (геометрические размеры, плотность, температура и т.п.) и коэффициенты переноса (тепла, массы, импульса и т.п.) как  $\zeta$ -распределенные (например, как нормально распределенные).

При экспериментальном исследовании процесса вытопки пищевого жира в качестве мягкого жиросырья было использовано первичное сырье (сальники, жировая обрезь и т.п.) от свиней, мелкого и крупного рогатого скота, а также вторичное сырье (жировая шквара, колбасная обрезь, соленый шпик и т.п.). Технологический процесс обработки такого сырья в роторном аппарате-плавителе III представляется следующим образом.

Сырье IY с известными характеристиками (влажность, температура, жиро содержание, качественный, массовый и дисперсный состав и т.п.) в кусковом виде питателем в количестве  $M_1$  кг/с подается в аппарат III. Туда же подаются водяной пар в количестве  $M_2$  кг/с и вода в количестве  $M_3$  кг/с с известными характеристиками (температура, давление и т.п.). В аппарате III, который в дальнейшем будем рассматривать как модуль (см. рис. I), одновременно протекают процессы перемещения, перемешивания, разрушения, нагрева, охлаждения, растворения и разделения, сопровождающиеся фазовыми переходами вещества. На осуществление этих процессов расходуется электрическая и тепловая энергия. Производительность одного аппарата III предлагается определять по формуле:

$$\Pi = M \cdot \eta \quad (2)$$

где:  $\Pi$  - производительность аппарата, кг/с;  
 $M$  - количество жира, содержащегося в сырье, направляемого на обработку в аппарат, кг/с;  
 $\eta$  - степень извлечения жира из сырья, волях единицы,  $0 \leq \eta \leq 1$

Для исследования процесса вытопки пищевого жира из мягкого жиросырья в непрерывном потоке была использована двухмодульная установка, представленная на рис. 2. В первом модуле (аппарат I) было установлено режущее устройство, набранное из  $n_1$  плоских режущих пар типа нож-решетка. Во втором модуле (аппарат II) было установлено режущее устройство, набранное из  $n_2$  цилиндрических режущих пар аналогичного типа. Режущие пары отличались друг от друга числом зубьев на ноже ( $K$ ), угловой скоростью вращения ножа ( $\omega$ ,  $n$ ), диаметром ( $D$ ) и высотой решеток ( $H$ ), а также числом ( $m$ ) и диаметром ( $d$ ) отверстий в них.

Одной из первых аналитических зависимостей (см. табл. I, теория 3), предложенных для определения производительности режущего устройства  $\Pi$  в кг/с, была формула А.И. Пелеева:

$$\Pi = \frac{F}{F_p} \quad (3)$$

Таблица I  
Table 1

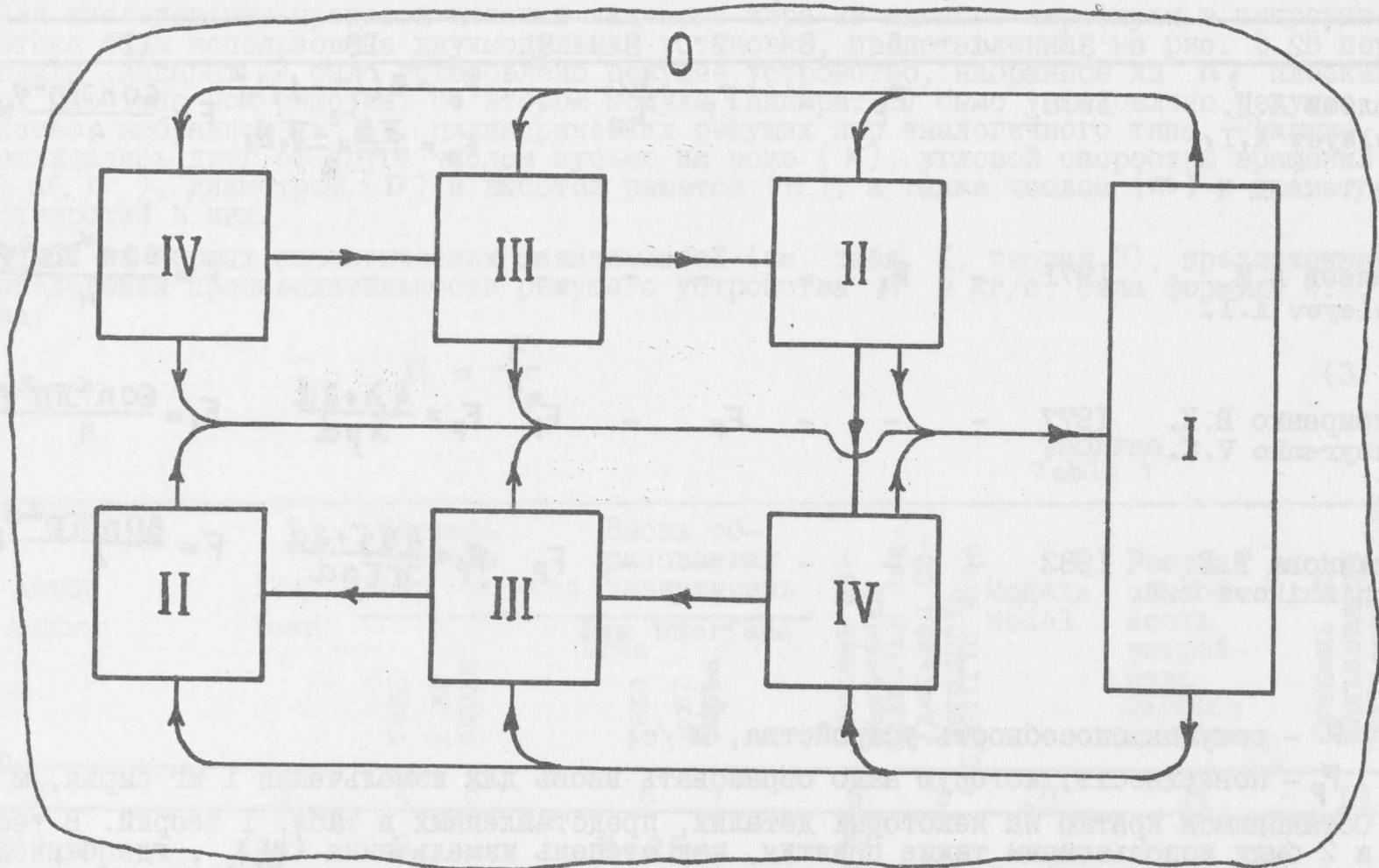
Теория Theory	Автор Author	Год Year	Площадь раздела Interface area		Вновь об- разованная поверхность New interface area		Степень из- мельчения Grinding deg. Удельная по- верхность area Specific area	Модель Model	Режущая способ- ность устрой- ства Cutting ability	Степень ис- пользования Utilization deg.	
			тела I	жиро- сырья II	тела I	жиро- сырья II					
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	I2
I. Риттингер Rittinger		1867	$F_p$	-	$F = 2F_p -$		$\frac{L_1}{L_2}$	-	-	-	-
2. Пелеев А.И. Peleev A.I.		1938	$F_p$	-	$F = 2F_p -$		$\frac{L_1}{L_2}$	-	$F_p = 3(\frac{L_1}{L_2} - 1)L_1^2 -$ $F_p = \frac{F_2 N_2^2 - F_1 N_1}{2}$	-	-

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	12
3. Пелеев А.И. Peleev A.I.	1938	-	$F_p$	-	$F_p$	$\frac{L_1}{L_2}$	-	$F_p = 3\left(\frac{L_1}{L_2} - 1\right) L_1^2$ $F_p = \frac{F_2 N_2 - F_1 N_1}{2}$	$F = \frac{60 n \pi D^2 \varphi_K}{4}$	-	
4. Пелеев А.И. Peleev A.I.	1971	-	$F_1$	-	-	-	-	-	$F = \frac{60 n \alpha \pi D^2 \varphi_K}{4} \varphi$		
5. Бубренко В.К. Buburenko V.K.	1977	-	-	-	$F_p$	-	$F_p$	$F_p = \frac{4\lambda + 2d}{\lambda \rho d}$	$F_1 = \frac{60 n \alpha \pi D^2 \varphi_K}{4}$	-	
6. Чижикова Т.В. Tchizhikova T.V.	1982	-	-	-	-	-	$F_p$	$F_p = \frac{4\sigma r + 2d}{\sigma r \rho d}$	$F = \frac{60 n \pi D^2 \varphi_K}{4} \varphi$		

где:  $F$  – режущая способность устройства,  $m^2/c$ ;

$F_p$  – поверхность, которую надо образовать вновь для измельчения I кг сырья,  $m^2/kg$ .

Остановимся кратко на некоторых деталях, представленных в табл. I теорий. В теориях I и 2 были использованы такие понятия, как степень измельчения ( $\frac{L_1}{L_2}$ ), где  $L_1$  и  $L_2$  – соответственно определяющий размер частиц сырья до и после измельчения; площадь раздела ( $F_p$ ) и вновь образованная поверхность ( $F = 2F_p$ ) сырья; полная поверхность ( $F_1, F_2$ ) и число частиц ( $N_1, N_2$ ) сырья до и после его измельчения. В теории 3 вводится понятие поверхности  $F_p$  (см. (3)), учитывается степень использования рабочей площади решетки ( $\varphi = m \cdot \frac{d^2}{D^2}$ ), а понятие вновь образованной поверхности отождествляется с понятием



**Рис.2** Fig. 2.

Схема управления двухмодульным аппаратом для выпечки пищевых топленых жиров.

A scheme of controlling a two-module melter for edible fats

площади раздела, введенным в теориях I и 2.

В теории 4 вводится понятие поверхности раздела  $F_1$ , образованной при измельчении единицы массы сырья. Численные значения  $F_1$  в теории 4 совпадают с численными значениями  $F_p$  в теории 3. Таким образом понятие поверхности раздела  $F_1$  в теории 4 отождествляется с понятием вновь образованной поверхности  $F_p$  в теории 3.

В теории 5 вводится понятие удельной поверхности  $F_p$ , которое отождествляется с понятием вновь образованной поверхности  $F_p$ , введенным в теории 3. Понятие о режущей способности устройства  $F_1$  в теории 5 отождествляется с понятием  $F$  в теории 4. В теориях 4 и 5 введен показатель степени  $\alpha$  при угловой скорости вращения ножевого вала  $n$  ( $n^\alpha, \alpha \leq 1$ ). В теориях 2, 3, 5, 6 приведены формулы для вычисления  $F_p$ , а в теориях 3, 4, 5, 6 приведены формулы для вычисления  $F$  и  $F_1$ . В теориях 4 и 6 степень использования рабочей площади решетки  $\Psi$  учитывается дважды. В теориях 5 и 6 введено понятие плотности сырья  $\rho$ . В теории 5 введено понятие глубины вдавливания сырья  $\lambda$  в отверстия решетки, а в теории 6 введены понятия: скорость истечения продукта из отверстий решетки  $v$  и время его истечения  $\tau = \frac{60}{nk}$  ( $\lambda = v \cdot \tau$ ).

Как видно из табл. I за период с 1938 г. по 1982 г. в аналитическую зависимость (I) не было внесено существенных изменений. Последовательной кинетической теории измельчения сырья животного происхождения в аппарате-плавителе Ш до настоящего времени не создано. Разработка такой теории связана с большими трудностями. Можно полагать, что построение теоретических основ работы режущего устройства аппарата-плавителя Ш надо начать с уточнения символики, аксиоматики, правил вывода и интерпретации теорий I, 2, 3, 4, 5, 6.

В первую очередь рассмотрим перемещение сырья (оно считается сжимаемым) вдоль оси питателя. По мере продвижения диспергированной сырьевой массы к режущему устройству степень ее уплотнения возрастает. Конденсирующийся на поверхности кусков сырья пар, содержимое клеток сырья, разрушенных при термодеструкции (в том числе жировых), и вода образуют жидкую среду, в которой находятся куски сырья. Если питатель обеспечивает скорость продвижения сырья по направлению к режущему устройству  $v$ , то при длине питателя  $l$ , продолжительность нахождения сырья в нем  $\tau$  составит:

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (4)$$

где:  $E$  - энергия активации образования перекисей;

$w_0, K$  - постоянные.

Явления, имеющие место в концевой зоне питателя в непосредственной близости к поверхности решетки режущего устройства, аналитически и экспериментально изучены недостаточно (Т.В.Чижикова, 1982). В первом приближении общая картина движения сырья в этой зоне представляется следующим образом. Под давлением, создаваемым питателем (предельная величина давления определяется прочностными характеристиками конструкции аппарата-пловителя III и его производительностью), вязко-пластичный поток сырья, стекая с питателя, обтекает зубья ножа и разделяется на  $K$  потоков; каждый из  $K$  потоков, обтекая тело решетки, разделяется на  $m_K$  потоков, общее число которых  $K \cdot m_K = m$ .

В зоне режущего устройства потоки сырья смешиваются с подаваемыми в него паром и водой. Пар конденсируется полностью. Для движения сырьевых потоков в зоне режущего устройства характерен турбулентно-фильтрационный режим; продолжается термодеструкция оболочек жировых клеток; происходит выплавка жира. Можно считать, что в первом приближении основные параметры процесса выплавки жира ( $\tau, T, h_1/h_2$ ) связаны между собой зависимостью:

$$f_1(\tau) \cdot f_2(T) \cdot f_3\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \text{const.} \quad (9)$$

519

Соотношение (9) позволяет варьировать технологические режимы обработки сырья в аппарате III, оставляя неизменным высокие качества продукта. Скорость его истечения  $v$  из отверстий решетки определяется давлением, создаваемым питателем, формой и величиной площади проходного сечения  $f$  этих отверстий. Зависит скорость  $v$  и от других факторов процесса (В.К.Бубренко, 1977). Истечение продукта из  $m$  отверстий может быть как свободным, так и затопленным. Можно полагать, что за время  $\tau = 60 : mK$  через одно отверстие решетки успевает протечь без взаимодействия с зубом ножа объем продукта:

$$V = v \cdot f \cdot \tau \quad (10)$$

Этот объем продукта может быть сплошным, отрезанным от сплошного массива сырья или составным, отрезанным от расщлененного массива сырья. Размерный состав сырья до решетки и после нее является  $F$ -распределенным. Результатом взаимодействия режущей кромки зуба ножа и режущей кромки отверстия решетки с сырьем являются деформационные разрушения связей в сырье. Наблюдаются возвратные течения из отверстий решетки, скручивание потоков сырья и интенсивное перемешивание. При этом оболочки жировых клеток разрушаются как на

За время  $\tau$  куски сырья размером  $l_1 \times l_2 \times l_3$  (увеличением объема тел при нагревании пренебрегаем) в соответствии с уравнением (I) нагреются до температуры (с учетом повышения температуры сырья вследствие трения и сжатия):

$$T = T_0 + (T_c - T_0) \cdot \Psi(\tau), \quad (5)$$

$$\Psi(\tau) = \left[ \frac{\sqrt{2} M a \tau}{(m+2)n^2} \cdot \frac{\alpha}{\lambda} (1-x)(1-y)(1-z) \right]^3, \quad (6)$$

где:  $T_0$  - начальная температура сырья;

$T_c$  - температура жидкой среды;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи сырья;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности сырья;

$x, y, z$  - относительные расстояния от поверхности до центра куска сырья;

$M, m, n$  - постоянные.

520

Нагрев сырья до температуры  $T$  в питателе должен обеспечить тепловую деструкцию оболочек жировых клеток (степень которой ограничивается заданным значением степени извлечения жира из сырья  $\eta$  после первого или второго модуля аппарата III) и, как следствие, снижение долговечности сырья  $\tau$  при его измельчении (Буссе, 1942):

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (7)$$

где:  $E$  - энергия активации измельчения;

$\tau_0, k$  - постоянные.

Продолжительность термообработки сырья  $\tau$  при температуре  $T$  тесно связаны со скоростью образования первичных продуктов окисления жиров: перекисных соединений типа  $R_O_2 H$ . Скорость образования  $W$  перекисей при температуре  $T$  составляет (А.А.Соколов, 1965):

$$W = W_0 e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (8)$$

поверхности кусков сырья, так и в плоскостях резания и кручения. Механизм этого разрушения до настоящего времени изучен слабо, ввиду отсутствия общепризнанной теории прочности (В.И.Феодосьев, 1972).

Продолжительность пребывания сырья в зоне режущего устройства  $\tau$  и его температура  $T$ , а также степень измельчения  $\eta_1/\eta_2$  могут быть найдены по формулам (4), (5) и (6) при условиях (7) – (10). В результате теплового и механического воздействий в первом модуле аппарата III осуществляется процесс вытопки из сырья легкоплавких фракций жира, степень завершенности которого может быть определена по формуле:

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (II)$$

где:  $C_0$  – начальная концентрация жира, заключенного в сырье;

$C$  – конечная концентрация жира, заключенного в сырье;

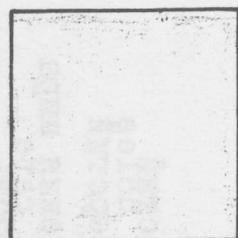
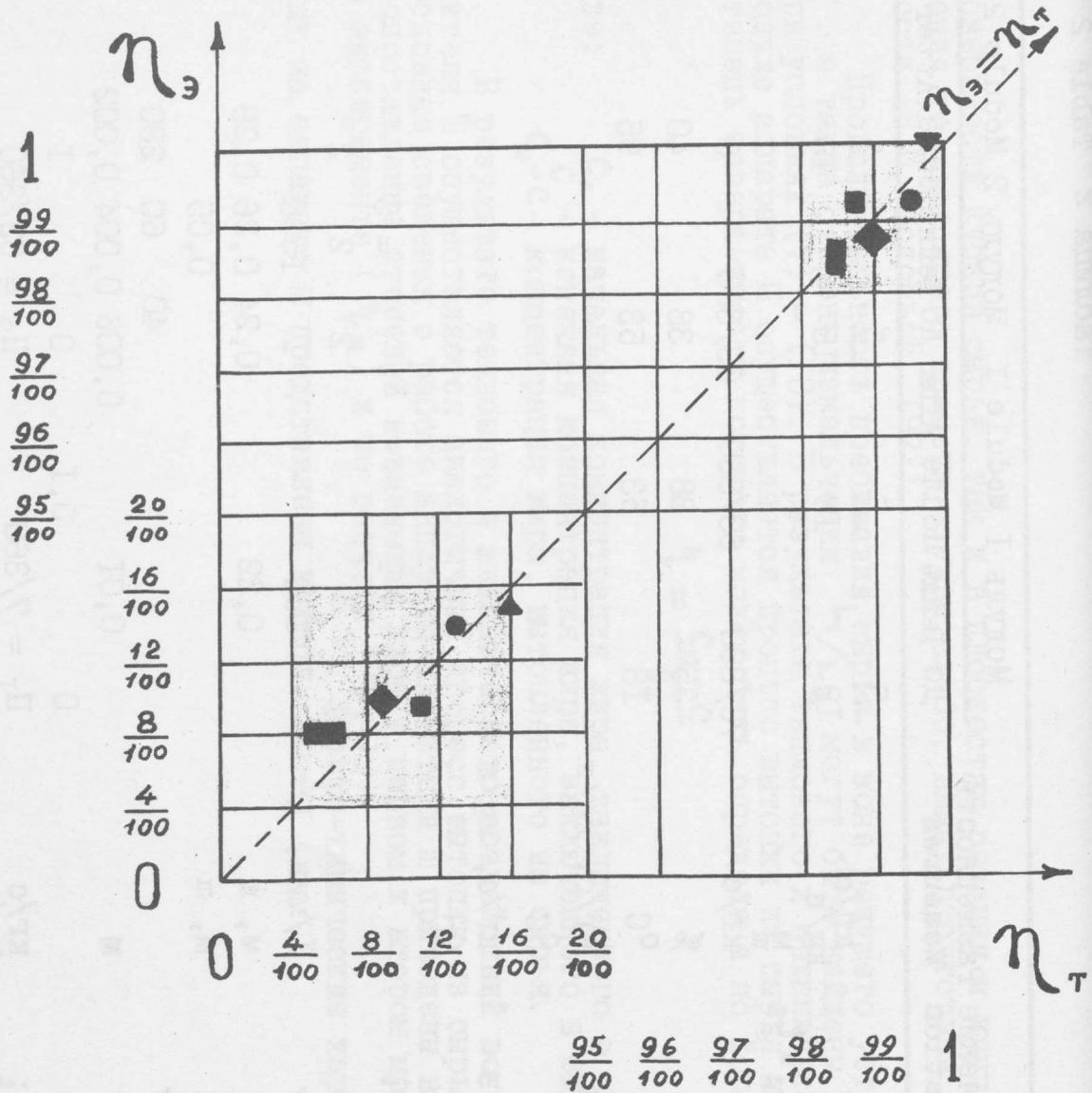
$C_0 - C$  – концентрация жира, вытопленного из сырья.

В результате теплового и механического воздействий во втором модуле аппарата-пловителя III осуществляется аналогичный процесс вытопки из сырья тугоплавких фракций жира. Основные сведения о работе аппарата-пловителя III приведены в табл. 2. На рис. 3 дано сопоставление степеней извлечения жира в первом и втором модуле аппарата III, полученных в эксперименте ( $\eta_2$ ) и по расчету ( $\eta_1$ ).

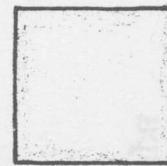
Физико-химические характеристики жиров, вытопленных на аппарате III представлены в табл. 3.

Таблица 2 Table 2

Показатели Indices	Обозначение Designation	Размерность Measures	Модуль I Module I		Модуль 2 Module 2	
			До Before	После After	До Before	После After
Сырье Raw meat	$M_1$	кг/с kg/s	5 I8	5 I8	5 I8	5 I8
размер кусков piece size	$l_1 \times l_2 \times l_3$	м m				
содержание жира fat content	$M$	кг/с kg/s	70/360	63/360	63/360	0
влажность water content	$W$	%	35	38	38	40
температура temperature	$T$	°C	I8	53	53	95
Пар Steam	$M_2$	кг/с, kg/s				
температура , temp.	$T$	°C				
Вода Water	$M_3$	кг/с, kg/s				
температура, temp.	$T$	°C				
Число режущих пар Number of cutting pairs	$n_i$	-	= I			= 5
Число зубьев ножа Number of teeth in a knife	$K$		3		2	2
Скорость вращения ножа Knife rotation speed	$n$	1/мин, 1/min.	I80		I500	
Диаметр решетки Plate diam.	$D$	м, m	0,22		0,24	0,26
Высота решетки Plate height	$H$	м, m			0,05	
число отверстий number of holes	$m$				40	60
диаметр отверстий hole diam.	$d$	м	0,01		0,006	0,004
Степень извлечения жира Fat extraction rate	$\eta$		0	0,1	0	I
Производительность Capacity	$P_i$	кг/с kg/s	$\Pi_I = 7/360$		$\Pi_2 = 63/360$	



Модуль I  
Module I



Модуль 2  
Module 2

Рис.3 Fig.3.

Степень извлечения жира в первом и втором модулях аппарата для вытопки пищевых топленых жиров.  
Fat extraction rate in the 1st and 2nd modules of an edible fat melter

Таблица 3 Table 3

Показатели Index	Обозначение Designation	Размерность Measures	Жир топленый Melted fat		
			говяжий beef	бараний sheep	свиной pork
Число омыления Saponification number			I96	I98	I97
Генера Gener number			96	95	96
Рейхерта-Мейссля Reichert-Meissl number			0,4	0,6	0,7
Йодное Iodine number			40	41	56
Родановое Thiocyanogen number			35	34	48
Ацетильное Acetyl number			3,2	-	2,6
Поленске Polenske number			-	0,4	0,5
Температура плавления Melting temp. $T^{\circ}\text{C}$			47	50	38
Теплота плавления Melting heat $\mathfrak{L}$	ккал/kg	ккал/kg кг	32	32	32
Теплопроводность Heat conduction	$\lambda$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м град}}$ $\frac{\text{Wt}}{\text{m deg}}$	0,37	-	0,33
Теплоемкость Heat capacity	$C$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг град}}$ $\frac{\text{kcal}}{\text{kg deg}}$	0,55	0,54	0,48
Плотность Density	$d_{15}^{15}$ $d_{15}^{50}$ $d_{15}^{100}$		0,945 0,895 0,861	0,949 0,895 0,895	0,919 0,896 0,861
Температуропроводность Thermal diffusivity	$\alpha$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ $\frac{\text{m}^2/\text{s}}$	6,5		6,83