

УДК 664.951.32

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ КОПТИЛЬНОГО ДЫМА
ПРИ ХОЛОДНОМ КОПЧЕНИИ РЫБЫ
МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Д.Х.Бунин
(ВНИРО)

В лаборатории механизации и автоматизации обработки рыбы ВНИРО разработаны способы контроля за влажностью и плотностью коптильного дыма /4, 5, 6/. Кроме того, существуют способы контроля за температурой и скоростью движения дыма, что позволяет установить взаимосвязь всех основных параметров коптильного дыма в производственных условиях.

Поскольку на подавляющем большинстве коптильных предприятий перечисленные параметры (кроме температуры) не контролируют, можно предположить, что их величины и соотношения во время копчения не оптимальны и, следовательно, процесс копчения более длителен, чем он мог бы быть при оптимальном соотношении параметров.

В данной работе представлены результаты поисков оптимального соотношения параметров при холодном копчении ставриды атлантической крупной на Бердянском рыбокомбинате. Средняя продолжительность копчения этой рыбы составляла трое суток. Коптильная камера снабжалась дымом из дымогенератора ПСМ-ВНИРО. Емкость камеры по сырцу - 500±550 кг (три подвесные клетки, передвигающиеся по монорельсу). На дымоотводе был помещен вытяжной вентилятор и регулирующие шибера.

Традиционный метод поиска оптимума параметров, при котором варьируют одним параметром, а остальные в это время зафиксированы, требует постановки многочисленных экспериментов. Применение методов математического планирования экспериментов, при котором варьируются одновременно все параметры по определенному плану, позволяет значительно сократить количество экспериментов и при этом получать статистически достоверные данные [7].

Задача оптимизации - достижение минимальных затрат времени на процесс копчения при заданных технологическими инструкциями влажности и качестве копченой рыбы.

Параметры, характеризующие процесс:

\hat{y}_1 - время копчения, ч;

\hat{y}_2 - влажность мяса рыбы, %;

\hat{y}_3 - качество копченой рыбы (цвет, запах, вкус).

\hat{y}_1 - параметр оптимизации ($\hat{y}_1 \rightarrow \min$), \hat{y}_2 и \hat{y}_3 служат ограничениями.

Влажность мяса рыбы определяется методом высушивания пробы до постоянного веса и не должна превышать 60%. Качество копченой рыбы оговорено ГОСТами и определяется органолептически.

Факторы, определяющие процесс:

\tilde{x}_1 - влажность дымовоздушной смеси, % или г/м³;

\tilde{x}_2 - "густота" или весовая концентрация дыма, г/м³;

\tilde{x}_3 - скорость дымовоздушной смеси, м/сек;

\tilde{x}_4 - температура дымовоздушной смеси, °С.

Выбор варьируемых факторов. Так как при холодном копчении различных видов и состояний рыб собрана обширная информация об оптимальной температуре копчения и она оговорена технологическими инструкциями, то решено изменять в опытах только первые три фактора. Однако в течение всех опытов температуру дыма необходимо поддерживать постоянной и измерять ее.

В процессе эксперимента необходимы были следующие измерения и анализы.

I. Влажность воздуха, поступающего в очаг дымообразования (влажность воздуха в дымогенераторной) определяли аспира-

ционным психрометром с последующим пересчетом в абсолютные единицы влажности ($г/м^3$).

2. Влажность дымовоздушной смеси непосредственно на выходе из камеры определяли также аспирационным психрометром с последующим пересчетом в абсолютные единицы влажности и внесением поправок на величину ошибки при определенной густоте дыма согласно результатам экспериментов, описанных в работе /4/. При этом по показателям сухого термометра фиксировали температуру дыма в камере.

3. Скорость дымовоздушной среды определяли в выходном дымоходе диаметром 440 мм при помощи крыльчатого анемометра с последующим пересчетом для определения скорости в самой коптильной камере.

4. Плотность дымовоздушной смеси определяли фотометром УПКА-65 в дымоходах на входе и выходе из камеры с учетом ошибки показаний этого прибора при изменении влажности дыма /5/.

5. Влажность топлива (опилок) определяли путем высушивания навески до постоянного веса.

6. Расход топлива в дымогенераторе определяли по времени сгорания взвешенной порции опилок.

7. Исходное состояние и влажность подлежащей копчению рыбы определяли в лаборатории рыбокомбината по стандартной методике.

8. Влажность рыбы измеряли каждые два часа копчения путем отбора средних проб (по две рыбы от каждой из трех клеток) по стандартной методике.

9. Окончание копчения устанавливали при достижении влажности в теле рыбы 60% и по органолептическим оценкам вкуса, запаха копчености и колера рыбы.

Выбор основных уровней контролируемых параметров и интервалов их варьирования. В ы б о р о с н о в о г о у р о в н я (априорная информация). Для выявления параметров, при которых обычно идет процесс копчения в производственных условиях, были измерены влажность, густота и скорость коптильного дыма, количество и влажность сжигаемых опилок и время копчения при достижении влажности в теле рыбы 60%.

Влажность дыма на выходе из камеры, его скорость, весовую концентрацию, температуру измеряли через 4-6 ч; влажность и расход опилок - один раз за цикл копчения. Все измерения повторяли трижды. Знание исходных параметров процесса позволило определить основной (исходный) уровень, от которого следует начинать поиск оптимальных соотношений параметров, а также определять дисперсию воспроизводимости. В табл. I приведены среднеарифметические результатов замеров влажности, скорости, весовой концентрации и температуры каждого цикла копчения, а также продолжительность цикла копчения.

Табл. а I

№ опыта	Влажность дыма, г/м ³ (x_1)	Весовая концентрация дыма г/м (x_2)	Скорость дыма м/сек (x_3)	Температура дыма, °C	Продолжительность копчения, ч (y_1)	Примечание
I	21,2	1,2230	0,38	30,5	66	Качество рыбы удовлетворительное.
2	22,8	1,2142	0,36	32,5	72	Качество рыбы плохое. Коллер очень темный.
3	22,8	1,2114	0,36	31,8	72	Влажность 62%. Реализована в местной торговой сети.
Среднеарифметическое	22,27	1,2162	0,367	31,6	70	Вычислены по формулам:
Среднеквадратическое	0,81	0,186	0,036	1,03	3,46	$x_a = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$ $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2}{n-1}}$

x/ Расход опилок - 12 кг/ч. Влажность 42%.

XX/ Скорость дымовоздушной смеси измеряли в дымоходе на выходе из камеры, размеры дымохода - 340x420 мм.

В то же время в производственных условиях, в которых проводились данные эксперименты, анализируемые параметры могут меняться в следующих пределах.

I. Абсолютная влажность воздуха, поступающего в очаг дымообразования, может колебаться в широком интервале, от 5 до 29 г/м³. Из топлива при дымообразовании может выделиться до

6 кг влаги в час (при сжигании 12 кг опилок 40% влажности). Влажность дымовоздушной смеси может колебаться от 5 до 32,5 г/м³ дыма.

2. Весовая концентрация (густота) дыма может меняться в данном случае от 0 (дыма нет) до 1,62 г/м³.

3. Скорость дымовоздушной смеси в копильных камерах в основном зависит от производительности вентилятора дымогенератора. Его максимальная производительность - 1800 м³/ч.

В месте измерения этого параметра при описываемых экспериментах, в выходном дымоходе копильной камеры Бердянского рыбокомбината площадью сечения 0,61 м² максимальная скорость дымовоздушной смеси может быть 0,82 м/сек.

Основной (нулевой) уровень варьирования параметрами выбран примерно в центре области их максимального измерения, что позволяет более широко оперировать параметрами при определении их оптимальных соотношений.

В ы б о р и н т е р в а л о в в а р ь и р о в а н и я .
В данном случае под интервалом варьирования понимается некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхнюю, а вычитание - нижнюю границу изменения параметров при проведении экспериментов.

Для первой серии экспериментов можно принять интервал варьирования каждого из трех факторов в 15-20% от определенной выше области их максимального изменения.

Если поверхность отклика (геометрическая область в трехмерном пространстве, на которой находится искомая подобласть или точка оптимального соотношения параметров) криволинейна, то, варьируя факторами - параметрами на двух уровнях в указанных пределах, получим возможность с минимальной ошибкой аппроксимировать эту поверхность полиномом первой степени

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (I)$$

где b_i - коэффициенты регрессии.

Уменьшение пределов варьирования может привести к тому, что изменение параметров будет не ощутимым из-за наличия неуправляемых колебаний исследуемых параметров (шумов).

В условиях производства на Бердянском рыбокомбинате, имеющего коптильные установки камерного типа с дымогенераторами ПСМ, при выборе основного уровня и интервалов варьирования необходимо принимать во внимание следующие соображения:

а) в дымогенераторе ПСМ можно сжечь минимально 8 кг/ч опилок (сжигание меньшего количества ведет к недопустимому обеднению дымовоздушной смеси), максимально - 12 кг/ч (паспортная производительность) при влажности опилок в 25-30%;

б) учитывая, что в месте замера скоростей площадь сечения дымохода составляет $0,61 \text{ м}^2$, изменение скорости движения дымовоздушной смеси на $0,1 \text{ м/сек}$ вызовет изменение расхода дымовоздушной смеси на $220 \text{ м}^3/\text{ч}$;

в) влажность опилок, имеющихся на топливном складе, была 27, 42 и 53% (по данным лаборатории комбината).

Следовательно, параметрами в этих условиях можно варьировать в таких пределах.

1. Сжигание различного количества опилок (8 или 12 кг/ч) с различной влажностью (27 или 53%) в присутствии 440 или 880 $\text{м}^3/\text{ч}$ воздуха (при изменении скорости движения дымовоздушной смеси от 0,2 до 0,4 м/сек) может изменить влажность этой смеси от $0,73 \text{ г/м}^3$ до $1,7 \text{ г/м}^3$.

Следовательно, изменение влажности дымовоздушной смеси только за счет сжигания опилок различной влажности не дает желаемого результата, так как эти колебания соизмеримы с колебаниями влажности воздуха, поступающего в очаг дымообразования. Поэтому при проведении эксперимента необходимо иметь еще один источник поступления влаги в дымовоздушную смесь. Для этого в камеру сжигания была подведена паровая магистраль. Кроме того, подача необходимого количества пара может сгладить атмосферные колебания влажности воздуха и стабилизировать влажность дымовоздушной смеси в течение всего процесса копчения. Поэтому интервалы варьирования влажностью выбраны в 2 г/м^3 .

2. Плотность или "густота" копильного дыма зависит от количества сжигаемых опилок, влажности этих опилок и количества воздуха, подаваемого в очаг дымообразования. При определении основного уровня и интервалов варьирования следует принять во внимание, что предварительные измерения параметров копильного дыма показали, что при сжигании 12 кг топлива влажностью 42% весовая концентрация дыма была в среднем $1,2162 \text{ г/м}^3$. При влажности опилок 42% концентрация была максимальной. Но при этом выкопченная рыба была с очень темным колером и резким запахом копчености. Поэтому такую концентрацию дыма следует принять за верхний уровень варьирования. Нижний уровень заранее установить трудно, но он определится при замерах плотности дыма при сжигании 8 кг топлива в час при влажности 27%.

3. Интервалы варьирования и средний уровень скорости дымовоздушной смеси следует принять, руководствуясь данными предварительных измерений. Верхнюю границу следует определить в 0,4 м/сек, интервал варьирования - в 0,1 м/сек.

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки их результатов масштабы варьирования обозначаются так, что верхний уровень соответствует +1, нижний - -1, а основной - нулю. Для этого используется преобразование:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{j_j}, \quad (2)$$

где x_j - кодированное значение фактора;
 \tilde{x}_j - натуральное значение фактора;
 \tilde{x}_{j0} - натуральное значение нулевого фактора;
 j_j - интервал варьирования;
 j - номер фактора.

Выбранные уровни факторов и интервалы варьирования представлены в табл.2.

Построение матрицы планирования. Для реализации всех возможных сочетаний трех факторов, варьируемых в данном эксперименте на двух уровнях, необходимо поставить восемь опытов (полный факторный эксперимент).

Таблица 2

Ф а к т о р ы	Уровни факторов			Интервал варьи- вания
	-I	0	+I	
\tilde{x}_1 - влажность дымовоздушной смеси, г/м ³	21,5	23,5	25,5	2,0
\tilde{x}_2 - весовая концентрация дымовоздушной смеси, г/м ³	0,83	1,02	1,21	0,19
\tilde{x}_3 - скорость дымовоздушной смеси на выходе из камеры, м/сек	0,2	0,3	0,4	0,1

Конечная цель данного эксперимента - поиск значений неизвестных коэффициентов уравнения (I). Таких коэффициентов - три. Для их нахождения достаточно получить четыре уравнения (четыре степени свободы). Четвертая степень свободы необходима для проверки гипотезы о том, что результаты эксперимента не могут быть представлены при помощи полинома нулевой степени (нуль-гипотеза). Следовательно, полный факторный эксперимент обладает избыточностью информации.

Уменьшить количество экспериментов без потери существенной информации можно, реализовав часть полного факторного эксперимента. В данном случае для получения четырех уравнений регрессии необходимо реализовать половину полного факторного эксперимента (полуреплику).

Матрица планирования для такого трехфакторного эксперимента имеет следующий вид (табл.3).

Таблица 3

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	y
1	+I	-I	-I	+I	y_1
2	+I	+I	-I	-I	y_2
3	+I	-I	+I	-I	y_3
4	+I	+I	+I	+I	y_4

x/ Фиктивная переменная x_0 . введена для облегчения дальнейших расчетов.

Результаты экспериментов. Как уже упоминалось, в каждом опыте температуру, влажность, скорость, оптическую плотность и весовую концентрацию дыма, а также влажность в теле рыбы измеряли каждые два часа. Количество сжигаемых опилок измеряли два раза в сутки. По окончании каждого опыта выводили среднеарифметические значения измеренных параметров, которые сведены в табл.4.

Таблица 4

№ опыта в матрице	x_1 код	\tilde{x}_1 г/м ³	x_2 код	\tilde{x}_2 г/м ³	x_3 код	\tilde{x}_3 м/сек	Продолжительность опыта, ч	Влажность рыбы, %
1	-I	21,5	-I	0,83	+I	0,4	72	62,0
2	+I	25,5	-I	0,84	-I	0,2	60	60,5
3	-I	21,4	+I	1,21	-I	0,2	48	60,0
4	+I	25,6	+I	1,20	+I	0,4	68	60,5

Примечание. Влажность в рыбе достигла 62% после 48 ч копчения и в последующие сутки не снизилась, так как поверхность рыбы заметно высохла, образовалась корка, через которую влага не проходила. Рыба отправлена на реализацию в местную торговую сеть.

Средняя температура копчения в каждом опыте была +31,5⁰С. Ночью температура в камере снижалась до 28⁰С, днем достигала +33⁰С.

В опыте № 1 сжигали в час 8,5 кг опилок влажностью 27%, в опыте № 2 - 12 кг влажностью 53%, в опытах 3 и 4 - 12 кг влажностью 42%.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

производится по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{N}$$

где N - число вариантов в матрице планирования;

y_i - значение выхода процесса в i -варианте;

x_{ij} - значение данного фактора в i -варианте,

$j = 0, 1, 2, \dots$

- номер фактора; ноль записан

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{72 + 60 + 48 + 68}{4} = 62;$$

$$b_1 = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} = \frac{-72 + 60 - 48 + 68}{4} = 2;$$

$$b_2 = \frac{-y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{4} = \frac{-72 - 60 + 48 + 68}{4} = 1;$$

$$b_3 = \frac{+y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{4} = \frac{+72 - 60 - 48 + 68}{4} = 8.$$

Таким образом, уравнение (3) принимает вид:

$$\hat{y} = 62 + 2x_1 + x_2 + 8x_3. \quad (4)$$

Полученное уравнение показывает, что:

- 1) на нулевом уровне ($\bar{x}_1 = 23,5 \text{ г/м}^3$; $\bar{x}_2 = 1,02 \text{ г/м}^3$; $\bar{x}_3 = 0,3 \text{ м/сек}$) время копчения составляет 62 ч;
- 2) при изменении влажности копильного дыма от нулевого уровня на величину единицы варьирования ($\pm 2,0 \text{ г/м}^3$) время копчения изменится на 2 ч;
- 3) при изменении весовой концентрации дыма от нулевого уровня на $\pm 0,19 \text{ г/м}^3$ время копчения изменится на 1 ч;
- 4) при изменении скорости дыма на $\pm 0,1 \text{ м/сек}$ скорость копчения изменится на 8 ч.

При оценке значимости коэффициентов регрессии необходимо найти их выборочную дисперсию $S^2[b_i]$

$$S^2[b_i] = \frac{S^2}{N}; \quad S[b_i] = \frac{S}{\sqrt{N}},$$

где S^2 — среднеквадратическое отклонение;

N — количество опытов в матрице планирования.

Отсюда видно, что ошибка коэффициента регрессии в \sqrt{N} раз меньше ошибки используемого опыта, что является одним из достоинств многофакторной схемы эксперимента.

$$S[b_1] = \frac{3,46}{2} = 1,73.$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии необходимо решить неравенство

$$b_i > S[b_i] t_p(f),$$

где $t_p(f)$ - коэффициент Стьюдента для заданной достоверности $p = 95\%$ и числа степеней свободы f , с которыми были определены коэффициенты регрессии; число степеней свободы:

$$f = N(K - 1) = 4(3 - 1) = 8;$$

для достоверности 95% и восьми степеней свободы коэффициент Стьюдента равен 2,306 /8/.

$$b_0 = 62 > 1,73 \cdot 2,306; \quad 62 > 3,99 - \text{коэффициент значим};$$

$$b_1 = 2 < 3,99 - \text{коэффициент не значим};$$

$$b_2 = 1 < 3,99 - \text{коэффициент не значим};$$

$$b_3 = 8 > 3,99 - \text{коэффициент значим}.$$

Проверка адекватности модели служит проверкой гипотезы о том, что исследуемый процесс описывается линейным уравнением без членов, учитывающих парные и тройные взаимодействия.

Для этого сначала рассчитывают значения параметра оптимизации \hat{y}_x в каждом из вариантов эксперимента:

$$\hat{y}_1 = b_0 - b_1 - b_2 + b_3 = 67;$$

$$\hat{y}_2 = b_0 + b_1 - b_2 - b_3 = 53;$$

$$\hat{y}_3 = b_0 - b_1 + b_2 - b_3 = 53;$$

$$\hat{y}_4 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 = 73.$$

Затем вычисляют неадекватность S_{AA}^2 принятой модели

$$S_{AA}^2 = \frac{\sum (\bar{y}_x - \hat{y}_x)}{N - i - 1},$$

где N - число вариантов при полном факторном эксперименте;

i - число отброшенных взаимодействий,

$$S_{AA}^2 = \frac{(72-67) + (60-53) + (48-53) + (68-73)}{3} = \frac{2}{3}$$

Адекватность проверяют с помощью табличного критерия Фишера для уровня достоверности, равном 95% /3/.

$$S_{AA}^2 = \frac{2}{3} \text{ имеет три степени свободы}$$

$S^2[\bar{y}] = 1,73$ - имеет две степени свободы.

$$F_{рас.р} = \frac{S^2_{AA}}{S^2[\bar{y}]} = \frac{2}{3} (f-3) : 1,63 (f-2) = 0,4.$$

Табличный критерий Фишера для этих степеней свободы равен 19,2; так как $F_{рас.р} \geq F(f_1, f_2)$, можно утверждать, что поверхность отклика достаточно точно описывается уравнением регрессии первой степени без парных взаимодействий.

Интерпретация результатов и принятие решения. По оценке значимости коэффициентов регрессии можно сделать следующее заключение.

Абсолютная величина коэффициентов есть количественная мера их влияния на параметр оптимизации, т.е. на время копчения. Чем больше коэффициент, тем больше его влияние. Следовательно, наибольшее влияние на время копчения оказывает фактор скорости копильного дыма. Но следует иметь в виду, что эксперимент проводили в локальной области факторного пространства и коэффициенты отражают влияние факторов только в этой области. Коэффициент при факторе концентрации дыма оказался незначимым, при влажности дыма - также незначимым. Такое положение можно объяснить несколькими причинами:

- а) выбрана слишком малая единица варьирования;
- б) нулевой уровень данного фактора уже лежит в оптимальной области, следовательно, изменение данного фактора на величину шага варьирования может не вызвать изменение значения выхода;
- в) большая ошибка опыта.

В данной ситуации возможны следующие варианты дальнейших действий: с целью нахождения оптимального соотношения параметров необходимы эксперименты с увеличенными интервалами варьирования, отсеивание незначительных факторов, увеличение количества параллельных опытов, движение по градиенту (крутое восхождение), реализация планов второго порядка или окончание исследования.

Чтобы выбрать одно из перечисленных решений, рассмотрим возможности каждого из них.

1. Увеличение интервалов варьирования влажности и густоты и копильного дыма. При проведении экспериментов на промышленном оборудовании увеличить или уменьшить густоту копильного дыма невозможно в больших пределах, так как минимально возможное количество сжигаемых опилок - 8 кг, максимально - 12 кг. Изменить интервал варьирования влажности дыма также невозможно, так как основная влага поступает с воздухом и высушить его в производственных условиях нельзя. Следовательно, изменение интервалов варьирования незначимых факторов в данном случае невозможно.

2. Все факторы в данном эксперименте оказывают влияние на процесс, следовательно, незначимые факторы отбрасывать нельзя.

3. Увеличить количество параллельных опытов или реализовать планы второго порядка очень трудно, так как каждый опыт длится не менее двух суток и строго соблюдения условия стабильности и чистоты повторных опытов чрезвычайно сложно из-за разнородности сырья и большого колебания параметров окружающего воздуха во времени.

4. Движение по градиенту (крутое восхождение к точке оптимального соотношения параметров). В полученной выше адекватной линейной модели значим только один коэффициент (кроме b_0). Тогда в движении по градиенту будет участвовать только один фактор. Многофакторная задача вырождается в однофакторную и движение по градиенту становится неэффективным [1, 9]. Кроме того, при движении по градиенту необходимо выбирать меньшие, чем в факторном эксперименте, интервалы варьирования (шаги). Но тогда изменение параметров будет соизмеримо с ошибками опыта (шумами), и выделить изменение параметров станет трудно. Поэтому в данной ситуации, на наш взгляд, следует завершить данный эксперимент.

З а к л ю ч е н и е

Из анализа литературных данных и результатов экспериментов можно сделать вывод, что исследуемые параметры копильного дыма, при которых время копчения в данных условиях было минимальным, лежат в оптимальной подобласти факторного прост-

ранства. Это подтверждается тем, что два из трех коэффициентов уравнения регрессии оказались незначимы. Кроме того, все коэффициенты мало (менее чем один на порядок) отличаются друг от друга, что также свидетельствует о нахождении параметров в оптимальных соотношениях.

Но это еще не значит, что на этом следует прекратить поиск наиболее оптимального соотношения параметров копильного дыма даже для данного вида рыб. Полученные результаты следует рассматривать лишь как первое приближение. Для получения более точных данных необходимо оборудовать копильные установки системами, которые позволят более точно изменять и поддерживать параметры копильного дыма, например, кондиционерами воздуха, подаваемого в очаг дымообразования. Лишь тогда откроется возможность найти не только подобласть, но и точку оптимальных соотношений и сократить до минимума время копчения рыбы при хорошем качестве продукта. Но даже при копчении атлантической ставриды копильным дымом с указанными параметрами время копчения сокращается больше чем на 30%.

Уравнение (4) может служить для выбора коэффициентов усиления регуляторов системы автоматического регулирования, так как оно является уравнением статики объекта.

Л и т е р а т у р а

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. Металлургия, 1968.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд-во "Наука", 1971.
3. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Изд. Лен.Гос ун-та, 1971.
4. Бунин Д.Х. Определение ошибок психрометра при измерении влажности копильного дыма. Тр.ВНИРО. Т.79, 1971.
5. Бунин Д.Х. Исследование погрешностей, вносимых водяными парами и туманами, при измерении плотности копильного дыма фотометром. Тр. мол. уч., вып.У, М., ОНТИ ВНИРО, 1971.

6. Маршак И.М., Бунин Д.Х., Васильева И.И. Прибор для измерения влажности копильного дыма. Авторское свидетельство № 306408. Б.-И. № 19, 1971.
7. Налимов В.В., Чертова И.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Изд-во "Наука", 1966.
8. Румицкий Л.В. Математическая обработка результатов эксперимента. Физматиздат, 1971.
9. Финн Д. Введение в теорию планирования экспериментов. Пер. с английского. Изд-во "Наука", 1970.

THE DETERMINATION OF THE OPTIMUM RATIO OF SMOKE
PARAMETERS AT COLD SMOKING OF FISH USING THE
METHOD OF MATHEMATICALLY-PLANNED EXPERIMENTS

D.H. Bunin

S U M M A R Y

The results of experiments carried out while smoking the Atlantic horse-mackerel at the canning plant are given. The application of the method of mathematically-planned experiments makes it possible to reduce substantially the number of experiments and to obtain statistically reliable data. The objective of the experiment was to reduce the time of smoking. According to the program three factors affecting the smoking process, such as humidity, the average speed of smoke movement and density of smoke were tested in various proportions at the same time. The optimum ratio of parameters allowing the smoking time to be reduced by 30% was ascertained.