

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ХОЛОДНОГО КОПЧЕНИЯ РЫБЫ

Ю.А. Дмитриев, А.Н. Остриков, А.А. Шевцов – Воронежская государственная технологическая академия



Основные стадии технологического процесса холодного копчения рыбы, оказывающие существенное влияние на величину энергозатрат, – размораживание, посол, отмачивание или промывка, подсушка и копчение. Однако только две последние ввиду своей энергоемкости в значительной степени определяют себестоимость готовой продукции. Основные технологические параметры теплоносителя (нагретого воздуха) и копильного дыма, определяющие эффективность и интенсивность протекания процессов подсушивания и копчения, зависят от размеров, исходного состояния, жирности и видов рыбной продукции и др. (Никитин, 1982). При этом эти параметры, как правило, увязаны с конструкцией копильной установки (Шалак, Шашков, Сидоренко, 1998).

Нами разработана универсальная методология выбора оптимальных технологических режимов процессов подсушки и собственно холодного копчения рыбы. В связи с этим ставится задача определения оптимальной скорости движения воздуха и копильного дыма на входе в рабочую камеру с учетом ограничений, накладываемых на качество обрабатываемой рыбы, в широком диапазоне изменения ее начальной влажности. Для этого введем обобщенный критерий оптимизации

$$R = R_c + R_k, \quad (1)$$

где R_c и R_k – критерии оптимизации процесса подсушки и копчения рыбы соответственно.

В качестве критерия оптимизации процесса подсушки предлагается использовать суммарные теплоэнергетические затраты, приходящиеся на единицу массы испаряемой влаги:

$$R_c = \Sigma 3/U = (\zeta_3 N_3 + \zeta_4 q_t)/U \rightarrow \min, \quad (2)$$

где ζ_3 – цена электроэнергии, р/(кВт•ч); N_3 – потребляемая мощность электропровода вентилятора, кВт, затрачиваемая на создание полного напора воздуха р, Н/м²; ζ_4 – цена топлива, р/кг; q_t – расход топлива для получения воздуха, кг/ч; U – количество влаги, испаряемой в единицу времени, кг/ч.

Покажем, что оперативное изменение скорости движения воздуха в условиях реальных возмущений позволит обеспечить экстремум критерия (2). Для этого выразим критерий (2) через скорость движения воздуха на входе в сушильную камеру. Первое слагаемое в числителе (2) – затраты электроэнергии в единицу времени на создание массового потока сушильного агента

$$\zeta_3 N_3 = K_3 \zeta_3 \rho F v_{с\bullet a}, \quad (3)$$

где K_3 – коэффициент перевода механической энергии потока воздуха в электрическую энергию электропривода вентилятора, кВт•ч/(Н•м); F – площадь сечения сушильной камеры, м²; v – скорость движения воздуха на входе в сушильную камеру, м/с.

Полный статический напор воздуха р выразим следующим образом:

$$p = \Sigma \zeta (\rho v^2 / 2), \quad (4)$$

где $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местного сопротивления на всех участках сушильной установки.

Отсюда

$$\zeta_3 N_3 = K_3 \zeta_3 (\Sigma \zeta) (\rho v^2 / 2) F v = K_3 \zeta_3 (\Sigma \zeta) (\rho v^3 / 2) F. \quad (5)$$

Второе слагаемое в числителе критерия (2) – затраты топлива в единицу времени на создание теплового потока сушильного агента

$$\zeta_4 q_t = (\zeta_4 / Q_H^p) \bar{\rho} \bar{c} F (T_2 - T_1) v, \quad (6)$$

где Q_H^p – теплота сгорания топлива, кДж/кг; $\bar{\rho} \bar{c}$ – плотность (кг/м³), теплоемкость [кДж/(кг•К)]; T_1, T_2 – температура воздуха на входе и выходе из камеры, К.

Знаменатель критерия – количество испаряемой влаги в единицу времени, выразим следующим образом:

$$U = (x_2 - x_1) \rho_{св} F v, \quad (7)$$

где x_1, x_2 – влагосодержание воздуха на входе и выходе из камеры соответственно, кг/кг; $\rho_{св}$ – плотность абсолютно сухого воздуха, кг/м³.

С достаточной степенью точности выразим знаменатель критерия (2) через скорость движения воздуха в виде уравнения линейной регрессии, которое для различных значений начальной влажности рыбы W_H имеет вид

$$(x_2 - x_1) = A_3 (Bv + 1), \quad (8)$$

где A_3 и B – эмпирические коэффициенты являются функцией начальной влажности и определяются экспериментально: $A_3 = f(W_H)$, $B = f(W_H)$, $i = 1, N$ – количество средних значений начальной влажности W_H из выборок рыбной продукции разных партий.

В таблице приведены результаты экспериментального исследования зависимости разности влагосодержаний скорости подсушивания воздухом от фиксированных значений начальной влажности скумбрии 67, 70 и 73 %, а скорость воздуха варьировалась в интервале 2–4 м/с. Опыты проводили в зимних условиях Воронежской

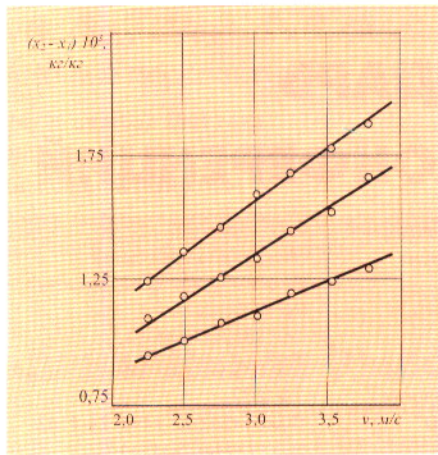


Рис. 1. Зависимость разности влагосодержаний воздуха на входе и выходе из камеры от его скорости:
 1 - $\nabla W = 67\% \in (x_2 - x_1) = 0,4 \cdot 10^{-3} (0,60v + 1)$;
 2 - $\nabla W = 70\% \in (x_2 - x_1) = 0,4 \cdot 10^{-3} (0,80v + 1)$;
 3 - $\nabla W = 73\% \in (x_2 - x_1) = 0,4 \cdot 10^{-3} (0,97v + 1)$

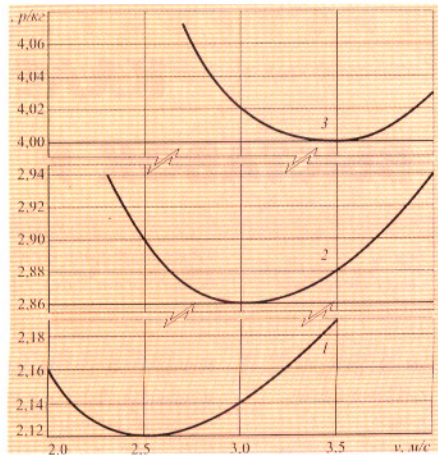


Рис. 2. Зависимость суммарных теплоэнергетических затрат, приходящихся на единицу испаряемой влаги, от скорости воздуха при различных значениях начальной влажности скумбрии $W_{н1}$, %: 1 - 67; 2 - 70; 3 - 73

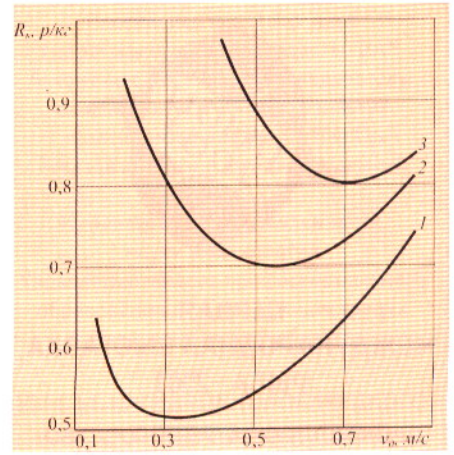


Рис. 3. Зависимость суммарных теплоэнергетических затрат, приходящихся на единицу испаряемой влаги, от скорости копильного дыма при различных значениях начальной влажности скумбрии $W_{н1}$, %: 1 - 63; 2 - 65; 3 - 68

Номер опыта	Начальная влажность скумбрии, $W_{н1}$, %	Скорость воздуха на выходе в сушильную камеру, v , м/с	Относительная влажность отработанного воздуха, ф. %	$x_2 \cdot 10^3$, кг/кг	$(x_2 - x_1) \cdot 10^3$, кг/кг	T_2 , К	$R_c = f(v)$	v^* , м/с	R_{cmin} , р/кг
1		2,5	81,8	41,20	0,96	310,7			
2	67	3,0	81,6	41,32	1,12	310,9	$R_{c1} = 0,1(15 + v^2) / 0,4(0,60v + 1)$	0,25	2,12
3		3,5	81,0	41,44	1,24	311,1			
4		2,5	86,6	41,38	1,18	310,6			
5	70	3,0	86,7	41,54	1,34	310,8	$R_{c2} = 0,15(17 + v^2) / 0,4(0,80v + 1)$	0,30	2,86
6		3,5	82,1	41,72	1,52	311,1			
7		2,5	82,4	41,56	1,36	310,6			
8	73	3,0	82,2	41,74	1,54	310,9	$R_{c3} = 0,225(19 + v^2) / 0,4(0,97v + 1)$	0,35	4,00
9		3,5	81,9	41,96	1,76	311,2			

области. Входные параметры свежего воздуха, подаваемого в калорифер, были усреднены и зафиксированы: $T_b = 273$ К, $x_0 = 0,042$ кг/кг. Влагосодержание воздуха x_2 на входе из камеры определили по значениям температуры и относительной влажности в соответствии с I-d диаграммой: $T_{раб} = 312$ К, $t_{раб} = 39$ °С, $d_1 = 17,8$ г/кг.

По результатам экспериментальных исследований найдены параметры линейной регрессии (8) (рис. 1).

Подставляя (5), (6), (7) в (2) с учетом (4) и (8), получим:

$$R = (A_1 F v^2 + A_2 F v) / A_3 (B v + 1) F v = (A_2 v^2 + A_2) / A_3 (B v + 1) = A_1 (v^2 + A_2 / A_1) / A_3 B (v + 1 / B), \quad (9)$$

$$\text{где } K_3 \zeta_3 (\sum \zeta) \rho / 2 = A_1, (C_T / Q^p H) \rho_{ca} c_{ca} T_{ca} = A_2. \quad (10)$$

Для оптимального выбора скорости движения воздуха, соответствующей минимальному значению суммарных теплоэнергетических затрат, приходящихся на единицу испаряемой влаги при ограничениях на качественные показатели рыбы, необходимо выполнение двух условий: $(dR/dv) = 0$ и $(d^2R/dv^2) > 0$.

Таким образом, были получены экстремальные характеристики процесса подсушки скумбрии (рис. 2) соответственно для различных значений начальной влажности $W_{н1} = 67\%$; $W_{н2} = 70\%$; $W_{н3} = 73\%$. Из графических зависимостей $R = f(v)$ следует, что отклонение от оптимума v^* , равного 2,5 м/с, 3 м/с, 3,5 м/с соответственно для значений начальной влажности скумбрии 67 %, 70 %, 73 %, ведет к теплоэнергетическим потерям и перерасходу электроэнергии.

В качестве критерия оптимизации процесса копчения предлагается использовать суммарные теплоэнергетические затраты, приходящиеся на единицу изменения концентрации копильного дыма в рабочей камере:

$$R_k = \sum 3 / 0,01 \Delta M \Delta C = (C_3 N_3 + C_0 q_0) / 0,01 (M_n - M_k) (C_n - C_k) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где C_0 – цена древесных опилок р/кг; q_0 – расход древесных опилок для получения копильного дыма, кг/ч; $\Delta M = M_n - M_k$ – изменение массы рыбы в процессе холодного копчения в единицу времени, кг/ч; $\Delta C = C_n - C_k$ – изменение концентрации копильного дыма, получаемого в единицу времени, %/ч.

Затем по аналогии с вышеприведенной методикой обоснования выбора критерии оптимизации процесса подсушки [формулы (2) – (8)] легко доказать, что изменение скорости копильного дыма в условиях реальных возмущений позволит обеспечить экстремум критерия (11).

Таким образом, были получены суммарные экстремальные характеристики процесса копчения скумбрии $R = f(v)$ (рис. 3) для различных значений начальной влажности. Их анализ показывает, что отклонение от оптимума v^* , равного 0,31, 0,52, 0,70 м/с для значений влажности подсушенной скумбрии 63 %, 65 %, 68 % соответственно, ведет к теплоэнергетическим потерям и перерасходу электроэнергии.

Годовой экономический эффект от реализации разработанной универсальной методологии выбора оптимальных технологических режимов процессов подсушки и холодного копчения скумбрии составляет более 75 тыс. руб.

