

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЫБЫ¹⁾

П. П. Лобзин

PHYSICAL PROPERTIES OF FISH

By P. P. Lobsin

В процессе холодильной обработки и хранения физико-химические свойства рыбы и рыбных продуктов, точно так же как и скоропортящихся продуктов вообще, претерпевают значительные изменения. С точки зрения холодильной технологии наиболее важным моментом является зависимость указанных изменений от температуры. Знать закономерность изменений величины различных коэффициентов во время холодильной обработки—это значит уметь с надлежащей точностью рассчитать производственные процессы и улучшить качество выпускаемой продукции. Эта цель и преследовалась нами при разработке методики и изучении в динамическом разрезе физико-химических свойств охлажденной и мороженой рыбы и ее мяса.

1. УДЕЛЬНЫЙ ВЕС РЫБЫ И ЕЕ МЯСА

Удельный вес рыбы и ее мяса находится в определенной зависимости от температуры; каждое повышение или понижение температуры имеет следствием соответствующее изменение их объема, а следовательно, и изменение удельного веса.

Опыты по определению удельного веса целой рыбы и ее мяса (в 2%-ном растворе хлористого натрия методом сливного сосуда) были произведены при температурах от +20 до -10°, так как этот интервал температур наиболее часто встречается в холодильной практике.

Полученные нами средние результаты определения плотности целой рыбы при различных температурах приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Удельный вес целой рыбы при различных температурах

наименование рыбы	Число опытов	Температура рыбы	Удельный вес рыбы
Сазан	5	+15,0	0,987
„	5	— 3,5	0,944
„	5	— 8,0	0,928

Изменение удельного веса рыбы в процессе ее замораживания можно определить на основании данных о коэффициенте расширения воды при переходе ее в твердое состояние и количестве льда, ко-

¹⁾ Экспериментальные работы проводились автором совместно с лаборантами Т. Ю. Хренниковой, А. С. Зыковой и А. В. Пупыриковой.

торое в свою очередь находится в зависимости от температуры, по следующей формуле:

$$\gamma_3 = \frac{g}{V_p \beta_p + \Delta V_p}, \quad (1)$$

где: γ_3 — удельный вес рыбы в замороженном состоянии;

g — вес рыбы;

V_p — объем рыбы при 0° ;

β_p — коэффициент изменения объема рыбы в зависимости от температуры (считая от 0° и выше)¹⁾;

ΔV_p — увеличение объема рыбы при замораживании, определяемое по формуле:

$$\Delta V_p = g \cdot A \cdot E \cdot \beta_a, \quad (2)$$

где A — содержание воды в 1 кг рыбы;

E — количество льда в рыбе при данной температуре;

β_a — увеличение объема воды при переходе ее в лед.

Вычисленные по формуле (1) значения удельного веса целой рыбы при различных температурах приводятся на рис. 1 параллельно данным, полученным на основании опытов (табл. 1).

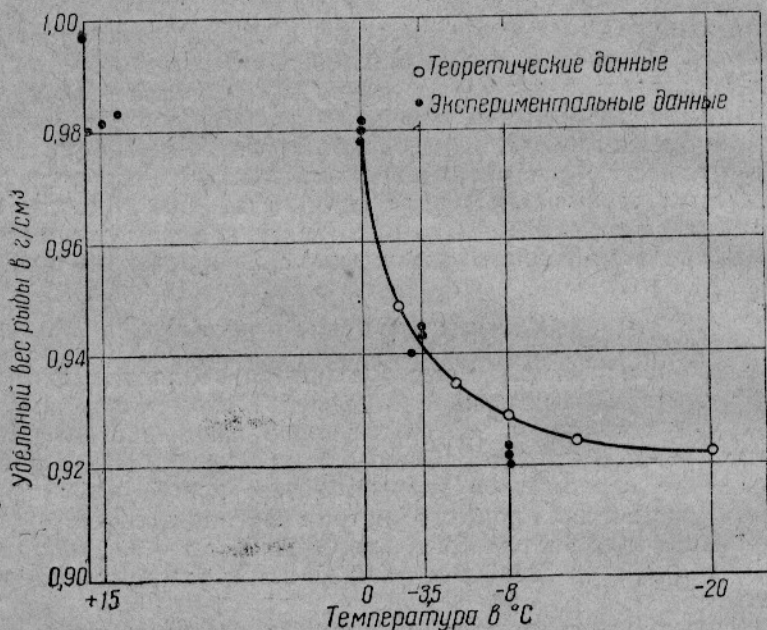


Рис. 1. Зависимость удельного веса целой рыбы от температуры.

Полученные нами экспериментальные и расчетные значения удельного веса мяса рыбы при разных температурах приводятся на рис. 2.

На удельный вес целой рыбы большое влияние оказывает плавательный пузырь и его состояние в момент определения.

Процесс потрошения рыбы связан с удалением плавательного пузыря и пр., а поэтому и удельные веса непотрошеной и потрошеной рыбы должны отличаться друг от друга, что видно из сопоставления полученных нами данных об удельном весе потрошеной рыбы (табл. 2) с данными по удельному весу целой рыбы (табл. 1).

¹⁾ В данном расчете мы не знали значения β_p , а поэтому не принимали его во внимание.

Таблица 2

Удельный вес потрошеной рыбы

Наименование рыбы	Температура воды (в °C)	Температура тела рыбы (в °C)	Удельный вес
Сазан	+15	+10	1,082
"	+15	+10	1,073
"	+15	+10	1,079
"	+15	+10	1,076
"	+15	+10	1,055

Таким образом, удельный вес потрошеной рыбы, благодаря удалению плавательного пузыря и других внутренностей, возрастает и приближается по своему значению к удельному весу мяса рыбы.

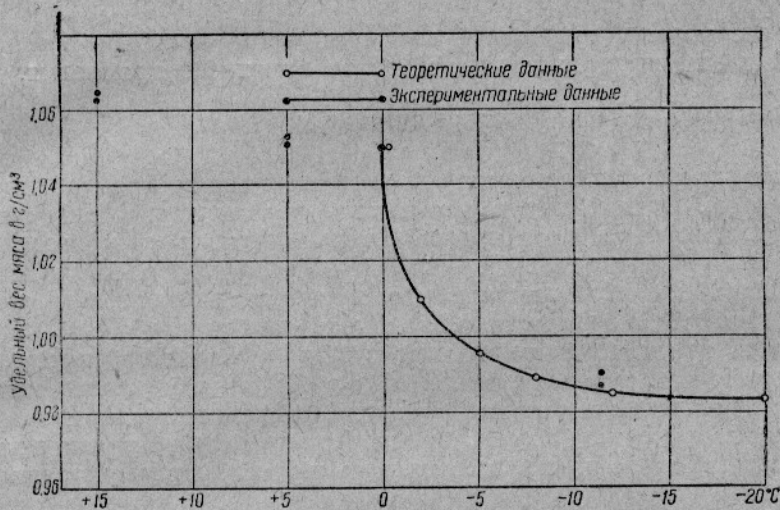


Рис. 2. Зависимость удельного веса мяса рыбы от температуры.

Данные табл. 3 указывают на некоторую тенденцию к уменьшению удельного веса рыбы с увеличением ее веса.

Таблица 3

Изменение удельного веса рыбы в зависимости от ее веса

Наименование рыбы	Число опытов	Температура (в °C)	Вес рыбы (в г)	Удельный вес
Судак	3	+15	350	0,996
"	3	+15	500	0,987
"	3	+15	1800	0,984
"	3	+15	3400	0,955

Удельный вес отдельных частей тела рыб приводится в таб. 4.

Таблица 4

Удельный вес отдельных частей тела рыбы
(Судак при +15°)

Части тела рыбы	Удельный вес
Мясо из головной части спинки .	1,065
Мясо из головной части брюшка	1,061
Мясо из хвостовой части брюшка	1,049
Кожа без чешуи	1,119
Кожа с чешуей	1,216

Для определения влияния свежести мяса рыбы на ее удельный вес нами было проведено несколько опытов с рыбой как в свежем состоянии, так и в состоянии порчи.

Результаты этих опытов нами приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Удельный вес рыбы различной степени свежести
(Дефростированный судак)

Состояние мяса рыбы	Число опытов	Удельный вес
Мясо свежее, без постороннего запаха	3	1,048
Мясо той же рыбы, пролежавшей в лаборатории 2 дня	3	1,049

Таким образом, удельный вес мяса рыбы, несмотря на происходящий в ней процесс порчи, остается почти без изменения.

2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ РЫБ В ОХЛАЖДЕННОМ И ЗАМОРОЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Определение теплоемкости охлажденной рыбы производилось калориметром. В калориметр наливалось строго определенное количество физиологического раствора (водный раствор хлористого натрия) с температурой около 17°. После 15—20-минутного наблюдения за изменением его температуры, что является необходимым для введения поправки на теплообмен в окружающую среду, в сосуд вносилось взвешенное количество рыбы (несколько кусочков или целая рыба) с температурой от 35 до 40° и наблюдалось изменение температуры воды в калориметре через каждые 2 минуты. Опыт заканчивался через 15 мин. после достижения уравновешенного состояния. Теплоемкость вычислялась по следующему уравнению:

$$C_p = \frac{M_{ж} C_{ж} [t_{иж} - (t_{иж} \pm t_n)] - q_n}{m(t_{нр} - t_{кр})} \dots \dots \dots (1)$$

- где C_p — теплоемкость рыбы в кал/кг °С;
 $C_{ж}$ — теплоемкость жидкости в кал/кг °С;
 $M_{ж}$ — масса жидкости в калориметре в кг;
 $t_{иж}$ — начальная температура жидкости в °С перед погружением в нее рыбы;
 $t_{кж}$ — конечная температура жидкости в °С;
 t_n — поправка на температуру за счет потерь тепла в окружающую среду, вычисленная за все время опыта в °С;
 m — масса рыбы, погруженная в калориметр, в кг;
 $t_{нр}$ — начальная температура рыбы в °С перед погружением ее в калориметр;
 $t_{кр}$ — конечная температура рыбы в конце опыта в °С;
 q_n — поправка в случае применения защитных гильз, например, металлической, резиновой и т. д., в кал;

Как показали первые опыты, даже при длительном пребывании рыбы в термостате с температурой от 35 до 40° рыба не нагревалась до температуры термостата, и температура кусочков мяса всегда была несколько ниже температуры воздуха в термостате.

Так как длительное нагревание кусочков рыбы имело бы следствием подсушивание их поверхности и изменение величины теплоемкости, то в дальнейших опытах в калориметр наливалось определенное количество физиологического раствора, нагретого до 20°, и в

него погружались кусочки рыбы, предварительно охлажденные во льду до 0° .

Результаты опытов при данных условиях приводятся в табл. 6.

Теплоемкость мяса рыбы (судака) Таблица 6

№ опытов	Содержание воды в мясе (в %)	$t_{\text{нж}}$ (в $^{\circ}\text{C}$)	$t_{\text{р}}$ (в $^{\circ}\text{C}$)	C (в кал/кг $^{\circ}\text{C}$)
13	78,4	+20 ⁰	0	0,842
16	78,4	+20 ⁰	0	0,846
20	78,4	+20 ⁰	0	0,856
22	78,4	+20 ⁰	0	0,849
26	78,4	+20 ⁰	0	0,834

Среднее . . . 0,845

Из таблицы видим, что расхождения результатов опытов не превышают 3%.

Определение теплоемкости сухих веществ рыбы производилось путем погружения строго определенного количества сухих веществ рыбы (с температурой 100°) в металлической гильзе в калориметр с водой.

Сухие вещества рыбы готовились путем высушивания при $100\text{--}105^{\circ}$ измельченного в мясорубке мяса до постоянного веса и тщательного его затем измельчения в ступке.

Результаты определений приводятся в табл. 7.

Теплоемкость сухих веществ мяса рыбы Таблица 7

№ опытов	Содержание воды в мясе в %	$t_{\text{в}}$ (в $^{\circ}\text{C}$)	$t_{\text{св}}$ (в $^{\circ}\text{C}$)	Теплоемкость сухих веществ (в кал/кг $^{\circ}\text{C}$)	Теплоемкость мускульной ткани (в кал/кг $^{\circ}\text{C}$) ¹⁾
62	75,6	+20	+100	0,339	0,849
64	75,6	+20	+100	0,345	0,840
65	75,6	+20	+100	0,328	0,836
67	75,6	+20	+100	0,331	0,837
68	75,6	+20	+100	0,326	0,835

Среднее . . . 0,334 0,839

С практической точки зрения наибольший интерес имеет определение теплоемкости мускульной ткани в интервале температур от 0 до -25° , так как в современной холодильной технике наиболее часто встречаются именно эти температуры при хранении и замораживании рыб. Процесс замерзания сопровождается отнятием скрытой теплоты затвердевания рыбы, цифровые значения которой при указанных температурах настолько велики, что влияние истинной теплоемкости может оказывать лишь очень малое влияние на величину теплосодержания рыбы. Поэтому теплоемкость мяса рыбы при температурах до -25° лучше всего рассматривать, как составную часть теплосодержания рыбы (см. специальную главу). Определение теплоемкости мяса рыб в замороженном состоянии мы проводили при температурах от -30 до -79° . При таких температурах хотя и имеет место процесс замерзания воды, однако количество последней очень

¹⁾ Теплоемкость мяса охлажденной рыбы высчитывается по формуле $C_{\text{ор}} = A \cdot C_{\text{в}} + B \cdot C_{\text{св}}$, где A — количество воды, B — количество сухих веществ в 1 кг мяса в кг, $C_{\text{в}}$ — теплоемкость воды, $C_{\text{св}}$ — теплоемкость сухих веществ.

невелико и не вызывает значительных отклонений от истинного значения теплоемкости рыбы в замороженном состоянии.

Основным отличием методики определения теплоемкости рыбы в замороженном состоянии является необходимость применения при работе с калориметром жидкостей с достаточно низкой точкой заморзания и с определенной теплоемкостью, как, например, водный раствор хлористого кальция.

Кусочки мяса замораживались при помощи сухого льда. Процесс охлаждения последних в сухом льду продолжался не менее 12—18 час. Точно так же с помощью сухого льда производилось и охлаждение раствора хлористого кальция до температуры -35 , -40° , после чего указанным раствором наполнялся сосуд Дьюара. Раствор выдерживался в сосуде Дьюара в течение 2-3 час. в целях достижения установившегося состояния. Перед опытом измерялась температура раствора хлористого кальция в течение 15—20 мин. для введения поправки, после чего в него возможно быстро погружалось несколько кусочков замороженной до -79° рыбы. Для того, чтобы кусочки рыбы тонули в растворе CaCl_2 , к каждому из них заранее привязывался металлический грузик. При подсчетах теплоемкости вводилась поправка на грузик.

Более точные результаты определения теплоемкости замороженного мяса получились при погружении его в жидкость в резиновой оболочке.

Таблица 8

Теплоемкость мускульной ткани рыбы в замороженном состоянии

№ опытов	Содержание воды в рыбе (в %)	$t_{\text{нж}}$ (в $^{\circ}\text{C}$)	t_p	C_p
59	75,0	-30	-79	0,426
61	75,0	$-34,2$	-79	0,422
63	75,0	$-33,5$	-79	0,432
64	75,0	$-32,0$	-79	0,416
65	75,0	$-28,0$	-79	0,492
67	75,0	$-28,4$	-79	0,452
Среднее . . .				0,440

Опыты по определению теплоемкости мяса рыб показали, что величина теплоемкости в значительной степени зависит от содержания воды в рыбе и от ее температурного состояния.

В практических условиях рыбных холодильников часто приходится оперировать с рыбой, содержащей различное количество воды, поэтому удобнее вычислять величину теплоемкости ее, пользуясь средним значением теплоемкости сухих веществ, полученным опытным путем. Правда, при таком подсчете полного совпадения значений теплоемкости мяса не получается, но и расхождения не так уже велики. Например, теплоемкость мяса судака (78,4% воды) при определении ее при помощи погружения в физиологический раствор NaCl оказалась равной $0,845 \text{ кал/кг}^{\circ}\text{C}$; теплоемкость того же мяса, подсчитанная по формуле, равна:

$$C = 0,784 + 0,334 \cdot 0,216 = 0,856 \text{ кал/кг}^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом, расхождение в процентах составляет всего только

$$\frac{0,856 - 0,845}{0,856} \times 100 \cong 1,4\%.$$

3. ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ РЫБЫ

Теплосодержание рыбы складывается из теплоемкости и скрытой теплоты затвердевания. Величина теплосодержания не одинакова для различных видов рыб и в свою очередь зависит от химического состава их.

В данном случае нас интересует изменение теплосодержания рыбы, а не абсолютное его значение, а поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только величину изменения теплосодержания в зависимости от начального и конечного температурного состояния рыбы.

Для наглядности рассмотрим составные части теплосодержания рыбы в отдельности, а затем перейдем к определению общего изменения теплосодержания рыбы применительно к условиям холодильной обработки. Теплосодержание при температурах выше точки замерзания рыбы определяется по следующей формуле:

$$[Q]^{\circ} = C_p (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где: $[Q]^{\circ}$ — теплосодержание рыбы в кал/кг от t_1 до t_2 ;

C_p — удельная теплоемкость рыбы в кал/кг $^{\circ}\text{C}$;

t_1 — начальная температура рыбы в $^{\circ}\text{C}$;

t_2 — конечная температура рыбы в $^{\circ}\text{C}$;

Таким образом, изменение величины теплосодержания рыбы при температурах выше точки замерзания зависит от ее теплоемкости и находится в прямой зависимости от изменения температуры рыбы.

При понижении температуры рыбы ниже точки ее замерзания начинается процесс замораживания. Изменение теплосодержания в этот период времени составляется из тепла, отнимаемого от рыбы: 1) во время охлаждения незамороженной части последней, 2) при замерзании части воды и 3) при охлаждении льда, образовавшегося в рыбе.

Все это можно представить в виде следующего теплового уравнения:

$$[Q]^3 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2)$$

где: $[Q]^3$ — общее изменение теплосодержания рыбы от t_3 до t_x где t_3 — точка замерзания рыбы, а t_x — температура, до которой замораживается рыба;

Q_1 — теплота, отнимаемая от рыбы при образовании в ней льда от t_3 до t_x ;

Q_2 — теплота, отнимаемая от рыбы при охлаждении льда, образовавшегося в рыбе в пределах температур от t_3 до t_x ;

Q_3 — теплота, отнимаемая от незамерзшей части мускульного сока в процессе ее охлаждения от t_3 до t_x ;

Q_4 — теплота, отнимаемая от сухих веществ рыбы в процессе их охлаждения от t_3 до t_x .

Отдельные величины, входящие в состав теплосодержания рыбы $[Q]^3$, в свою очередь определяются соответствующими формулами:

$$Q_1 = A \cdot E \cdot R_o, \quad (3)$$

где: A — содержание воды в 1 кг рыбы в кг;

E — количество льда в 1 кг рыбы, образовавшегося в 1 кг при изменении температуры от t_3 до t_x в кг;

R_o — теплота затвердевания воды в кал/кг.

$$Q_2 = A \cdot E \cdot C_{\text{л}} (t_3 - t_x) \quad (4)$$

где: A , E , t_3 и t_x обозначают то же, что и в формуле (3);

$C_{\text{л}}$ — теплоемкость льда в кал/кг $^{\circ}\text{C}$.

$$Q_3 = A \cdot D \cdot C_e (t_3 - t_x) \quad (5)$$

где: A , t_3 , t_x — обозначают то же, что и в формуле (4);

D — количество мускульного сока в 1 кг рыбы, оставшегося в жидком состоянии при изменении температуры от t_3 до t_x в кг;

C_e — теплоемкость этого сока (0,9).

$$Q_4 = B \cdot C_{св} (t_3 - t_x) \quad (6)$$

где: B — содержание сухих веществ в 1 кг рыбы в кг;

$C_{св}$ — теплоемкость сухих веществ рыбы в кал/кг °C;

t_3 и t_x — то же, что и в формуле (5).

Приведенный расчет изменения теплосодержания рыбы в процессе ее замерзания является довольно сложным; для его выполнения требуются данные, без которых подсчет становится невозможным, как, например, зависимость количества вымерзающей воды от температуры рыбы, теплоемкость как рыбы в охлажденном и замороженном состоянии, так и ее сока.

На основании предположения о тождественности процесса вымерзания воды из мясного сока и физиологического раствора хлористого натрия нами был произведен подсчет определения количества вымерзающей воды из физиологического раствора NaCl по формуле:

$$E = 100 - \frac{a \cdot 100}{b} \quad (7)$$

где: E — количество воды, вымерзающей из физиологического раствора NaCl при данных условиях,

a — содержание NaCl в физиологическом растворе в г;

b — содержание NaCl при данной концентрации раствора и температуре.

Построенная на основании формулы (7) кривая (рис. 3) весьма близко совпадает с кривой, построенной Heiss'ом для вымерзания воды из мяса.

В основу методики определения изменения теплосодержания рыбы нами положен калориметрический метод.

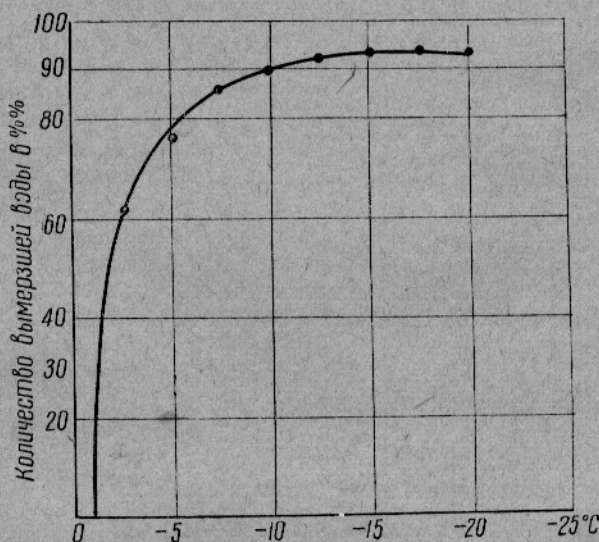


Рис. 3. Вымерзание воды из раствора хлористого натрия, изотоничного мясному соку судака.

В качестве калориметра нами были взяты литровые сосуды Дьюара с вставленными в них термометрами Бекмана. После определения температурной поправки к прибору в сосуд Дьюара быстро вносилось несколько кусков замороженной рыбы с точно установленной температурой. Вслед за их погружением следовало интенсивное понижение температуры воды в сосуде. Для введения поправки на конечную температуру воды измерение последней продолжалось в течение 15 мин. после достижения установившегося состояния. Зная вес внесенного в сосуд Дьюара куска или кусков рыбы, а также количество воды в нем и понижение температуры в сосуде в единицу времени, можно определить изменение теплосодержания рыбы по формуле:

$$[Q]^3 = \frac{G_v \cdot C_v [t_n - (t_k \pm t_n)]}{G_p} \text{ кал/кг}, \quad (8)$$

где: $[Q]^3$ — изменение теплосодержания рыбы от t_n до t_k в кал/кг;
 G_v — вес воды в сосуде Дьюара в кг;
 C_v — средняя теплоемкость воды при температуре от t_n до t_k в кал/кг°С;
 t_n — начальная температура воды в сосуде Дьюара (перед погружением в нее рыбы);
 t_k — конечная температура воды в нем;
 t_n — температурная поправка на потери тепла в окружающую среду;
 G_p — количество рыбы, погруженной в сосуд Дьюара в кг.

Успешность определения теплосодержания в основном зависит от правильности измерения температуры в начале и в конце опыта и быстроты переноса рыбы в сосуд Дьюара. Для получения в кусках рыбы определенной начальной температуры нами были использованы термосы, охлаждаемые эвтектическими растворами.

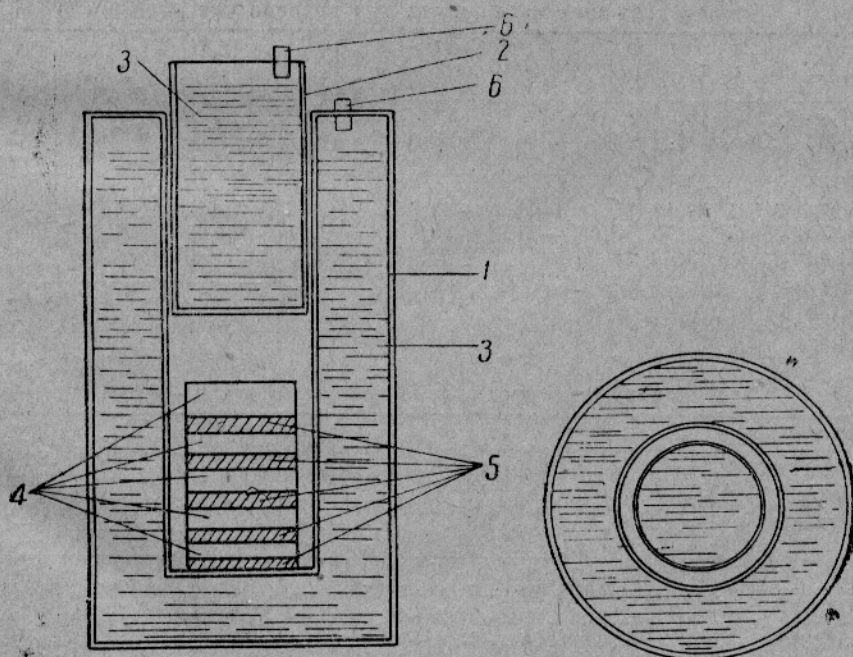


Рис. 4. Термос с эвтектическим охлаждением: 1—металлический сосуд с двойными стенками; 2—крышка металлического сосуда, полая внутри; 3—эвтектический раствор; 4—кусочки рыбы; 5—металлические пластинки, привязанные к рыбе; 6—пробки.

Каждый термос представлял собой полый металлический цилиндр с двойными стенками (рис. 4), образующими рубашку, заполненную эвтектическим раствором. Эвтектический раствор замораживался в термосе, после чего термос помещался в кожух из изоляционного материала.

В середину термоса помещались предназначенные для опыта кусочки рыбы в металлических гильзах или с привязанным металлическим грузиком, после чего он закрывался крышкой, заполненной эвтектическим льдом.

В таком термосе рыба выдерживалась сутки и только после этого она помещалась в сосуд Дьюара для определения теплосодержания. Используя различные эвтектические растворы, как например, $K_2SO_4 + KNO_3$ с эвтектической температурой $-3,8^\circ$, KCl с $-11,1^\circ$ и $NaCl$ с $-21,2^\circ$, мы имели возможность получить строго определенную температуру в рыбе.

В результате были получены следующие данные:

Таблица 9

Теплосодержание мяса судака при температуре $-3,8^\circ$

№ опытов	В о д а			Р ы б а			Поправка на потерю в окружающей среде, на гильзу и пр. (в кал)	$[Q]^3$ кал	$[Q]^3$ с t_n по t_k (в кал/кг)	$[Q]^3$ кал/кг с $+20$ до $-3,8^\circ$
	G_B (в г)	Δt_B	t_k	G_P	t_n	t_k				
3	684,19	2,046	+13,31	26,695	-3,8	+13,36	-0,046	1,354	50,63	56,13
4	587,75	2,584	+13,51	28,885	-3,8	+13,51	-0,043	1,475	51,95	57,4
5	663,45	2,695	+13,83	29,46	-3,8	+13,83	-0,04	1,665	57,84	63,04
7	648,98	2,708	+12,94	31,92	-3,8	+12,94	-0,04	1,718	53,81	60,6

Среднее значение . . . 59,34

Таблица 10

Теплосодержание мяса судака при температуре $-11,1^\circ$

№ опытов	В о д а			Р ы б а			Поправка на потерю в окружающей среде, на гильзу и пр. (в кал)	$[Q]^3$ кал	$[Q]^3$ с t_n по t_k (в кал/кг)	$[Q]^3$ кал/кг с $+20$ до $-11,1^\circ$
	G_B (в г)	Δt_B	t_k	G_P	t_n	t_k				
8	508,89	4,521	12,18	31,2	-11,1	+12,18	+0,196	2,496	71,79	78,6
9	507,44	2,945	13,75	17,98	-11,1	+13,75	+0,057	1,548	76,13	81,3
14	614,04	3,381	13,32	29,65	-11,1	+13,32	-0,043	2,032	68,53	74,1

Среднее значение | 78,0

Таблица 11

Теплосодержание мяса судака при температуре $-21,2^\circ$

№ опытов	В о д а			Р ы б а			Поправка на потерю в окружающей среде, на гильзу и пр. (в кал)	$[Q]^3$ кал	$[Q]^3$ с t_n по t_k (в кал/кг)	$[Q]^3$ кал/кг с $+20$ до $-21,2^\circ$
	G_B (в г)	Δt_B	t_k	G_P	t_n	t_k				
15	982,39	2,315	+14,6	28,39	-21,2	+14,6	-0,092	2,183	76,9	81,5
16	952,91	2,856	+12,81	34,895	-21,2	+12,81	-0,089	2,631	76,41	82,4
17	942,13	2,255	+12,54	25,75	-21,2	+12,54	-0,084	2,039	79,18	85,4
19	693,73	3,241	+13,56	29,585	-21,2	+13,56	-0,091	2,157	74,59	80,0

Среднее значение . . . 82,3

Расхождения результатов отдельных опытов, повидимому, можно объяснить различием химического состава отдельных экземпляров рыб, что нами и было установлено проверочными опытами с одним и тем же экземпляром рыбы.

Для сопоставления теоретических данных с экспериментальными нами были произведены подсчеты по формулам (1), (2), (3), (4), (5). Количество вымерзающей из рыбы воды при различных температурах взято по кривой Heiss'a; теплоемкость охлажденной рыбы принята равной 0,83; теплоемкость сухих веществ 0,35; теплоемкость мясного сока рыбы 0,9. Условно принято, что при температуре рыбы в $+20^{\circ}$ теплосодержание равно 0.

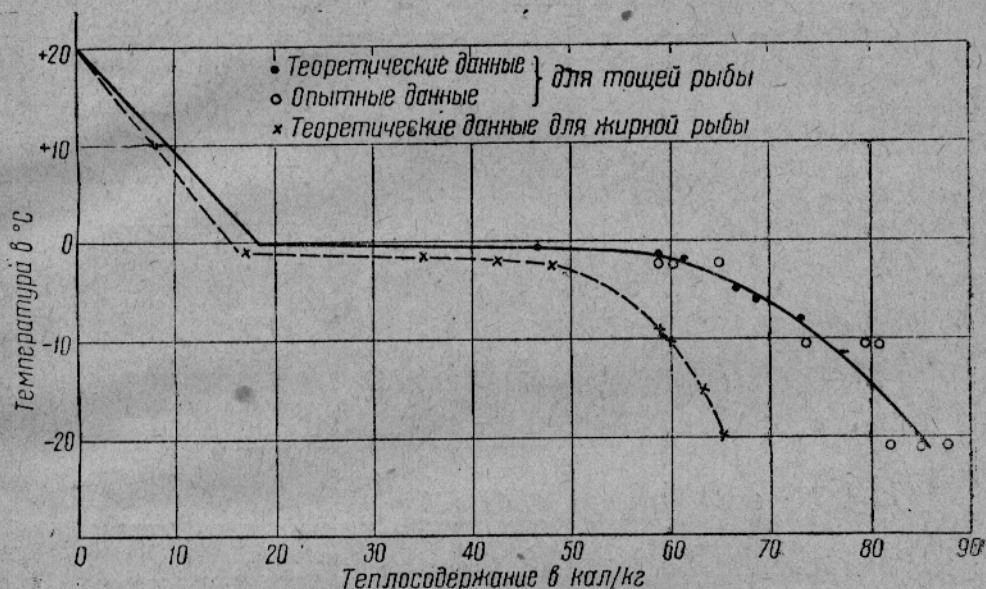


Рис. 5. Теплосодержание рыбы (опытные и теоретические данные).

При рассмотрении характера изменения теплосодержания в рыбе на рис. 5 не трудно заметить, что оно находится в определенной зависимости от стадии холодильной обработки. В процессе охлаждения изменение теплосодержания рыбы происходит линейно до точки заморзания рыбы. С точки заморзания начинается процесс образования льда в тканях рыбы, который характеризуется значительным изменением теплосодержания, причем эти изменения особенно значительны для температуры от -1 до -2° . Дальнейшее понижение температуры рыбы сопровождается менее интенсивным изменением теплосодержания. При температуре от -7 до -8° наблюдается перелом кривой, характеризующийся значительным уменьшением изменения теплосодержания. Причиной перелома кривой является значительное замедление процесса вымораживания воды, так как основная ее масса (83%) уже превратилась в лед. Поэтому прирост теплосодержания начинает происходить главным образом не за счет перехода воды в лед, а за счет теплоемкости, которая, как известно, для мороженой рыбы почти в два раза меньше, чем для охлажденной. Для более наглядного сопоставления экспериментальных данных об изменении теплосодержания рыбы с теоретическими мы нанесли их на ту же кривую. Экспериментальные данные довольно хорошо совпадают с теоретической кривой, доказывая тем самым правильность теоретических подсчетов изменения теплосодержания рыбы.

Небезынтересно было бы проследить изменение теплосодержания рыбы, с меньшим содержанием воды, например, белорыбицы; по ряду обстоятельств мы принуждены ограничиться здесь приведением только расчетных данных.

Изменение теплосодержания белорыбицы происходит так же, как и у судака, с тем, однако, отличием, что указанные изменения одинаковы по своему характеру, но различны по величине; у белорыбицы благодаря меньшему содержанию воды и теплосодержание меньше, чем у судака. Необходимо, однако, оговориться, что при вычислении теплосодержания белорыбицы нами допущена некоторая неточность, так как количество вымерзающей воды нами было взято по кривой Heiss'a для тощей рыбы и мяса, а не для жирной рыбы.

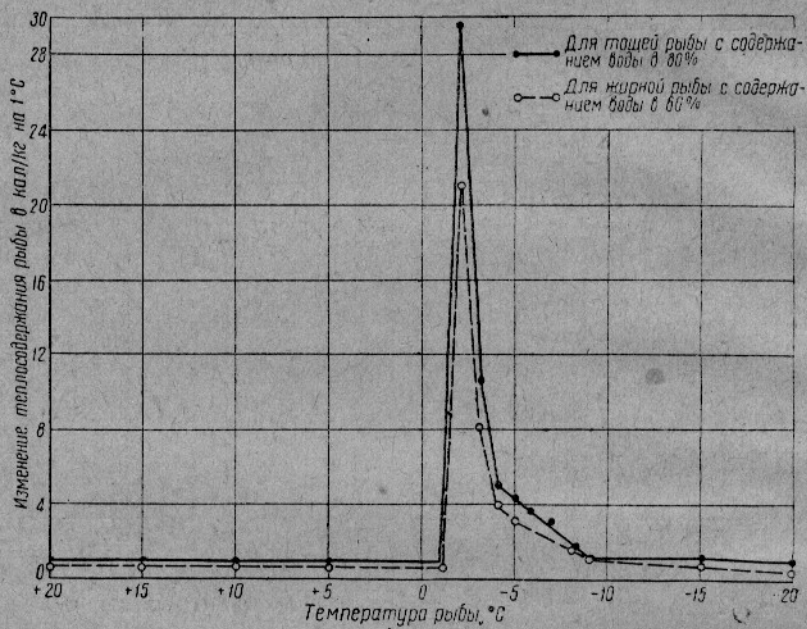


Рис. 6. Изменение теплосодержания рыбы на каждый градус понижения температуры

Графическое изображение изменения теплосодержания рыбы, приведенное выше, дает возможность пользоваться им при калорических расчетах охлаждения и замораживания рыб без затраты времени на подсчеты по формулам. На рис. 6 приведено изменение теплосодержания в рыбе на градус понижения температуры.

4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЯСА РЫБЫ

Теплопроводность пищевых продуктов оказывает существенное влияние на продолжительность процессов охлаждения и замораживания. Насколько нам известно, данных о теплопроводности рыбы, кроме наших исследований, в этой области не имеется. В иностранной литературе приводятся результаты определения теплопроводности говяжьего мяса.

Способ определения коэффициента теплопроводности охлажденного мяса, предложенный В. Таммом¹⁾, в основном заимствованный нами в более ранней нашей работе, с достаточной подробностью уже описан в литературе²⁾, а поэтому во избежание повто-

¹⁾ W. Tam m., Die Kühlung von Fleisch, 1930.

²⁾ П. П. Лобзин. Коэффициент теплопроводности скоропортящихся продуктов. Журн. „Холодильное дело“ № 8 за 1931 г.

рения останавливаться на нем здесь мы не будем. Метод Оубери и Гриффитс для определения теплопроводности свежего мяса при низких температурах весьма кратко был ими изложен в журнале «Chemistry and Industry»¹). Для определения коэффициента теплопроводности Оубери и Гриффитс применяли прибор, основанный на методе горячей и холодной пластинок. Два куска тощего мяса, разрезанные в виде ровных пластин, помещались по обе стороны металлической пластинки, внутри которой находился электронагревательный прибор. Мясо с внешних сторон покрывалось двумя медными пластинками, края кусков мяса изолировались пробкой. Вся данная система пластинок с мясом помещалась в среду, охлаждаемую сухим льдом. Горячая и холодная пластинки были соединены с термopарами для измерения их температуры. Прибор перед опытами тарировался путем замены мяса пробкой с известным коэффициентом теплопроводности, что давало возможность определить поправку на теплопотери через боковые стенки, защищенные пробкой. При определении теплопроводности мяса через пластинку пропусклся электрический ток для получения надлежащего перепада температур между теплой и холодной пластинками. По расходу электроэнергии после достижения в приборе установившегося состояния подсчитывался коэффициент теплопроводности.

Среднее значение коэффициента теплопроводности для тощего мяса было получено равным 1,368 кал/час °C.

В описании не приводятся значения температур, при которых производилось определение теплопроводности, что делает очень затруднительным оценку полученной величины теплопроводности с точки зрения ее точности.

Никаких других данных о коэффициенте теплопроводности пищевых продуктов во время выполнения данной работы у нас не имелось. В связи с тем, что методика определения коэффициента теплопроводности пищевых продуктов, примененная Таммом, а позднее нами, была мало совершенна, а способ Оубери и Гриффитса довольно сложен и пригоден не для всех случаев определения, мы прежде всего остановились на выработке методики определения коэффициента теплопроводности рыб (как в охлажденном, так и замороженном состоянии).

а) Теплопроводность рыбы в охлажденном состоянии

При выборе способа определения коэффициента теплопроводности рыбы в охлажденном состоянии мы в основном руководствовались, с одной стороны, простотой определения, не требующей сложной аппаратуры и измерительных приборов, с другой стороны, достаточной точностью получаемых результатов.

В основу нашего прибора был положен способ В. Тамма, который, как указывалось выше, подробно описан в нашей первой работе.

Видоизмененный нами прибор (рис. 7) представляет собой металлическую коробку размерами 0,31×0,3 м, высотой 0,05 м. Коробка имеет два отверстия для подвода и вывода циркулирующей внутри ее горячей жидкости. Для равномерного нагрева поверхности коробки внутри ее были установлены направляющие плоскости для равномерного распределения жидкости по всей коробке. На крышку коробки, сделанную из меди, помещается исследуемый продукт. Чтобы не вызывать излишнего неестественного уплотнения продукта, последний укладывается в деревянную рамку соответствующих размеров, внутри

¹ Awbery, Griffiths Thermal properties of meat. Journ. „Chemistry and Industry“, № 40, 1933

оклеенную тонкой резиной. На рамку с испытуемым продуктом помещается металлическая (медная) коробка, имеющая внешние размеры $0,31 \times 0,31$ м и высоту 0,30 м. В середине этой коробки имеется в свою очередь маленькая коробка, размерами $0,15 \times 0,15$ м и высотой 0,2 м, причем дно ее совпадает с дном внешней коробки. Между коробками со всех сторон имеется воздушный зазор в 0,005 м. Сверху как внутренняя, так и внешняя коробки имеют плотно закрывающиеся крышки. Обе коробки снабжены металлическими отводными трубками для стока из них жидкости. Наружная коробка защищает внутреннюю от потерь тепла наружу.

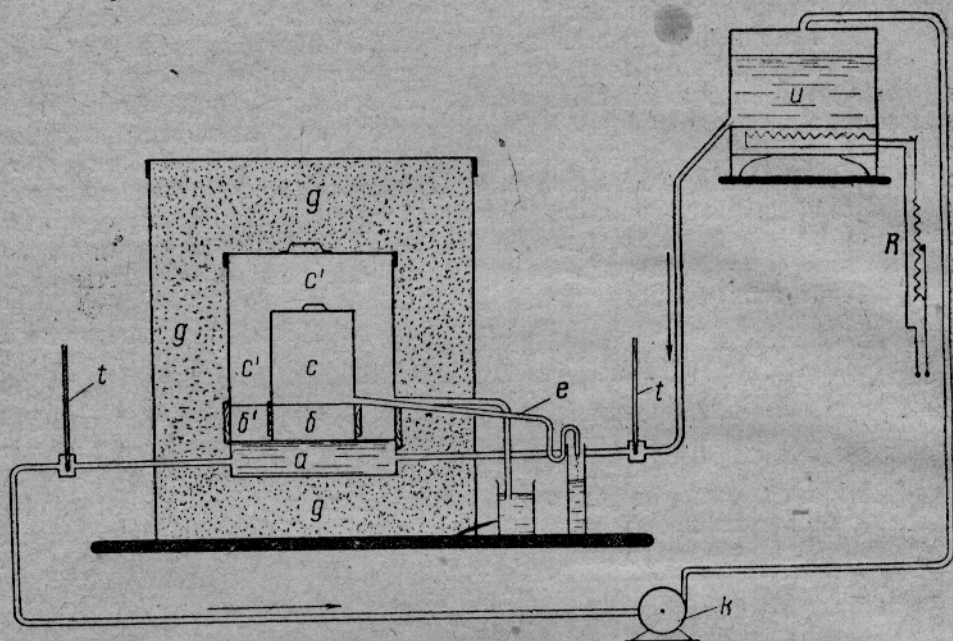


Рис. 7. Прибор для определения коэффициента теплопроводности пищевых продуктов: *a* — нижняя коробка с проточной горячей водой; *b* — рамка, в которую помещается испытуемое мясо рыбы; *b'* — защитное кольцо из мяса рыбы; *c* — верхняя внутренняя коробка для водяного льда; *c'* — верхняя наружная коробка, служащая защитным кольцом для внутренней коробки *c*; *d* — пробковая мелочь, которой засыпается прибор; *e* — трубка для стока воды; *u* — электробаия для подогрева воды; *R* — реостат для регулирования нагрева воды; *k* — насос для подачи воды в электробаию; *t* — термометры для измерения температуры воды.

Вся система коробок с испытуемым продуктом помещается в цилиндрический железный бак. На дне бака находится пробковая плита общей толщиной в 0,16 м, на которую устанавливается прибор в собранном виде.

Кроме того в состав прибора входят: 1) электрическая водяная баня для нагревания воды, циркулирующей в нижней коробке прибора, с реостатом *R*; 2) насос с электромотором; 3) два термометра для измерения температуры, поступающей и отходящей из коробки воды.

Определение коэффициента теплопроводности мяса при помощи описанного выше прибора производилось следующим образом. Куски рыбы укладываются достаточно плотно без воздушных прослоек в рамки прибора и затем устанавливаются на нижней коробке. Верхние коробки (внешняя и внутренняя) наполняются измельченным водным льдом, покрываются крышками и в таком виде помещаются на рамку с рыбой. Незаполненное пространство в баке прибора засыпается пробковой мелочью. Вода, нагреваемая в электрической бане, непре-

рывно поступает в нижнюю коробку прибора с температурой около 40°. Тепло, отдаваемое водой, проходит через продукт и вызывает таяние льда в верхней коробке. Количество воды, получаемой от таяния льда, зависит от теплопроводности продукта.

Таяние льда в верхней коробке происходит не только за счет проникновения тепла через испытуемый продукт, но и за счет проникновения тепла из внешней среды через стенки прибора. Для устранения этого в настоящем приборе нами были применены как в верхней коробке, так и около продукта защитные слои, предохраняющие их от притока тепла снаружи.

Последнее значительно облегчило работу по определению коэффициента теплопроводности, так как исключило необходимость определения поправок.

Подсчет коэффициента теплопроводности производился по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{Q^\circ \delta}{F(t_1 - t_2)}, \quad (1)$$

где: λ — коэффициент теплопроводности в $\text{кал/м час } ^\circ\text{C}$;

Q° — количество тепла, проходящее через исследуемый продукт, в кал/час ;

δ — толщина продукта, помещенного в прибор, в м ;

F — поверхность продукта во внутренней рамке прибора в м^2 ;

t_1 — средняя температура входящей и отходящей теплой воды за все время испытания в $^\circ\text{C}$;

t_2 — температура льда в $^\circ\text{C}$.

Количество тепла, проходящее через продукт, определялось в свою очередь по следующей формуле:

$$Q^\circ = R_0 G_w \quad (2)$$

где: R_0 — теплота плавления льда в кал/кг ;

G_w — количество воды, полученной при таянии льда, в кг/час .

Точность определения коэффициента теплопроводности в данном приборе была проверена путем неоднократного определения λ пробковой плиты с известным коэффициентом теплопроводности, причем результаты пяти определений показали, что максимальное расхождение между ними не превышало 6%, что свидетельствует о вполне удовлетворительной работе прибора.

Опыты по определению коэффициента теплопроводности судака проводились нами при перепаде температур между льдом и водой в 30 и 40°.

Результаты определения приводятся в табл. 12.

Теплопроводность мяса судака

Таблица 12

№ опытов	Перепад температур (в $^\circ\text{C}$)	Коэффициент теплопроводности (в $\text{кал/м час } ^\circ\text{C}$)
5	40,0	0,409
6	40,5	0,445
8	39,8	0,425
9	39,5	0,428
10	40,6	0,398
Среднее . . .	40	
12	30,5	0,389
14	31,2	0,390
15	30,1	0,418
16	29,8	0,408
17	30,8	0,410
Среднее . .	30	0,403

Как видно из таблицы, значение коэффициента теплопроводности при перепаде температур в 40° несколько больше, чем при 30° . Таяние льда в приборе при 40° происходит более интенсивно, чем при 30° ; точность определения количества воды, получаемой от таяния льда, от этого увеличивается, а вместе с тем и определение коэффициента теплопроводности дает более точные результаты.

Полученные нами средние данные о коэффициенте теплопроводности мяса судака $\lambda = 0,403-0,421$ несколько отличаются от результатов нашей более ранней работы (0,327); это, повидимому, объясняется или 1) различным состоянием рыбы, так как в первом случае мы определяли теплопроводность охлажденной рыбы, во втором — рыбы дефростированной, или 2) изменением конструкции аппарата; в этом случае наибольшая точность результатов остается за последними данными, так как они получены на более совершенном приборе.

б) Теплопроводность рыбы в замороженном состоянии

При определении коэффициента теплопроводности рыб в замороженном состоянии мы внесли в конструкцию только что описанного прибора некоторые изменения. Эти изменения были вызваны необходимостью создать в приборе перепад температур ниже 0° для того, чтобы испытуемая рыба находилась в приборе в замороженном состоянии. С этой целью вместо электрической бани в систему трубопроводов был включен небольшой прибор для охлаждения рассола. Температура последнего устанавливалась в зависимости от заданных условий эксперимента. В верхних бачках водный лед был заменен льдом эвтектическим с точкой плавления значительно ниже температуры рассола, циркулирующего в нижней коробке прибора (рис. 8). В рамку между коробками помещалась испытуемая рыба в замороженном состоянии. Перепад температуры между нижней и верхней коробками создавал тепловой поток через замороженную рыбу, что имело следствием таяние эвтектического льда в приборе. По количеству растаявшего льда производился расчет притока тепла через рыбу и вычислялась величина коэффициента теплопроводности рыбы в замороженном состоянии. Защитное кольцо в верхней коробке заполнялось эвтектическим льдом для предохранения от таяния эвтектического льда, находящегося во внутренней коробке, за счет теплопритока через стенки прибора. Испытуемое мясо было в свою очередь окружено защитным кольцом, заполненным тем же мороженым мясом рыбы, что гарантировало достаточную точность определения коэффициента теплопроводности.

В качестве эвтектического льда мы в своих опытах использовали эвтектический водный раствор NaCl с точкой замерзания в $-21,2^\circ$ и скрытой теплотой плавления в $56,4 \text{ кал/кг}$. В нижней коробке прибора циркулировал раствор NaCl, охлаждаемый в приборе до температуры от 0 до -5° .

Как показали первые опыты, между рыбой и коробками всегда оставались воздушные прослойки, сильно искажавшие результаты определения. В дальнейших опытах мы устранили это явление следующим образом. Поверхность замороженного в рамке мяса перед помещением его в прибор быстро оттаивалась на глубину 2-3 мм при помощи прикладывания к ней металлической коробки с горячей водой. Слегка оттаявшее с поверхности мясо в той же рамке быстро переносилось в прибор и зажималось между коробками с холодным рассолом и эвтектическим льдом. При таком способе удавалось достаточно плотно без воздушных зазоров поместить мясо в прибор (или, вернее, даже приморозить к коробкам).

Лучшие результаты были получены при наполнении рамки мясом

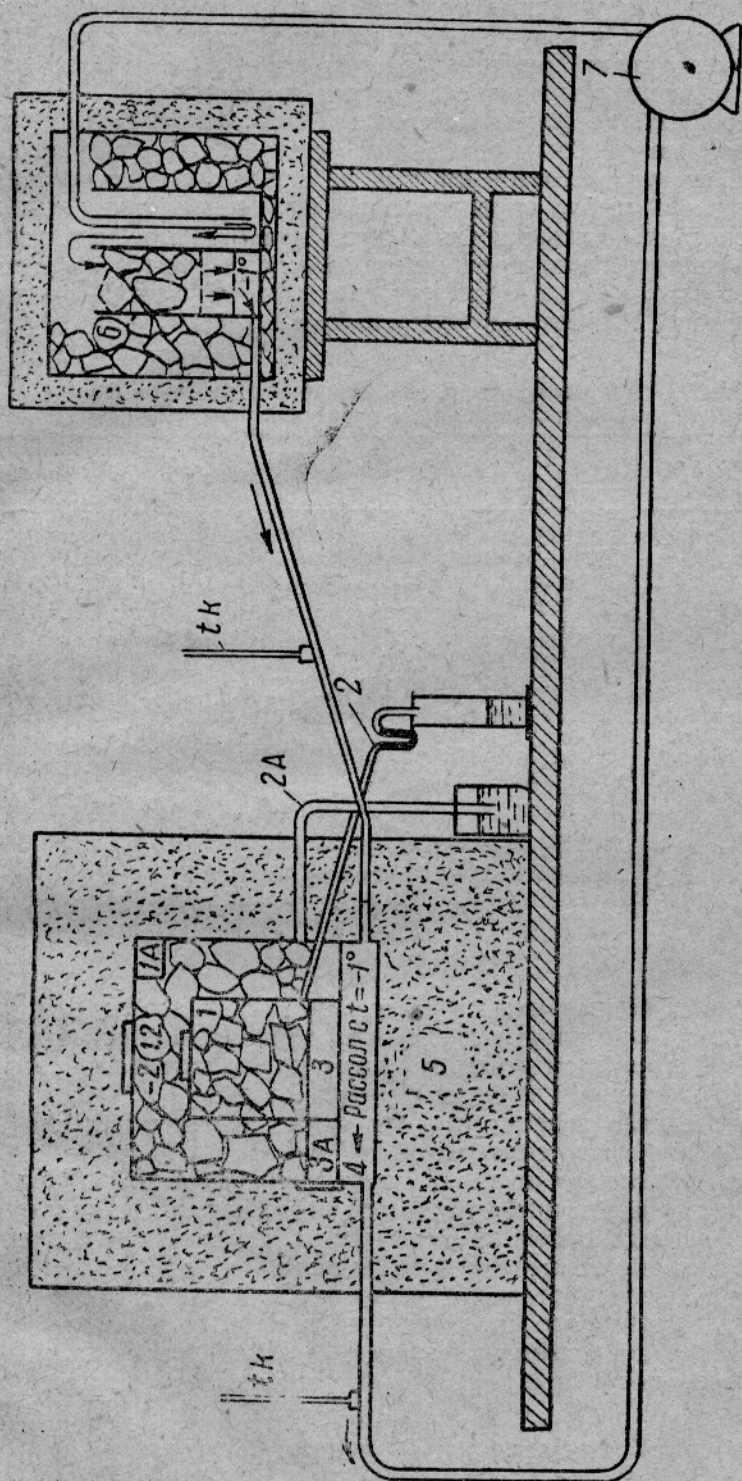


Рис. 8. Прибор для определения теплопроводности мяса в замороженном состоянии.

1 — металлическая коробка с эвтектическим льдом; 1а — внешняя металлическая коробка с эвтектическим льдом, служащая защитным кольцом для коробки 1; 2 — трубка для отвода рассола; 2а — отводная трубка для рассола; 3 — рамка с испытуемым продуктом; 3а — защитное кольцо из продукта; 4 — коробка с циркулирующим рассолом; 5 — пробковая мелочь; 6 — прибор для охлаждения рассола; 7 — насос для подачи рассола в прибор.

охлажденной рыбы и последующим замораживанием его в той же рамке при помощи эвтектического льда. Контакт между металлической коробкой и поверхностью продукта в этом случае был безукоризненным. Данный метод позволял вести наблюдения за общим процессом теплопередачи рыбы на протяжении всего времени замораживания, что представляет значительный интерес.

Подсчет коэффициента теплопроводности мороженой рыбы производился по той же формуле, что и для охлажденной рыбы за весь период установившегося состояния, т. е. за время постоянного теплового потока через рыбу, определяемого по равномерному таянию эвтектического льда. Длительность опыта была от 4 до 8 час. в зависимости от варианта. Было проведено три серии опытов, отличавшихся друг от друга лишь температурой рассола, циркулирующего в нижней коробке. Результаты этих опытов приводятся в табл. 13.

Таблица 13

Коэффициент теплопроводности замороженного рыбного филе из дефростированного сулака при температурах от $-0,5$ до $-21,2^{\circ}$

№ опытов	Q (в кал/м ² час)	δ (в м)	t_1 (в $^{\circ}\text{C}$)	t_2 (в $^{\circ}\text{C}$)	λ (в кал/м час $^{\circ}\text{C}$)
а) Одна сторона продукта заморожена до -21° , другая не заморожена					
9	310	0,035	$-21,2$	$-0,4$	0,522
10	340	0,035	$-21,2$	$-0,9$	0,584
1	313	0,035	$-21,2$	$-0,7$	0,535
2	280	0,035	$-21,2$	$-0,4$	0,51
б) Одна сторона продукта заморожена до $-21,2^{\circ}$, другая начинает замерзать					
3	285	0,049	$-21,2$	$-1,7$	0,715
4	235	0,049	$-21,2$	$-2,6$	0,620
5	330	0,040	$-21,2$	$-1,9$	0,683
6	320	0,038	$-21,2$	$-2,1$	0,638
в) Одна сторона заморожена до $-21,2^{\circ}$, другая имеет температуру $-4,5^{\circ}$					
11	345	0,040	$-21,2$	$-4,8$	0,84
12	415	0,038	$-21,2$	$-4,4$	0,94

В приведенных нами данных прежде всего обращает на себя внимание зависимость величины коэффициента теплопроводности от температуры одной из сторон рыбы, несмотря на то, что мы варьировали ее в весьма ограниченном пределе от $-0,5$ до -5°C .

Объяснение такого явления следует искать в изменении свойств рыбы в данном интервале температуры.

В пределах температур от точки замерзания рыбы до -4° происходит наибольшее изменение агрегатного состояния рыбы, заключающееся в превращении основной массы воды, содержащейся в рыбе, в лед. При понижении температуры рыбы ниже -4° происходит дальнейшее замораживание остальной части воды в рыбе. Таким образом, изменение агрегатного состояния рыбы, т. е. ее замораживание, сопровождается постепенным изменением ее теплопроводности.

Как известно, коэффициент теплопроводности льда больше, чем воды, так:

$$\lambda \text{ воды} = 0,502 \text{ кал/м час}^{\circ}\text{C}; \quad \lambda \text{ льда} = 2,07 \text{ кал/м час}^{\circ}\text{C}.$$

Исходя из этого положения, теплопроводность мороженой рыбы должна быть примерно в 3,5 раза больше, чем охлажденной, так как содержащаяся в рыбе вода при ее замораживании превращается в лед.

Предположим, что коэффициент теплопроводности рыбы представляет собою сумму теплопроводностей ее составных частей в том соотношении, в каком они находятся в рыбе. Тогда можно было бы легко определить коэффициент теплопроводности рыбы в охлажденном состоянии по следующей формуле:

$$\lambda_{p(0)} = \lambda_{св} \cdot (1 - a) + \lambda_{в} \cdot a, \quad (3)$$

где: $\lambda_{p(0)}$ — коэффициент теплопроводности рыбы в охлажденном состоянии в $\text{кал/м час } ^\circ\text{C}$;

$\lambda_{св}$ — коэффициент теплопроводности сухих веществ рыбы (приравнивая их к целлюлозе $\lambda_{св} = 0,22$);

a — содержание воды в рыбе;

$\lambda_{в}$ — коэффициент теплопроводности воды.

Для мороженой рыбы, в состав которой, кроме сухих веществ, входят и вода и лед в количествах, зависящих от ее температуры, коэффициент теплопроводности будет равен:

$$\lambda_{p(t)}^t = \lambda_{св} \cdot (1 - a) + \lambda_{л} \cdot a(1 - E_t) + \lambda_{в} \cdot a \cdot E_t, \quad (4)$$

где: $\lambda_{p(t)}^t$ — коэффициент теплопроводности мороженой рыбы при температуре t ;

E_t — количество вымерзшей воды в рыбе при той же температуре t ;

$\lambda_{л}$ — коэффициент теплопроводности водного льда.

Простота такого подсчета коэффициента теплопроводности рыбы в охлажденном и замороженном состоянии очень заманчива, однако здесь требуется основательная экспериментальная проверка. На рис. 9 графически изображена зависимость $\lambda_{p(t)}$ как функции температуры на основании подсчета по формулам (3) и (4).

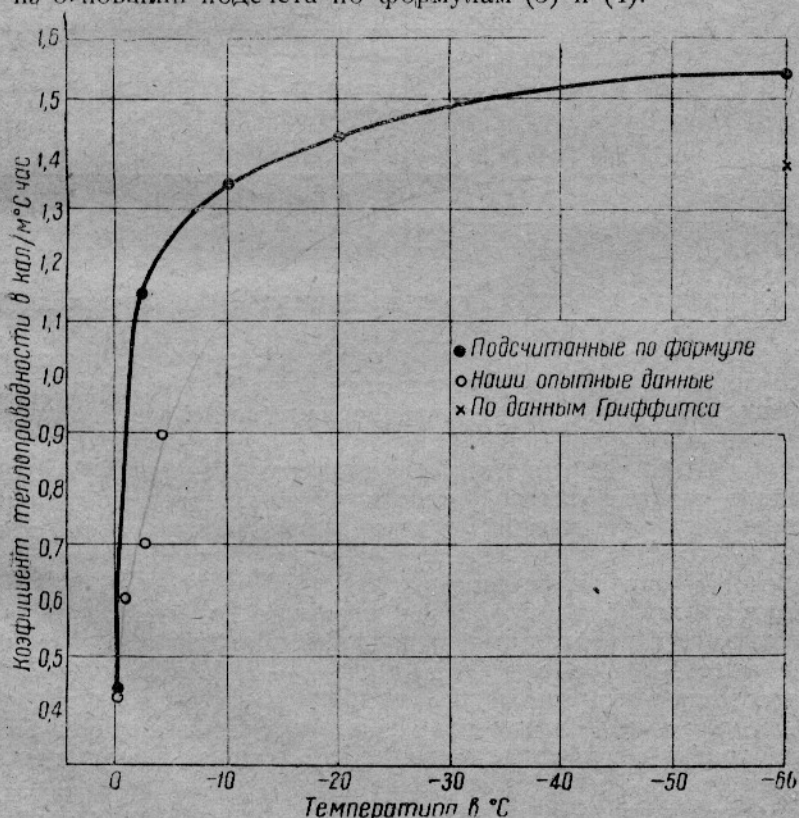


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплопроводности рыбы от температуры.

На тот же график нанесены экспериментальные данные из табл. 13. Оказалось, что последние близко совпадают только для охлажденной рыбы, все остальные значения, хотя и имеют тенденцию с понижением температуры возрасти, однако, лежат значительно ниже тех точек, которые подсчитаны по формуле (4). Это лишний раз указывает на необходимость проверки высказанного нами предположения о возможности подсчета $\lambda_{p(m)}$ по этой формуле.

Возвращаясь к полученным нами экспериментальным данным, приводим в качестве иллюстрации графические изображения количества тепла, которое снималось с поверхности рыбы в приборе, как функцию времени, начиная с процесса замораживания и кончая установившимся состоянием, при котором тепловой поток выравнивался и был равен количеству тепла, проходящему от рассола (с температурой от $-0,5$ до -4°) к эвтектическому льду (с температурой $-21,2^\circ$) через слой рыбы (рис. 10).

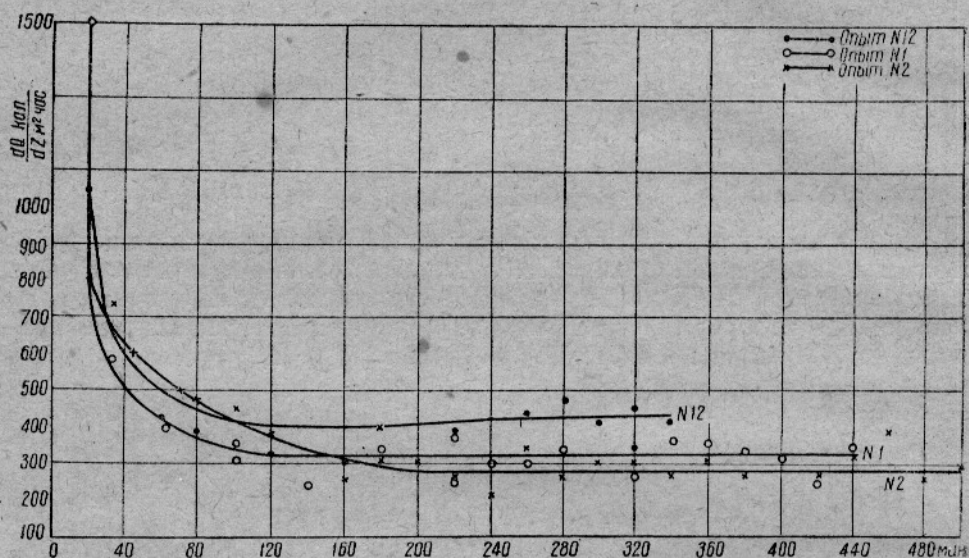


Рис. 10. Изменение количества тепла, снимаемого от рыбы при замораживании ее в приборе, для определения теплопроводности.

В этих кривых обращает на себя внимание большое количество тепла, снимаемого с рыбы в начальный период опыта, так как теплообмен в это время идет главным образом за счет отнятия от рыбы скрытой теплоты плавления. Вычислить коэффициент теплопроводности рыбы за период замораживания не представляется вследствие этого возможным, поэтому в приведенных нами в табл. 13 данных мы вели подсчет только за период установившегося состояния. Постоянство теплотока при данном условии указывает на окончание процесса замораживания; таяние эвтектического льда с этого момента происходит только от прохождения тепла через тело рыбы, т. е. за счет ее теплопроводности.

Правильно ли будет подсчитан коэффициент теплопроводности рыбы в условиях наших опытов, когда температура рыбы с одной стороны имеет $-0,5$ а с другой стороны $-21,2^\circ$? Если бы в этом интервале температур изменение агрегатного состояния в рыбе не имело места, то подсчет можно было бы считать верным, причем величина коэффициента теплопроводности в этом случае имела бы среднее значение для интервала температур от $-0,5$ до $-20,0^\circ$.

В действительности, в этом интервале температур происходит постепенное изменение агрегатного состояния рыбы, сопровождаемое

изменением коэффициента ее теплопроводности. Поэтому при определении коэффициента теплопроводности с перепадом температур от $-0,5$ до -21° в начальной стадии опыта имеет место изменение температуры во всей толще мяса рыбы, по окончании которого наступает установившееся состояние (рис. 11). Установившееся состояние характеризуется неизменным температурным состоянием рыбы, причем средние слои ее принимают температуру, промежуточную между крайними значениями температуры рыбы, т. е. между $-21,2$ и $-0,5^\circ$ (рис. 12). Теплопроводность рыбы меняется с температурой, а следовательно, каждый слой рыбы характеризуется свойственной ему величиной теплопроводности в зависимости от количества льда, в нем находящегося.

Таким образом, прохождение тепла через толщу рыбы и отдельные слои ее является сложным процессом, исключаящим, собственно говоря, возможность достаточно точного нахождения значения λ_p при определении его с перепадом температур в 20° в интервале от 0 до -21° .

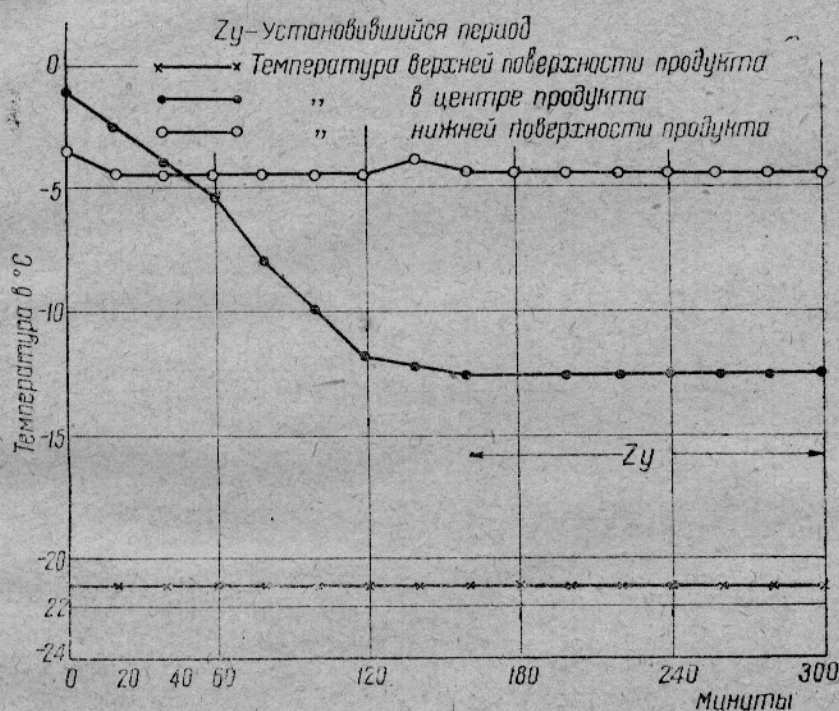


Рис. 11. Температурное состояние мяса рыбы при определении коэффициента теплопроводности (опыт № 11).

Тепловой поток проходит через рыбу по направлению от поверхности с более высокой температурой к более низкой; поступление тепла извне главным образом ограничивается поэтому теплопроводящей способностью первого слоя рыбы, прилегающего к теплопередающей поверхности прибора. Последующие слои рыбы имеют более низкую температуру, а следовательно, и большую теплопроводность. Поэтому значение λ_p в наших опытах должно быть ближе к теплопроводности рыбы при наиболее высокой температуре. В наших опытах наиболее высокой температурой испытуемой рыбы без большой ошибки можно считать температуру, равную температуре протекающего через коробку прибора рассола, так как прилегающие к этой

коробке слой рыбы безусловно принимают если не температуру этого рассола, то во всяком случае температуру, весьма к ней близкую.

Поэтому приведенные в таблице значения теплопроводности рыбы, повидимому, следует относить не ко всему интервалу температуры от $-0,5$ до $-21,2^\circ$, а только к наиболее высокому значению последней, так, например, в опыте № 9 к температуре около -1° , в опыте № 6 — к температуре -2° и т. д.

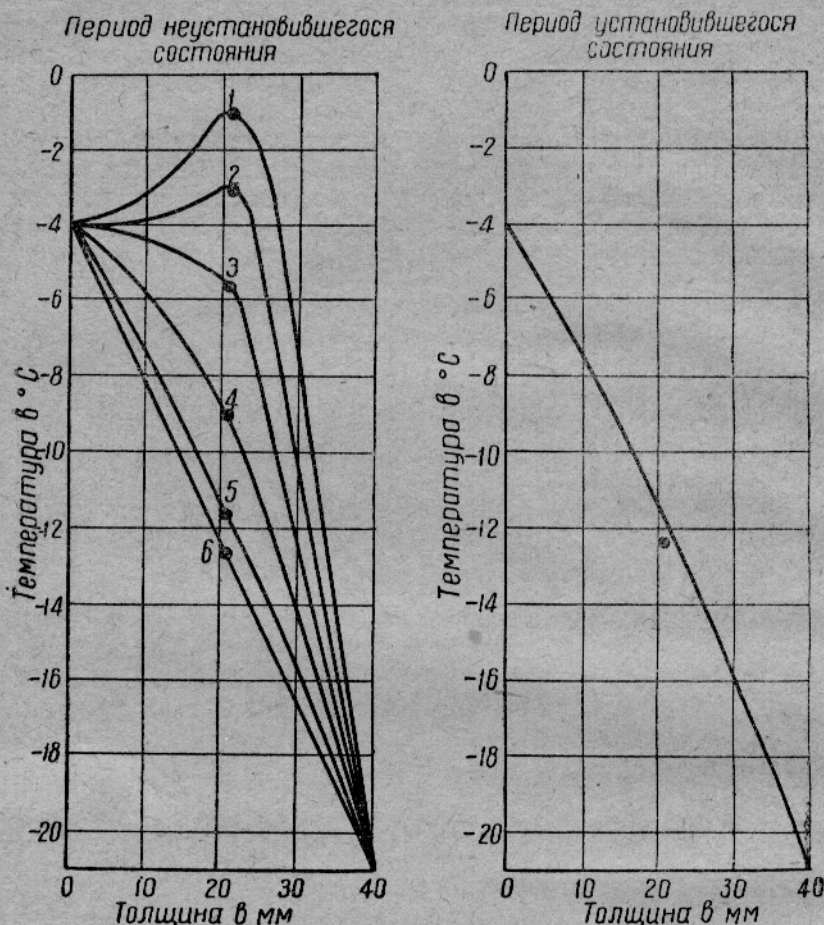


Рис. 12. Распределение температуры в рыбе (опыт 11).
— начало опыта; 2 — через 30 мин; 3 — через 60 мин.; 4 — через 90 мин; 5 — через 120 мин.; 6 — через 150 мин.; А — через 150 до 320 мин. без изменения.

В подтверждение правильности полученных нами результатов подсчитаем значение λ_p при помощи формулы по определению продолжительности замораживания пищевых продуктов, выведенной инж. Д. Г. Рютовым¹⁾.

Основная формула инж. Рютова, из которой определяется продолжительность процесса замораживания, имеет следующий вид:

$$\frac{dQ}{dZ} = \frac{\theta}{\sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + \frac{2\theta}{\gamma \cdot R \cdot \lambda_p} \cdot Z}} \quad (5)$$

Для процесса охлаждения и замораживания эта формула будет иметь вид:

Н. Д. А. Христодело и Д. Г. Рютов, Быстрое замораживание мяса, 1936.

$$\frac{dQ}{dZ} = \frac{\vartheta \left(1 + \frac{C}{R} \cdot \frac{(t_3 - t_n)}{2} \right)}{\sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + \frac{2\vartheta}{\gamma \cdot R \cdot \lambda_p} Z}}, \quad (6)$$

где $\frac{dQ}{dZ}$ — количество тепла, проходящее через 1 м² поверхности в

Z час, в кал/м² час;

ϑ — перепад температуры между замораживаемым продуктом и охлаждающей средой;

C — средняя „теплоемкость“ продукта в том интервале температур, в котором ведется замораживание, в кал/кг °С;

t_3 — температура замерзающего слоя продукта в °С;

t_n — температура продукта, соприкасающегося с охлаждающей средой;

α — коэффициент теплоперехода в кал/м² час °С;

γ — удельный вес продукта в кг/м³;

R — скрытая теплота плавления продукта при данной температуре замораживания в кал/кг;

λ_p — коэффициент теплопроводности продукта при температуре замораживания в кал/м час °С;

Z — продолжительность процесса замораживания в час.

Для упрощения последнего выражения (6) часть его, а именно $1 + \frac{C}{R} \cdot \frac{(t_3 - t_n)}{2}$, обозначим через букву k . Тогда формула примет следующий вид:

$$\frac{dQ}{dZ} = \frac{\vartheta \cdot k}{\sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + \frac{2\vartheta}{\gamma \cdot R \cdot \lambda_p} Z}} \quad (7)$$

Для подтверждения закономерности процесса замораживания в наших опытах приведем выражение (7) к уравнению прямой. Для этого прежде всего упростим выражение (7) и освободимся от иррациональной зависимости в знаменателе:

$$\left(\frac{dQ}{dZ} \right)^2 = \frac{\vartheta^2 k^2}{\frac{1}{\alpha^2} + \frac{2\vartheta}{\gamma \cdot R \cdot \lambda_p} Z} \quad (9)$$

Путем дальнейших алгебраических преобразований придем к уравнению прямой:

$$\frac{\vartheta^2 \cdot k^2}{\left(\frac{dQ}{dZ} \right)^2} = \frac{1}{\alpha^2} + \frac{2\vartheta}{\gamma \cdot R \cdot \lambda_p} Z \quad (10)$$

По данным наших опытов, значение ϑ и $\frac{dQ}{dZ}$ известно и зависит от времени. Значение k можно подсчитать для условий, в которых проводились наши опыты. Для этого примем $R = 54$ кал/кг для замораживания до -4° ; $C = 1,28$ кал/кг °С, как среднюю для температуры от -4 до -15° ; $t_3 = -1^\circ$; $t_n = -15^\circ$ и $\gamma \cong 1010$ кг/м³.

Все эти данные позволяют сделать графическое построение $\frac{\vartheta^2 k^2}{\left(\frac{dQ}{dZ} \right)^2}$ как функции времени.

На рис. 13 приводятся данные, построенные нами для тех опытов, в которых замораживание рыбы происходило непосредственно в приборе. Из этих кривых видно, что начало опыта, как правило, характеризуется таким расположением точек, которое позволяет провести прямую линию: определенная закономерность в этом случае имеет место. Этот характер кривой резко изменяется по окончании вымораживания основной массы воды, содержащейся в рыбе; кривая резко начинает подниматься вверх; в это время происходит дальнейшее охлаждение рыбы, которое заканчивается наступлением установившегося состояния, т. е. третьим резким переломом кривой, снова принимающей горизонтальное положение.

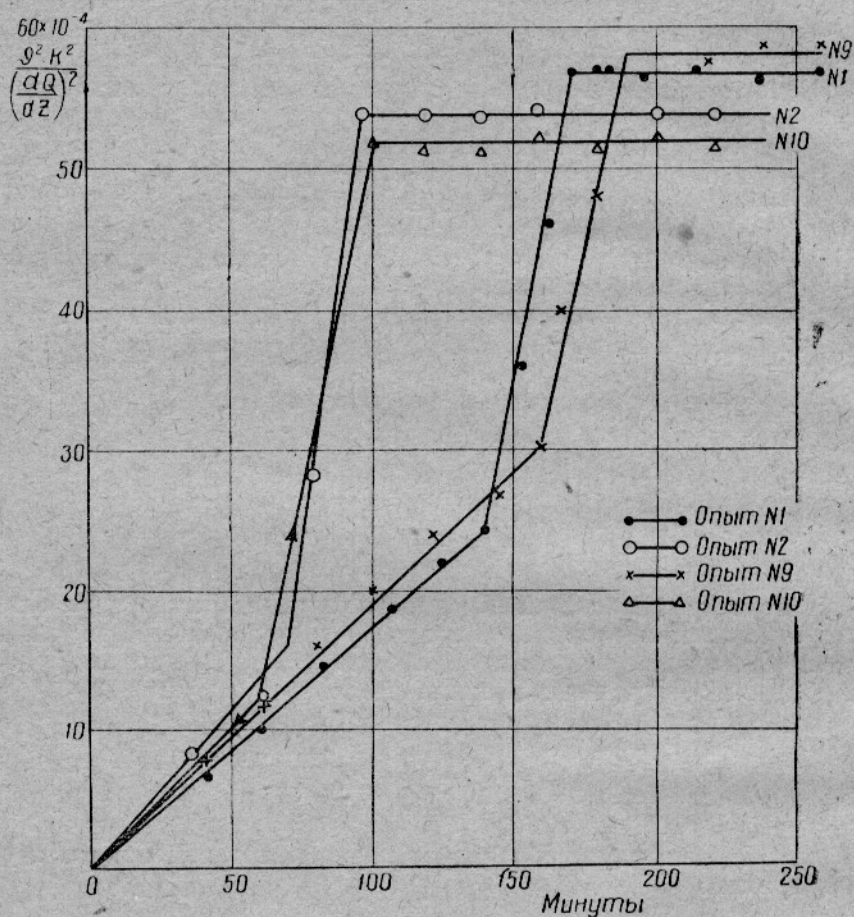


Рис. 13. Графическое построение функции $\frac{\partial^2 k^2}{(\frac{dQ}{dZ})^2}$

Преобразуя уравнение (10) относительно λ и упрощая его исключением $\frac{1}{\alpha^2}$, которое примем равным 0, так как значение α^2 без большой ошибки может быть приравнено бесконечности, получим:

$$\lambda = \frac{2\theta}{\frac{\partial^2 k^2}{(\frac{dQ}{dZ})^2} \cdot \gamma \cdot R} \cdot Z \quad (11)$$

По данной формуле можно определить значение λ , подставляя из графика (рис. 13) величину $\frac{\partial^2 \cdot k^2}{\left(\frac{dQ}{dZ}\right)^2}$, соответствующую данному значению Z . Результат подсчетов для различных опытов приводится в табл. 14.

Таблица 14

Коэффициент теплопроводности мяса судака при температуре его замерзания (-10°), подсчитанный по формуле (11)

№ опытов	Z (в час.)	$\frac{\partial^2 \cdot k^2}{\left(\frac{dQ}{dZ}\right)^2}$	θ (в $^\circ\text{C}$)	R (в кал/кг)	γ (в кг/м ³)	λ_p (в кал/м час $^\circ\text{C}$)
1А	2	$21,6 \times 10^{-4}$	20,5	54	1010	0,697
2А	1	$13,2 \times 10^{-4}$	20,8	54	1010	0,58
9	2	$23,5 \times 10^{-4}$	20,8	54	1010	0,65
10	1	$12,2 \times 10^{-4}$	20,3	54	1010	0,61

Сравнение значений теплопроводности, полученных опытным путем (табл. 13) и вычисленных (табл. 14), показывает, что они довольно близки друг к другу. Некоторое расхождение можно отнести за счет приближенных значений для R , γ и k , принятых нами при расчете.

Описанные нами опыты по определению коэффициента теплопроводности мороженой рыбы в интервале температур от 0 до -21° показали, что каждый градус понижения температуры рыбы отражается на величине коэффициента теплопроводности рыбы.

Значение коэффициента теплопроводности рыбы на границе замерзания несколько больше теплопроводности охлажденной рыбы. С понижением температуры рыбы до $-4,5^\circ$ коэффициент теплопроводности увеличивается и становится вдвое больше теплопроводности охлажденной рыбы. Отсюда следует, что обычно применяемое в практике значение коэффициента теплопроводности мороженого мяса $\lambda = 1,2$ или $\lambda = 1,38$, если и соответствует истине, то относится к температурам мяса порядка не выше -10° , т. е. к тому моменту, когда практически процесс замораживания заканчивается. Поэтому величина λ_p рыбы при расчетах процесса замораживания должна быть пересмотрена и соответствующим образом изменена. Для этого необходимо иметь данные о зависимости коэффициента теплопроводности рыбы от температуры. Как нами указывалось выше, обычные способы определения теплопроводности, основанные на принципе перепада температур, дают только средние значения теплопроводности в пределах данного перепада температур и, как это следует из наших опытов, точно определить эту зависимость при указанных условиях нет возможности. Поэтому для определения зависимости коэффициента теплопроводности от температуры в пределах от 0 до -20° приходится обращаться к непрямым методам исследования. Одним из таких методов является определение коэффициента температуропроводности, так как величина последнего может быть определена в пределах одного градуса понижения температуры.

В заключение считаем необходимым отметить следующее.

1. Определение коэффициента теплопроводности охлажденной рыбы по разработанному нами методу дает достаточно точные результаты, и потому может быть рекомендовано не только при изучении физических свойств рыбы и рыбных продуктов, но и для других пищевых продуктов и для изоляционных материалов.

2. Определение коэффициента теплопроводности мороженой рыбы

по той же методике дает достаточно точные данные только в тех пределах температур, при которых не происходит изменения агрегатного состояния воды, содержащейся в рыбе. Для практических же целей наиболее интересны температуры от $-1,0$ до -20° , т. е. та область температуры, в которой изменение агрегатного состояния в продуктах происходит наиболее интенсивно. Для этих условий разработанный нами способ определения λ_p оказывается недостаточно точным.

3. Для окончательного обоснования процессов замораживания рыбы необходимо произвести определение коэффициента ее температуропроводности.

5. КОЭФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МЯСА РЫБЫ

Скорость процесса охлаждения и замораживания продуктов в одной и той же охлаждающей среде и при одинаковых условиях зависит от коэффициента ее температуропроводности.

Величина последнего находится в зависимости от коэффициента его теплопроводности, теплоемкости и удельного веса. Представим эту зависимость в виде следующего отношения:

$$a_p = \frac{\lambda_p}{\gamma_p \cdot C_p} \text{ м}^2/\text{час}, \quad (1)$$

где a_p — коэффициент температуропроводности в $\text{м}^2/\text{час}$;

λ_p — коэффициент теплопроводности $\text{кал}/\text{м час } ^\circ\text{С}$

C_p — теплоемкость $\text{кал}/\text{кг } ^\circ\text{С}$;

γ_p — удельный вес $\text{кг}/\text{м}^3$.

В интервале температур от 25° до точки замерзания значения коэффициента теплопроводности, теплоемкости и удельного веса без большой погрешности могут быть приняты постоянными. Последнее не может быть распространено на температуры ниже точки замерзания продукта, где даже незначительные изменения температуры сопровождаются очень значительными изменениями физических свойств продуктов, в данном случае — коэффициента теплопроводности, теплоемкости и удельного веса.

Причиной указанных изменений является образование льда в тканях рыбы, а так как интенсивность этого процесса находится в зависимости от температуры рыбы, то, следовательно, изменения физических свойств рыбы находятся в определенной зависимости от ее температурного состояния. Изучить эту зависимость и является необходимым для теоретического обоснования как процессов замораживания рыбы, так и для осуществления тепловых расчетов по холодильной ее обработке.

Определение коэффициента температуропроводности рыбы, представляющее само по себе большой теоретический и практический интерес с точки зрения характеристики скорости замораживания, позволяет, кроме того, определить и закономерность изменения коэффициента теплопроводности рыбы в процессе холодильной обработки.

По вопросу о коэффициенте температуропроводности пищевых продуктов в литературе имеется очень мало данных; в отношении рыбы, насколько нам известно, они отсутствуют.

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов в интервале температур от 40° до точки замерзания с достаточной достоверностью может быть определен путем подсчета на основании данных об их физических свойствах. Значения коэффициента температуропроводности для различных пищевых продуктов приводятся в табл. 15 и 16.

Таблица 15

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов, подсчитанный по данным Тамма

Наименование продуктов	В пределах температур	γ (в кг/м ³)	C (в кал/кг ⁰ C)	λ (в кал/м час ⁰ C)	a (в м ² /час)
Говяжье мясо	от 0 до +40°	1070	0,83	0,43	0,00481
Свинное сало	от 0 до +40°	850	0,54	0,153 ¹⁾	0,000333

Таблица 16

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов, подсчитанный по данным Лобзина

Наименование продуктов	В пределах температур	γ (в кг/м ³)	C (в кал/кг ⁰ C)	λ (в кал/м час ⁰ C)	a (в м ² /час)
Мясо рыбы	от 0 до +40°	1050	0,83	0,327	0,000375
" " "	0 до +40°	1050	0,83	0,412	0,000473
" говяжье	0 до +40°	1070	0,81	0,478	0,000551

Эти данные можно считать близкими к действительным значениям коэффициента температуропроводности, так как в интервале температур от 40° до точки замерзания величины λ , C и γ изменяются в незначительной степени.

Что касается коэффициента температуропроводности продуктов в замороженном состоянии, то определение его путем подсчета не представляется возможным из-за отсутствия соответствующих данных.

Нам известны только экспериментальные данные о коэффициенте температуропроводности мороженого говяжьего мяса, полученные Оубери и Гриффитсом, представляющие главным образом теоретический интерес, так как значение коэффициента температуропроводности в интервале температур от —40 до —80° лишь в малой степени применимо для практических целей (табл. 17).

Таблица 17

Коэффициент температуропроводности говяжьего мяса по Оубери и Гриффитсу

	В пределах температур	γ (в кг/м ³)	C (в кал/кг ⁰ C)	λ (в кал/м час ⁰ C)	a (в м ² /час)
Экспериментальные данные	от —40 до —80°	—	—	—	0,003302
Вычисленные данные	—60°	1160	0,36	1,368	0,00327

Распространение этих данных на более высокие пределы температур, при которых обычно происходит процесс замораживания продуктов, не представляется возможным ввиду несоответствия их величины истинному значению этого коэффициента. Последнее делается особенно ясным, если мы ориентировочно подсчитаем a на основании наших экспериментальных данных о физических свойствах рыбы в пределах от 0 до —21° (табл. 18).

1) По данным Рубнера.

Коэффициент температуропроводности мяса рыб при температурах ниже 0°, подсчитанный по данным П. П. Лобзина (ориентировочный подсчет)

В пределах температур	γ (в кг/м³)	C (в кал/кг °C)	λ (в кал/м час °C)	a (в м²/час)
Мясо рыбы от — 0,8 до — 21,2°.	1030—985	28,6—0,74	0,538	0,0000364
„ „ „ — 2,1 до — 21,2°.	1010—985	10,7—0,74	0,664	0,000116
„ „ „ — 4,6 до — 21,2°.	995—985	3,2—0,74	0,890	0,000456

Как видно из табл. 18, значение « a » довольно заметно изменяется с температурой так, например, от — 0,8 до — 21,2а — 0,00036; от — 2,1 до — 21,2а — 0,000116; т. е. изменение температуры от — 0,8 до — 2,1° имеет следствием увеличение значения a в 3 раза. Изменение величины a было бы еще более отчетливым, если бы значения были известны с точностью до 1° в пределах интервала температур от — 0,8 до — 2,1°.

Полное подобие процессов распространения тепла в двух различных телах позволяет определить значение коэффициента температуропроводности одного из тел при том условии, если физические свойства другого тела изучены с такой точностью, что это тело может быть рассматриваемо в качестве эталона, т. е.:

$$a = a_э \cdot V_a, \quad (2)$$

где a — коэффициент температуропроводности исследуемого тела;
 $a_э$ — коэффициент температуропроводности тела, физические свойства которого хорошо известны (эталон);

V_a — множитель, характеризующий значение коэффициента исследуемого тела (определяется опытным путем).

Определение V_a возможно по методу подобия. С этой целью прежде всего рассмотрим основное уравнение распространения тепла.

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x_a \cdot \partial x_a}, \quad \dots \dots \dots (3)$$

где: t — температура тела в точке (x_1, x_2, x_3) в момент времени τ ;
 a — коэффициент температуропроводности тела.

Уравнение (3) имеет бесконечное число решений. Принятием известных дополнительных условий эта многозначность может быть устранена. Это дополнительное условие заключается в том, что любые две функции $t_1(x_1, x_2, x_3, \tau)$ и $t_2(x_1, x_2, x_3, \tau)$, представляющие собою решение данного уравнения и удовлетворяющие дополнительным условиям, должны быть равны друг другу.

Дополнительными условиями в данном случае являются заданные начальные температуры тела и среды в течение всего процесса, геометрические формы тела и его физические свойства.

Из этого следует, что единственная физическая переменная, входящая в состав этих определяющих величин, есть температура.

По Гухману, уравнению (3) соответствует только одно обуславливающее уравнение:

$$\frac{V_a \cdot V_t}{V_a^2} = 1, \quad (4)$$

где: V_a — множитель преобразования, которым определяется относительное значение коэффициента температуропроводности;

V_τ — множитель преобразования, которым определяется относительное значение времени;

V_d — множитель преобразования, которым определяется относительное значение диаметра.

Таким образом, обуславливающее уравнение (4) представляет собою единственный критерий, ограничивающий свободу выбора величин, входящих в составные условия однозначности. Уравнение (4) характерно тем, что оно не содержит температуры. Таким образом, множитель преобразования температурного поля может быть выбран совершенно произвольно. Полная тождественность полей будет иметь место тогда, когда этот множитель равен единице. Уравнение (4) позволяет найти значение V_a :

$$V_a = \frac{V_d^2}{V_\tau}. \quad (5)$$

Полное геометрическое подобие формы и размера испытуемого вещества и тела, служащего эталоном, дает значение множителя преобразования $V_d=1$, откуда.

$$V_a = \frac{1}{V_\tau}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения V_a необходимо найти значение V_τ , которое и определяется экспериментальным путем. Для этого испытуемое тело и тело-эталон, имеющие во всех точках одинаковую температуру, погружаются в среду с температурой, отличной от температуры погружаемых тел. Изменение температуры тел во времени изображается графически. По кривым определяется значение V_τ , как отношение продолжительности изменения температуры на определенное число градусов (в испытуемом теле) к продолжительности изменения температуры (на то же число градусов) в эталоне.

Основные требования, предъявляемые к методике определения коэффициента температуропроводности, сводятся к следующему:

1) по своей форме как испытуемое тело, так и эталон должны быть геометрически подобными; последнее легко можно осуществить путем применения одной и той же гильзы для испытуемого тела и эталона;

2) интервалы изменения температуры во время опытов не должны быть очень большими во избежание значительных изменений физических констант испытуемого тела и эталона;

3) начальные температурные поля как в испытуемом объекте, так и в эталоне должны быть подобны;

4) на поверхности тел должны быть установлены подобные условия.

Все эти требования были учтены нами при разработке прибора и методики определения коэффициента температуропроводности.

Прибор для определения коэффициента температуропроводности состоял из металлического цилиндра для исследуемого продукта и эталона, термометров Бекмана, термосов с эвтектической смесью и мешалкой, внешнего сосуда, наполненного эвтектическим льдом, и изолированного ящика, в который помещался весь прибор (рис. 14).

Цилиндр, предназначенный для помещения в него исследуемого продукта, был сделан из красной меди и имел следующие размеры: диаметр 60 мм и высоту 220 мм. Верхняя часть цилиндра имела плотно навинчивающуюся крышку с патрубком для термометра Бекмана. Цилиндр возможно плотно, но с учетом расширения воды при замерзании, наполнялся испытуемым продуктом (например, рыбой) или материалом с известным коэффициентом температуропроводности

(так называемым эталоном). В середину цилиндра с продуктом через патрубок в крышке вводился термометр Бекмана. Для установки термометра в строго вертикальном положении на поверхность мяса в цилиндре помещалась металлическая пластинка с диаметром, почти равным внутреннему диаметру цилиндра. В центре пластинки было сделано отверстие, равное диаметру термометра. Патрубок и пластинка в этом случае являлись направляющими для термометра и гарантировали строго вертикальное положение его.

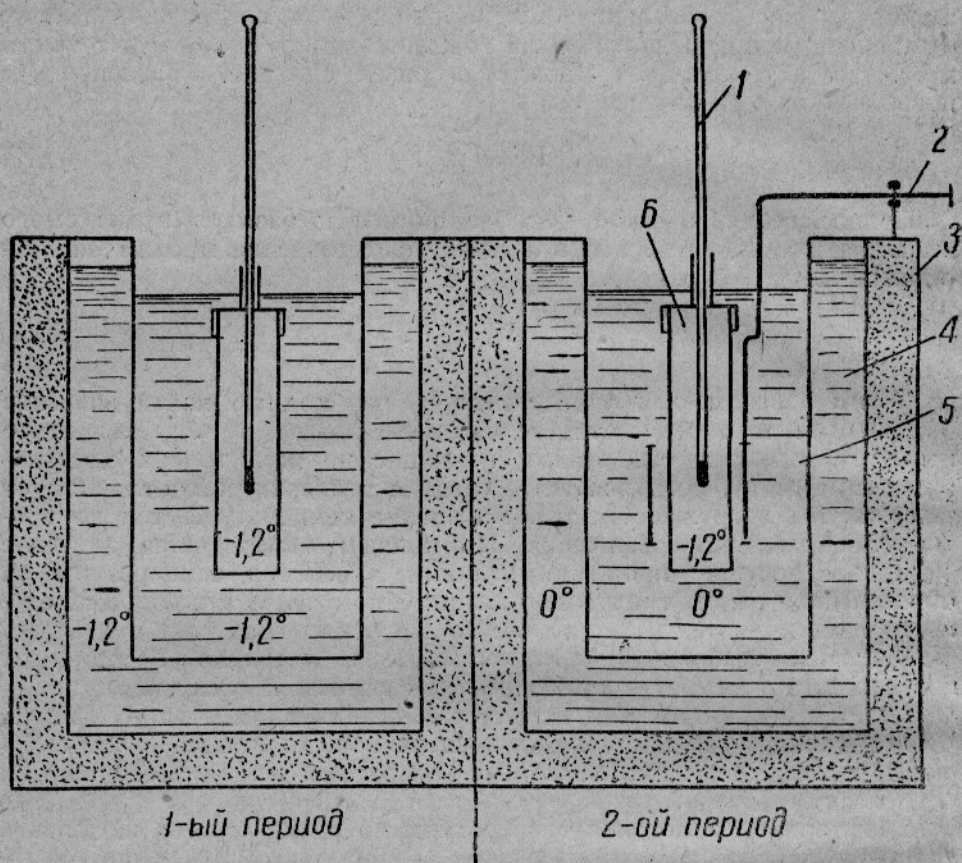


Рис. 14. Прибор для определения теплопроводности.

1 — термометр Бекмана; 2 — мешалка; 3 — изоляция; 4 — сосуд с эвтектическим льдом; 5 — сосуд-термос с эвтектической смесью в виде кашеобразной массы; 6 — цилиндр, заполненный испытуемым мясом.

Мы пользовались термометром Бекмана со шкалой в 5° и точностью до $0,01^{\circ}$. Тарировка термометра производилась по точкам таяния водного и эвтектического льда, отсчеты — с помощью лупы.

В термос с эвтектической смесью устанавливался на специальной площадке цилиндр с продуктом. Эвтектическая смесь помещалась в сосуд в виде кашеобразной массы, состоящей из смеси очень мелко наколотого эвтектического льда и эвтектического раствора, и в таком количестве, чтобы цилиндр с продуктами полностью был погружен в нее.

Для обеспечения равномерной теплопередачи от эвтектической смеси к продукту, находящемуся в термосе с эвтектической смесью, была установлена мешалка вертикального типа. Мешалка состояла из стержня с прикрепленными к нему двумя серповидными пластинками. Пластинки были соединены вертикальными стержнями. Для уменьше-

ния трения мешалки об эвтектическую смесь в пластинках были сделаны отверстия. Мешалка работала от электромотора, и в наших опытах движение ее (т. е. подъем и опускание) происходило со скоростью 60—65 раз в минуту.

Во избежание усиленного таяния эвтектической смеси, а вместе с тем и изменения температуры в термосе, последний помещался в сосуд больших размеров, который в свою очередь также заполнялся эвтектическим льдом. Этот сосуд для уменьшения таяния смеси снаружи изолировался пробковой мелочью. При таком расположении сосудов таяние эвтектической смеси в термосе было минимальным и происходило только за счет отнятия тепла от продукта, помещенного в цилиндр, и небольшого притока тепла через верхнюю открытую часть прибора. Это гарантировало постоянство температуры в термосе в течение всего опыта.

Интервалы температуры были выбраны нами по возможности малыми во избежание влияния изменений физических констант исследуемого продукта и эталона на результаты опытов. К сожалению, очень ограниченное количество эвтектических смесей с подходящей для нас температурой плавления не дало нам возможности использовать в процессе опытов минимальные интервалы температур. В силу этого все наши опыты проводились при температурных условиях, указанных в табл. 19.

Методика проведения опытов заключалась в следующем. Цилиндр, наполненный исследуемым мясом или эталоном с установленным в нем термометром Бекмана, помещался не менее чем на 24 часа в термос с эвтектической смесью при температуре ее таяния, например, $-1,2^{\circ}$ для Na_2SO_4 . За это время продукт, находящийся в цилиндре, во всех его точках принимал температуру термоса. Одновременно с этим подготавливался второй термос, например, с температурой 0° , для чего использовался чистый лед. По истечении 24 час. цилиндр с продуктом возможно быстро переносился из первого термоса во второй, после чего периодически производилось измерение температуры продукта в цилиндре до момента полного выравнивания температуры продукта с температурой во втором термосе. Опыт в одинаковых температурных условиях повторялся 5 раз и более до получения хорошо совпадавших результатов.

Точно так же проводились опыты с продуктом при других температурных перепадах путем использования соответствующей пары эвтектических растворов (табл. 19).

Таблица 19

Интервалы температур во время опытов ($^{\circ}\text{C}$)		Эвтектические смеси	
от	до	1	2
0	+15,0	Водный лед	Вода при комнатной температуре
— 1,2	0,0	Na_2SO_4	Водный лед
— 2,1	— 1,2	Na_2CO_3	Na_2SO_4
— 3,8	— 2,1	$\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KNO}_3$	Na_2CO_3
— 6,8	— 3,8	ZnSO_4	$\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KNO}_3$
— 11,1	— 6,8	KCl	ZnSO_4
— 15,8	— 11,1	NH_4Cl	KCl
— 21,2	— 15,8	NaCl	NH_4Cl

Для определения коэффициента температуропроводности мяса рыбы нами был использован мороженный астраханский судак следующего химического состава (табл. 20).

	Средний взс (в кг)	Воды	Азотистых веществ	Жиры	Зола
Астраханский судак	2-2,7	80	17	0,5	1,6

Судак перед опытом дефростировался, обешкуривался, разделывался на филе, после чего некоторое количество филе помещалось в цилиндр прибора для определения коэффициента температуропроводности.

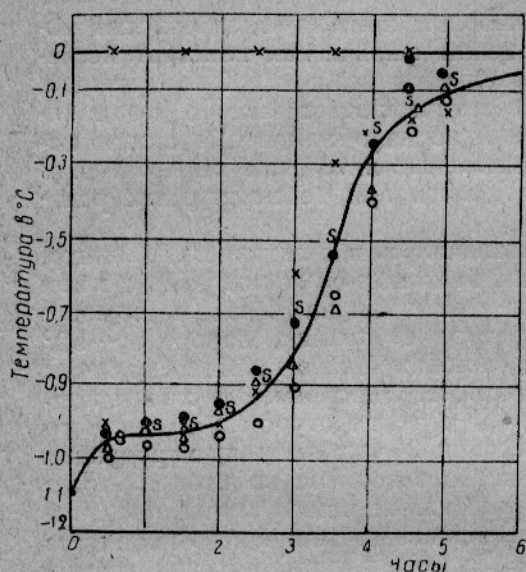


Рис. 15. Изменение температуры мяса судака.

В качестве эталона нами применялся водный лед, физические свойства которого достаточно хорошо известны. (Лед приготовлялся из дистиллированной воды). Цилиндр, наполненный водой, помещался под вакуум для удаления из воды воздуха, после чего вода замораживалась непосредственно в цилиндре путем помещения его в камеру с температурой ниже 0° .

Для температур от 0 до 15° в качестве эталона нами применялась пробковая мелочь со следующими физическими свойствами:

$$\gamma = 75 \text{ кг/м}^3, C = 0,33 \text{ и } \lambda = 0,033.$$

Наполнение цилиндра пробковой мелочью производилось путем продолжительного встряхивания всегда одного и того

же количества пробковой мелочи для получения предельного объемного веса.

Подсчет коэффициента температуропроводности мяса рыб проводился нами по формуле (2):

$$a = a_0 V_a.$$

Опытные данные обрабатывались в виде графиков изменений температуры исследуемого продукта (рис. 15), а также тела, принятого в качестве эталона, как функции времени (рис. 16). Сопоставление этих изменений давало возможность определить значение V_a .

Продукт и эталон в наших опытах последовательно помещались в один и тот же цилиндр прибора; благодаря этому полное подобие геометрических размеров тел было соблюдено, поэтому V_a можно было принять равным 1.

При этом условии V_a определяется следующим уравнением:

$$V_a = \frac{1}{V_0}.$$

Отношение времени, необходимого для изменения температуры исследуемого продукта на величину перепада температуры (Z^p) между

центром продукта и его поверхностью, к соответствующему времени для эталона ($Z_э$) представляет собою величину $V_т$, т. е.:

$$V_т = \frac{Z_p}{Z_э} \dots\dots\dots (7)$$

откуда:

$$V_a = \frac{1}{V_т} = \frac{Z_э}{Z_p} \dots\dots\dots (8)$$

Постоянство величин $V_т$ на всем протяжении кривых является признаком, по которому можно судить о степени точности опыта. С

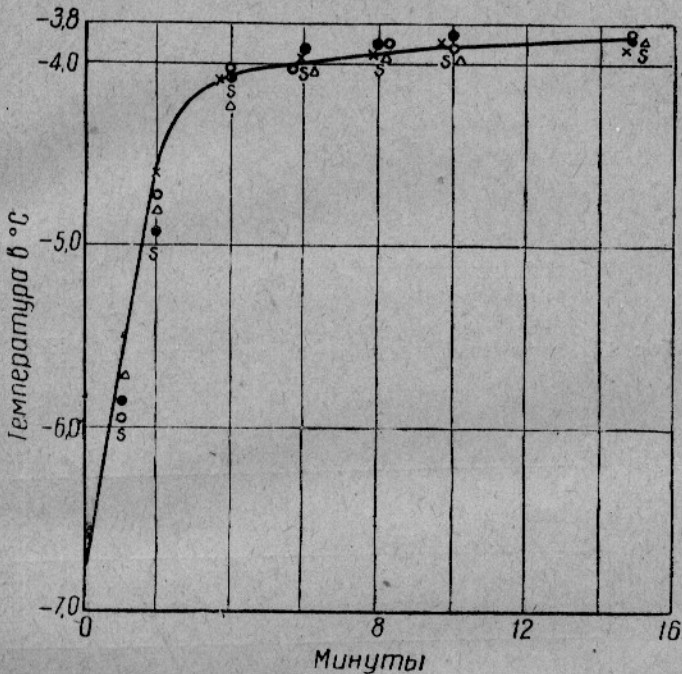


Рис. 16. Изменение температуры водного льда.

этой же целью для каждой серии опытов по исправленной кривой нами строился полулогарифмический график перепадов температуры по времени (рис. 17). В случае получения кривой вместо прямой опыты переделывались.

На основании многочисленных опытов по определению коэффициента температуропроводности были получены следующие результаты (табл. 21).

Таблица 21

Коэффициент температуропроводности мяса судака
(на основании опытных данных)

Интервал температур, в котором проводилось определение	$a_э$	$V_a = \frac{Z_э}{Z_p}$	$a_p = a_э \cdot V_a$
-21,2~-15,8°	0,00486	0,33	0,0016
-15,8~-11,1	0,00463	0,24	0,0011
-11,1~- 6,8	0,00455	0,15	0,00068
- 6,8~- 3,8	0,00444	0,05	0,00022
- 3,8~- 2,1	0,00438	0,0146	0,000064
- 2,1~- 1,2	0,00434	0,0085	0,000037
- 1,2~- 0,0	0,00431	0,0125	0,000054
0° ~+15 (пробка)	0,00133	0,38	0,000503

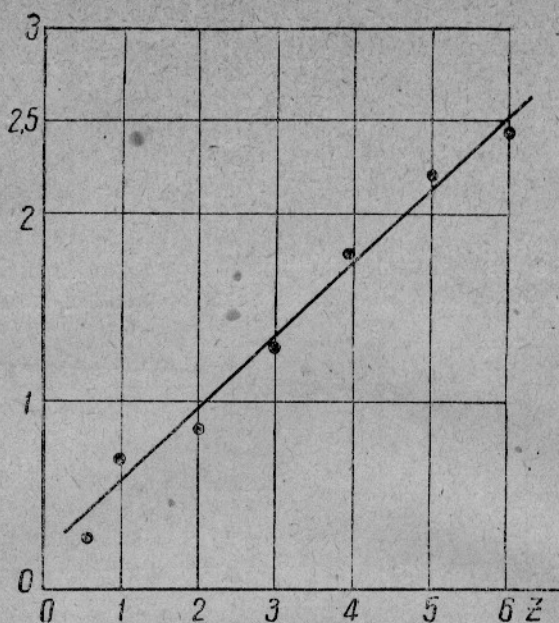


Рис. 17. Графическое изображение зависимости $\ln \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}$

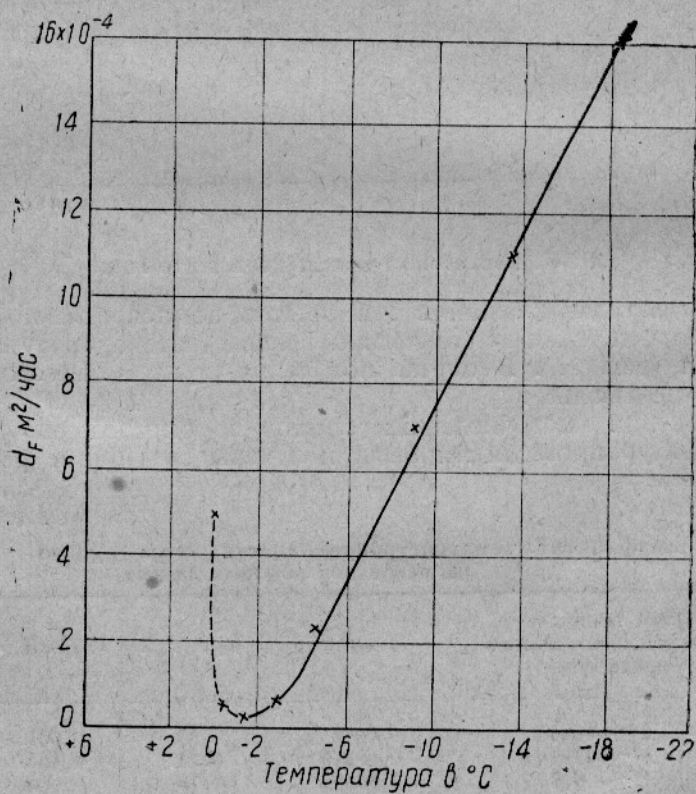


Рис. 18. Зависимость α_p от температуры

При рассмотрении данных о коэффициенте температуропроводности мяса судака необходимо оговориться, что в интервале температур от 0 до $-1,2^{\circ}$, от $-1,2$ до $-2,1^{\circ}$, а также, повидимому, частично и от $-2,1$ до $-3,8^{\circ}$, значение a_p следует рассматривать только как приближенное. Причиной этого являются очень большие изменения физических свойств мяса рыб в этих интервалах температур, несмотря на то, что опыт проводился в относительно узком интервале температур, равном $0,9-1,7^{\circ}$.

Зависимость коэффициента температуропроводности мяса рыбы от температурного его состояния приводится на графике (рис. 18).

Из графика видно, что наименьшее значение a_p имеет место при температуре от $-1,0$ до $-3,0^{\circ}$; примерно при $-8,0^{\circ}$ значение a_p становится равным своему значению в охлажденном состоянии, и, наконец, значение a_p при -20° возрастает в 3 раза по сравнению с охлажденным состоянием и в 30 раз по сравнению со значением при -2° . Все это указывает на те значительные изменения коэффициента температуропроводности мяса рыб, которые происходят в процессе ее холодильной обработки.

Небезынтересно воспользоваться полученными значениями a_p для определения значения коэффициента теплопроводности при различных температурах мяса рыб. Необходимые для этого значения γ_p и C_p нами были взяты из соответствующих глав данной работы. Подсчет коэффициента теплопроводности производился по формуле (1). Результаты подсчета приводятся в табл. 22.

Таблица 22

Изменение коэффициента теплопроводности мяса судака в зависимости от температуры

Интервал температур, в котором проводилось определение a_p	a_p	C_p	γ_p	λ_p
+15—0°	0,000505	0,83	1070	0,448
0— $-1,2$	0,000054	5,5	1065	0,316 (?)
$-1,2$ — $-2,1$	0,000037	25,8	1047	1,0 (?)
$-2,1$ — $-3,8$	0,000064	8,2	1027	0,54
$-3,8$ — $-6,8$	0,00022	3,5	1015	0,782
$-6,8$ — $-11,1$	0,00068	1,35	1008	0,925
$-11,1$ — $-15,8$	0,0011	0,98	1005	1,084
$-15,8$ — $-21,2$	0,0016	0,74	1004	1,19

В таблице обращает на себя внимание величина коэффициента теплопроводности λ_p мяса рыбы при температурах от 0 до $-1,2^{\circ}$ и от $-1,2$ до $-2,1^{\circ}$, не соответствующая общей закономерности изменения λ_p от температуры. Это особенно хорошо видно при графическом изображении λ_p как функции температуры (рис. 19). Понятно, что полученное значение при температурах от 0 до -2° следует признать неточным по тем же самым причинам, которые были отмечены для a_p , а именно из-за значительного изменения физических констант мяса рыбы в этом интервале температур.

Что же касается значений λ_p при температурах от $+15$ до 0° и от -3 до -21° , то их можно считать достаточно точными и близко совпадающими как с теоретическими подсчетами, так и с имеющимися экспериментальными данными, что подтверждает тем самым правильность полученной нами величины коэффициента температуропроводности.

Таким образом, в результате этой работы мы получили данные о коэффициенте температуропроводности мяса судака для температур от $+15$ до 0° и от -4 до -20° , т. е. в том интервале температур, который наиболее часто применяется в практике холодильной обработки рыбы.

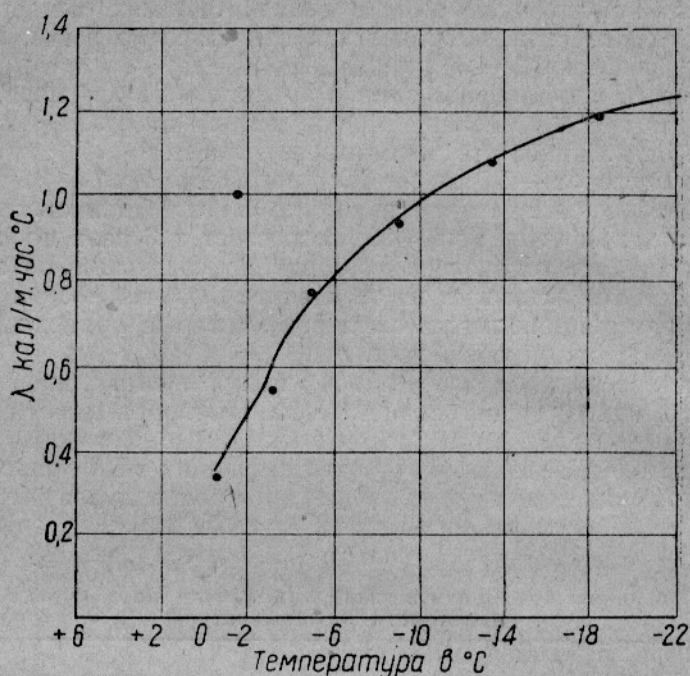


Рис. 19. Зависимость λ_p от температуры.

Пользуясь этими данными, мы определили значение и зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Полученные значения коэффициента теплопроводности довольно близко согласуются с теоретическими расчетами и имеющимися экспериментальными данными.

Что касается полученных нами значений коэффициента температуропроводности от -1 до -4° , то они подлежат уточнению в более узком интервале температур, чем это имело место в наших опытах. Выполнение этого условия требует значительно более точного измерения температуры во время опытов и наполнения термосов эвтектическими смесями с температурой плавления в пределах от -1 до -4° и перепадом температуры между ними не более, чем на $0,2^\circ$.

6. КОНСИСТЕНЦИЯ МЯСА РЫБ ПРИ ХОЛОДИЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ И ХРАНЕНИИ РЫБЫ

При оценке качества рыбы и методов холодильной обработки ее большое значение имеет определение консистенции мяса. В отношении охлажденной рыбы под консистенцией надо подразумевать упругость мяса. Изменение упругости последнего указывает, как далеко продвинулись в рыбе посмертные изменения, а также сколько времени можно сохранить рыбу при данных условиях. В отношении мороженой рыбы под консистенцией надо понимать твердость мяса; числовое значение этого коэффициента находится в зависимости от температуры рыбы и количества кристаллов льда, находящихся в ее мясе; в данном случае консистенция свидетельствует о степени промораживания или талости рыбы.

По вопросу о консистенции рыб имеются данные Таути и др., разработавших метод определения свежести рыбы по степени упругости и сконструировавших для этой цели специальный прибор. Прибор представляет собою стеклянный шарик диаметром 1,35 см, прикрепленный к пружине; сжатие пружины при надавливании шариком на рыбу дает указания на степень упругости рыбы. Те же самые измерения произведены и нашей лабораторией. Для опытов был использован прибор для определения зрелости фруктов с заменой иглы никелированным шариком.

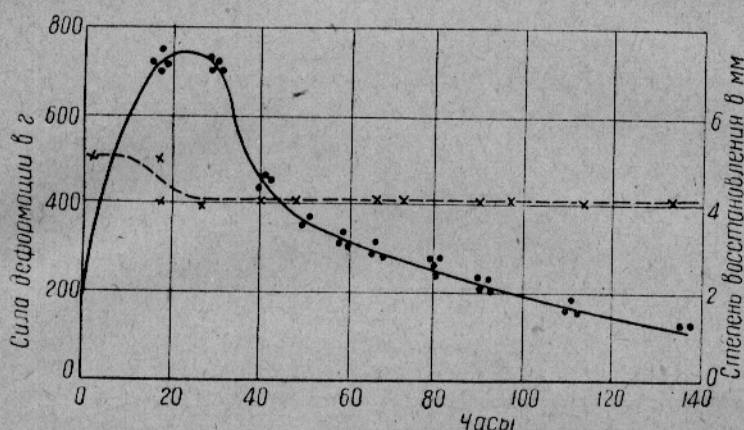


Рис. 20. Изменение упругости мяса карпа при хранении.

Результаты, приведенные на рис. 20, указывают, что упругость мяса рыбы после ее смерти вначале возрастает, достигая максимума при посмертном окоченении, затем начинает убывать. Опыты показали возможность использования этого метода для определения количества дней, прошедших со дня смерти рыбы.

Моран провел ряд опытов по изучению твердости мороженого мяса, пользуясь для этого прибором, позволяющим погружать в мясо с различной температурой стержень с концом, заостренным в виде конуса, диаметром 1 см, и наблюдать те давления, которые требуются для погружения стержня в мясо на глубину 3 мм.

Американские исследователи Тресслер, Бердсей и Моррей определяли влияние замораживания на качество мяса по его консистенции до и после замораживания; они пользовались пенетрометром для определения усилия, необходимого для проникновения тупой иглы строго определенных размеров в куски мяса; тем же пенетрометром они измеряли глубину проникновения тупой иглы в мясо под действием стандартной нагрузки в течение заранее обусловленного времени. Оба эти метода себя оправдали и позволили авторам доказать, что замораживание и последующее хранение заметно ослабляют консистенцию мяса.

Основным недостатком всех выше рассмотренных приборов является их стационарность и необходимость определения консистенции в лабораторной обстановке; между тем для промышленных целей необходимо сконструировать прибор, дающий возможность быстро и достаточно точно определять консистенцию мяса в производственных условиях.

Задачей нашей работы являлся подбор прибора, пригодного для определения консистенции мяса рыб в производственной обстановке, и проверка удовлетворительности его работы.

Всего нами было опробовано два прибора: пружинный консистометр и поршневой консистометр.

Главной частью прибора является тупой стержень, несколько выступающий из дискового экрана прибора. Под влиянием нажима стержнем на испытуемый объект происходит сжатие пружины и вдавливание стержня в указанный объект. Чем слабее консистенция испытуемого объекта, тем глубже вдавливается в него стержень, и наоборот. Глубина вдавливания стержня прибора отмечается стрелкой на специально устроенном циферблате. Меняя упругость пружины в

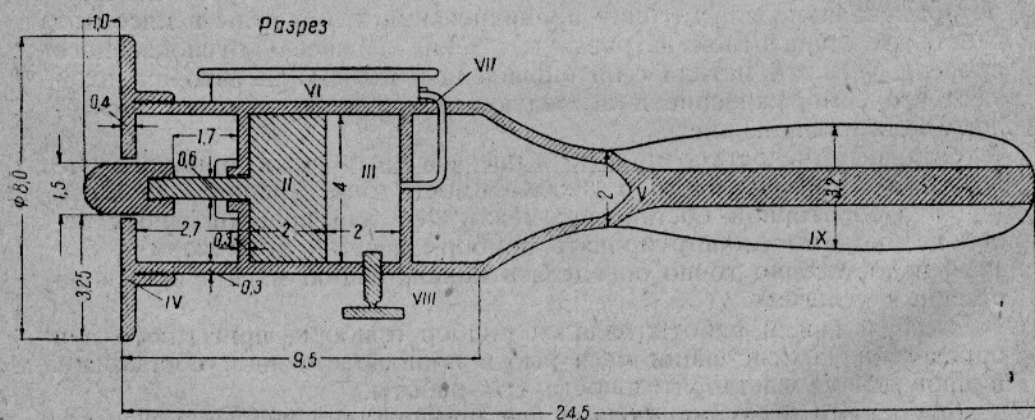
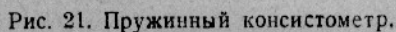


Рис. 22. Поршневой консистомер.

приборе, длину и форму наконечника, можно подобрать те усилия, которые с достаточной точностью будут характеризовать изменения консистенции. Для удобства работы прибор снабжен ручкой, с помощью которой можно легко и быстро производить определение консистенции, а также стрелкой, фиксирующей максимальное давление, достигнутое во время данного опыта.

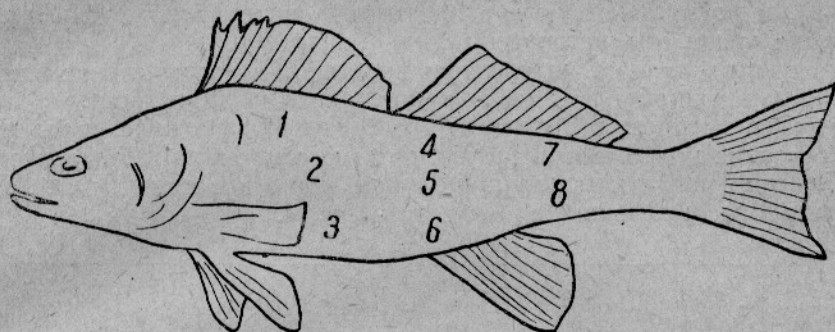


Рис. 23. Расположение точек, в которых производилось определение числа консистенции

Поршневой консистометр (рис. 22) по идее своей подобен пружинному, с той разницей, что пружина заменена в нем металлическим цилиндром с поршнем. Сопротивление, оказываемое продуктом при вдавливании в него стержня, имеет следствием сжатие налитой в цилиндр жидкости, степень сжатия которой можно определить манометром. Поршневой консистометр более портативен и удобен, чем пружинный. Прибор имеет шкалу, разделенную на 50 частей, характеризующих сопротивление пружины в каждой из этих точек в весовых единицах. Каждая точка находится при помощи тарирования прибора. Максимальная нагрузка пружины для мороженой рыбы должна равняться 12—15 кг при длине выступающего из прибора конца стержня от 0,5 до 1,5 см. (Лучшие результаты получаются при длине выступающей части стержня в 1 см).

При определении числа консистенции целой охлажденной рыбы возник вопрос, в каких точках тела рыбы производить определение (рис. 23).

Результаты неоднократных определений числа консистенции мяса рыб приводятся в табл. 23.

Таблица 23

Величина числа консистенции в различных частях судака, полученная при помощи пружинного консистометра

Вес рыбы (в кг)	t рыбы в °C	Расположение точек, в которых производилось определение консистенции (по рис. 23)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Число консистенции (в кг)*							
1,19	+ 10,0	1,0	1,0	0,5	0,82	1,0	0,65	0,82	0,98
0,99	+ 12,0	0,98	1,0	0,53	0,85	0,95	0,58	0,9	0,95
1,01	+ 11,0	0,99	1,0	0,6	0,9	1,0	0,85	0,9	1,0
0,9	+ 13,0	1,0	1,15	0,65	1,0	1,00	0,65	0,95	1,0
1,04	+ 12,0	0,95	0,98	0,65	0,8	0,9	0,73	0,8	0,9
0,96	+ 12,0	0,97	1,0	0,4	0,78	0,95	0,53	0,95	0,95
0,80	+ 13,0	1,0	1,0	0,52	0,78	0,95	0,7	0,9	0,9

Устойчивые значения чисел консистенции получались не во всех исследуемых частях тела рыб. Наибольшие колебания в цифрах наблюдались в брюшной части тела рыбы (точки 3 и 6 на рис. 23), а поэтому производить определение консистенции в этих точках не рекомендуется. На основании данных, приведенных в табл. 23, считаем достаточным производить определение числа консистенции в трех точках, а именно в точках 1, 5 и 8, отмеченных на том же рис. 23, и из полученных в этих точках значений выводить среднее значение числа консистенции для данной рыбы.

Следующим весьма интересным вопросом было выяснение влияния кожи охлажденной рыбы на величину числа консистенции.

Результаты опытов показали, что срезывание кожи с рыбы вызывает большие колебания значения числа консистенции. Следовательно, определение числа консистенции лучше всего производить без предварительного срезывания кожи с тела рыбы.

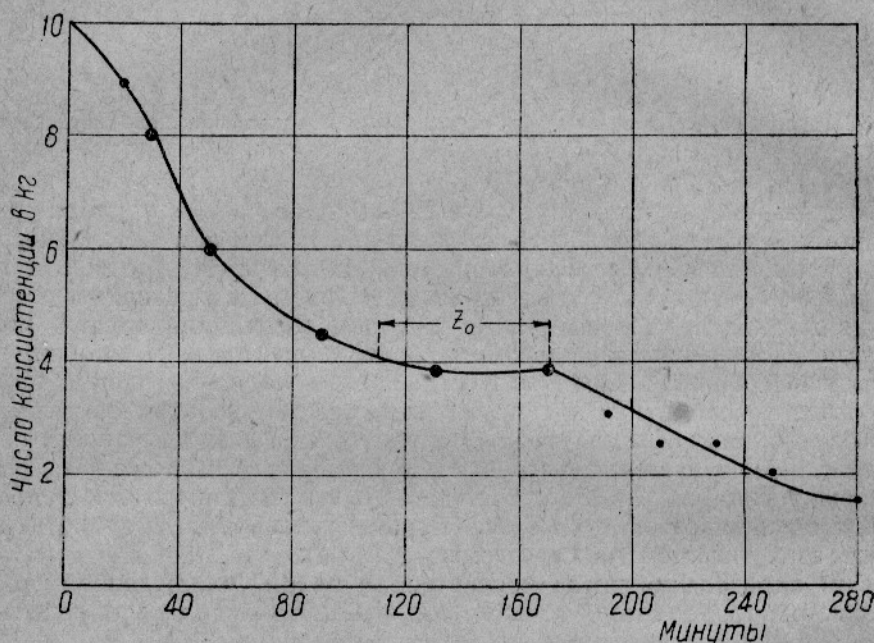


Рис. 24. Изменение числа консистенции по времени в процессе дефростации рыбы в воздухе при $t + 180$ (среднее из 12 опытов).

Большой интерес при приемке рыбы и экспертизе ее представляет определение степени дефростации (талости) мороженой рыбы. Существующие в настоящее время приемы определения талости мороженой рыбы весьма несовершенны и субъективны, а поэтому и не дают достаточно точного представления о состоянии рыбы.

При температуре от -8 до -10° 80—85% всей воды, содержащейся в рыбе, находится в виде льда. Это обстоятельство сильно отражается на консистенции рыбы. Чем больше воды в рыбе перешло в лед, тем больше ее твердость. Таким образом, консистенция рыбы в известной степени является мерилем процессов замораживания и дефростации.

Нами были проведены специальные опыты по определению числа консистенции мороженой рыбы при ее дефростации. Опыты проводились следующим образом. Мороженые рыбы с температурой от -8 до -10° в количестве не менее трех для каждого опыта подвергались медленной дефростации при температуре окружающего воздуха от 15 до 18° . Во время процесса дефростации периоди-

чески производилось измерение числа консистенции, температуры тела рыбы (в центре и на глубине 1 см от поверхности) и температуры наружного воздуха. В результате многочисленных опытов были получены средние данные, которые послужили для составления ряда графиков.

На рис. 24 приводится изменение числа консистенции рыбы в течение всего процесса дефростации. Из графика видно, что в начале процесса дефростации изменение консистенции протекает довольно быстро, затем, начиная с 110 мин., наблюдается значительное замедление, и кривая принимает почти горизонтальное положение. На 170 мин. наблюдается довольно резкий перелом кривой, указывающий на дальнейшее изменение числа консистенции. Характер изменения числа консистенции рыбы во времени объясняется одновремен-

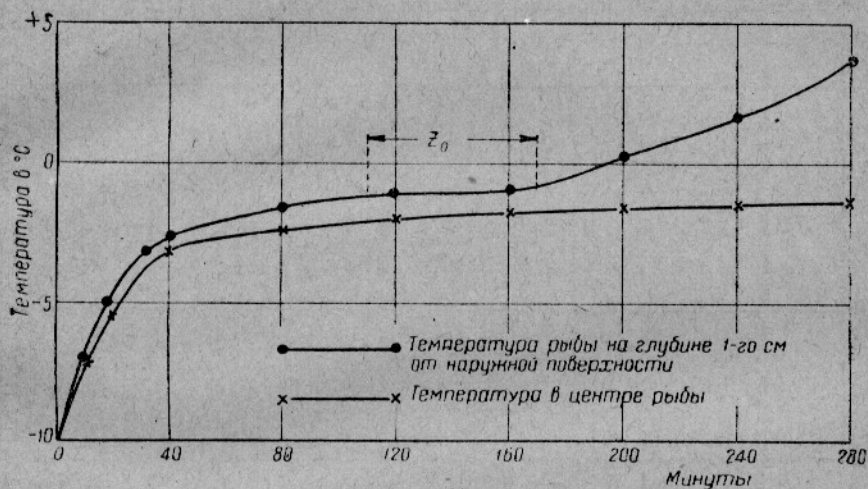


Рис. 25. Температурное состояние судака во время дефростации (среднее из 12 опытов)

ным температурным изменением ее. Изменение температуры рыбы на глубине 1 см от поверхности имеет противоположный характер по сравнению с изменением числа консистенции рыбы (рис. 25). По достижении рыбой точки замерзания температура некоторое время остается почти постоянной, что совпадает с горизонтальным положением кривой изменения числа консистенции. При дальнейшем повышении температуры рыбы число консистенции ее также начинает изменяться.

Если мы отметили определенную зависимость между числом консистенции и температурой рыбы на глубине от 1 см, то эту зависимость нельзя распространить на температуру в центре рыбы, что наглядно видно из рис. 26, на котором, кроме температуры поверхностного слоя, приводится температура в центре рыбы. Из этого следует, что для крупных рыб число консистенции на поверхности рыбы не отражает температурного состояния в центре рыбы.

График (рис. 26) дает возможность по числу консистенции судить о температуре поверхностных слоев рыбы, а следовательно, и о температурном состоянии рыбы небольших размеров.

Пользуясь данными Heis'a о вымораживании воды в зависимости от температуры, можно построить график зависимости числа консистенции от содержания льда в рыбе (рис. 27). Зная число консистенции рыбы в данный момент, можно определить процент талости рыбы по изменению числа консистенции в зависимости от ее теплосодержания (рис. 28).

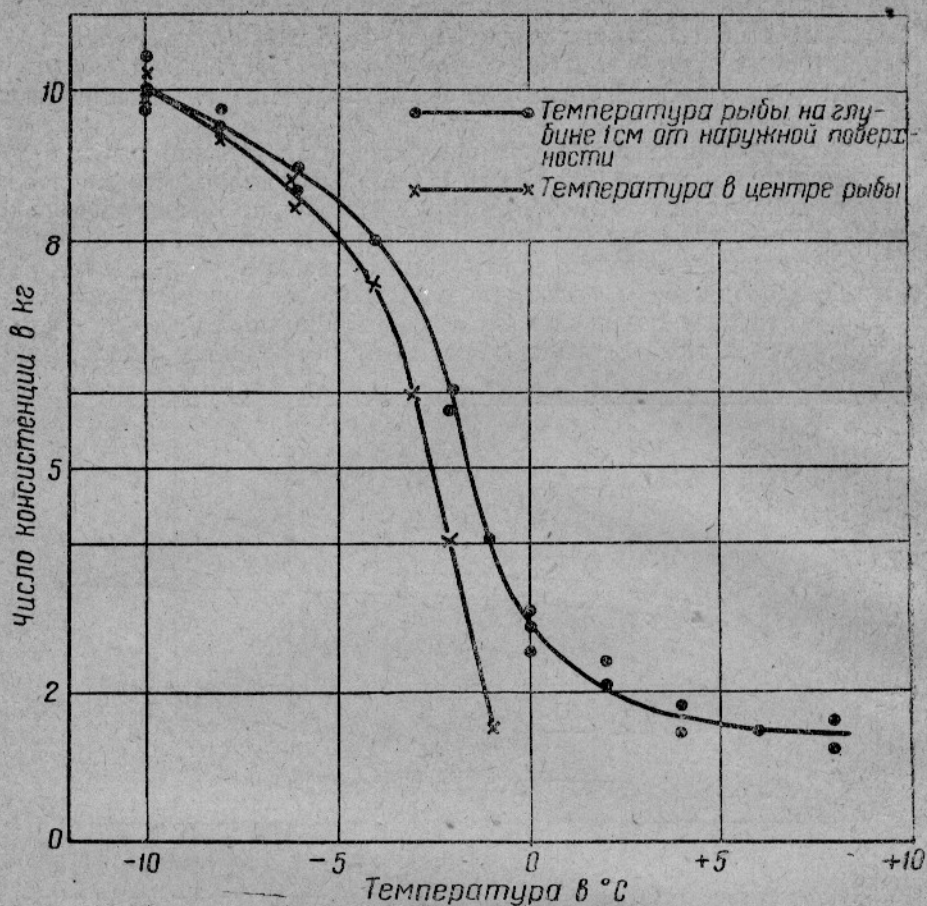


Рис. 29. Изменение числа консистенции рыбы в процессе ее дефростации при $t + 18^{\circ}$ (среднее из 12 опытов).

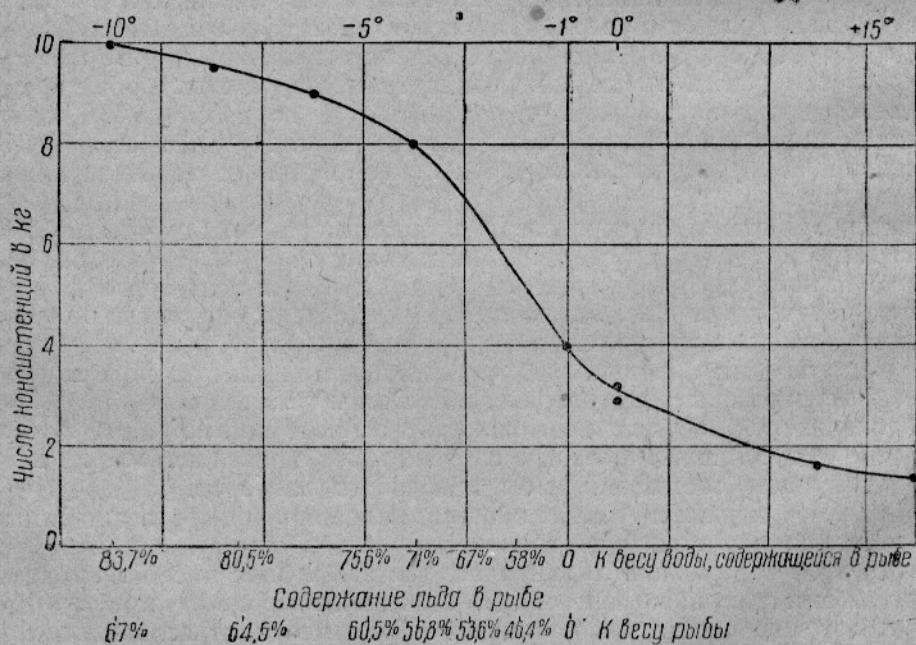


Рис. 27. Изменение числа консистенции рыбы в зависимости от содержания льда.

Данные о тепловом состоянии рыбы необходимы для расчета процесса домораживания.

Необходимо еще раз оговориться, что все вышесказанное относится главным образом к мелкой рыбе, толщина которой не превышает 3 см. Что касается крупной рыбы, то для определения талости по значению числа консистенции, повидимому, необходимо изменить форму наконечника у стержня прибора. Нам кажется, что наконечник следует сделать в виде иглы с одновременным увеличением его длины.

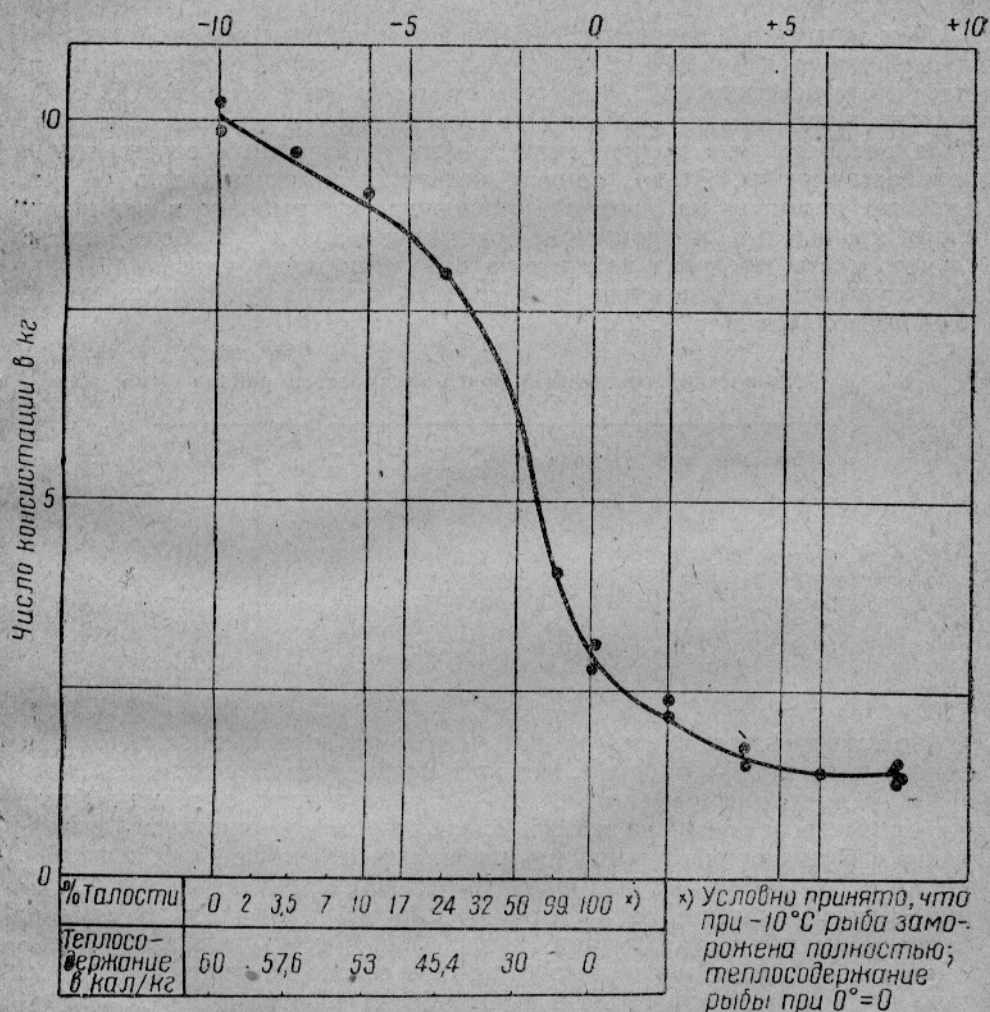


Рис. 28. Изменение числа консистенции в зависимости от изменения теплосодержания в рыбе.

В этом случае прибор будет работать на прокол поверхностного слоя незамороженной (оттаявшей) ткани рыбы и задерживаться в замороженном слое, что и должно отразиться на показаниях прибора. Предполагаемое изменение конструкции прибора можно легко выполнить, так как в приборе предусмотрена смена одного наконечника на другой.

В заключение нам хотелось остановиться на перспективах применения консистометра в качестве контрольно-измерительного прибора в процессе холодильной обработки и хранения рыб. Этот прибор может найти широкое применение на производстве для оценки качества

рыбы во время перевозки и хранения ее, для контроля процесса замораживания, определения степени талости мороженой рыбы и т. п. Простота и быстрота определения наряду с достаточной для практики точностью результатов делают этот прибор незаменимым в производственных условиях.

7. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ ВОЛГО-КАСПИЙСКОГО РАЙОНА

При изучении физических свойств промысловых рыб в Астрахани в осеннюю путину 1934 г. мы пользовались рыбой, поступающей на плот холодильника № 2. Качество судака и сома было всегда безукоризненным, так как рыба приходила к плоту в прорезах, и нам была предоставлена полная возможность выбора по ассортименту и количеству рыбы. Этого, однако, нельзя было сказать про осетра, который поступал на плот холодильника из рыбниц: в рыбницах осетр хранился в потрошеном состоянии во льду. В большинстве случаев осетр поступал на плот на 4-5 суток после улова.

Результаты определения химического состава указанных пород рыб приводятся в табл. 24.

Таблица 24
Химический состав рыб Волго-Каспийского района
(в %)

Название рыб	Вода	Азотистые вещества	Жир	Зола
Судак	78 — 80	16 — 18	0,5	1,5
Сом	77 — 79	16 — 17	4 — 5	1,0
Осетр	71 — 72	15 — 16	10 — 11	1,0

Под парной рыбой мы подразумеваем рыбу только что убитую, под охлажденной — ту рыбу, которая после убоя охлаждалась нами во льду до температуры от 0 до -1° и хранилась в нем не более суток. Осетр поступал на плот в охлажденном состоянии, и длительность его хранения от улова до плота нам точно не была известна. Мороженой рыбой мы называли рыбу, хранившуюся на холодильнике при температуре от -8 до -9° . Кроме того, часть рыбы была заморожена нами в воздушной и рассольной морозилке в производственных условиях, после чего было определено ее теплосодержание.

Удельный вес охлажденной рыбы определялся на плоту холодильника, мороженой рыбы — в одной из камер последнего, рыбного филе — в лаборатории Астраханского отделения ВНИИРП. Удельный вес целых рыб определялся при помощи сливных сосудов, а рыбного филе — при помощи гидростатического взвешивания в физиологическом растворе.

Результаты определения удельного веса целых рыб и рыбного филе приводятся в табл. 25.

Удельный вес рыбы, например, судака, имеет тенденцию к повышению вместе с увеличением веса рыбы (при весе судака в 0,6 кг удельный вес — 0,856; 2,5 кг — 0,92; 4,6 кг — 0,975). Удельный вес потрошеной рыбы и филе оказался близким друг к другу по величине; мороженная рыба и филе обладают меньшим удельным весом, чем охлажденные.

Таблица 25

Удельный вес рыб Волго-Каспийского района

Способ обработки рыбы	С о м	Судак	Осетр
Живая	от 0,995 до 1,01	—	—
Парная	0,933	0,967	—
Потрошенная	1,05	1,08	1,056
Мороженая	0,969	0,985	1,022
Филе охлажденное	1,071	1,08	1,057
Филе мороженое	1,032	1,026	1,032

Приведем данные о точке замерзания различных видов рыб (табл. 26).

Таблица 26

Точка замерзания

Способ обработки рыбы	Судак	Сом	Осетр
Парная	— 0,786	— 0,758	—
Охлажденная	— 0,643	— 0,832	— 0,793
Дефростированная	— 0,798	— 0,863	— 0,788

Некоторые колебания результатов определения точки замерзания для одного и того же вида рыбы и ее обработки, повидимому, объясняются индивидуальными свойствами отдельных экземпляров рыб.

Теплоемкость охлажденной рыбы определялась калориметрическим способом в интервале температур от 0 до 18°. Определение велось на кусочках рыбного филе, которые перед опытом охлаждались до 0° в течение 12—18 час.

Результаты определения теплоемкости рыб следующие:

Теплоемкость охлажденного судака	— 0,828 кал/кг° С
” ” сома	— 0,804
” ” осетра	— 0,751

Значения теплоемкости судака довольно близко совпадают с вычисленными. Для сома и для осетра совпадение менее удовлетворительно. Повидимому, такое расхождение объясняется значительно большим содержанием жира в осетре и соме по сравнению с судаком, что и обусловило разницу в теплоемкости сухих веществ. Поэтому полученную нами ранее величину теплоемкости сухих веществ судака мы считаем возможным применять только для тощих рыб.

Теплосодержание рыб во время холодильной обработки их на холодильнике колеблется в зависимости от степени их охлаждения. Мы обследовали величину теплосодержания рыбы как при ее замораживании в морозилке, так и при хранении в камерах холодильника.

Определение величины теплосодержания рыб производилось калориметрическим способом. В связи с тем, что определение теплосодержания производилось в лаборатории, а пробы мороженой рыбы надо было доставлять из холодильника, нами были применены для переноски рыбы небольшие термосы, охлаждаемые эвтектическим льдом.

Данные о теплосодержании рыбы приводятся в табл. 27.

Теплосодержание мороженой рыбы при различных интервалах температуры

Наименование рыбы	Способ обработки рыбы	Интервал температуры (в °C)	Теплосодержание (в кал/кг)
Судак	Замораживание в воздухе	от 20 ¹⁾ до — 8,2	73,14
"	" " " рассоле	" 20 " — 17,0	77,20
"	" " " воздухе	" 20 " — 19,0	78,92
Сом	" " " "	" 20 " — 8,7	70,29
"	" " " "	" 20 " — 17,5	78,12
Осетр	" " " "	" 20 " — 7,0	65,53
"	" " " "	" 20 " — 19,0	72,95

SUMMARY

The study of physical properties of fish and fish products has a great significance, when making calculations for the processes of refrigerative treatment, and designing of fishery enterprises. In this work we describe experiments for the study of changes of physical properties of fish and its meat (specific gravity, heat capacity, heat content, thermal conduction, consistency) — changes which depend on the temperature.

1) Теплосодержание при 20° принято равным 0.