

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²ООО «Юнилевер-Русь»
(Омский филиал),
г. Омск

³Омский государственный
аграрный университет
имени П. А. Столыпина,
г. Омск

⁴Мичуринский государственный
аграрный университет,
г. Мичуринск

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье показано, что при проектировании съемных устройств конвейерных линий пищевой промышленности необходимо рассмотрение всех стадий технологического процесса. Приведены термодинамические расчеты, показывающие влияние степени кристаллизации воды, криоскопической температуры и скорости кристаллизации. Приведена оценка разных способов аппроксимации температурных зависимостей. Выявлено значительное влияние состояния поверхности на усилие отрыва съемных устройств. Даны рекомендации по подбору технологических параметров.

Ключевые слова: конвейерные линии, съемные устройства, криоскопическая температура, степень кристаллизации, производство мороженого.

Введение. Конвейерные линии широко применяются в пищевой промышленности — как в разных ее сегментах (производство круп, мясное, молочное и другие виды производства), так и на разных этапах производственного цикла (обработка сырья, производство продукции, упаковка, фасовка). Каждая производственная линия, по меньшей мере на конечном этапе, содержит съемное устройство, обеспечивающее либо отгрузку продукции потребителю, либо передачу изделия на следующую стадию производства. Несмотря на то, что съемное устройство выполняет единственную технологическую операцию при его проектировании, необходимо рассматривать всю совокупность процессов производственного цикла. В данной статье проводится анализ процессов, определяющих усилие отрыва съемных устройств конвейерных линий, применяемых при производстве мороженого.

Производство мороженого в России в течение последних десяти лет колеблется по данным Росстата в пределах 340–410 тыс. тонн продукции в год [1, 2]. Наиболее представительными группами выпускаемого ассортимента являются мороженое на палочке (29,4 %) и в вафельном стаканчике (34,5 %).

Несмотря на продолжительное время выпуска разных сортов мороженого и обилие как отечественных, так и зарубежных поставщиков оборудования, имеется ряд проблем в работе съемных устройств, остающихся нерешенными до сих пор.

Основным фактором, определяющим эффективность работы съемного устройства, является сила адгезии между лотком транспортера конвейера и брикетом мороженого. При слабой адгезии возможно соскальзывание брикетов мороженого с транспортера при движении в морозильной камере, что приводит к полной выбраковке соответствующей продукции. Напротив, при слишком большой величине силы адгезии возникает ряд проблем при съеме мороженого с транспортера после морозильной камеры, среди них:

- потеря товарного вида мороженого (рис. 1);
- излом палочки-держателя;
- залипание мороженого к лотку транспортера.

Проблемы проявляют себя в комплексе и, несмотря на то что в первых двух случаях дефект потенциально может быть обнаружен на этапе упаковки (соответствующий брикет отправляют на переработку), решение последней проблемы тре-



Рис. 1. Потеря товарного вида продукции

бует дополнительных технологических решений. Традиционным подходом является установка на линию в паре со стандартным съемным устройством пневматических молотков (цилиндров), наносящих по лотку серию ударов при достижении брикетом мороженого определенного положения. Однако такое решение значительно увеличивает акустическую нагрузку на персонал, что требует проведения дополнительных мероприятий по охране труда.

Значение силы адгезии, на преодоление которой должно быть рассчитано съемное устройство, определяется технологическими параметрами производства, такими как время нахождения лотка за пределами морозильной камеры, время нахождения смеси мороженого в транспортном рукаве, температура смеси по выходу из экструдера и рядом других. Соответственно, наиболее перспективным подходом к проектированию съемных устройств при производстве становится моделирование тепловых процессов в брикетах мороженого и определение оптимальных технологических параметров на основе результатов этого моделирования [3].

Температурная зависимость степени кристаллизации воды. Основной вклад в адгезию между брикетом мороженого и лотком, по всей видимости, связан с переходом воды в кристаллическое состояние, сопровождающимся с формированием мостиков из льда между лотком и брикетом. Расчет температурной зависимости степени кристаллизации воды позволяет определить, какая часть воды будет участвовать в этом процессе.

Вычисление степени кристаллизации воды чисто теоретическими методами вряд ли возможно, это связано с тем, что молекулы воды частично находятся в сильно связанном состоянии с молекулами остальных веществ, входящих в состав мороженого, и не способны переходить в кристаллическое состояние даже при температурах значительно более низких, чем $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Однако если иметь данные о зависимости теплоемкости смеси мороженого от температуры и данные о теплоемкости отдельных компонентов, то возможно вычисление степени кристаллизации воды на основании уравнения теплового баланса [4, 5].

Вычисление степени кристаллизации воды проводилось для двух сортов мороженого, составы смесей которых приведены в табл. 1. Значения параметров приведены в массовых процентах, основное отличие данных сортов заключается в итоговом содержании молочного жира.

На основании данных табл. 1 и имеющихся в литературе данных [6] вычислялась результирующая жирность смесей. При расчете принимались следующие значения параметров: доля СОМ в молоке жирностью 3,6 % принималась равной 8,8 %, доля СОМ в масле принималась равной 1,5 %. Плотность СОМ — 570 кг/м^3 , молочного жира — 920 кг/м^3 , заменителя молочного жира — 930 кг/м^3 , сахара — 1190 кг/м^3 , глюкозы — 1555 кг/м^3 (среднее значение между сухой и гидратной формами), стабилизатор — 1648 кг/м^3 , вода — 1000 кг/м^3 .

Результаты вычисления жирности смесей приведены табл. 2.

В соответствии с ГОСТ 31457-2012 первая смесь относится к пломбирам, последняя смесь относится к сливочному мороженому. Необходимость определения вида мороженого связана с тем, что в настоящее время в открытой литературе отсутствуют данные по калориметрии отдельных сортов и смесей мороженого, однако в литературе имеются данные

Таблица 1

Параметр/Ингредиент	Смесь 1	Смесь 2
Молоко натуральное 3,6 %	56,00	62,00
Сухое обезжиренное молоко (СОМ)	5,79	2,52
Масло 82,5 %	12,21	2,30
Молочный жир 99,9 %	0,00	0,00
Заменитель молочного жира (ЗМЖ)	0,00	4,00
Сахар	10,10	9,93
Глюкоза	9,00	10,50
Стабилизаторы и эмульгаторы	1,50	0,60
Ароматизаторы и красители	0,20	0,16
Вода	5,20	7,99

Таблица 2

	Смесь 1	Смесь 2
Жирность, %	12,09	8,13

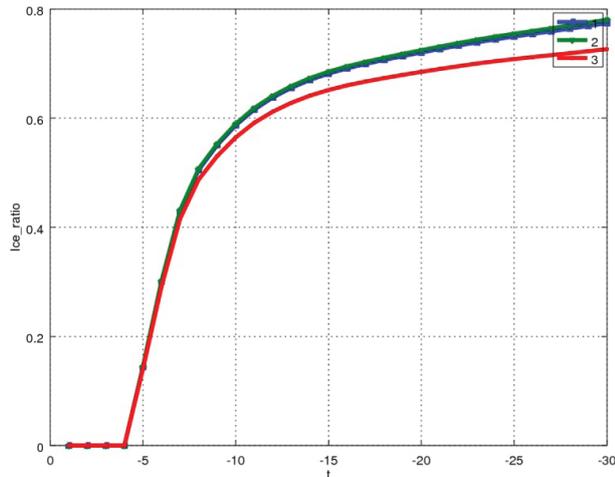


Рис. 2. Зависимость степени кристаллизации воды от температуры для смеси 1

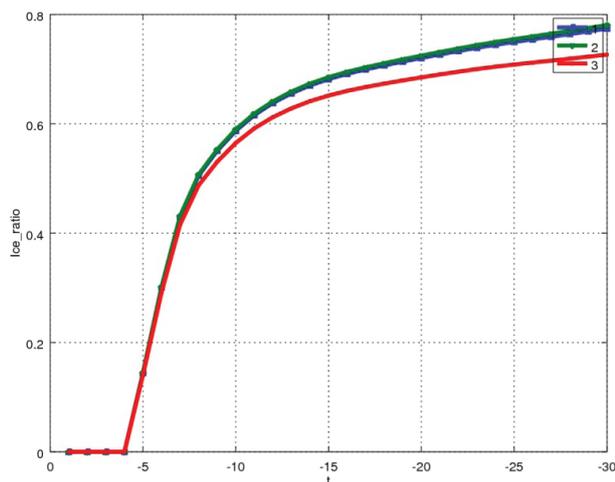


Рис. 3. Зависимость степени кристаллизации воды от температуры для смеси 2

о результатах калориметрии пломбир, сливочного и молочного мороженого [7].

Расчет степени кристаллизации воды проводится на основе уравнения теплового баланса для смеси

$$\omega = \frac{C_m \cdot M - \sum_i C_i \cdot m_i}{M_B L}, \quad (1)$$

где ω — массовая доля льда по отношению к общей массе воды в смеси; C_m — теплоемкость мороженого; C_i — теплоемкости отдельных компонентов; M — масса брикета мороженого по данным производителя; M_B — масса воды в смеси; L — удельная теплота плавления льда. Расчет проводился для каждого температурного интервала (температурный интервал выбирался равным 1 °C в соответствии с имеющимися литературными данными [7], аппроксимации данных внутри температурного ин-

тервала не производилось. Значительное влияние на получаемые результаты может оказать значение удельной теплоты плавления льда, потому было выполнено несколько расчетов с разными видами аппроксимации температурной зависимости данной величины. Данные с индексом «1» используют зависимость

$$L(t) = 4186,8(79,82 + 0,46t + 0,00165t^2) \text{ Дж/кг}, \quad (2)$$

данные с индексом «2» используют зависимость

$$L(t) = (334,2 + 2,12t + 0,0042t^2) \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}, \quad (3)$$

данные с индексом «3» используют фиксированное значение $L(t) = 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ [8].

Зависящей от температуры [7] принималась также теплоемкость СОМ, аппроксимируемая уравнением

$$C_{СОМ}(t) = (0,5625 + 0,03125(273 + t))10^3 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad (4)$$

теплоемкость воды, аппроксимируемая уравнением

$$C_B(t) = (4,2182 - 0,003308t + 0,00007553t^2)10^3 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad (5)$$

теплоемкость льда, аппроксимируемая уравнением,

$$C_A(t) = (2,12 + 0,08t)10^3 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad (6)$$

Теплоемкости остальных элементов принимались константами со значениями $C_{ГЛ} = 0,3003 \text{ кДж/(кг·К)}$, $C_{СХ} = 0,712 \text{ кДж/(кг·К)}$, $C_{См} = 1,151 \text{ кДж/(кг·К)}$, $C_{ЗМЖ} = 2,52 \text{ кДж/(кг·К)}$, $C_{КР} = 2,0 \text{ кДж/(кг·К)}$.

Результаты вычисления степени кристаллизации воды в зависимости от температуры для смесей представлены на рис. 2 и 3.

Для обеих смесей наблюдается хорошее совпадение результатов, полученных на основании температурных зависимостей, задаваемых уравнениями (2) и (3). Во всех случаях использование постоянной теплоты плавления льда дает меньшее значение степени кристаллизации воды, тем не менее максимальное отклонение составляет не более 10 %. Предположительно, все представленные данные могут быть достаточно точно аппроксимированы нарастающей экспоненциальной зависимостью, что дает возможность определения криоскопической температуры дополнительными методами.

Вычисление криоскопической температуры.

Безусловно, важнейшим параметром, определяющим степень адгезии мороженого и лотка, является криоскопическая температура. Под криоскопической температурой подразумевается температура, при которой вода, находящаяся в мороженом, начнет переходить в кристаллическое состояние с формированием сильных адгезионных связей между брикетом мороженого и лотком. Для расчета криоскопической температуры применялась стандартная методика анализа зависимости степени кристаллизации льда от обратной температуры: значения ω (массовой доли льда по отношению к общей массе воды в смеси) рассматривались как линейная функция $(1/t)$.

Расчитанные значения аппроксимировались уравнением

$$\omega = A + B \cdot (1/t).$$

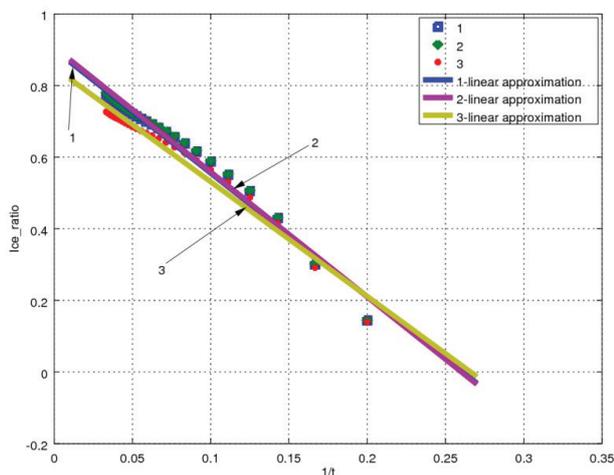


Рис. 4. Обратная зависимость степени кристаллизации от температуры для смеси 1

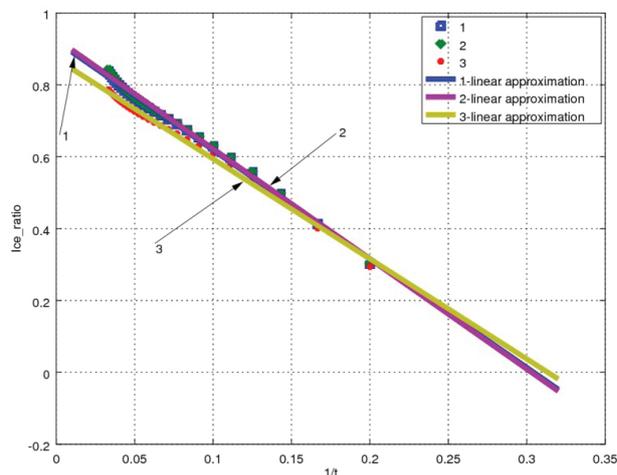


Рис. 5. Обратная зависимость степени кристаллизации от температуры для смеси 2

Таблица 3

	Значение, вычисленное с использованием уравнения (2)	Значение, вычисленное с использованием уравнения (3)	Значение, вычисленное с использованием фиксированного значения	Среднее значение криоскопической температуры
Смесь 1	-3,8322 °C	-3,8428 °C	-3,7582 °C	-3,8110 °C
Смесь 2	-3,2857 °C	-3,2994 °C	-3,1906 °C	-3,2586 °C

Коэффициенты уравнения определялись методом наименьших квадратов в пакете прикладных программ Matlab R2019a. По вычисленным значениям коэффициентов A и B рассчитывалась температура, соответствующая началу процесса кристаллизации ($\omega=0$) $t_{кр} = \frac{-B}{A}$. Для контроля и визуализации параллельно применялся графический метод — строилась зависимость $\omega = \omega \cdot (1/t)$, проводилась линеаризация графика и искалась точка пресечения с осью абсцисс, дающая величину, обратную криоскопической температуре. Расчет производился для трех разных зависимостей удельной теплоты плавления льда с последующим вычислением среднего значения. Результаты вычислений представлены на рис. 4, 5 и в табл. 3.

Криоскопическая температура для сливочного мороженого ожидаемо выше, чем для пломбиров. Значения криоскопических температур, вычисленные с использованием температурных зависимостей удельной теплоты плавления, во всех случаях оказываются ниже, чем значения, вычисленные при использовании фиксированного значения. Различия составляют десятые-сотые доли градуса и влияния на реальные технологические процессы не оказывают.

Расчет скорости кристаллизации воды. Криоскопическая температура определяет точку, при которой начинается процесс установления адгезионных связей между брикетом мороженого и лотком. Однако даже если температура смеси в момент попадания на лоток не превышает криоскопическую, это не означает, что невозможно сильное прилипание мороженого к лотку, так как при криоскопической температуре в кристаллическое состояние переходит не вся вода, имеющаяся в смеси. Наи-

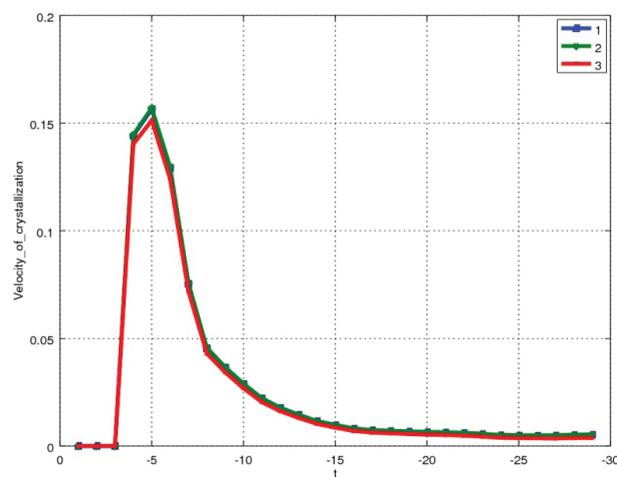


Рис. 6. Скорость кристаллизации смеси 1

более полную информацию об образовании адгезионных связей можно получить, вычисляя скорость кристаллизации воды в зависимости от температуры смеси.

Для расчета скорости кристаллизации выполнялось численное дифференцирование зависимости $\omega(t)$. Расчет выполнялся в пакетах прикладных программ Matlab R2019a.

Полученная зависимость исследовалась графически для определения температуры, соответствующей наибольшей скорости кристаллизации t_{MAX} и выявления области температур, соответствующей интенсивному образованию льда. Ввиду отсутствия в литературе данных об аналитической зависимости скорости кристаллизации от температуры ап-

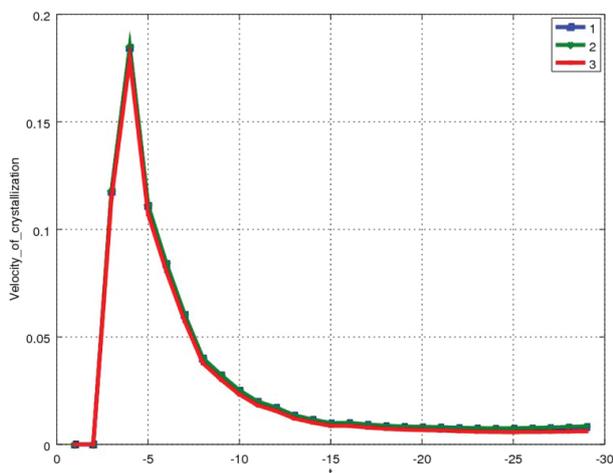


Рис. 7. Скорость кристаллизации смеси 2

проксимация данных не производилась. Результаты приведены на рис. 6 и 7.

Для пломбира максимум кристаллизации происходит при более низкой температуре, чем для сливочного мороженого, что коррелирует с данными о криоскопической температуре. Тем не менее для сливочного мороженого процесс кристаллизации воды идет на начальном этапе более интенсивно — к моменту охлаждения до температуры, соответствующей максимальной скорости кристаллизации для сливочного мороженого; доля воды, перешедшей в кристаллическое состояние, составляет порядка 30 %, в то время как для пломбира только 15 %. Выравнивание происходит при температуре около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда доля воды, перешедшей в кристаллическое состояние, составляет около 60 %.

Расчет отрывного усилия съемного устройства.

Расчет отрывного усилия съемного устройства производился для брикета мороженого без наполнителя и подложки, выполненной из нержавеющей стали, по следующей схеме:

- на основании геометрических данных определялась площадь контактной поверхности, составившей $S = 34,8814\text{ см}^2$;

- на основании данных о составе смеси определялась поверхностная доля воды на контактной поверхности — $\varepsilon_s = 0,30916$;

- на основании данных температурного анализа определялась доля воды, которая будет переходить в кристаллическое состояние и образовывать адгезионные связи при охлаждении до температуры закалочной камеры — $\varepsilon_r = 0,63009$.

С учетом выше перечисленного определялась эффективная площадь контактной поверхности между мороженым и подложкой ($S_{эф} = 6,7949\text{ см}^2$).

Для расчета отрывного усилия, необходимого для отделения мороженого от лотка, рассматривались три механизма взаимодействия:

- прямое взаимодействие с металлической подложкой, механическая прочность на разрыв составляет $\sigma = 8,1\text{ кгс/см}^2$;

- взаимодействие с металлической подложкой, покрытой инеем, содержащим кристаллы льда значительных размеров $\sigma = 0,2\text{ кгс/см}^2$;

- взаимодействие с металлической подложкой, покрытой инеем, не содержащим кристаллов льда значительных размеров $\sigma = 0,027\text{ кгс/см}^2$.

Рассчитанные значения отрывных усилий съемного устройства приведены в табл. 4.

	Прямое взаимодействие	Иней с крупными кристаллами	Иней без крупных кристаллов
Значение силы, Н	539,75 Н	15,126 Н	1,7992 Н

Заключение. Значение отрывного усилия, на которое при проектировании рассчитывается съемное устройство, может отличаться на несколько порядков в зависимости от параметров технологического цикла. Важно понимать, что, несмотря на многообразие процессов, протекающих в смеси мороженого, наибольшее влияние на нагрузку съемного устройства оказывают доля воды, переходящая в кристаллическую фазу, и состояние поверхности лотка конвейера. Возможности изменения каждого из этих параметров существенно ограничены. Долю воды, переходящую в кристаллическое состояние, можно изменять, понижая температуру смеси мороженого на выходе из фризера, но при этом возможна потеря потребительских свойств мороженого [9]. Кроме того, при этом могут возникнуть проблемы с движением смеси по транспортным рукавам, проблемы с формированием брикетов, требуются дополнительные меры по поддержанию температуры смеси, возрастут механические нагрузки на технологические узлы линии, увеличатся расходы на электроэнергию. Сама возможность внесения подобного изменения в технологический процесс может потребовать полной замены производственной линии.

Вторым вариантом уменьшения нагрузки на съемные механизмы является изменение физических свойств поверхности лотка [10] с целью обеспечения приемлемого уровня адгезии. Разработки по нанесению покрытий проводятся как научными центрами [11, 12], так и крупными производственными компаниями. Специалистами компании Unilever проводятся исследования по нанесению на лотки конвейера тефлонового покрытия и использованию ультразвуковых сигналов для отделения брикетов мороженого от лотков, но на данный момент техническое решение, подходящее для промышленного использования, не получено.

Разработка покрытия, работающего в большом интервале температур, обладающего стойкостью к механическим нагрузкам при чистке производственной линии, обладающего приемлемой стоимостью и биологической совместимостью с компонентами смеси мороженого, остается непростой задачей.

Библиографический список

1. Промышленное производство в России. 2016: стат. сб. / Под ред. А. Л. Кевеш; Росстат. М., 2016. 347 с. ISBN 978-5-89476-432-0. URL: https://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/prom16.pdf (дата обращения: 26.12.2019).
2. Производство мороженого в России // Империя холода. № 6 (99). 2019. URL: <https://www.holodinfo.ru/rubrics/morozhenoe/proizvodstvo-morozhenogo-v-rossii/> (дата обращения: 26.12.2019).
3. Cogné C., Laurent P., Andrieu J. [et al.]. Experimental Data and Modelling of Ice Cream Freezing // Chemical Engineering

Research and Design. 2003. Vol. 81, Issue 9. P. 1129–1135. DOI: 10.1205/026387603770866281.

4. Pham Q. T. Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data // Journal of Food Engineering. 1996. Vol. 30, Issues 1-2. P. 95–107. DOI: 10.1016/s0260-8774(96)00036-2.

5. Чубик И. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. 2-е изд., доп. М.: Пищевая промышленность, 1970. 185 с.

6. 2018 ASHRAE Handbook—Refrigeration / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE. 2018. ISBN 978-1-939200-97-6.

7. Оленев Ю. А., Творогова А. А., Казакова Н. В. [и др.]. Справочник по производству мороженого. М.: ДеЛи принт, 2004. 79 с. ISBN 5-94343-074-1.

8. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.]. Физические величины: справ. / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. ISBN 5-283-04013-5.

9. An R., Jiang N. Frozen yogurt and ice cream were less healthy than yogurt, and adding toppings reduced their nutrition value: evidence from 1999–2014 National Health and Nutrition Examination Survey // Nutrition Research. 2017. Vol. 42. P. 64–70. DOI: 10.1016/j.nutres.2017.04.013

10. Zouaghi S., Six T., Nuns N. [et al.]. Influence of stainless steel surface properties on whey protein fouling under industrial processing conditions // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 228. P. 38–49. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.02.009.

11. Barish J. A., Goddard J. M. Anti-fouling surface modified stainless steel for food processing // Food and Bioproducts Processing. 2013. Vol. 91, Issue 4. P. 352–361. DOI: 10.1016/j.fbp.2013.01.003.

12. Huo J., Xiao J., Kirk T. V. [et. al.]. Effects of Fluorolink® S10 surface coating on WPC fouling of stainless steel surfaces and subsequent cleaning // Food and Bioproducts Processing. 2019. Vol. 118. P. 130–138.

ЛАСИЦА Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6923-0706

ORCID: 0000-0002-7187-6400

ResearcherID: F-4110-2014

Адрес для переписки: lasitsa@mail.ru

БОРОДИХИН Илья Андреевич, инженер производства ООО «Юнилевер-Русь» (филиал), г. Омск.

SPIN-код: 2361-1540

ORCID: 0000-0003-1434-9011

ЛИСИН Петр Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Продукты питания и пищевая биотехнология» агротехнологического факультета Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина, г. Омск.

БРИЖАНСКИЙ Леопольд Викторович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Математика, физика и информационные технологии» Мичуринского государственного аграрного университета, г. Мичуринск.

SPIN-код: 2601-1666

Для цитирования

Ласица А. М., Бородихин И. А., Лисин П. А., Брижанский Л. В. Проектирование съемных устройств конвейерных линий пищевой промышленности // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 11–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-11-16.

Статья поступила в редакцию: 10.01.2020 г.

© А. М. Ласица, И. А. Бородихин, П. А. Лисин,
Л. В. Брижанский