

УДК 664.8.037.1:635

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ОВОЩНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

И.А. Короткий, Г.Ф. Сахабутдинова\*, А.В. Шафрай

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт  
пищевой промышленности (университет)»,  
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

\*e-mail: 89235202979@yandex.ru

Дата поступления в редакцию: 17.05.2017

Дата принятия в печать: 04.09.2017

**Аннотация.** Комбинированный способ замораживания сочетает в себе конвекционное подмораживание продукта и контактное последующее домораживание на охлаждаемой металлической плите. Способ применяется для замораживания овощных полуфабрикатов, предварительно расфасованных в вакуумную упаковку. Достоинства комбинированного способа заключаются в отсутствии усушки продукта, потери ароматических свойств, уменьшении температурных колебаний в ходе процесса, щадящие условия работы на фасовочно-упаковочном участке. Важной характеристикой процесса замораживания является его продолжительность. Целью работы являлось определение рациональных технологических параметров замораживания комбинированным способом при производстве овощных полуфабрикатов. Предсказание продолжительности замораживания является наиболее сложной задачей в теплофизике, так как присутствует множество параметров, оказывающих влияние на протекание процесса замораживания. В статье представлены результаты исследования, выявляющие степень влияния температуры внутри скороморозильной камеры, скорости движения воздуха и толщины слоя продукта в упаковке, закладываемого на замораживание. В результате проведенных исследований доказано, что на продолжительность замораживания овощной смеси оказывают большее влияние значение температуры в камере  $t$ , толщина замораживаемого продукта  $\delta$  и совместное влияние  $t$ - $\delta$ . При помощи программы Statistica в результате обработки экспериментальных данных продолжительности замораживания получена математическая регрессионная модель, способная с высокой точностью предсказать длительность процесса замораживания. Значения относительной погрешности между данными, полученными экспериментально, и предсказанными данными составили менее 5 %.

**Ключевые слова.** Овощные полуфабрикаты, продолжительность замораживания, параметры замораживания, уравнения регрессии, регрессионный анализ

## ANALYSIS OF PARAMETERS INFLUENCING PERIOD OF VEGETABLE SEMI-FINISHED PRODUCTS FREEZING WITH COMBINED METHOD

I.A. Korotkiy, G.F. Sahabutdinova, A.V. Shafrai

Kemerovo Institute of Food Science  
and Technology (University),  
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

\*e-mail: 89235202979@yandex.ru

Received: 17.05.2017

Accepted: 04.09.2017

**Abstract.** The combined method of freezing combines the product convectional freezing and subsequent contact storage on a cooled metal plate. This method is used to freeze vegetable semi-finished products that have been pre-packed in a vacuum package. Advantages of the combined method are the absence of product shrinkage, loss of aromatic properties, and reduction of temperature fluctuations during the process, sparing operating conditions in the packing area. Freezing period is an important characteristic of the process. The prediction of the freezing period is the most difficult task in thermophysics, since there are many parameters affecting the freezing process. The article presents the results of the research revealing the degree of temperature influence inside the freezing chamber, the rate of air movement and the layer thickness of the product to be frozen in the package. It has been proved that the freezing period of the vegetable mix is more influenced by the temperature in the chamber  $t$ , the thickness of the frozen product  $\delta$  and the joint influence of  $t$ - $\delta$ . Using the Statistica program for processing the experimental data on the freezing period a mathematical regression model has been obtained, which can predict the freezing period with high accuracy. The relative error between the experimentally obtained data and the predicted ones is less than 5%.

**Keywords.** Vegetable semi-finished products, freezing period, freezing parameters, regression equations, regression analysis

### Введение

Для замораживания овощных полуфабрикатов применялся комбинированный способ, заключаю-

щийся в сочетании конвективного подмораживания вакуумированной порции смеси в упаковке и последующего контактного домораживания с одновре-

менным обдувом потоком воздуха. Подмораживание осуществляется на металлической решетке с принудительным обдувом потоком восходящего воздуха, по завершению подмораживания на поверхности образуется затвердевший слой продукта толщиной 2–3 мм, что придает порции смеси дополнительную механическую прочность. Цель использования металлической решетки – исключение примерзания продукта, легкое отделение в конце процесса подмораживания, унос части влаги с поверхности упаковки потоком восходящего воздуха. Контактное домораживание происходит при переносе порции смеси на металлическую плиту. Для интенсификации процесса применяется одновременный принудительный обдув потоком воздуха в горизонтальном направлении. Благодаря предварительному подмораживанию упаковка не примерзает к плите и не повреждается при отделении от нее [1].

При замораживании комбинированном способом продукт в меньшей мере подвержен тепловому воздействию, так как отсутствуют температурные колебания вследствие того, что смесь сначала упаковывают и только потом замораживают. Качество готового полуфабриката выше благодаря использованию вакуумной упаковки, которая исключает усушку и потерю ароматических свойств овощей [2, 3]. На фасовочно-упаковочном участке предприятия, применяющего комбинированный способ замораживания, не требуется использовать искусственное охлаждение в помещении. Это позволяет создать более комфортные условия для работников, а также снизить энергетические затраты и уменьшить производственные площади [4, 5, 6].

Технологическая линия с применением комбинированного способа замораживания проиллюстрирована на рис. 1.

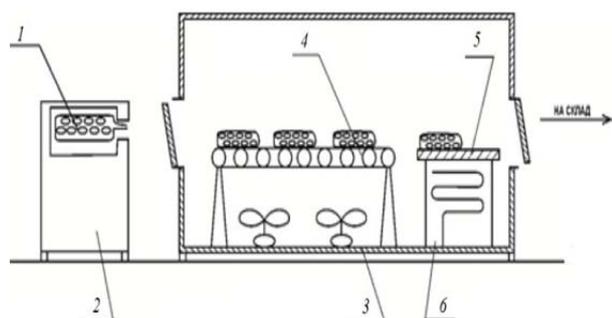


Рис. 1. Технологическая линия замораживания овощных полуфабрикатов: 1 – порция овощной смеси; 2 – вакуумная однокамерная машина; 3 – воздушный скороморозильный аппарат; 4 – решетчатый конвейер; 5 – металлическая охлаждаемая плита; 6 – контактный аппарат

**Целью работы** является определение рациональных технологических параметров продолжительности замораживания комбинированным способом на основе регрессионного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований при производстве овощных полуфабрикатов.

С учетом поставленной цели решались следующие задачи.

- исследовать комбинированный способ замораживания для выявления рациональных технологических параметров продолжительности процесса;
- провести регрессионный анализ полученных данных для выявления степени влияния варьируемых параметров на продолжительность замораживания овощной смеси в упаковке;
- получить регрессионную модель, способную прогнозировать длительность процесса замораживания комбинированным способом.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступает комбинированный способ замораживания овощных полуфабрикатов, включающий предварительное подмораживание в потоке восходящего воздуха в течение 5 минут с последующем домораживанием на охлаждаемой плите в горизонтальном потоке воздуха.

Предмет исследования – выявление рациональных технологических параметров, влияющих на продолжительность замораживания овощной смеси в упаковке.

#### Результаты и их обсуждение

При замораживании поток воздуха необходим для передачи теплоты от плодовоовощной смеси к хладагенту, циркулирующему внутри воздушного скороморозильного аппарата. Увеличение скорости движения воздуха возможно за счет того, что продукт замораживается, будучи упакованным, что исключает усушку овощей. Снижение температуры внутри замораживающей камеры и увеличение скорости движения воздуха необходимо совершать с учетом затрат на получения холода, поддерживая наиболее выгодную с экономической точки зрения разницу температур. На продолжительность замораживания оказывает влияние то, какой толщины продукт находится в упаковке. Толщина продукта зависит от размеров упаковки и размеров кусочков овощей, из которых состоит смесь [7, 8]. В результате вышесказанного были выделены наиболее значимые параметры, существенно влияющие на продолжительность замораживания  $t$ , мин.

Были проведены исследования, посвященные выявлению степени влияния температуры в камере скороморозильного аппарата ( $t$ , °C), скорости движения воздуха при обдуве продукта ( $\omega$ , м/с) и толщины замораживаемого слоя продукта ( $\delta$ , мм) в упаковке. Плодовоовощную смесь замораживали при температурных режимах минус 30 и минус 40 °C до достижения в центре продукта температуры минус 22° C, т.к. при указанной температуре вся свободная влага в продукте подвергается кристаллизации [5, 9]. При температурном режиме минус 20 °C замораживание проводили до достижения в центре продукта температуры минус 18 °C.

В ходе проведения экспериментов температура в камере менялась от минус 40 до минус 20 °C, скорость движения воздуха – от 1 до 3 м/с, толщина продукта в упаковке в диапазоне 10–30 мм. Базовые (нулевые) точки и шаги варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования

Фактор	Условное обозначение	Уровни варьирования			
		Верхний уровень	Нижний уровень	Центр плана	Интервал варьирования
Температура в камере воздушного скороморозильного аппарата $t$ , °C	$t$	-20	-40	-30	10
Скорость движения воздуха $\omega$ , м/с	$\omega$	3	1	2	0,5
Толщина слоя замораживаемого продукта $\delta$ , мм	$\delta$	30	10	20	5

В ходе исследования требовалось установить силу зависимости, а также смоделировать уравнение для определения количественных значений факторов, влияющих на продолжительность замораживания овощной смеси. За зависимый параметр взята продолжительность замораживания. За независимые переменные были взяты температура в камере, скорость движения воздуха и толщина слоя замораживаемого продукта.

Анализ проводился в программе Statistica 8 с помощью модулей «Промышленная статистика», «Нелинейное оценивание» и «Общие регрессионные модели». Полученная в ходе статистического анализа модель классифицирована как аналитическая эмпирическая статическая стохастическая нелинейная математическая модель [10].

Наилучшая модель получена с помощью инструмента «Регрессия поверхности смеси» модуля «Общие регрессионные модели».

Таблица 2

Оценка модели

Зависимая переменная	R	R <sup>2</sup>	F	p
$\tau$	0,9985	0,9972	2559,316	0,00

В табл. 2 приведены оценки модели. Коэффициент корреляции (R), равный 0,998, практически приблизился к единице, что говорит о сильной зависимости выходной переменной от входных переменных. Близость коэффициента корреляции к единице показывает приближение корреляционной связи к функциональной. Коэффициент детерминации (R<sup>2</sup>) данной модели, равный 0,997, также близок к единице. Из этого следует, что доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, равна 99,7 %. F-критерий Фишера имеет достаточно большое значение (F = 2559,316), чтобы утверждать, что модель является адекватной и может быть использована для принятия решений к осуществлению прогнозов. Рассматриваемая модель является статисти-

чески значимой, т.к. p-уровень составляет 0 %. Это показывает, что модель с вероятностью 0,00 будет являться лишь случайным совпадением для данной выборки.

В табл. 3 приведены коэффициенты регрессии модели. Статистическая значимость (p-уровень) у всех коэффициентов низкая, в пределах тысячных долей процентов, лишь у одного коэффициента она составляет 1,56 %, что также является малым значением. Это показывает, что каждый найденный коэффициент с вероятностью, равной соответствующему ему p-уровню, будет говорить, что найденная зависимость является лишь случайной особенностью данной выборки. Аналогичные результаты отображает t-критерий Стьюдента. У всех коэффициентов он достаточно высок, что говорит о высокой статистической значимости этих коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты  $\beta$ . Данный коэффициент оценивает меру чувствительности одной переменной к другой переменной. Это означает, что наиболее чувствительным для значения продолжительности  $\tau$  будет влияние  $t$ ,  $t^2$ ,  $\delta$  и совместное влияние  $t$ - $\delta$ , причем все факторы дают прямо пропорциональную зависимость. Чувствительность остальных факторов менее существенна, но значительно выше нуля.

Таблица 3

Коэффициенты модели

Эффект	Коэффициент	t	p	$\beta$
Свободный член	162,6076	13,8474	0,000000	
t	10,3762	17,8248	0,000000	1,31125
t <sup>2</sup>	0,1674	18,5626	0,000000	1,27513
$\omega$	-25,3404	-5,1032	0,000003	-0,27732
$\omega^2$	4,3754	4,3055	0,000057	0,19362
$\delta$	14,3413	28,8819	0,000000	1,56952
$\delta^2$	0,0252	2,4831	0,015613	0,11166
$t \times \omega$	-0,3104	-4,2149	0,000079	-0,13155
$t \times \delta$	0,2495	33,8786	0,000000	1,05735
$\omega \times \delta$	-0,4898	-5,7610	0,000000	-0,15629

Полученная по ходу исследования модель имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_3 + b_{11} \times x_1^2 + b_{22} \times x_2^2 + b_{33} \times x_3^2 + b_{12} \times x_1 \times x_2 + b_{13} \times x_1 \times x_3 + b_{23} \times x_2 \times x_3 \quad (1)$$

Подставляя в формулу (1) коэффициенты модели из табл. 3, получаем итоговую модель, позволяющую прогнозировать значения зависимой переменной.

$$\tau = 162,6076 + 10,3762 \times t + 0,1674 \times t^2 - 25,3404 \times \omega + 4,3754 \times \omega^2 + 14,3414 \times \delta + 0,0252 \times \delta^2 - 0,3104 \times t \times \omega + 0,2495 \times t \times \delta - 0,4898 \times \omega \times \delta \quad (2)$$

Данные, полученные в ходе расчета, для лучшего восприятия представлены в виде поверхностей отклика (рис. 1–3).

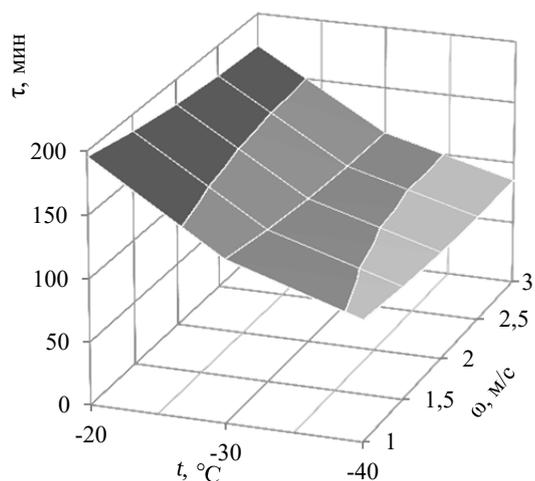


Рис. 1. Зависимость продолжительности замораживания от температуры и скорости движения воздуха в скороморозильной камере

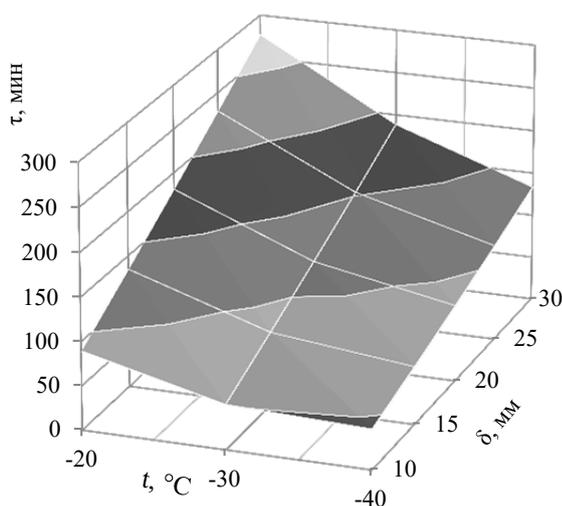


Рис. 2. Зависимость продолжительности замораживания от температуры в скороморозильной камере и толщины слоя продукта

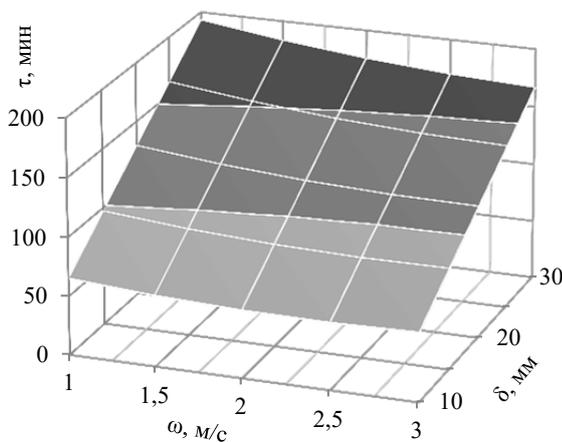


Рис. 3. Зависимость продолжительности замораживания от скорости движения воздуха в скороморозильной камере и толщины слоя продукта

Используя данную модель можно сравнить наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) зависимой переменной с предсказанными (полученные с помощью математической модели). Разницу наблюдаемых и предсказанных значений можно оценить с помощью относительной погрешности по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{|\tau_{\text{Набл}} - \tau_{\text{Пред}}|}{\tau_{\text{Набл}}} \times 100\% \quad (3)$$

Результаты сравнения первых десяти значений продолжительности замораживания сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение наблюдаемых и предсказанных значений

№ п/п	τ, мин Наблюдаемое	τ, мин Моделируемое	Относительная погрешность, %
1.	45,67	48,11	5,33
2.	69,83	70,63	1,14
3.	95	94,41	0,62
4.	121,17	119,45	1,41
5.	148,17	145,76	1,62
6.	42,83	44,66	4,27
7.	65,5	65,96	0,70
8.	89	88,52	0,54
9.	113	112,34	0,58
10.	138	137,42	0,42

Сравнение выявило, что погрешность достаточно мала, менее 5 %, следовательно, модель можно использовать для предсказания значений зависимой переменной.

Ввиду приведенных выше рассуждений, модель, полученная в ходе исследования, может считаться адекватной и быть использована для дальнейшего тестирования.

### Выводы

Были выявлены рациональные технологические параметры процесса замораживания комбинированным способом, которые оказывают наибольшее влияние на продолжительность низкотемпературной обработки овощной смеси: температура в скороморозильной камере  $t$ , толщина слоя замораживаемого продукта  $\delta$  и их совместное влияние  $t - \delta$ . Чувствительность остальных факторов значительно выше нуля, но менее существенна.

С помощью инструментов программы Statistica была получена математическая регрессионная модель, которая позволяет предсказывать продолжительность замораживания продуктов комбинированным способом с высокой точностью. Значения относительной погрешности между экспериментальными данными и предсказанными составили менее 5 %.

## Список литературы

1. Анурьева, Е.В. Замораживание плодов и овощей на флюидизационных туннелях / Е.В. Анурьева // Мороженое и замороженные продукты. – 2004. – № 12. – С. 26–28.
2. Шубина, О.Г. Низкокалорийные продукты как составляющие сбалансированного рациона питания современного человека / О. Г. Шубина, А. А. Кочеткова // Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки. – 2005. – № 1. – С. 9–13.
3. Доценко, В.А. О структуре потребления продуктов питания по пищевой ценности и медико-пищевым признакам / В.А. Доценко, Д.Х. Кулев, Ю.В. Клоков // Пищевая промышленность. – 2016. – № 8. – С. 22–25.
4. Павловская, Л.М. Направления развития производства консервированных продуктов за рубежом / Л.М. Павловская // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2013 – № 3 (21). – С. 18–24.
5. Короткий, И.А. Определение теплотехнических свойств компонентов плодовоовощной смеси в процессе замораживания / И.А. Короткий, Г.Ф. Сахабутдинова, М.И. Ибрагимов // Техника и технология пищевых производств, 2016. – Т. 40. – № 1. – С. 81–86.
6. Korotkiy, I.A. Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries / I.A. Korotkiy // Foods and Raw Materials. – 2014. – No. 2. – pp. 3–14.
7. Григорьева, Р.З. Анализ способов и разработка технологии производства картофельных полуфабрикатов / Р.З. Григорьева, А.Ю. Просеков // Достижения науки и техники АПК. – 2008. – № 3. – С. 40–42.
8. Исследование замораживания в производстве полуфабрикатов из картофеля / А.Ю. Просеков, Р.З. Григорьева, С.Ю. Юрьева, В.А. Жданов // Достижения науки и техники АПК. – 2006. – № 6. – С. 47.
9. Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment / P. Butza, R. Edenharderb, A. Fernándeza, H. Fistera, C. Merkela, B. Tauschera // Food Research International. – 2002. – V. 35. – No. 2–3. – pp. 295–300.
10. Dermesonlouoglou, E. Kinetic modeling of the quality degradation of frozen watermelon tissue: effect if the osmotic dehydration as a pre-treatment / E. Dermesonlouoglou, M. Giannakourou, P. Taoukis // International journal of food science and technology. – 2007. – V. 42. – No. 7. – pp. 790–798.

## References

1. Anur'eva E.V. Zamorazhivanie plodov i ovoshchey na flyuidizatsionnykh tunnelyakh [Freezing fruits and vegetables on fluid tunnels]. *Morozhenoe i zamorozhennyye produkty* [Ice cream and frozen food], 2004, no. 12, pp. 26–28.
2. Shubina O.G., Kochetkova A.A. Nizkokaloriynye produkty kak sostavlyayushchie sbalansirovannogo ratsiona pitaniya sovremennogo cheloveka [Low-calorie foods as components of a balanced diet of modern man]. *Pishchevye ingredienty. Syr'e i do-bavki* [Food ingredients. Raw materials and additives], 2005, no. 1, pp. 9–13.
3. Dotsenko V.A., Kulev D.Kh., Klokov Yu.V. O strukture potrebleniya produktov pitaniya po pishchevoy tsennosti i mediko-pishchevym priznakam [On the structure of food consumption by nutritional value and medical and nutritional characteristics]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food processing industry], 2016, no. 8, pp. 22–25.
4. Pavlovskaya L.M. Napravleniya razvitiya proizvodstva konservirovannykh produktov za rubezhom [Directions for the development of the production of canned food abroad]. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food industry: science and technology], 2013, vol. 21, no. 3, pp. 18 – 24.
5. Korotkiy I.A., Sakhabutdinova G.F., Ibragimov M.I. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv komponentov plo-doovoshchnoy smesi v protsesse zamorazhivaniya [Determination of thermophysical properties of components of fruit and vegetable mixtures in freezing]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2016, vol. 40, no. 1, pp. 81–86.
6. Korotkiy I.A. Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries. *Foods and Raw Materials*, 2014, no. 2, pp. 3–14. DOI: 10.12737/5454.
7. Grigor'eva R.Z., Prosekov A.Yu. Analiz sposobov i razrabotka tekhnologii proizvodstva kartofel'nykh polufabrikatov [Analysis of methods and development of technology for the production of potato semi-finished products]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2008, no. 3, pp. 40–42.
8. Prosekov A.Yu., Grigor'eva R.Z., Yur'eva S.Yu., Zhdanov V.A. Issledovanie zamorazhivaniya v proizvodstve polufabrikatov iz kartofelya [Study of freezing in the production of semi-finished potatoes]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2006, no. 6, pp. 47.
9. Butz P., Edenharderb R., Garciaa A.F., Fistera H., Merkela C., Tauschera B. Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment. *Food Research International*, 2002, vol. 35, no. 2–3, pp. 295–300. DOI: 10.1016/S0963-9969(01)00199-5.
10. Dermesonlouoglou E., Giannakourou M., Taoukis P. Kinetic modelling of the quality degradation of frozen watermelon tissue: effect of the osmotic dehydration as a pre-treatment. *International journal of food science and technology*, 2007, vol. 42, no. 7, pp. 790–798. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01280.x.

## Дополнительная информация / Additional Information

Короткий, И.А. Анализ параметров, влияющих на продолжительность замораживания овощных полуфабрикатов комбинированным способом / И.А. Короткий, Г.Ф. Сахабутдинова, А.В. Шафрай // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 46. – № 3. – С. 108–113.

Korotkiy I.A., Sakhabutdinova G.F., Shafrai A.V. Analysis of parameters influencing period of vegetable semi-finished products freezing with combined method. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 46, no. 3, pp. 108–113 (In Russ.).

© **Короткий Игорь Алексеевич**

д-р техн. наук, профессор, декан заочного факультета, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 73-43-44, e-mail: krot69@mail.ru

© **Сахабутдинова Гульнар Фигатовна**

аспирант, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, e-mail: 89235202979@yandex.ru

© **Шафрай Антон Валерьевич**

канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, e-mail: shafraia@mail.ru

© **Igor' A. Korotkiy**

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Dean of the Correspondence Faculty, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 73-43-44, e-mail: krot69@mail.ru

© **Gul'nar F. Sakhabutdinova**

Postgraduate Student, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, e-mail: 89235202979@yandex.ru

© **Anton V. Safrai**

Cand.Sci.(Eng.), Senior Lecturer of the Department of Technological Design of Food Production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, e-mail: shafraia@mail.ru

