

## Исследование процесса сушки креветки

А.Э. Суслов, Н.В. Точенова, А.С. Бестужев, Ю.А. Фатыхов

ФБГОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»

*Разработаны экспериментальная установка для вакуумной сушки сырья и методика проведения опытов. Получены данные по кинетике сушки очищенной морской креветки и морской креветки без головы в зависимости от различных параметров процесса. В процессе вакуумной сушки влияющими факторами являются температура греющих плит и давление внутри аппарата. Методом планирования эксперимента получена их взаимосвязь с темпом обезвоживания морской креветки в виде полинома второго порядка.*

**Ключевые слова:** вакуумная сушка, морская креветка, экспериментальная установка, получение пищевой добавки, планирование эксперимента.

## Research of shrimps drying process

A.Suslov, N. Tochenova, A. Bestuzhev, 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 peeled shrimps and headless shrimps drying depending on different process parameters have been obtained. During the process of vacuum drying the influence factors are: the temperature of heating plates and pressure inside the unit. By means of planning experiment there were obtained their interconnection with the dehydration rate of shrimps in the mode of the second order polynomial.*

**Keyword:** vacuum drying, shrimps, experimental apparatus, obtain a food additive, planning of experiment.

### 1. Введение

Сушка является одним из способов консервирования пищевых продуктов, в том числе и гидробионтов. В рыбной промышленности сушка широко используется при вялении, копчении, производстве рыбной муки и других процессах. В последнее время сушка все более широко используется при производстве различных вкусовых добавок.

Несмотря на большое разнообразие научных работ по исследованию процесса сушки гидробионтов, на сегодняшний день процесс сушки морской креветки изучен недостаточно. Сушёная креветка относится к дорогостоящим видам снеков и вкусовых добавок. Значительное влияние на себестоимость этой продукции оказывают энергозатраты. Поэтому, исследования в области разработки энергосберегающих режимов сушки морской креветки при высоком качестве продукции, представляет научный и практический интерес.

Задачей настоящего исследования являлось определение энергосберегающих режимных параметров процесса сушки креветки для производства натуральной вкусовой добавки. Анализ энергоёмкости процесса, условий достижения необходимого качества продукции показал, что наиболее целесообразной является вакуумная сушка.

Исследовались процессы сушки, как мяса креветки, так и креветки в панцире без головы. На основе изучения литературных источников была установлена конечная влажность продукта, которая составляет 10-12%.

Исследование множества кривых кинетики обезвоживания в зависимости от способа разделки креветки, применяемого типа сушки и режимных параметров процесса позволили выбрать наиболее рациональные условия ведения процесса. На основании полученных экспериментальных результатов разработаны математические модели для сушки морской креветки в вакуумной установке. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние режимных параметров вакуумной сушки на темп обезвоживания продукта.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование процесса сушки креветки при внедрении их в рыбной промышленности, позволят расширить ассортимент отечественных вкусовых добавок, улучшить качество и снизить их себестоимость.

## **2. Описание экспериментальной установки и методики проведения опытов**

Принципиальная схема экспериментальной установки для вакуумной сушки представлена на рис. 1.

Сушильная вакуумная установка включает в себя:

- Сушильную вакуумную камеру. Сушильная вакуумная камера (1) представляет собой цилиндрическую вертикально расположенную камеру, выполненную из нержавеющей стали. Сверху камера герметично закрывается крышкой. Внутри вакуумной камеры размещен теплообменник (4) механически связанный с крышкой, на который устанавливаются поддоны с высушиваемым продуктом. Для обеспечения загрузки и выгрузки вакуумной камеры крышка с теплообменником поднимается механизмом подъема.

- Теплообменник. В качестве теплообменника (4) используется трубчатый теплообменник, изготовленный из алюминиевого сплава состоящий из четырех параллельно соединенных секций. Внутри теплообменника циркулирует горячая вода, подогреваемая водонагревателем (10). Водонагреватель снабжен аварийным датчиком температуры, отключающим нагреватель при достижении предельно допустимой температуры греющей воды. Циркуляция воды в

трубчатом теплообменнике обеспечивается водяным циркуляционным насосом (3).

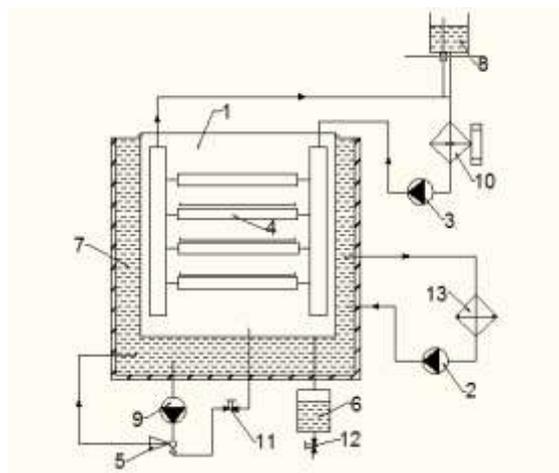


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной сушильной вакуумной установки

1-сушильная вакуумная камера, 2,3- насосы водяные циркуляционные, 4-греющие плиты (теплообменник), 5-эжектор водяной, 6-бак водосборник, 7-охлаждающий контур сушильной установки, 8-бак расширительный, 9-насос водяной, 10-водонагреватель, 11,12-вакуумные вентиля, 13-испаритель холодильной машины.

- Водяной эжектор. Вакуумирование и поддержание необходимого давления в сушильной камере в процессе сушки обеспечивается водяным эжектором (5) с насосом (9).

- Конденсатор. Конденсатором служит внутренняя поверхность цилиндрической вакуумной камеры. Стенки вакуумной камеры (водяной контур 7) охлаждаются водой. Для охлаждения воды используется испаритель (13). Циркуляция воды по системе обеспечивается циркуляционным насосом (2). Конденсат, поступающий из камеры, накапливается в баке водосборнике (6).

Установка работает следующим образом.

Продукт раскладывается равномерным слоем на сетчатые поддоны. Поддоны устанавливаются в теплообменник (4) между греющими плитами. Теплообменник с поддонами опускается в вакуумную камеру (1). Вакуумная камера герметично закрывается. Для создания необходимого абсолютного давления в сушильной вакуумной камере (1) включается водяной эжектор (5), насос (9) и открывается вакуумный вентиль (11). Для нагрева греющих плит включается водонагреватель (10) и насос (3). Для охлаждения воды включаются в работу холодильная машина (испаритель 13) и насос (2). Между конденсатором (внутренняя поверхность вакуумной камеры) и греющими плитами создается разность температур. В процессе сушки влага из продукта испаряется и конденсируется на внутренней поверхности вакуумной камеры, стекая в бак-водосборник (6). После выхода на режим сушки температура на греющих плитах и давление внутри вакуумной камеры поддерживаются

автоматически и могут меняться при необходимости приборами контроля и управления.

Для измерения давления, температуры в сушильной камере и в продукте используются следующие приборы:

- для измерения давления в сушильной камере используется измерительный преобразователь давления Элемер АИР-20. Аир-20 оборудован интерфейсом RS232 для связи с компьютером;

- для измерения температуры греющих плит внутри сушильной камеры и продукта используются платиновые термометры сопротивления (термометры сопротивления для измерения температуры внутри продукта и для измерения температуры греющих плит). Поступающие от датчиков температуры сигналы поступают на микроконтроллер Термодат-13Е1. Термодат оборудован интерфейсом RS485 для связи с компьютером.

В качестве объекта исследования были выбраны варенные морские креветки в панцире без головы и мясо вареной морской креветки.

Для измерения температуры в центре креветки устанавливали термометры сопротивления.

Вначале эксперимента измеряли начальную влажность продукта. Продукт раскладывали равномерным одинарным слоем на сетчатые поддоны. Поддоны устанавливали в вакуумную камеру на греющие плиты. Камеру герметично закрывали, установку запускали в работу. После выхода на режим (на заданное абсолютное давление) значения температуры в центре разделанной креветке фиксировались через каждые 15 минут.

В процессе сушки по истечении определенного времени вскрывали камеру и измеряли промежуточную влажность креветки, в конце процесса сушки замеряли конечную влажность продукта.

### **3. Результаты исследований**

#### **3.1 Кинетика сушки креветки**

Проведен комплекс экспериментальных исследований на специально созданной установке. В процессе сушки креветки контролировали абсолютное давление, температуру в центре морской креветки и температуру греющих плит по центру поддона. Было установлено, что колебания температуры по площади поддона незначительно.

Параметры процесса вакуумной сушки ( $T$  - температура греющих плит- 70, 80, 90<sup>0</sup>С и  $P$  - абсолютное давление - 1.6, 2.0, 2.4 кПа) определены экспериментально, как наиболее целесообразные. По результатам проведенных экспериментов при различных режимах получены кривые сушки, обработка которых позволила оптимизировать режимы обезвоживания при сохранении высоких качественных показателей сушеной креветки.

На рис.2,3,4,5 представлены термограммы и кривые сушки продукта, построенные по экспериментальным данным для различных значений температуры греющих плит вакуумной сушильной установки. Поскольку в вакуумных аппаратах затруднен отбор проб исследуемого продукта для

определения его текущей влажности, для построения кривых сушки в основу расчета принимали оба значения влажности – начальное и конечное, это позволило распределить погрешность эксперимента на всю длину кривой сушки, снижая ошибку при дальнейшей ее обработке [1]. Кроме того, ряд экспериментов прерывали для контрольного определения текущей влажности исследуемого образца.

По представленным графикам (рис. 2,3,6) для мяса морской креветки и по графикам (рис. 4,5,7) для морской креветки в панцире без головы процесс вакуумной сушки можно охарактеризовать наличием четырех периодов: охлаждение, нагрев, постоянная скорость сушки, падающая скорость сушки.

На рис.3 видно, что кривые сушки имеют вид, характерный для коллоидных капиллярно-пористых тел, к которым относятся исследуемые продукты. При постоянной величине абсолютного давления внутри сушильной камеры термовлагопроводность, как известно [2], определяется молекулярной термодиффузией влаги за счет перемещения влаги из-за разной скорости молекул различно нагретых слоев продукта и капиллярной проводимости, возникающей из-за изменения капиллярного потенциала.

По температурным кривым (рис. 2,4) видно, что в первом периоде происходит снижение температуры креветки в течение 12-15 мин. за счет интенсивного испарения влаги с поверхности продукта.

Влияние температуры греющих плит вакуумной сушильной установки (при  $P=2,4$  кПа) видно из сопоставления кривых 1, 2, 3 рис.3, 5. При  $T = 70$  °С процесс сушки продукта характеризуется низкой интенсивностью (кривая 3), что объясняется недостаточным потенциалом термовлагопроводности.

Изменение абсолютного давления внутри сушильной установки (1,6 и 2,0 КПа) также не приводит к значительной интенсификации процесса, поэтому значения влияющих факторов, соответствующих данным кривой 1 (рис.3,5) следует считать рациональными (близкими к оптимальным) для процесса вакуумной сушки мяса морской креветки.

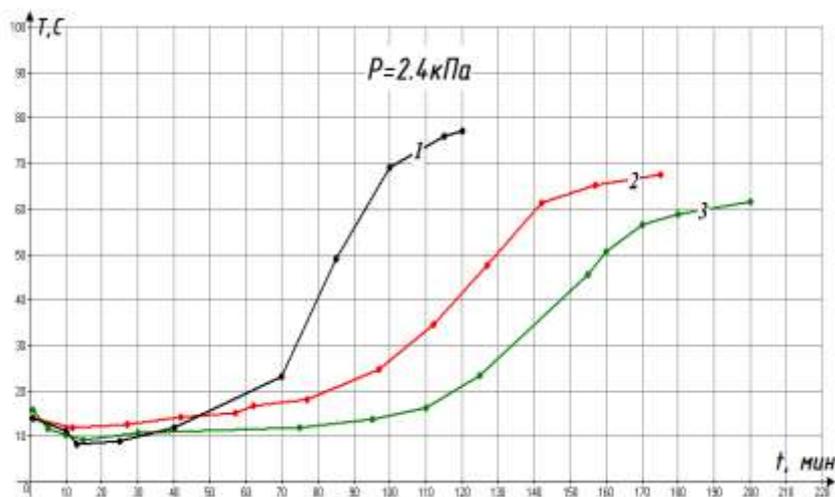


Рис.2. Термограммы (1, 2, 3) мяса морской креветки ( $P=2,4$ кПа) при различных значениях температуры греющих плит 1 –  $T = 90^{\circ}\text{C}$ ; 2–  $T=80^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T = 70^{\circ}\text{C}$ ;

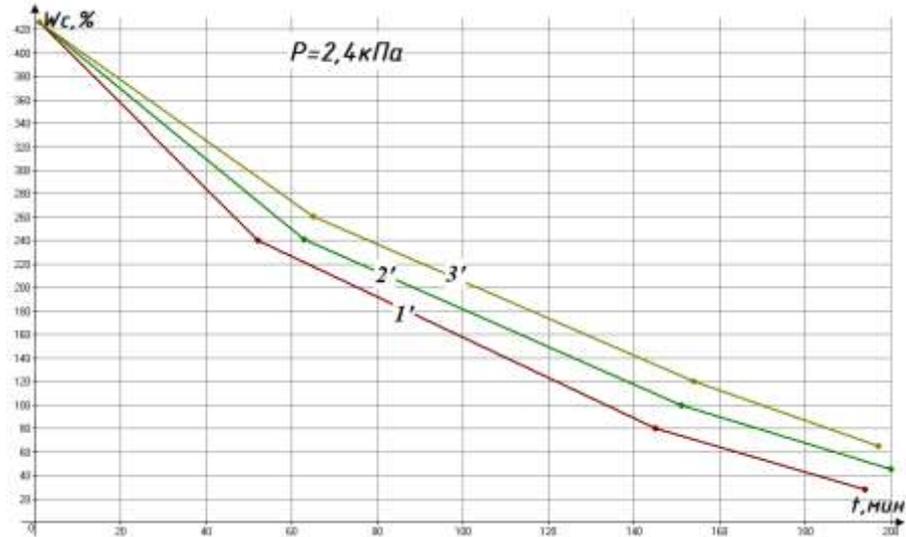


Рис.3 Кривые сушки (1', 2', 3') мяса морской креветки ( $P=2,4 \text{ kPa}$ ) при различных значениях температуры греющих плит 1' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 90^\circ\text{C}$ ; 2' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 80^\circ\text{C}$ ; 3' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$

На рис.4 представлены термограммы, характеризующие процесс сушки морской креветки в панцире без головы. Исходя из аналогичных рассуждений, наиболее рациональным следует признать процесс сушки исследуемого объекта с параметрами, соответствующими кривой 1.

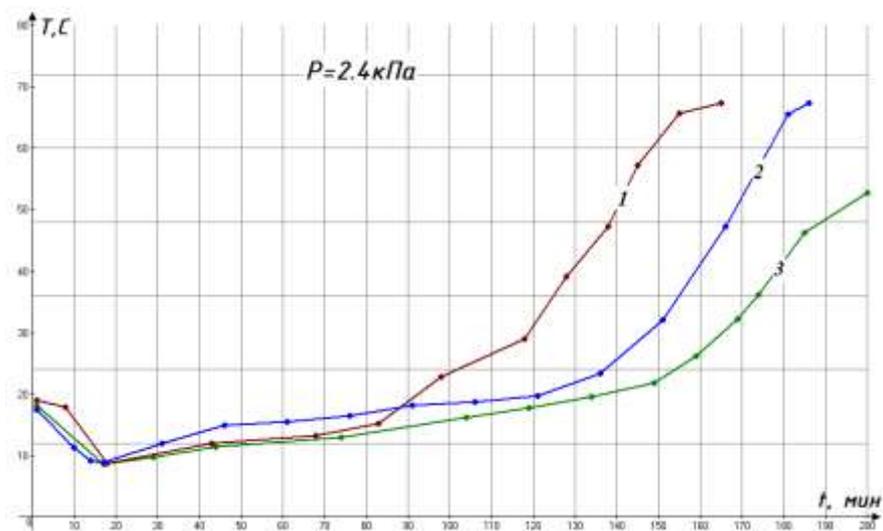


Рис.4. Термограммы (1,2, 3) морской креветки в панцире без головы ( $P=2,4 \text{ kPa}$ ) при различных значениях температуры греющих плит 1 –  $T = 90^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 80^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 70^\circ\text{C}$ .

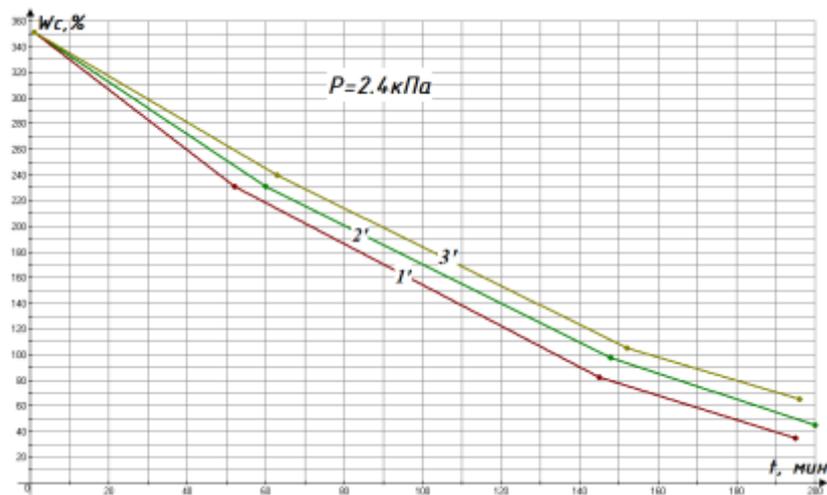


Рис.5 Кривые сушки (1', 2', 3') морской креветки в панцире без головы при различных значениях температуры греющих плит 1' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 90^\circ\text{C}$ ; 2' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 80^\circ\text{C}$ ; 3' –  $W^c(\tau)$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$ .

На рис.6 представлены кривые кинетики сушки мяса морской креветки. Значения текущей влажности материала  $W^c$  вычисляли по отношению массы влаги в продукте к массе абсолютно сухого вещества. Естественно, что кривая сушки мяса морской креветки 1 имеет характер зависимости, аналогичный данным рис.3. При этом для неё справедливы те же рассуждения о происходящей физике процесса обезвоживания. Кривая 1 рис.6 характеризует закономерность изменения скорости сушки  $dW^c/d\tau = f W^c$  и более наглядно отображает характерные периоды обезвоживания материала. Период прогрева, который часто исключают из анализа процесса [2] соответствует правой части кривой 1 рис.6. Период постоянной скорости обезвоживания, для которого  $dW^c/d\tau = N = \text{Const}$ , показывает, что при одинаковых свойствах объекта обработки величина  $N$  определяется режимными параметрами процесса.

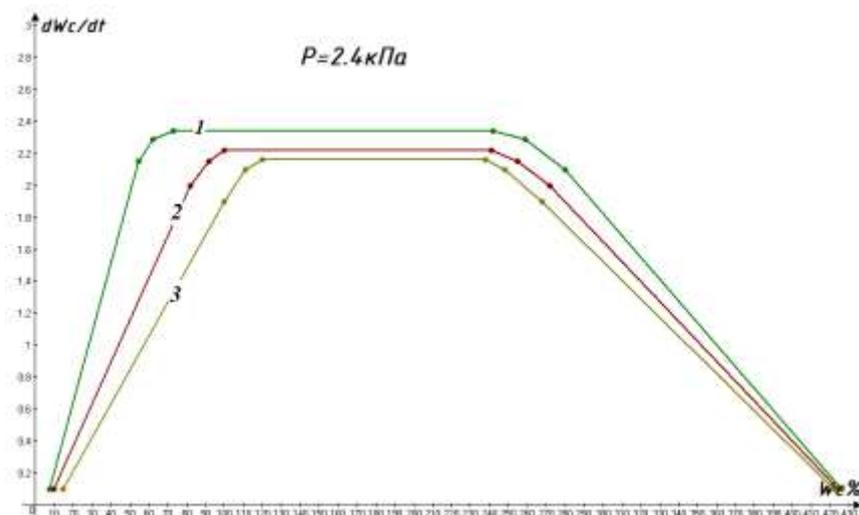


Рис.6. Кривые скорости сушки мяса креветки (1 -  $T = 90^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T = 80^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T = 70^\circ\text{C}$ )

Период подающей скорости обезвоживания (левая часть рис.6) имеет вид, присущий однородному капиллярно-пористому телу [2].

На рис. 7 представлена кривая кинетики сушки морской креветки в панцире без головы. Сопоставление данных рис.6 и 7 показывают их качественное совпадение, за исключением небольших отличий в характере кривых, соответствующих периоду падающей скорости обезвоживания. Как отмечалось выше, вероятно это связано с различием в этих продуктах процесса обезвоживания микрокапиллярной осмотически связанной влаги. Различная скорость сушки объектов исследования (рис.6, 7) связана с различием исследуемых образцов по начальному влагосодержанию и виду разделки.

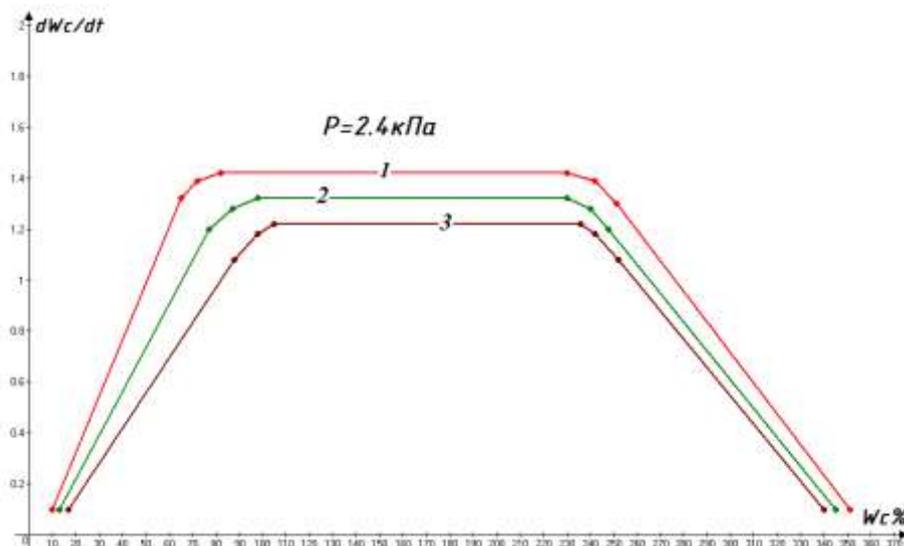


Рис.7. Кривые скорости сушки креветки в панцире без головы (1 -  $T=90^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T=80^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T=70^\circ\text{C}$ )

По кривым скорости сушки (рис 6,7) видно, что в начале периода прогрева происходит интенсивное испарение влаги из креветки. Удаляется поверхностная влага и влага макро- и микрокапилляров, переходных макропор. Скорость сушки в этот период имеет максимальное значение-2,4%/мин. для мяса креветки и 1,6%/мин.- для креветки в панцире без головы. Период постоянной скорости сушки характеризуется удалением большего количества влаги, чем в других периодах. Начало периода падающей скорости сушки, соответствует критическому влагосодержанию материала. В это время происходит удаление влаги наиболее прочно связанной с продуктом. Интенсивность испарения уменьшается, скорость сушки замедляется, температура в толще продукта становится равной температуре на поверхности. Из рис. 6,7 видно, что скорость сушки падает и в конце периода имеет минимальное значение. В конце этого периода достигается равновесная влажность креветки, процесс сушки прекращается.

### 3.2. О влиянии режимных параметров

При вакуумной сушке влияющими факторами процесса являются температура греющих плит сушильной установки - Т и абсолютное давление внутри камеры аппарата - Р.

В качестве параметра оптимизации выбираем темп обезвоживания продукта, характеризующий скорость удаления влаги за процесс:

$$V = (W_0^c - W_e^c) / \tau, \quad (1)$$

где  $W_0^c$ ;  $W_e^c$  – начальная и конечная влажность продукта, отнесенная к сухой массе, %;

$\tau$  – продолжительность сушки, мин.

При этом ставилась задача, определить при каких параметрах процесса будет обеспечена минимальная его продолжительность, т.е. максимальная производительность установки по готовому продукту. Ограничением являлись конечная влажность продукта 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 [3]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

где  $y$  – обобщенный параметр оптимизации;

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

$x_1, x_2$  – кодированные значения факторов.

В соответствии с известным методом планирования был реализован полный факторный эксперимент типа  $3^2$ . Уровни и интервалы варьирования факторами представлены в табл. 1

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторами

Факторы	Кодированные обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			Основной 0	Верхний +1	Нижний -1
Т-температура греющих плит, °С	$x_1$	10	80	90	70
Р- абсолютное давление внутри аппарата, кПа	$x_2$	0,4	2,0	2,4	1,6

Матрица планирования и результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты опытов по сушке очищенной креветки и креветки без головы.

№ п/п	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Мясо креветки, W <sub>o</sub> <sup>c</sup> =426%			Креветка в панцире без головы, W <sub>o</sub> <sup>c</sup> =351%		
						W <sub>k</sub> <sup>c</sup> , %	τ, мин	у	W <sub>k</sub> <sup>c</sup> , %	τ, мин	у
1.	-1	-1	+1	+1	+1	18,3	174	2,3	39,18	174	1,79
2.	-1	0	0	+1	0	43,7	150	2,55	57,7	150	1,95
3.	-1	+1	-1	+1	+1	8,8	200	2,08	22,3	200	1,64
4.	0	-1	0	0	+1	53	108	3,45	49	108	2,79
5.	0	0	0	0	0	9,3	162	2,57	49,25	162	1,86
6.	0	+1	0	0	+1	7,7	181	2,31	23,3	181	1,81
7.	+1	-1	-1	+1	0	18,1	138	2,95	23,4	138	2,37
8.	+1	+	0	+1	0	22,1	135	2,99	66,1	135	2,11
9.	+1	+1	+1	+1	+1	52,4	115	3,25	82,5	115	2,33

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 кодированных значениях факторов

Для мяса креветки

$$y = 2,615 + 0,335x_1 - 0,0921x_2 + 0,0883x_1 \cdot x_2 + 0,132 \cdot x_1^2 - 0,127x_2^2 \quad (3)$$

Для креветки в панцире без головы

$$y = 1,886 + 0,193x_1 - 0,092x_2 - 0,04x_1x_2 + 0,13x_1^2 - 0,045x_2^2 \quad (4)$$

В натуральных значениях факторов

Для мяса креветки

$$V = 9,185 - 0,221T + 1,183 P + 0,022TP + 0,0013T^2 - 0,795 P^2 \quad (5)$$

Для креветки в панцире без головы

$$V = 6,393 - 0,169T + 1,696 P - 0,01TP + 0,001T^2 - 0,281P^2 \quad (6)$$

Полученные уравнения регрессии позволяют не только предсказать значение функции отклика для заданных условий реализации процесса вакуумной сушки мяса креветки и креветки в панцире без головы. но и дают информацию о форме поверхности отклика, которые представлены на рис.8 и 9.

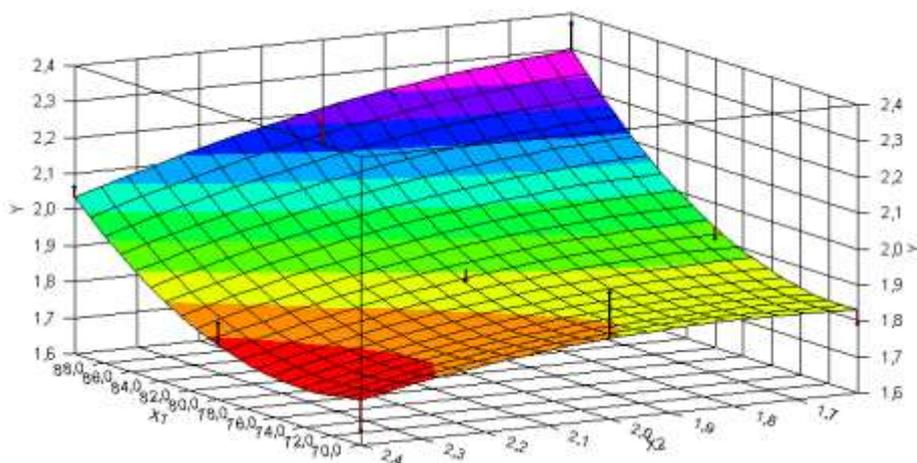


Рис.8. Поверхности функции отклика  $y(x_1; x_2)$  в выбранной области факторного пространства для креветки в панцире без головы

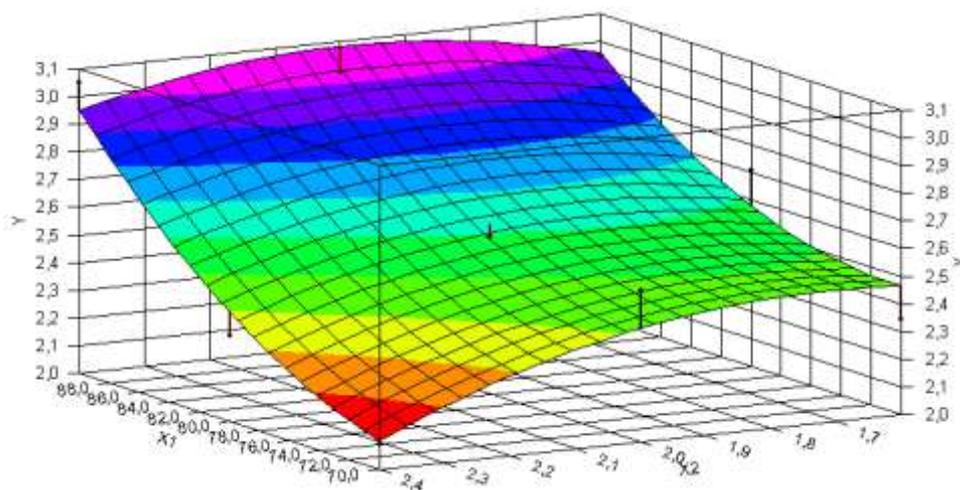


Рис.9 Поверхности функции отклика  $y(x_1; x_2)$  в выбранной области факторного пространства для мяса креветки

## Заключение

Разработана экспериментальная вакуумная сушильная установка для сушки морской креветки. Обоснована методика проведения экспериментов на ней.

Предложен и обоснован способ получения мяса сушеной морской креветки, которое может использоваться при приготовлении натуральной вкусовой пищевой добавки.

Получены и обработаны экспериментальные данные по кинетике сушки мяса морской креветки и морской креветки в панцире без головы.

Установлены кинетические закономерности вакуумной сушки мяса морской креветки и креветки в панцире без головы при различных параметрах процесса: абсолютном давлении  $P=1,6 \dots 2,4$  кПа, температуре греющих плит  $T=70 \dots 90^\circ\text{C}$ .

Разработана математическая модель процесса вакуумной сушки мяса морской креветки и креветки в панцире без головы, устанавливающая взаимосвязь параметров процесса: абсолютного давления  $P$  и температуры

греющих плит Т в вакуумной сушильной установке на темп обезвоживания продукта.

Установлены рациональные параметры процесса вакуумной сушки мяса морской креветки и креветки в панцире без головы  $P=1,6$  кПа,  $T=90^{\circ}\text{C}$ .

### **Список литературы**

1. Антипов С.Т., Воронин А.А., Кумицкий А.С. и др. Исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания пищевых продуктов при различных способах энергоподвода. Вестник МАХ, вып. 2. 2007.- С.44-47.
2. Баранов В.В., Бражная И.Э., Гроховский В.А. и др. Технология рыбы и рыбных продуктов: под ред. А.М.Ершова. СПб, ГИОРД. 2006.-С.944.
3. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. Свердловск, УПИ им. Кирова. 1975.-С.140.