

УДК 664.047

Результаты исследования процесса сушки рыбы (плотва и чехонь)

Суслов А.Э., Фатыхов Ю.А.
sergs53@yandex.ru

Калининградский государственный технический университет

Разработана экспериментальная установка для сушки сырья и методика проведения опытов. Получены данные по кинетике сушки плотвы и чехони в зависимости от различных параметров процесса. В процессе сушки влияющими факторами являются температура и влагосодержание воздуха в установке. Методом планирования эксперимента получена их взаимосвязь с темпом обезвоживания в виде полинома второго порядка

Ключевые слова: процесс сушки рыбы, скорость сушки, темп обезвоживания

Research results of fish drying process (roach and alosa)

A.Suslov, J. Fatyhov, sergs533@mail.ru

Kaliningrad State Technical University

Experimental unit for drying of material and experiments carrying out method have been exhausted. Data for kinetics of roach and alosa fish drying depending on different process parameters have been obtained. During the process of drying the influence factors are: the temperature and moisture content of air inside the unit. By means of planning experiment there were obtained their interconnection with the dehydration rate of fish in the mode of the second order polynomial.

Keyword: drying process of fish, drying speed, *dehydration rate*.

Введение

Процесс сушки является одним из основных этапов в технологии приготовления копченой и вяленой рыбопродукции. Факторы, влияющие на внутренний массоперенос в рыбе и внешний массоперенос от рыбы к сушильному агенту, в значительной степени влияют на продолжительность процесса и его энергоемкость, а также определяют органолептические показатели готовой продукции и сроки ее хранения.

Результаты экспериментальных исследований

Мышечные ткани рыбы относятся к влажным коллоидным

капиллярнопористым телам [2] и как было показано в работе [5] кинетика внутреннего массопереноса в общем случае может быть описана уравнением:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha_m \nabla^2 U + \alpha_m \delta \nabla^2 \Theta + k_p / \rho_0 \nabla^2 p, \quad (1)$$

где: U - влагосодержание тела, Θ - перепад температур в теле, p - общее давление влажного воздуха в теле, α_m - коэффициент диффузии, δ - относительный коэффициент термодиффузии, k_p - коэффициент молярного фильтрационного переноса влаги, ρ_0 - плотность абсолютно сухого тела, ∇^2 - оператор Лапласа.

Поскольку, процесс сушки рыбы осуществляют при температурах не выше 35°C , то влияние градиента нерелаксируемого давления незначительно и его можно не учитывать [5].

Таким образом, массоперенос при вялении и холодном копчении рыбы математически может быть описан первым слагаемым уравнения (1):

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha_m \nabla^2 U \quad (2)$$

Экспериментально установлено, что прогрев тканей рыбы в процессе сушки до температуры сушильного агента в зависимости от толщины рыбы, длится от 0,1 до 0,8 часа, что составляет сравнительно небольшую величину от общей продолжительности сушки. Это указывает на незначительное влияние термовлагопроводности на скорость сушки [5].

При исследовании процесса сушки рыбы исследовалось влияние скорости воздуха на скорость сушки рыбы. По литературным данным рекомендуемая скорость воздуха в установках для вяления рыбы находится в пределах 1-3 м/с и зависит от относительной влажности воздуха [3]. Результаты экспериментальных исследований влияния скорости воздуха на скорость сушки представлены на рис.1. Как видно из графика скорость воздуха в интервале 1-3 м/с оказывает практически незначительное влияние на скорость сушки рыбы и зависит, в большей степени, от вида рыбы.

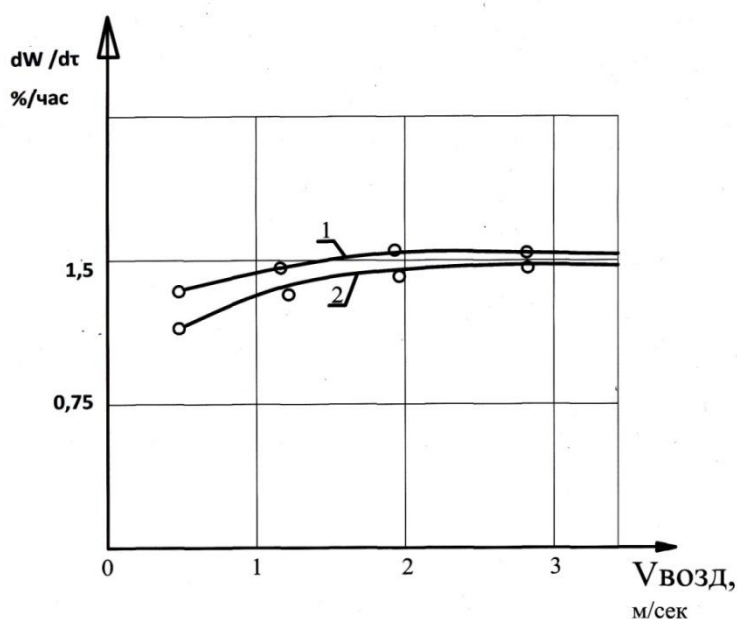


Рис.1. Зависимость скорости сушки от скорости воздуха:
1—салака; мойва 2— окунь.

Тепловые расчеты сушильных установок обычно сводятся к определению расхода тепла на сушку при значениях параметров сушильного агента, рекомендуемых технологическими инструкциями. При этом не учитываются закономерности переноса влаги между рыбой и сушильным агентом. Рабочим агентом в сушильной камере является смесь сухого воздуха и водяного пара, доля которого в смеси характеризуется величиной его парциального давления. При этом парциальное давление пара в пограничном слое около влажного материала всегда больше, чем в основной массе воздуха. Под действием разности этих давлений происходит диффузия пара от материала в воздух. При прочих равных условиях скорость выделения пара с поверхности материала зависит от парциального давления пара в воздухе или от его влагосодержания d .

Результаты исследований

В качестве объекта исследования для оптимизации параметров воздуха в процессе сушки при вялении и холодном копчении рыбы был выбран плотва и чехонь, являющиеся объектом промысла в Калининградской области (Куршский и Калининградский залив), используемые для вяления и холодного копчения.

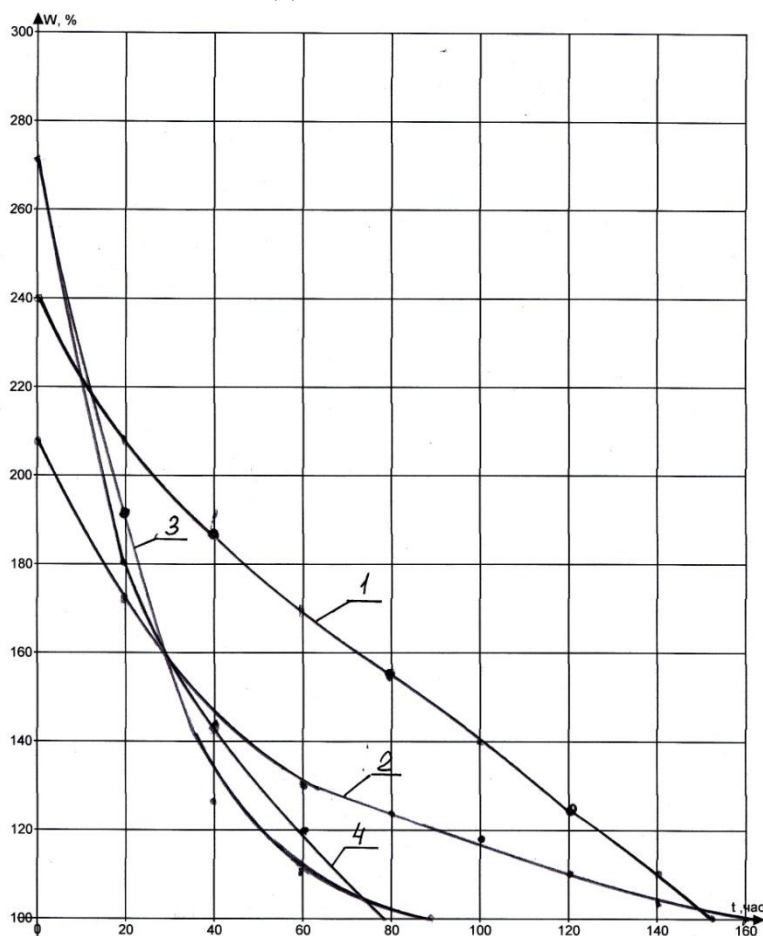


Рис.2. Кривые обезвоживания при сушке плотвы.

1 - $t=20^{\circ}\text{C}$, $d=7,4 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$, 2 - $t=20^{\circ}\text{C}$, $d=10,8 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$,
 3 - $t=30^{\circ}\text{C}$, $d=10,8 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$, 4 - $t=30^{\circ}\text{C}$, $d=7,4 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$.

Рыбу солили смешанным посолом, отмачивали, измеряли начальную влажность. Рыбу развешивали на прутках в установку, установку запускали в работу. Замеры промежуточной влажности рыбы в процессе сушки проводили каждые 8 часов, температура, влажность воздуха поддерживались постоянными в течение всего эксперимента. Скорость воздуха поддерживалась постоянной во всех экспериментах 2,2 м/с.

На рис.2,3 представлены кривые сушки плотвы и чехони, построенные по экспериментальным данным для различных значений температуры и влажности воздуха в сушильной установке. Значения текущей влажности рыбы W^c вычисляли по отношению массы влаги в продукте к массе абсолютно сухого вещества.

Из рис.2,3 видно, что исследуемые зависимости имеют вид, характерный для коллоидных капиллярно-пористых тел, к которым относится большинство пищевых продуктов.

Влияние температуры воздуха в сушильной установке видно из сопоставления кривых 1 и 3 (рис. 2,3) , при $t = 20^{\circ}\text{C}$ процесс сушки рыбы характеризуется низкой интенсивностью (кривая 1), что объясняется

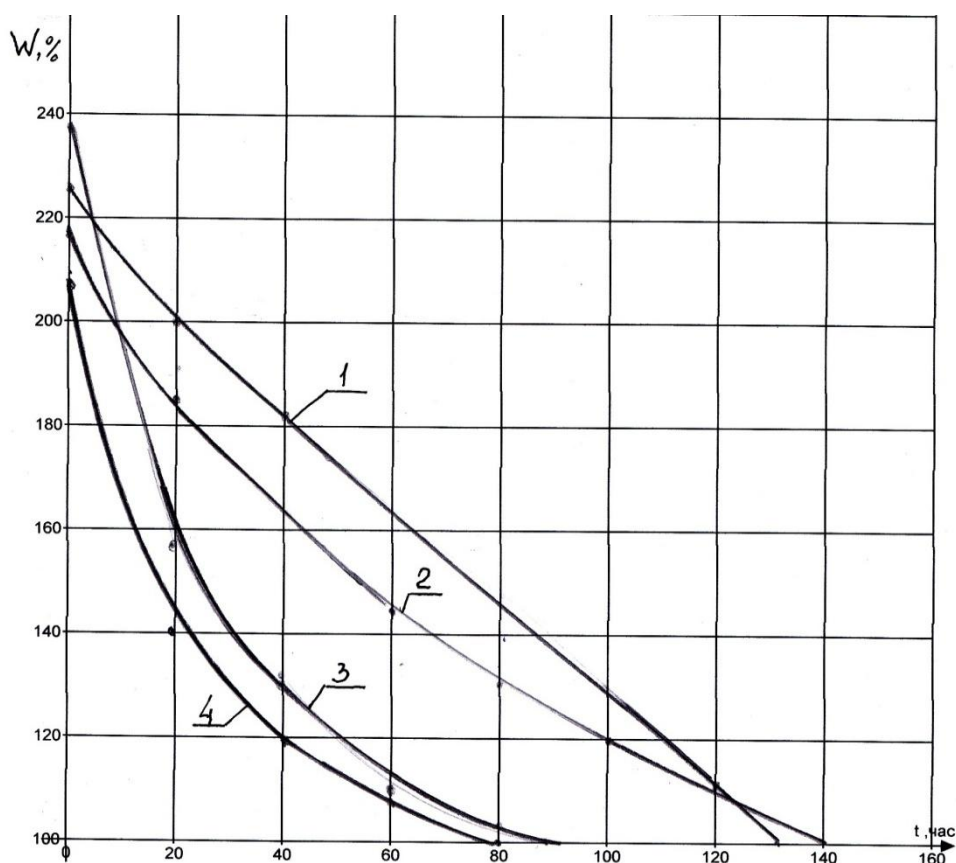


Рис.3. Кривые обезвоживания при сушке чехони.

1 - $t=20^{\circ}\text{C}$, $d= 7,4 \text{ Г}_{\text{ВЛ}}/\text{КГ}_{\text{СУХ.ВОЗД}}$, 2 - $t=20^{\circ}\text{C}$, $d= 10,8 \text{ Г}_{\text{ВЛ}}/\text{КГ}_{\text{СУХ.ВОЗД}}$,
 3 - $t=30^{\circ}\text{C}$, $d= 10,8 \text{ Г}_{\text{ВЛ}}/\text{КГ}_{\text{СУХ.ВОЗД}}$, 4 - $t=30^{\circ}\text{C}$, $d= 7,4 \text{ Г}_{\text{ВЛ}}/\text{КГ}_{\text{СУХ.ВОЗД}}$,

недостаточным потенциалом термовлагопроводности. Повышение температуры воздуха до 30°C, кривая 3, интенсифицирует процесс, но также приводит к ухудшению условий сушки (кривая 3 и 4) исследуемых объектов, так как пересушивание поверхностных слоев приводит к образованию «корки», препятствующей термовлагодиффузии.

Изменение влагосодержания воздуха в сушильной установке (от 10,8 до 7,4 Г_{вл}/кг_{сух.возд}) также приводит к интенсификации процесса сушки (кривые 1 и 2, 3 и 4), поэтому значения влияющих факторов температуры и влажности воздуха, следует считать рациональными (близкими к оптимальным) для процесса.

Естественно, что кривые кинетики сушки для всех видов исследуемых рыб имеют характер зависимостей, аналогичный данным рис. 3,4. При этом для них справедливы те же рассуждения о происходящей физике процесса обезвоживания. Кривые 3 и 4 (рис. 4,5) более наглядно отображают характерные периоды обезвоживания материала. В начальный период скорость сушки достаточно высока, т.к. в этот период удаляется поверхностная влага и влага из поверхностных слоев рыбы, нет

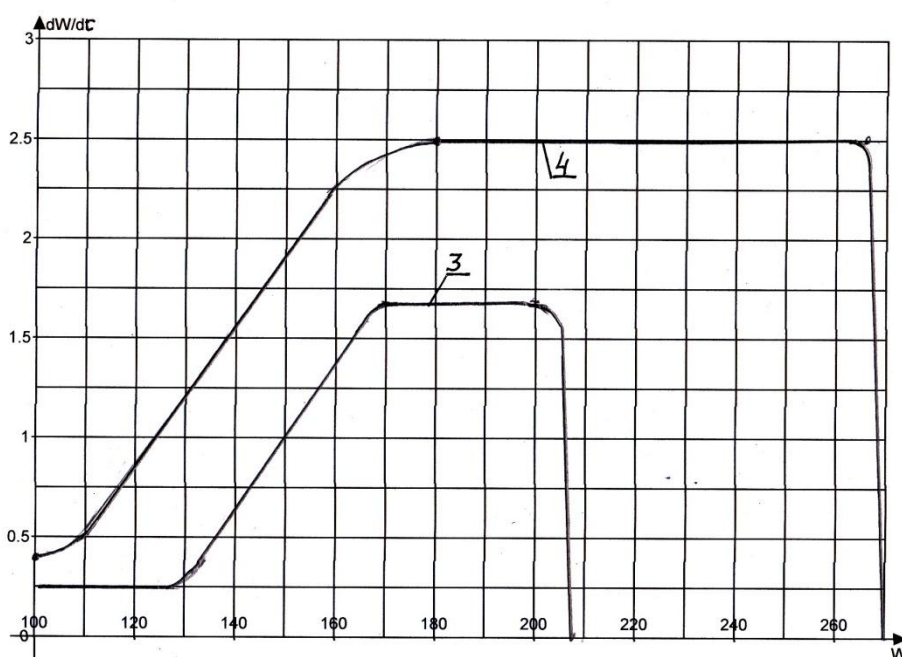


Рис.4. Кривые скорости сушки плотвы

3- при $t = 20^{\circ}\text{C}$ $d = 10,8$ Г_{вл}/кг_{сух.возд}, 4 - при $t = 30^{\circ}\text{C}$ $d = 7,4$ Г_{вл}/кг_{сух.возд}

поверхностной «корки», препятствующей термовлагодиффузии. Во втором периоде скорость обезвоживания падает, что объясняется образованием «корки», препятствующей термовлагодиффузии. Период постоянной скорости обезвоживания, для которого $dW^{\circ}/dt = N = \text{Const}$, наступает при $t = 20^{\circ}\text{C}$ $d = 10,8$ Г_{вл}/кг_{сух.возд} в интервале влажности плотвы от 132% до 100%, чехони от 150% до 100%, что объясняется различной структурой (толщиной и плотностью кожного покрова, размером чешуи) и свойствами объекта обработки (начальной влажностью, соленостью и жирностью).

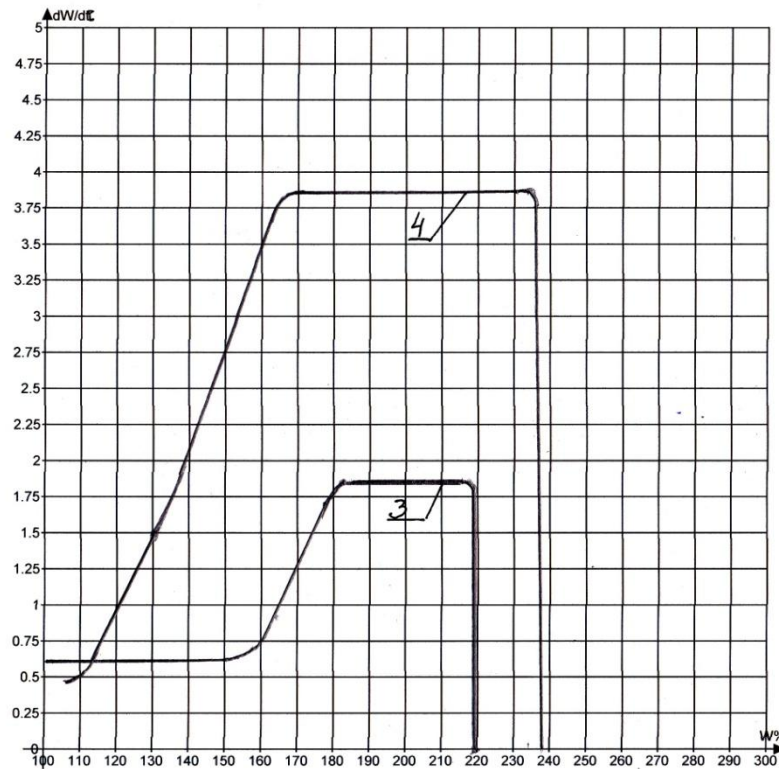


Рис.5. Кривые скорости сушки чехони
 3- при $t = 20^{\circ}\text{C}$ $d = 10,8 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$, 4 - при $t = 30^{\circ}\text{C}$ $d = 7,4 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$

При режиме сушки $t = 30^{\circ}\text{C}$ $d = 7,4 \text{ г}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{сух.возд}}$ в начальный период скорость сушки достаточно высока, т.к. в этот период удаляется поверхностная влага и влага из поверхностных слоев рыбы, нет «корки», препятствующей термовлагодиффузии. Далее скорость сушки постоянно падает, при значениях, соответствующих влажности плотвы 105 %, чехони 100% и окуня 105% , что объясняется более высокой температурой и более низкой влажностью воздуха, образованием «корки» препятствующей термовлагодиффузии. В данном случае параметры, соответствующие кривой 4, характеризуют более интенсивный режим обезвоживания материала. Период падающей скорости обезвоживания (левая часть рис.4,5) имеет вид, присущий однородному капиллярно-пористому телу [1].

Сопоставление кривых кинетики этих видов рыбы показывает их различие, связанное с характером кривых периода падающей скорости обезвоживания, что объясняется различием структур и свойств сопоставляемых объектов.

Обработка результатов экспериментов

В процессе сушке при вялении и холодном копчении рыбы влияющими факторами процесса являются температура и влажность воздуха в сушильной установке.

В качестве параметра оптимизации выбрана скорость обезвоживания продукта $V \text{ \%}/\text{ч}$, характеризующая скорость удаления влаги за процесс:

$$v = W_0^c - W_\varepsilon^h / \tau, \quad (3)$$

где: W_0^c ; W_ε^h – начальная и конечная влажность продукта, отнесенная к сухой массе, %; τ – продолжительность сушки, час.

При этом ставилась задача, при каких параметрах процесса будет обеспечена минимальная ее продолжительность и максимальная производительность установки по готовому продукту. Ограничением является конечная влажность продукта по ГОСТ и его качество.

При определении вида уравнения регрессии исходили из предпосылки, что если поверхность, на которой находится искомая точка оптимального соотношения режимных параметров сушки криволинейна, то варьируя факторами можно получить возможность с минимальной ошибкой аппроксимировать эту поверхность полиномом второго порядка [4]:

$$y = b_0 + \sum_{i \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{i \leq i \leq k} b_{ii} x_i x_i + \sum_{i \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (4)$$

где y – обобщенный параметр оптимизации;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ii} – коэффициенты регрессии;

x_i, x_i – кодированные значения факторов.

В соответствии с известным методом планирования был реализован центральный композиционный план эксперимента второго порядка. Уровни и интервалы варьирования факторами представлены в табл.1. Матрица планирования и результаты опытов представлены в табл. 2,3.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторами

Факторы	Кодовые обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			Основной 0	Верхний +1	Нижний -1
Т-температура воздуха, °С	x_1	10	25	30	20
Влагосодержание воздуха, Г _{вл} /кг _{сух.возд}	x_2	3,4	9,1	10,8	7,4

Таблица 2 – Результаты опытов по сушке плотвы

№ п/п	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	плотва, $W_k=100\%$			
						$W_n, \%$	$\Delta W, \%$	$\tau, \text{ час}$	y
1.	-1	-1	+1	+1	+1	237,8	137,8	146	0,943
2.	-1	0	0	+1	0	238,4	138,4	122	1,134
3.	-1	+1	-1	+1	+1	235,5	135,5	152	0,891
4.	0	-1	0	0	+1	270,3	170,3	101	1,686
5.	0	0	0	0	0	263,6	163,6	102	1,603
6.	0	+1	0	0	+1	244,8	144,8	111	1,304
7.	+1	-1	-1	+1	+1	257,1	157,1	90	1,754
8.	+1	0	0	+1	0	227,8	127,8	88	1,452
9.	+1	+1	+1	+1	+1	263,6	163,6	100	1,636

Таблица 3 – Результаты опытов по сушке чехони

№ п/п	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	чехонь, W _к =100%,			
						W _н ,%	ΔW,%	τ, час	y
1.	-1	-1	+1	+1	+1	233,3	133,3	138	0,965
2.	-1	0	0	+1	0	270,3	170,3	120	1,419
3.	-1	+1	-1	+1	+1	203	103	158	0,652
4.	0	-1	0	0	+1	233,3	133,3	130	1,025
5.	0	0	0	0	0	252,1	152,1	120	1,267
6.	0	+1	0	0	+1	233,3	133,3	145	0,919
7.	+1	-1	-1	+1	+1	257,1	157,1	88	1,785
8.	+1	0	0	+1	0	212,5	112,5	90	1,25
9.	+1	+1	+1	+1	+1	244,8	144,8	110	1,316

Реализация плана экспериментов и обработка полученных данных, проведенная с помощью компьютерной программы DataFit Ver. 9.0.59, позволила получить следующие уравнения регрессии, адекватно описывающие влияние факторов на темп вакуумной сушки.

В натуральных значениях факторов для плотвы уравнение имеет вид:

$$V = -6,4781 + 0,5388 t + 0,1665 d - 0,00194 t d - 0,0092 t^2 - 0,0094 d^2 \quad (5)$$

В натуральных значениях факторов для чехони уравнение имеет вид:

$$V = -1,9003 - 0,2361 t + 1,2976 d - 0,0046 t d + 0,0064 t^2 - 0,0698 d^2 \quad (6)$$

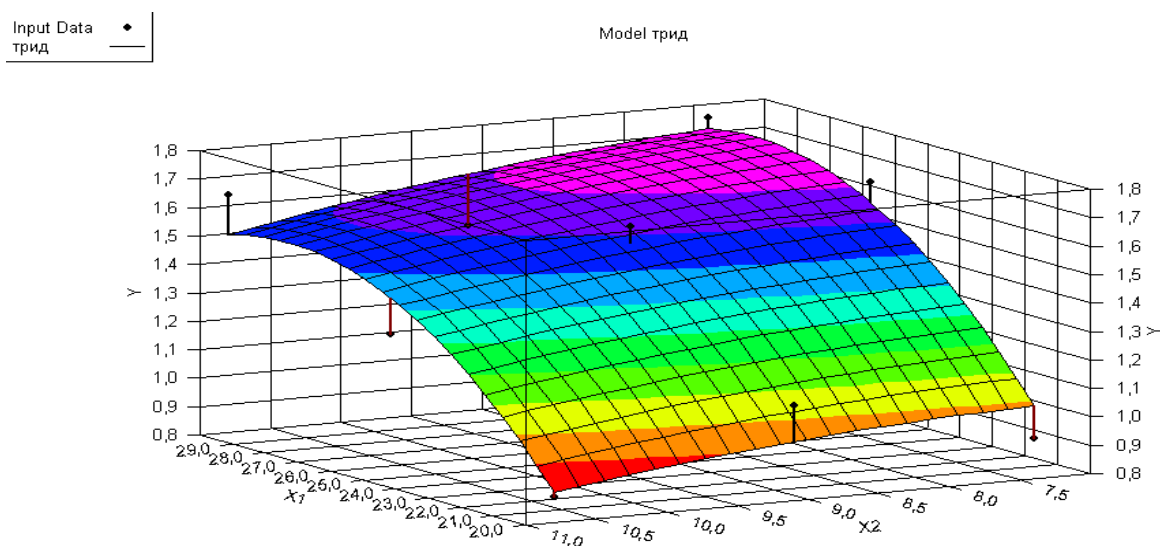


Рис.6. Поверхности функции отклика $y(x_1, x_2)$ в выбранной области факторного пространства для плотвы

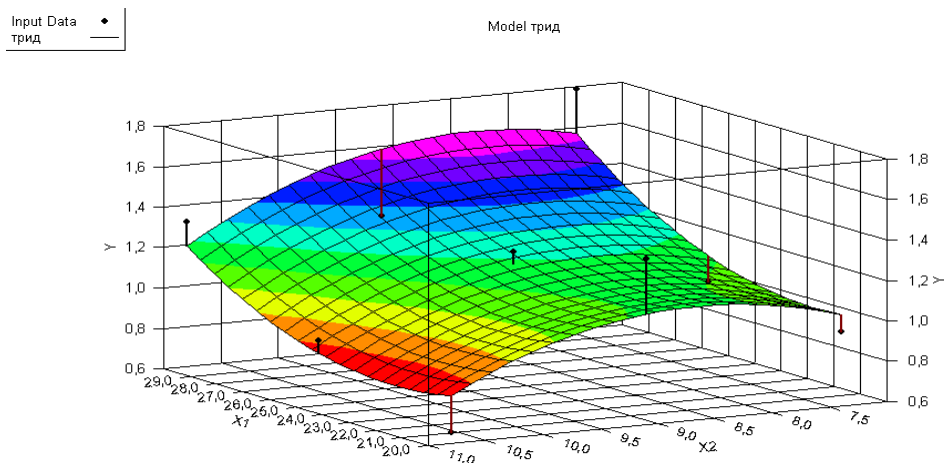


Рис.7. Поверхности функции отклика $y(x_1; x_2)$ в выбранной области факторного пространства для чехони

Полученные уравнения регрессии позволяют не только предсказать значение функции отклика для заданных условий реализации процесса сушки рыбы, но и дают информацию о форме поверхности отклика, которые представлены на рис.6,7.

Заключение

Получены и обработаны экспериментальные данные по кинетике сушки плотвы и чехони. Установлены рациональные параметры процесса сушки исследуемых объектов.

Получены уравнения регрессии, описывающее влияние режимных параметров сушки на темп обезвоживания исследуемых объектов.

Список литературы

1. Баранов В.В., Бражная И.Э., Гроховский В.А. и др. Технология рыбы и рыбных продуктов: под ред. А.М.Ершова. СМб, ГИОРД, 944 с., 2006.
2. Воскресенский Н.А. Посол, копчение и сушка рыбы.- М.: Пищевая промышленность.1966.- с.563.
3. Никитин Б.Н. Основы теории копчения рыбы. М. Легкая и пищевая промышленность,1982. с.240.
4. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. Свердловск, УПИ им. Кирова, 140 с., 1975.
5. A.Suslov, J.Fatychov, V.Erlichman. The peculiar features of the drying process in the heat pump drying installation: Научный журнал СПбГУНИПТ. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств (электронный журнал) /ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий.» . выпуск №2. сент. 2009. Режим доступа к журн.: <http://www.open-mechanics.com/journals> свободный.