

Теоретические основы процесса посола рыбы и расчет продолжительности просаливания

В.В. Димова¹, А.М. Ершов², В.А. Гроховский², М.А. Ершов³

¹ ЗАО "Арктиксервис"

² Технологический факультет МГТУ, кафедра технологии рыбных продуктов

³ ОАО "Траловый флот"

Аннотация. В работе кратко изложены современные представления о теории посола рыбы. Приведена методика расчета продолжительности просаливания с использованием аналитической формулы и численным методом сеток. Определена зависимость коэффициента диффузии соли в мясе рыбы от температуры и химического состава продукта. Приведены экспериментально определенные значения коэффициентов диффузии для некоторых видов рыб. Показана методика построения кривой кинетики просаливания и определения среднеобъемной солёности рыбы по известным солёностям в центре и на поверхности. Рассмотрена зависимость между потерей массы в процессе посола и солёностями рыбы, отнесенными к массе рыбы до и после посола. Представлены результаты экспериментальных исследований пограничного слоя на поверхности просаливающихся образцов.

Abstract. The modern concepts on fish brining have been stated briefly in the paper. The methods of calculation of brining duration using the analytical formula and numerical net method have been given. The dependence of salt diffusion coefficient on temperature and chemical content of fish has been determined. The experimentally found diffusion coefficients for some species of fish have been given as well. The results of experimental research of the boundary layer of the brining samples have been considered.

1. Введение

Посол – сложный процесс, состоящий из диффузионного перехода соли в рыбу, диффузионно-осмотического переноса воды из тканей рыбы в тузлук либо, наоборот, в зависимости от концентрации солевого раствора. Посол сопровождается физико-химическими и биохимическими изменениями: денатурацией и гидролизом белков, липидов и экстрактивных веществ, изменением микрофлоры и витаминов.

При посоле в продукте имеют место два взаимосвязанных процесса – внешняя диффузия, или процесс конвективного массообмена, и внутренняя молекулярная диффузия.

Внешнюю диффузию можно упрощенно представить в следующем виде:

$$q_n(\tau) = \beta [C_p - C_n(\tau)], \quad (1)$$

где $q_n(\tau)$ – плотность потока соли через поверхность, кг/(м²·с); τ – время от начала процесса, с; C_p , C_n – концентрации соли в растворе и на поверхности рыбы, соответственно, %; β – коэффициент массообмена, или коэффициент внешней диффузии, кг/(м²·с·%).

Внутренняя диффузия может быть описана I и II законом Фика:

$$dm/d\tau = -DF \partial C/\partial X, \quad (2)$$

$$dC/d\tau = -D \partial^2 C/\partial X^2, \quad (3)$$

где $dm/d\tau$ – количество соли, поступающее в рыбу за единицу времени, кг/с; $dC/d\tau$ – изменение концентрации соли в мясе рыбы по времени посола (скорость просаливания), (кг/м³)/с; D – коэффициент диффузии соли в мясе рыбы, м²/с; F – площадь внешней поверхности рыбы, м²; $\partial C/\partial X$ – градиент концентрации соли (изменение концентрации вещества на единицу длины пути диффундирующего вещества), (кг/м³)/м.

Из (1-3) следует, что изменение концентрации соли в тканях рыбы зависит от продолжительности просаливания, характеристического размера рыбы, коэффициента диффузии соли, концентрации тузлука, если температура посола, химический состав, состояние тузлука постоянны в процессе просаливания:

$$C = f(\tau, X, b, C_p), \quad (4)$$

где C – концентрация соли в рыбе, %; τ – время просаливания, с; b – характеристический размер рыбы (полутолщина), м; D – коэффициент диффузии соли, м²/с; C_p – концентрация раствора соли, окружающего рыбу, %.

Далее рассмотрено влияние этих факторов на продолжительность процесса просаливания, приведена методика расчета. Определение продолжительности посола имеет важное значение при обработке тех или иных видов рыб.

2. Теоретические основы процесса посола рыбы

При погружении рыбы в тузлук низкой концентрации возникает неуравновешенная система. Эта система стремится к равновесию концентраций соли и влаги. Вначале мышечная ткань рыбы впитывает соль, влагу и набухает. Затем после достижения какой-то критической концентрации соли в рыбе последняя начинает терять влагу при возрастании в тканях концентрации соли. Критическая концентрация для большинства видов рыб составляет 8 %. Разность концентраций соли и воды в рыбе и тузлуке является главной движущей силой просаливания. Процесс продолжается до установления равновесия. Если рыба погружается в тузлук с высокой концентрацией соли, то происходит высаливание белков, и мышечная ткань теряет влагу (Уитон и др., 1989). В процессе просаливания выделяющаяся из рыбы вода разбавляет тузлук в пограничном с поверхностью рыбы слое, при этом снижается концентрация тузлука у поверхности рыбы и, следовательно, снижается градиент концентрации соли, что ведет к замедлению процесса просаливания.

Эксперименты по изучению пограничного слоя показали, что концентрация соли у поверхности рыбы действительно меньше таковой в тузлуке. В начале посола концентрация соли у поверхности рыбы снижается, затем несколько повышается, не достигая первоначального значения (рис. 1). Соленость тузлука у поверхности продукта (S_n^u , %) описывается выражением:

$$S_n^u = aC_p, \quad (5)$$

где C_p – концентрация соли в толще раствора тузлука, %; a – коэффициент, показывающий снижение концентрации тузлука в пограничном слое у поверхности рыбы за счет массообменных процессов.

Средние за процесс посола значения коэффициента a приведены в табл. 1 (Димова, 1996).

Диффузионные свойства рыбы характеризуются коэффициентом диффузии, который зависит от температуры посола и состояния тканей рыбы. Если температура процесса постоянна, то коэффициент диффузии будет зависеть от реологических свойств рыбы, которые, в свою очередь, связаны с изменением белков под действием хлорида натрия. По мере насыщения тканей рыбы солью коэффициенты диффузии сначала уменьшаются, затем несколько увеличиваются, т.е. существует такая концентрация соли в тканях рыбы, при которой коэффициенты диффузии минимальны. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента диффузии D от солёности рыбы S . Уменьшение коэффициентов диффузии в начале процесса посола связано с уменьшением эффективной площади, на которой происходит диффузия, из-за набухания тканей рыбы. После достижения определенной критической концентрации соли в мышцах рыбы (солёность рыбы около 8 %) происходит частичное высаливание белков, и мышечная ткань теряет влагу. Высаливание белков способствует сокращению размеров тканей и некоторому увеличению эффективной поверхности, через которую диффундирует соль, это ведет к увеличению коэффициентов диффузии.

Чем ниже температура посола (рис. 3, 4), тем меньше значения коэффициентов диффузии, из-за уменьшения интенсивности теплового движения молекул.

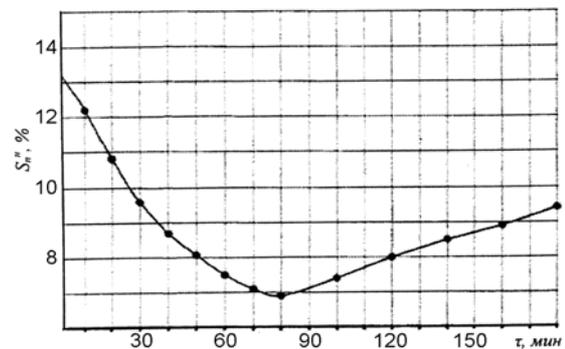


Рис. 1. Изменение концентрации солевого раствора в пограничном слое на поверхности просаливающегося филе скумбрии по времени посола ($\rho = 1,20 \text{ г/см}^3$, $t = +18^\circ\text{C}$, $C = 26 \%$)

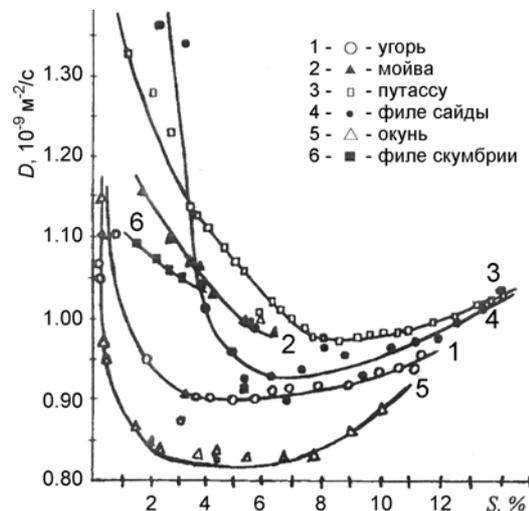


Рис. 2. Изменение коэффициентов диффузии соли в мясе различных видов рыб при их посоле в тузлуке в зависимости от средней солёности образцов ($\rho = 1,20 \text{ г/см}^3$, $t = +18^\circ\text{C}$, $C = 26 \%$)

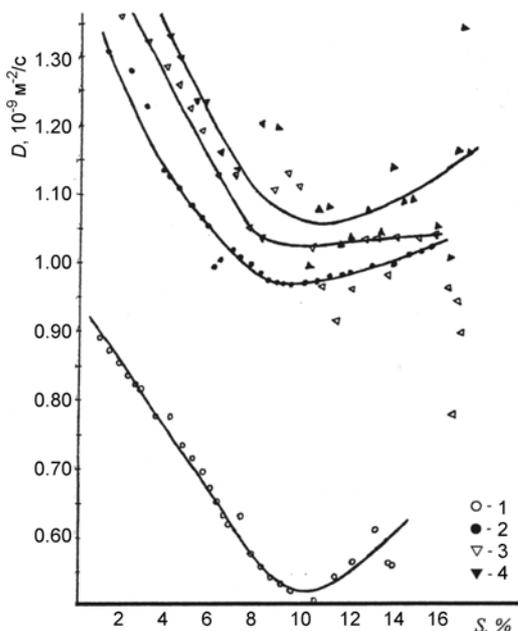


Рис. 3. Изменение коэффициентов диффузии соли в мясе путассу при посоле в неподвижном тузлуке при различных температурах в зависимости от средней солёности образцов.

Температура тузлука при посоле:
1 – 9°C, 2 – 18°C, 3 – 25°C, 4 – 30°C

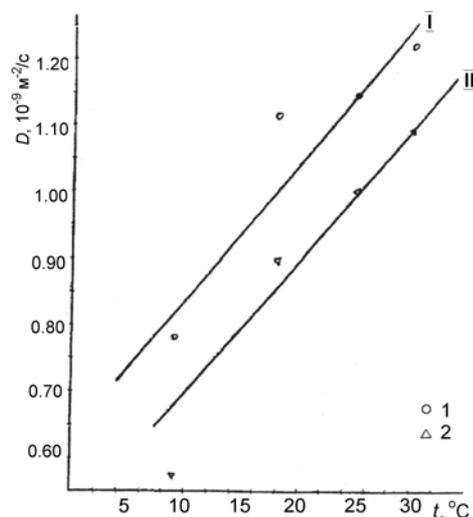


Рис. 4. Зависимость коэффициентов диффузии соли в мясе путассу от температуры тузлука ($\rho = 1,20 \text{ г/см}^3$).

- 1 – средние значения коэффициентов диффузии (рассчитаны по закону потенциалопроводности) на I этапе посола до достижения образцами солёности 7...10 %;
- 2 – то же на II этапе посола после достижения образцами солёности 7...10 %

Таблица 1. Значения коэффициента a при тузлучном посоле некоторых рыб

Рыба (сырье)	Содержание жира, %	Температура тузлука, °C	Значение a
Филе сайды мороженое	1,3	18	0,66
Окунь свежий неразделанный	7,0	18	0,41
Мойва мороженая неразделанная	9,7	18	0,3
Филе скумбрии мороженое	13,2	18	0,32
Угорь мороженный	15,0	18	0,38
Путассу свежая неразделанная	2	9	0,67
		18	0,68
		25	0,88
		30	0,92

Примечание: Если необходимо произвести расчет процессов посола для вида рыбы, которого нет в табл. 1, то коэффициент a принимают по виду рыбы, наиболее близкому по химическому составу к заданному виду рыбы.

Таблица 2. Значения коэффициента диффузии для некоторых видов рыб

Объект посола	Содержание жира в мясе рыбы	Среднее значение коэффициента диффузии	
		на I этапе посола, $D_1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	на II этапе посола, $D_2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$
Филе сайды мороженое	1,3	1,0388	0,9577
Окунь свежий неразделанный	7,0	0,9680	0,8500
Мойва неразделанная мороженая	9,7	1,0797	0,9875
Филе скумбрии мороженое	13,4	1,0822	1,0158
Угорь мороженный	15	1,0157	0,9197
Путассу свежая неразделанная, при температуре:	2,0	9°C	0,7521
		18°C	1,1499
		25°C	1,1058
		30°C	1,1936
			0,5557
			0,9917
			0,9001
			1,0987

Примечание: посол окуня, угря, филе сайды, филе скумбрии, мойвы проводился в тузлуке с температурой 18°C.

Чем больше содержание жира в рыбах, направляемых на посол, тем меньше коэффициенты диффузии при прочих равных условиях (рис. 5). Это объясняется тем, что жир не участвует в процессах массопереноса и уменьшает активное пространство для обменных процессов.

Значения коэффициентов диффузии можно найти из следующего выражения:

$$D = \xi (0,66 - 0,003Ж + 0,02t) \cdot 10^{-9}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (6)$$

где Ж – жирность рыбы, %; t – температура тузлука, °С; ξ – коэффициент, учитывающий изменение диффузионных свойств рыбы по мере просаливания.

Если посол ведется до солёности $S^H < 7,5\%$ для тощих видов рыб, то $\xi = 1$. Если $S^H > 7,5\%$, коэффициент принимают равным 0,91.

Некоторые значения коэффициента диффузии D, определенного экспериментально на основе закона потенциалопроводности, приведены в табл. 2.

Здесь S^H – солёность, отнесенная к массе рыбы до посола $S^H = M_c \cdot 100/M_p^H$. На практике определяют солёность готового продукта $S = M_c \cdot 100/M_p$. Эта солёность S отличается от солёности S^H , так как масса рыбы по мере просаливания меняется: $M_p = M_p^H + M_c \pm M_g$. Здесь M_p – масса рыбы после посола, кг; M_p^H – масса рыбы до посола, кг; M_g – потери воды или впитывание её, кг.

С учетом изложенного выше взаимосвязь между S и S^H можно представить следующей формулой:

$$S = S^H / (1 \pm \Delta w + 0,01 S^H), \quad (7)$$

где S – солёность рыбы, равная отношению содержания соли к массе соленой рыбы, %; S^H – солёность рыбы, равная отношению содержания соли к массе рыбы до посола, %; Δw – потери или впитывание воды, в долях массы рыбы до посола.

Рис. 5. Зависимость коэффициентов диффузии соли в мясе рыбы при посоле в тузлуке от ее жирности ($\rho = 1,20 \text{ г/см}^3$, $t = 18^\circ\text{C}$)

- 1 – средние значения коэффициентов диффузии (рассчитаны по закону потенциалопроводности) на I этапе посола до достижения образцами солёности 7...10 %;
- 2 – то же на II этапе посола после достижения образцами солёности 7...10 %

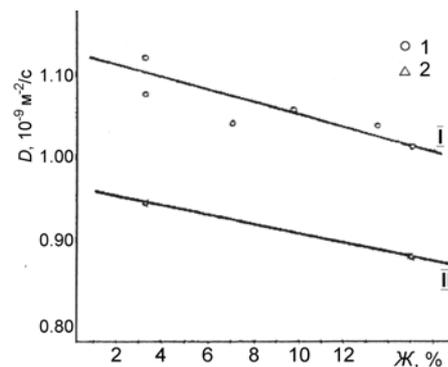
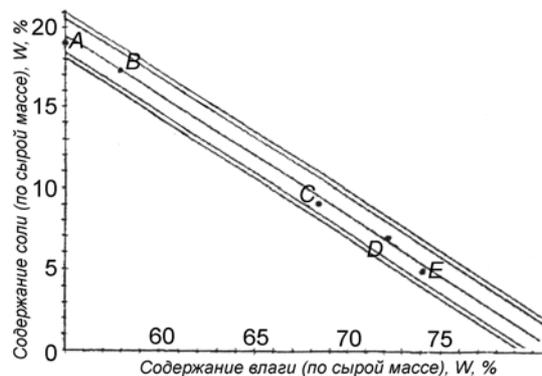


Рис. 6. Линии регрессии содержания соли относительно содержания влаги с 80-и 90-% доверительными интервалами и средние приемлемые содержания соли и влаги в продуктах из соленой трески, выпускаемых в Канаде:

- A – крепко соленая рыба стопового посола;
- B – маринованная крепко соленая рыба;
- C – ньюфаундлендская слабосоленая рыба стопового посола;
- D – рыба осеннего гаспского посола;
- E – рыба гаспского посола



Выход части воды в системе рыба-тузлук – диффузионно-осмотический процесс. Потеря влаги и поглощение соли мышечной тканью рыбы связаны обратно-пропорциональной зависимостью (рис. 6). Таким образом, чем больше соли диффундировало в рыбу, тем меньше влаги в ней осталось. Следует отметить, что это справедливо при солёностях, больших пяти процентов.

Количество воды, выделившейся из тканей рыбы, в долях единицы, можно приближенно найти из следующего выражения:

$$\Delta w = W_{nep}/100 = W_0 C \cdot K_c/100, \quad (8)$$

где W_{nep} – количество воды, выделившееся из рыбы, %; W_0 – начальное содержание воды в рыбе, %; C – концентрация соли в тканевом соке рыбы, %; K_c – коэффициент пропорциональности.

При увеличении концентрации соли во столько же раз увеличивается количество перемещающейся из рыбы воды. При постоянной концентрации соли в рыбе отношение количества перемещающейся воды к содержанию ее до просаливания является величиной постоянной, т.е. чем больше начальное содержание воды в рыбе, тем больше ее выделяется при посоле. Коэффициент пропорциональности K_c колеблется в узких пределах, и в среднем его можно принять равным $0,0153 \pm 0,0003$.

Скорость перемещения влаги из рыбы выше скорости перемещения соли в рыбу. Если увеличивать температуру посола, то количество извлекаемой воды из рыбы при прочих равных условиях тоже увеличится.

Концентрацию соли C в соке рыбы с достаточной точностью для инженерных расчетов можно заменить на C'' , которую находят из выражения:

$$C \approx C'' = S'' \cdot 100 / (S'' + W_0), \% \quad (9)$$

где C'' , C – концентрация соли в тканевом соке рыбы, отнесенная к содержанию влаги до посола и после посола. Хотя концентрация соли, найденная как отношение содержания соли к содержанию соли плюс содержание влаги в рыбе до посола, будет отличаться от таковой в соленой рыбе, но это отличие невелико, и погрешность в определении количества выделившейся воды при подстановке в (8) C'' вместо C также мала.

Изменения массы рыбы при посоле обратимы не полностью. На эти изменения накладывают свой отпечаток начальные условия. Надо учитывать и изменения азотистых веществ и жира наряду с перемещениями воды и соли.

Миндер Л.П. (1948) предложил следующую формулу для определения потерь плотных веществ:

$$X = [A - (B \cdot G/100)]/A, \quad (10)$$

где A – содержание плотных веществ в свежей рыбе, %; B – содержание их в соленой рыбе, %; X – потеря плотных веществ, в % от A ; G – масса соленой рыбы, в % от массы свежей рыбы.

Потери плотных веществ при 0°C больше, чем при 20°C , но с увеличением плотности тузлука разница сглаживается. Это объясняется тем, что с повышением температуры усиливается высаливание белков, и потери плотных веществ меньше при теплом посоле, чем при холодном, а большую потерю массы при теплом посоле можно объяснить большой потерей воды (Миндер, 1948).

Потери органических веществ при просаливании зависят и от продолжительности посола. При законченном посоле потери органических веществ выше, чем при прерванном посоле. Однако при дальнейшем хранении в тузлуке потери органических веществ для рыбы законченного посола меньше, чем для рыбы прерванного посола.

Потери органических веществ у мороженой рыбы выше, чем у свежей. Такая закономерность особенно проявляется при низких температурах посола. По-видимому, это объясняется денатурационными изменениями белков, в результате чего нарушается связь белка и воды. Однако выход соленой продукции, приготовленной из мороженой рыбы, выше из-за меньших потерь воды (Воскресенский, 1953).

Потери воды и плотных веществ, за исключением слабых посолов, больше, чем масса приобретенной рыбой соли. Поэтому при солении масса рыбы, как правило, уменьшается. Обычно для расчета соленой продукции пользуются формулой М.И. Турпаева (Леванидов и др., 1987):

$$P = [K \cdot 100(W + S - W' - S')]/(100 - W - S), \quad (11)$$

где K – безразмерный коэффициент, учитывающий способ разделки и крепость посола; W , W' , S , S' – содержание влаги и соли в свежей и соленой рыбе, %.

Тощие рыбы, как уже отмечалось, теряют в массе значительно больше, чем жирные. В свою очередь, чем крепче посол, тем больше рыба теряет воды и плотных веществ.

На изменения массы и объема рыбы при посоле оказывают влияние следующие факторы: химический состав (жирность) рыбы, крепость тузлука и температура посола, способ и техника посола, механические воздействия, оказываемые на рыбу в процессе посола, качество сырья и качество используемой соли.

3. Определение продолжительности посола с использованием модифицированной формулы Рулева Н.Н. и формулы Димовой-Глазунова-Ершова

Ряд российских ученых (Турпаев М.И., Миндер Л.П., Леванидов И.П., Ионас Г.П.) на основе закона Фика разработали методы определения продолжительности посола (Леванидов, 1956; Леванидов, 1967; Миндер, 1970):

$$\tau = (2,303H^2/\pi^2 K_c) \lg[C_p/(C_p - C)], \quad (12)$$

$$\tau = [l^2 \ln(1 - C/C_p)] / K_c. \quad (13)$$

Здесь f – удельная поверхность рыбы, $\text{см}^2/\text{г}$; C_p, C – концентрация соли в тузлуке и тканевом соке рыбы, соответственно, %; H – полная толщина рыбы, см; l – длина рыбы, см; K_c – коэффициент просаливания, $\text{см}^2/\text{сут}$; τ – продолжительность посола, сут.

Рулевым Н.Н. предложена формула расчета продолжительности с учетом начального содержания влаги в рыбе:

$$\tau = (wH^2/8K) \ln[C_p/(C_p - C)], \quad (14)$$

где w – содержание влаги в долях единицы.

Коэффициенты просаливания K_c в выражениях (12-14) по своей физической сущности аналогичны средним значениям коэффициентов пропорциональности массопереноса соли (диффузии) D . Однако коэффициент просаливания K_c не тождественен D . Поэтому для применения формул (12-14) при расчетах продолжительности посола необходимо знать K_c , которые не всегда известны.

Для расчета продолжительности посола сельди с использованием выражения (14) Рулев Н.Н. рекомендует коэффициент просаливания K_c определять из следующего выражения:

$$K_c = 0,3 \pm 0,6Ж, \quad (15)$$

где $Ж$ – жирность сельди, %. Выражение (15) справедливо при посоле в тузлуках температурой $5 \dots 10^\circ\text{C}$.

Ионас Г.П. рекомендует в формулы определения продолжительности посола вводить поправочные коэффициенты в зависимости от способа посола: неподвижный тузлук – 1,00; циркулирующий тузлук – 0,83; смешанный способ посола – 0,74.

Значения коэффициентов диффузии, найденные из (6), нельзя подставлять в выражения (12-14) по следующим причинам:

- На поверхности рыбы (в пограничном слое) концентрация тузлука меньше средней в слое тузлука $C_0 < C_p$, причем значение C_0 меняется в процессе просаливания.
- Коэффициенты просаливания, как и коэффициенты диффузии, изменяются в процессе посола, а в формулах (12-14) их значение принято постоянным.
- Погрешности вычислений учитываются коэффициентом просаливания K . Эти погрешности в значениях D из формулы (6) не учтены.

Авторами в формулу (14) введены поправочные коэффициенты, что позволило определять продолжительность посола для довольно большого видового состава рыбы:

$$\tau = (wB^2/8D) \ln[aC_p/(aC_p - C)], \quad (16)$$

где w – начальное содержание влаги в долях единицы; B – приведенная толщина рыбы ($B = xH$. Здесь H – толщина рыбы, м; x – коэффициент, учитывающий погрешности вычислений и размерный ряд рыбы, направляемой на посол. Для рыб средних размеров – окунь, угорь, путассу и др. – значения x равны 0,757. Если солится филе и мелкая рыба, то x равен приблизительно 0,573); D – коэффициент диффузии соли, $\text{м}^2/\text{с}$ (находят из выражения (6)); a – коэффициент, учитывающий уменьшение концентрации тузлука в пограничном слое у поверхности рыбы (находят из табл. 1); C_p – концентрация тузлука, %; C – концентрация соли в тканевом соке рыбы, %, которую находим следующим образом:

$$W_k = 100 - Ж - (Б+З) - \Delta W - S, \quad (17)$$

$$C = S \cdot 100 / (W_k + S). \quad (18)$$

Здесь W_k – содержание воды в рыбе после просаливания, %; $Ж, Б, З$ – содержание жира, белка и золы в рыбе до посола, %; S – соленость рыбы, %; ΔW – потери воды в рыбе при посоле, % (находим из выражения (8) с учетом перевода долей единицы в проценты, в (8) подставляем значение C , найденное из выражения (9)). Значения $C_p, w, Ж, Б, З, S$ задаем.

Выражение (16) справедливо, если $C_p > C$.

Авторами совместно с Глазуновым Ю.Т. предложено следующее выражение для определения солености в центре рыбы:

$$S_{(0,\tau)}^H = S_{\text{ест}} + C_0 \{1 - \exp[-2,4706((D/l^2) \cdot \tau - 0,0843)]\}, \quad (19)$$

здесь $S_{\text{ест}}$ – естественная соленость рыбы; $S_{(0,\tau)}^H$ – соленость в центре рыбы, отнесенная к начальной массе рыбы, %; $C_0 = aC_p$ – концентрация тузлука в пограничном слое у поверхности рыбы, %; (a – полуэмпирический коэффициент из табл. 1, C_p – концентрация соли в тузлуке, %); D – коэффициент диффузии соли, $\text{м}^2/\text{с}$; l – полутолщина рыбы, м; τ – продолжительность посола, с.

Формула справедлива, если $\tau > \tau'$, где $\tau' = 0,0843 \cdot l^2/D$ – время, по прошествии которого начинает изменяться соленость в центре образца, т.е. это время, в течение которого соль диффундирует до центра объекта посола, с.

В выражение (19) подставляются значения D , найденные из (6). Однако следует иметь в виду, что для жирных и средней жирности видов рыб при среднеобъемной солености S^H более 4,5 % значения D , найденные из (6), уменьшают в 1,1 раза, а для тощих рыб эту операцию производят при $S^H > 7,5$ %.

Для практики необходимо знать среднеобъемную соленость. Если известна соленость в центре рыбы, то среднеобъемную соленость S^H находят из следующего выражения (Ершов, Ершов, 2001):

$$S^H = b (S_{(0,\tau)}^H + S_1^H + S_2^H + \dots + S_n^H) / (n+1), \quad (20)$$

где $S_{(0,\tau)}^H$ – соленость в центре рыбы, найденная из (19), %; $S_1^H, S_2^H, \dots, S_n^H$ – значения солености в слоях по толщине рыбы, %; b – эмпирический коэффициент, учитывающий изменения солености тузлука у поверхности рыб;

Каждое значение солености S_n^H в формуле (20) отличается от предыдущего S_{n-1}^H на принятую произвольно одну и ту же постоянную величину, например, 1; 2; 2,5 и т.п. Например: $S_{(0,\tau)} = 2, S_1 = 2 + 1 = 3, S_2 = S_1 + 1 = 4, S_3 = S_2 + 1 = 5$ и т.д. Последняя в ряду соленость S^H не должна быть больше солености на поверхности рыбы S_n^H , которая находится из выражения: $S_n^H = C_0 = aC_p$, т.е. соленость на поверхности рыбы принимается равной концентрации тузлука C_0 в пограничном слое у поверхности рыбы. Из этого условия определяется количество слоев.

Эмпирический коэффициент $b = 0,816$, если S^H , найденная из (20), меньше 6,5 %, при $S^H \geq 6,5$ % $b = 1$.

Отклонения среднеобъемных соленостей, вычисленных по (19) и (20), от найденных из эксперимента составляют не более 20 %, что приемлемо для такого объекта посола, как рыба.

Для определения продолжительности посола, используя (19) и (20), строят график функции $S^H = f(\tau)$, $S_{(0,\tau)}^H = f(\tau)$ (рис. 7) и из этого графика по заданной солености находят продолжительность процесса. Полученную продолжительность умножают на 0,83 при посоле в циркулирующем тузлуке или на 0,74, если имел место смешанный посол рыбы.

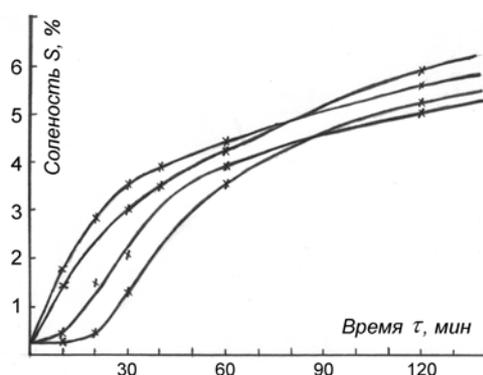


Рис. 7. Кривая кинетики просаливания мойвы

- 1 – $S_{(0,\tau)}^H = f(\tau)$ расчетная,
- 2 – $S_{(0,\tau)}^H = f(\tau)$ экспериментальная,
- 3 – $S^H = f(\tau)$ расчетная,
- 4 – $S^H = f(\tau)$ экспериментальная.

4. Расчет продолжительности посола методом сеток

Если в дифференциальном уравнении второго порядка диффузии соли:

$$\partial S / \partial \tau = D (\partial^2 S / \partial X^2)$$

заменить производные через разностные отношения, то можно получить следующие простые выражения для расчета солености рыбы в течение процесса просаливания:

$$S_A = [S_1^H + (P - 2)S_0^H + S_2^H] / P, \quad \text{для пластины;} \quad (21)$$

$$S_A = [(S_1^H - 1/n) S_0^H + (n + 1)/n] S_2^H / P, \quad \text{для цилиндра, } P = 2; \quad (22)$$

$$S_A = [S_1^H + S_0^H (n - 1)/n + S_2^H (n + 1)/n] / P, \quad \text{для цилиндра, } P = 3; \quad (23)$$

$$S_A = [S_1^H - S_0^H (2n - 1)/n + S_2^H (n + 1)/n] / P, \quad \text{для цилиндра, } P = 4; \quad (24)$$

здесь S_1^H, S_0^H, S_2^H – солености в трех соседних точках сетки в момент времени τ_n ; S_A – соленость в том же узле сетки, что S_0 в момент времени τ_{n+1} ; P – целое число в пределах от 2 до 6; n – число отрезков, на которые разделена полутолщина рыбы R . Формулы предложены инженером М.А. Ершовым.

Чтобы понять, как пользоваться указанными выражениями, построим сетку для тела, приближающегося по форме к пластине (рис. 8).

Обозначим на рис. 8 на оси X известные значения солености рыбы. В начальный момент времени (на оси X) считаем, что соленость равна либо нулю, либо естественной солености на поверхности рыбы. При этих условиях можно рассчитывать соленость во всех узлах сетки.

В формулах (21-24) и на рис. 8 приняты обозначения:

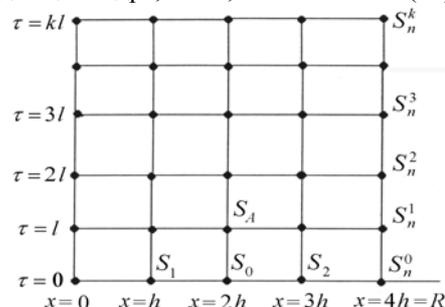


Рис. 8. Сетка прямоугольного типа для приближенного решения уравнения диффузии соли

h – шаг по оси абсцисс – времени ($h = R/n$, здесь R – полутолщина тела, n – количество участков, на которые разделена полутолщина);

l – шаг по оси ординат – толщине рыбы ($l = h^2/(PD)$, здесь D – коэффициент диффузии соли, m^2/c).

Вначале определяют солёности в узлах сетки ординаты $\tau = 1l$, затем $\tau = 2l$ и т.д.

Для сходимости вычислительного процесса необходимо выполнять условие $l \leq h^2/(2D)$. Однако уменьшать $l < h^2/(6D)$ нецелесообразно, так как это может снизить точность расчёта.

Солёность на поверхности рыбы можно найти по формуле (5).

Основные ограничения, определённые для формул (19), (20) действуют и при расчёте методом сеток. Например, коэффициент диффузии уменьшают в 1,1 раза при достижении солёности для тощих видов рыб $S'' \geq 7,5$ %, а для жирных $S'' \geq 4,5$ %, т.е. в начале шаг по оси ординат будет равен $l = h^2/(PD)$, где D – коэффициент диффузии, найденный из (6) или табл. 2 (I этап).

Затем при достижении $S'' \geq 7,5$ (тощие виды рыб) и $S'' \geq 4,5$ % (жирные и средней жирности виды рыб) шаг по оси ординат увеличивают в 1,1 раза, т.е. $l_2 = 1,1 \cdot l_1$.

Среднюю солёность в любой момент времени находят из (20), где $b = 0,816$ до достижения средней солёности $S'' \leq 6,5$ %, затем в (20) подставляют $b = 1$.

На рис. 9 представлены результаты расчёта распределения солёности рыбы по ее толщине (обозначены крестиками) для посола мойвы в сравнении с экспериментальными данными (кружки). Данный рисунок позволяет наглядно оценить точность описанного метода расчёта.

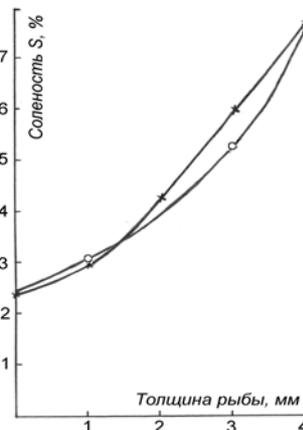


Рис. 9. Распределение содержания соли по толщине мяса мойвы через 40 мин.

6. Заключение

Предложенные на основе современных взглядов на теорию посола методы определения продолжительности просаливания позволяют получить достаточно точные результаты. Отклонение расчетных продолжительностей просаливания от определенных экспериментальным путем составило в первом примере 5 %, во втором – менее 1 %. Отличие расчетных и экспериментальных среднеобъемных солёностей составляет не более 20 %. Такая точность приемлема для инженерных расчётов. Данные методики могут быть использованы при проектировании в расчётах технологических процессов.

Литература

- Воскресенский Н.А.** Кинетика посола охотской сельди. *Рыб. хоз-во*, № 3, с.55-59, 1953.
- Димова В.В.** Закономерности процесса диффузии соли в мясе рыбы при посоле в тузлуке. *Апатиты, Кольский научный центр РАН*, с.18, 1996.
- Ершов А.М., Ершов М.А.** Методические указания по курсу "Современные методы расчёта технологических процессов". *Мурманск, МГТУ*, с.26, 2001.
- Леванидов И.П.** О коэффициенте просаливания рыбы. *Рыб. хоз-во*, № 3, с.83-85, 1956.
- Леванидов И.П.** Посол рыбы (элементы теории и практики). *Владивосток, Известия ТИИРО*, с.197, 1967.
- Леванидов И.П., Ионас Г.П., Слуцкая Т.Н.** Технология солёных, копченых и вяленых рыбных продуктов. *М., Агропромиздат*, с.157, 1987.
- Миндер Л.П.** Изменения веса рыбы в растворах поваренной соли. *Рыб. хоз-во*, № 4, с.29-33, 1948.
- Миндер Л.П.** Некоторые вопросы теории посола рыбы. *Тр. ПИИРО*, вып.30, с.143-158, 1970.
- Уитон Ф.У., Лосон Т.Б.** Производство продуктов питания из океанических ресурсов. В 2-х т. Под ред. и с предисл. Быкова В.П. *М., Агропромиздат*, с.765, 1989.