

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СУШЕНЫХ ПОРИСТЫХ ПРОДУКТОВ ИЗ РЫБНОГО СЫРЬЯ

А.А. Яшонков

*Уменьшение объемов вылова рыбного сырья требует от промышленных предприятий применения современных безотходных энергоэффективных способов его переработки и консервирования. Одним из широко применяемых способов консервирования рыбного сырья является производство сушеной продукции. Классическая технология сушки рыбного сырья является в достаточной степени энергозатратной. Автором предложен способ снижения энергозатрат при производстве сушеных рыбных продуктов путем предварительного порообразования в исходном сырье, которое позволит увеличить площадь поверхности испарения влаги. Разработана конструкция и изготовлена лабораторная установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования по порообразованию и вакуумной сушке исходного сырья, а также сушке исходного сырья при атмосферном давлении. В статье приведены результаты разработки и проведения многофакторного эксперимента; определены рациональные параметры процесса порообразования и сушки на примере производства снеков из фарша бычка кругляка (*Neogobius melanostomus*). Получена регрессионная зависимость продолжительности процесса порообразования и сушки от давления и температуры в рабочей камере, а также плотности набивки снеков. Для найденных параметров построены экспериментальные кривые сушки и скорости сушки, визуально показано изменение влагосодержания при порообразовании.*

*Ключевые слова: переработка рыбного сырья, снеки, рыбный фарш, вакуумная сушилка, многофакторный эксперимент, рациональные параметры процесса, сушка, продолжительность сушки, энергоэффективность процесса сушки, порообразование.*

Современное состояние рыбодобывающей отрасли и снижение объемов вылова рыбного сырья [1] требует от рыбоперерабатывающих предприятий разрабатывать и внедрять новые безотходные способы переработки гидробионтов. Одним из наиболее энергозатратных процессов при переработке рыбного сырья является процесс сушки. В настоящее время в промышленных масштабах процессы сушки и их аппаратное обеспечение практически не соответствует современным требованиям пищевой промышленности [2]. Автором был предложен новый способ [3] получения сушеных пористых продуктов на основе рыбного сырья при температуре 55°C. Это позволило сохранить в готовом продукте термолабильные витамины, а также добавлять на стадии производства биологически активные добавки [4].

Предложенный автором способ получения сушеных пористых продуктов был проверен на примере получения пищевых (снеки) и кормовых (плавающий корм для сеголеток радужной форели) продуктов [5].

Для проведения промышленной апробации способа необходимо разработать рекомендации относительно рациональных пара-

метров процесса производства сушеной продукции.

В настоящей статье представлены результаты исследований на примере получения пищевого продукта – снеков из фарша бычка кругляка.

Целью исследований было экспериментальное определение рациональных параметров процесса получения сушеных пористых продуктов на основе рыбного сырья методом многофакторного эксперимента.

Для определения рациональных параметров процесса использовали статистический метод планирования эксперимента [6,7].

Экспериментальные исследования проводили на установке, внешний вид и принципиальная схема которой представлена на рисунке 1 [8].

Принцип работы установки. В рабочей камере 1 размещены термовесы 2 с расположенной на них перфорированной пластиной 3, внутри которой находились исследуемые образцы. Нагрев рабочей камеры до заданной температуры осуществляли на водяной бане 4 при атмосферном давлении. В тоже время, вакуум-насосом 5 в ресивере 6 создается разряжение до необходимых па-

раметров. В дальнейшем рабочую камеру и ресивер соединяли между собой, давление в них выравнивалось, в это время внутри исходного сырья за счет прогрева и пониженного давления, происходит «микровзрыв» с образованием пор за счет закипания влаги. Кроме того, установка снабжена выключателем 7, контрольной лампой 8, терморегулятором 9, экраном термовесов 10, экраном показания температуры в рабочей камере 11, датчиком измерения температуры 12 и игольчатым крапом 13 [9].

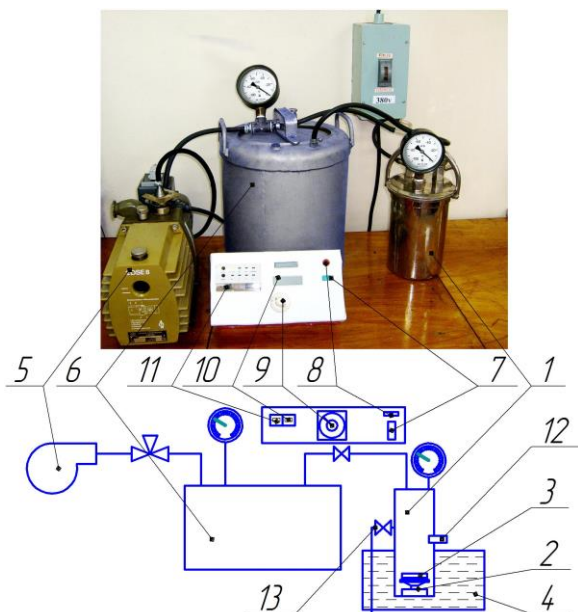


Рисунок 1 – Внешний вид и схема исследовательской установки

В качестве входных параметров были выбраны температура ( $t$ , °C) и давление ( $P$ , кПа) в рабочей камере, а также плотность набивки снегов ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>). В качестве выходного параметра была принята продолжительность процесса ( $t$ , мин.), которая влияет на производительность и энергозатраты.

С целью сохранения термолабильных витаминов и обеспечения необходимой степени порообразования и твердости продукта, на основании предварительных экспериментов, были определены интервалы варьирования входных параметров [10] (таблица 1).

Для упрощения записи условий и обработки данных ввели кодирование значений факторов: верхний уровень +1; нижний уровень -1; основной уровень 0.

Кодовое значение факторов определили по формуле:

$$X = \frac{\bar{X}_j - \bar{X}_{j0}}{I_j} \quad (1)$$

где  $X_j$  – кодированное значение факторов;

$X_j$  – натуральное значение фактора;  
 $\bar{X}_{j0}$  – натуральное значение основного уровня;

$I_j$  – интервал варьирования;

$j$  – номер фактора.

Таблица 1 – Входные параметры и интервалы варьирования

Факторы	Основной уровень	Ед. варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень	Код
$P$ , кПа	12,5	2,5	15,0	10,0	$X_1$
$t$ , °C	50,0	5,0	55,0	45,0	$X_2$
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1160	60	1220	1100	$X_3$

Таким образом,

$$X_1 = \frac{P-12,5}{2,5}; \quad X_2 = \frac{t-50,0}{5,0}; \quad X_3 = \frac{\rho-1160,0}{60,0}$$

В зависимости от количества входных параметров использовали многофакторный эксперимент типа  $2^3$ . Матрица такого эксперимента состоит из трех вектор-столбцов, построенных по правилу чередования знаков. При этом матрица разбита на два блока (таблица 2). Межблоковым эффектом за счет учета тройного эффекта взаимодействия  $P_6 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$  мы пренебрегаем.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента типа  $2^3$

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	+	+	-
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	-
5	-	-	+
6	-	+	-
7	+	+	+
8	+	-	-

Для учета неопределенности каждого эксперимента вычислили ошибку параллельных опытов (ошибку воспроизводимости), используя расчет дисперсии:

$$s^2 = \frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{\psi} \quad (2)$$

где  $y_q$  – результаты отдельного опыта;

$\bar{y}$  – среднее арифметическое;

$\psi$  – число степеней свободы  $\psi=(N-1)$ ;

$N$  – количество опытов.

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СУШЕНЫХ ПОРИСТЫХ ПРОДУКТОВ ИЗ РЫБНОГО СЫРЬЯ

Проверку результатов экспериментальных данных на наличие грубых ошибок проводили с использованием статистического

критерия Стьюдента, который с доверительной вероятностью 95% составил  $t=2,2622$  [7].

Таблица 3 – Результаты трехфакторного эксперимента

№ опыт	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	Y <sub>10</sub>	$\bar{y}$	S <sup>2</sup>
1	128,1	127,5	125,8	135,1	132,7	135,3	136,2	137,5	137,8	133,1	132,9	18,82
2	155,2	154,3	148,1	145,8	145,1	143,1	143,2	149,5	152,2	152,2	148,9	20,20
3	175,8	174,2	178,8	180,9	182,2	182,1	182,9	185,3	186,2	176,2	180,5	16,67
4	141,3	143,2	146,8	148,2	151,1	151,8	140,8	140,3	143,2	141,2	144,8	18,98
5	179,2	174,1	167,9	165,1	168,8	171,8	172,2	169,3	168,5	167,5	170,4	16,27
6	121,2	126,5	127,9	120,3	122,3	127,2	127,9	129,2	124,5	127,2	125,4	9,86
7	156,2	159,2	152,3	157,6	152,1	151,1	160,5	159,5	158,5	159,1	156,6	12,27
8	145,5	147,6	155,2	151,8	157,5	153,2	154,1	145,9	148,1	149,3	150,8	17,09

Однородность дисперсий проверяли по статистическому критерию Фишера, который сравнивали с табличным значением.

$$F_p = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} \quad (3)$$

Расчетный критерий Фишера составил  $F_p=2,05$ . Табличный критерий Фишера для степеней свободы  $\psi_1=\psi_2=9$  равен  $F_{\text{табл}}=3,18$  [5]. Так как  $F_p < F_{\text{табл}}$ , то дисперсии однородны.

Для оценки воспроизводимости результатов экспериментов определили расчетный статистический критерий Кохрена, который сравнивали с табличным значением.

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_i^2} \quad (4)$$

Расчетная величина критерия Кохрена составила  $G_p=0,155$ . Табличная величина критерия Кохрена  $G_{\text{табл}}=0,266$  [6]. Так как  $G_p < G_{\text{табл}}$ , то дисперсии однородны.

Функцию отклика с учетом парных эффектов взаимодействия представили в виде алгебраического полинома II степени:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3, \quad (5)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{23}, b_{13}$  – расчетные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_1^N \bar{y}_i}{N}, b_1 = \frac{\sum_1^N x_{1i} \bar{y}_i}{N}, b_2 = \frac{\sum_1^N x_{2i} \bar{y}_i}{N}, \\ b_3 &= \frac{\sum_1^N x_{3i} \bar{y}_i}{N}, b_{12} = \frac{\sum_1^N x_{1i} x_{2i} \bar{y}_i}{N}, \\ b_{23} &= \frac{\sum_1^N x_{2i} x_{3i} \bar{y}_i}{N}, b_{13} = \frac{\sum_1^N x_{1i} x_{3i} \bar{y}_i}{N} \end{aligned} \quad (6)$$

Функция отклика получена в следующем виде:

$$y = 151,29 + 3,91 \cdot x_1 - 10,34 \cdot x_2 + 12,81 \cdot x_3 - 0,10 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,53 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,02 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (7)$$

Значимость коэффициентов уравнения определяли по доверительному интервалу:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S\{b_i\}, \quad (8)$$

где  $t$  – табличное значение коэффициента Стьюдента при числе степеней свободы, с которым определяли  $S\{b_i\}$  в выбранном уровне значимости,  $t=1,9944$  [6];

$S\{b_i\}$  – дисперсия коэффициента регрессии, следовательно:

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}}, \quad (9)$$

где  $S^2\{b_i\}$  – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

$$S^2\{b_i\} = \frac{\sum_1^N \psi_i S_i^2}{\sum_1^N \psi_i} \quad (10)$$

По результатам расчетов определены: дисперсия воспроизводимости эксперимента  $S^2\{y\} = 16,42$ ; дисперсия коэффициента регрессии  $S\{b_i\}=2,05$ ; доверительный интервал  $\Delta b_i=2,8575$ . Таким образом, в уравнении (7) 4 значимых коэффициента  $b_0=151,29$ ;  $b_1=3,91$ ;  $b_2=-10,34$ ;  $b_3=12,81$ , которое приняло вид:

$$y = 151,29 + 3,91 \cdot x_1 - 10,34 \cdot x_2 + 12,81 \cdot x_3 \quad (11)$$

Из анализа уравнения 11 следует, что продолжительность процесса увеличивается при увеличении давления в рабочей камере и

плотности набивки снеков, а также при уменьшении температуры в рабочей камере.

Модель можно считать адекватной, если выполняется требование: предсказанное с помощью модели значение отклика в некоторой подобности, в которую входят координаты выполненных опытов, не должно отличаться от фактического больше, чем на некоторую заранее заданную величину. Проверку адекватности модели проводили по F-критерию Фишера с использованием дисперсии адекватности.

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}} \quad (12)$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^T \Delta y_i^2}{\psi} \quad (13)$$

где  $\Delta y_i^2$  – остаточная сумма квадратов разности между расчетным и средним значением  $y$ ;

$\psi$  – число степеней свободы, равное разности между числом опытов и числом коэффициентов (констант), которые уже вычислены по результатам опытов независимо друг от друга.

Расчетный критерий Фишера равен  $F_p = 0,19$ . Табличный критерий Фишера для степеней свободы 4-9 равен  $F_{табл} = 3,63$  [6]. Так как  $F < F_{табл}$ , то с доверительной долей вероятности 0,95 модель можно считать адекватной.

В натуральных переменных уравнение 11 имеет вид:

$$\tau = 1,564 \cdot P - 2,068 \cdot t + 0,2135 \cdot \rho - 12,52 \quad (14)$$

На рисунках 2-4 показана графическая интерпретация влияния двух факторов при фиксированном значении третьего фактора на продолжительность процесса вспенивания и сушки рыбного сыря.

Анализ приведенных плоскостей показал, что на графиках нет экстремумов, а есть только минимальные значения продолжительности процесса в пределах заданных интервалов изменяемых параметров.

Для нахождения минимального значения уравнения 11 при заданных ограничениях переменных факторов (таблица 1) применили методы выпуклой оптимизации (симплекс методы) с использованием функции «Поиск решения» табличного редактора Excel. Искомые значения переменных параметров составили:  $P = 10$  кПа,  $t = 55^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>.

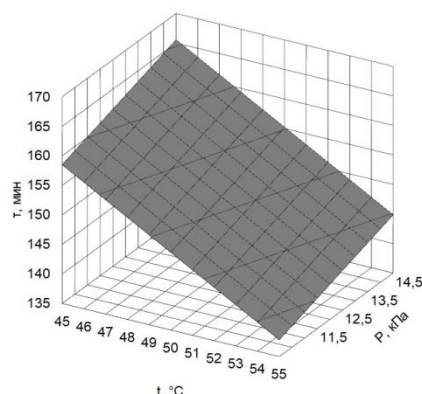


Рисунок 2 – Зависимость продолжительности процесса порообразования и сушки ( $\tau$ ) от температуры ( $t$ ) и давления ( $P$ ) в рабочей камере при постоянной плотности набивки снеков ( $\rho = 1160$  кг/м<sup>3</sup>)

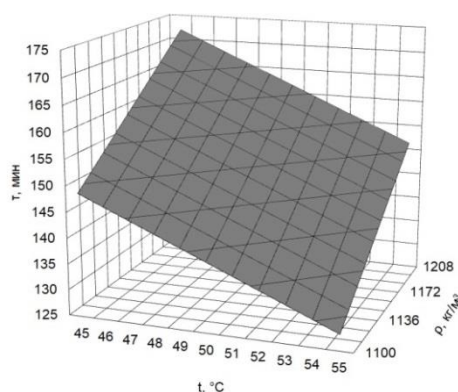


Рисунок 3 – Зависимость продолжительности процесса порообразования и сушки ( $\tau$ ) от температуры ( $t$ ) и плотности набивки снеков ( $\rho$ ) при постоянном давлении ( $P = 12,5$  кПа)

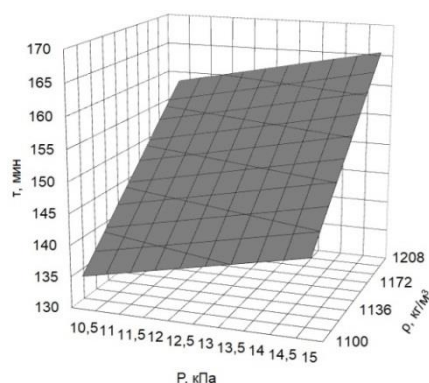


Рисунок 4 – Зависимость продолжительности процесса порообразования и сушки ( $\tau$ ) от давления в рабочей камере ( $P$ ) и плотности набивки снеков ( $\rho$ ) при постоянной температуре в рабочей камере ( $t = 50^\circ\text{C}$ )

После подстановки полученных рациональных параметров в уравнение (14) получена продолжительность процесса порообразования и

**ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2017**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СУШЕНЫХ ПОРИСТЫХ ПРОДУКТОВ ИЗ РЫБНОГО СЫРЬЯ

сушки, которая составила 125,4 мин. Для найденных рациональных параметров построены экспериментальные кривые порообразования и сушки (рис. 5) и скорости порообразования и сушки (рис. 6).

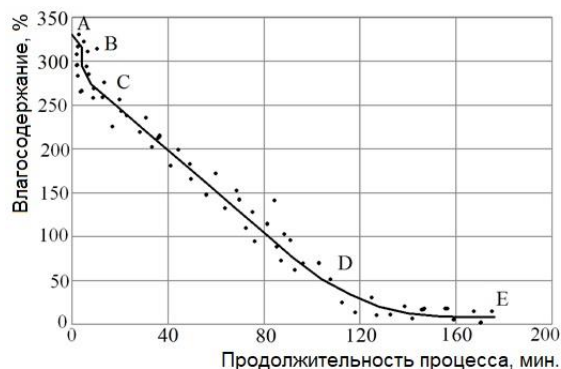


Рисунок 5 – Кривая изменения влагосодержания порообразования и сушки при производстве снеков из фарша бычка кругляка ( $P = 10$  кПа;  $t = 55^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>)

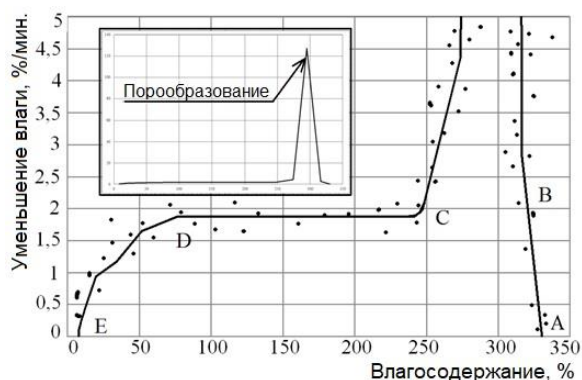


Рисунок 6 – Кривая изменения скорости порообразования и сушки при производстве снеков из фарша бычка кругляка ( $P = 10$  кПа;  $t = 55^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>)

На представленных кривых участок АВ соответствует периоду прогрева сырья, ВС – период порообразования, CD – период постоянной скорости сушки, DE – период падающей скорости сушки.

Таким образом, на основании проведенного трехфакторного эксперимента для минимизации продолжительности порообразования и сушки при производстве снеков из фарша бычка кругляка были определены рациональные параметры процесса, которые составили: давление в рабочей камере  $P = 10$  кПа, температура в рабочей камере  $t = 55^\circ\text{C}$ , плотность набивки снеков  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>; продолжительность процесса при этих условиях составила 125,4 мин.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение количественной и качественной сохранности витаминов исходного сырья в

процессе получения сухеных пористых продуктов по предложенному способу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сукманов В.А. Обоснование необходимости переработки рыбного сырья с добавлением термолабильных биологически активных добавок и его использования в качестве плавающих кормов для рыбоводства / В.А. Сукманов, А.А. Яшонков // Оборудование и технологии пищевых производств. – 2011. – Вып. 26. – С. 474-479
  2. Бажанов А.А. Система приоритетов развития пищевой промышленности / А.А. Бажанов // Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития): материалы III Международной научно-технической конференции. В 3 т. Т. 1. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2009. – С. 7-9.
  3. Пат. 65473 Украина, МПК А01К61/00. Способ получения вспененных смесей / Сукманов В.А., Яшонков А.А.; заявитель и патентособственник Керченский государственный морской технологический университет. - № и 2011 05429; заявл. 28.04.11; опубл. 12.12.11, Бюл. № 23. – 3 с.
  4. Яшонков А.А. Исследование сохранности витаминов в рыбном сырье при получении вспененных смесей / А.А. Яшонков, В.А. Сукманов, Д.В. Степанов // Рыбное хозяйство Украины. – 2013. – № 6 (89). – С. 24-27
  5. Sukmanov V. Research of process of output of foamed mixtures made of raw fish / V.Sukmanov, A. Yashonkov // Journal of EcoAgriTourism. – 2014. – Vol.1, №1 (28). – P.103-108
  6. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
  7. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента: [пер. с англ.] / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
  8. Пат. 88105 Украина, МПК А23К1/10. Конструкция учебно-исследовательской установки для получения вспененных смесей / Сукманов В.А., Яшонков А.А.; заявитель и патентособственник Керченский государственный морской технологический университет. - № и 2013 13092; заявл. 11.11.13; опубл. 25.02.14, Бюл. № 24. – 5 с.
  9. Яшонков А.А. Разработка конструкции экспериментальной установки для переработки рыбного сырья на вспененные смеси / А.А. Яшонков, Сукманов В.А. // Актуальные проблемы пищевой промышленности и ресторанного хозяйства. Современные вопросы подготовки кадров: Материалы I Всеукраинской научно-практической конференции. – Луганск. – 2012. – С.63-66.
  10. Сукманов В.А. К вопросу экспериментальных исследований вспениваемости рыбного сырья / В.А. Сукманов, А.А. Яшонков // Рыбное хозяйство Украины. – 2011. - № 6 (77). – С. 40-43.
- Яшонков Александр Анатольевич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», jashonkov@rambler.ru