

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты**

**Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алёшин**

Кубанский государственный технологический университет,  
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является моделирование продолжительности холодильного воздействия на пищевой продукт. **Метод.** Продолжительность холодильного воздействия состоит из двух этапов: охлаждения и заморозки. При этом теплофизические характеристики продукции определяются практически на специализированной экспериментальной установке, разработанной в лаборатории кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения. **Результат.** Зная технологические режимы, можно определять время, затраченное на охлаждение и заморозку различных пищевых продуктов. **Вывод.** Данную методику можно применять в широких климатических условиях на производствах Российской Федерации в крупных масштабах. Если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до 3 м/с, то получим сокращение времени на 502 с при условии  $R = 0,015$  м и  $\delta = 0,125$  м. Имея начальные и конечные условия можно быстро определять продолжительность холодильного воздействия для любых других пищевых продуктов, выбирая оптимальный режим.

**Ключевые слова:** охлаждение, замораживание, криоскопическая температура, расчёт, теплофизические характеристики, эксперимент.

**Для цитирования:** Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алёшин. Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):24-32. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32

**Modeling the process of refrigeration effects on food products**

**R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Alyoshin**

Kuban State Technological University,  
2 Moscow St., Krasnodar 350072, Russia

**Abstract. Objective.** The present article discusses the issue of modeling the duration of the refrigeration effect on a food product using the example of raw lean meat. **Method.** The duration of the refrigeration effect consists of two stages: cooling and freezing. At the same time, the thermophysical characteristics of products are determined practically on a specialized experimental setup developed in the laboratory of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems. **Result.** Knowing the technological regimes, it is possible to determine the time spent on cooling and freezing various food products. **Conclusion.** This technique can be applied in wide climatic conditions in the production of the Russian Federation on a large scale. If we increase the air speed at the surface of the product to 3 m/s, we will get a reduction in time by 502 s, provided  $R = 0.015$  m and  $\delta = 0.125$  m. Having the initial and final conditions, you can quickly determine the duration of the refrigeration exposure, both for raw lean meat, and for any other food products, choosing the optimal one.

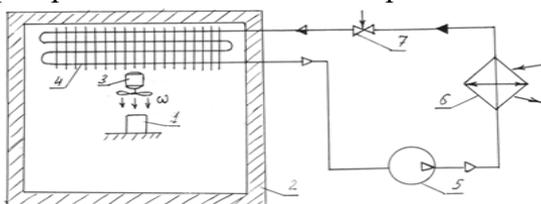
**Key words:** cooling, freezing, cryoscopic temperature, calculation, thermophysical characteristics, experiment

**For citation:** R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Alyoshin. Modeling the process of refrigeration effects on food products. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 24-32. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-24-32

**Введение.** Эффект от холодильного консервирования продуктов обнаруживается после их отепления или размораживания, исключения составляют процессы замораживания с целью проведения сублимации, измельчения, то есть процессы холодильной обработки без использования последующего размораживания. В действительности, положительный эффект зависит от совершенства процессов холодильной обработки и техники. Нахождение рациональных и оптимальных, режимов холодильной обработки того или иного продукта является одной из главных задач холодильной техники и технологии. Решение такой задачи требует, прежде всего, уточнения основного физического параметра, характеризующего режим холодильной обработки, такого как продолжительности охлаждения. В настоящее время часто таким параметром является скорость замораживания продукта. Именно понятию скорости замораживания в холодильной технологии уделяется немалое внимание, как наиболее существенному показателю при теплофизической оценке процесса. Кроме того, интенсивности процесса или его скорости придают первостепенное значение как фактору, влияющему на качество процесса. Если считать, что о состоянии объекта в начале и в конце процесса наиболее полно свидетельствуют его среднеобъемная температура, то в качестве параметра, характеризующего сам процесс, можно использовать «период активного воздействия холодом».

Под периодом активного воздействия холодом следует понимать продолжительность холодильной обработки объекта с данной начальной среднеобъемной температурой до момента достижения им конечной, заданной среднеобъемной температуры. С практической точки зрения параметр «период активного воздействия холодом» определяет то время, в течение которого объект холодильной обработки должен непосредственно находиться в холодильной (морозильной) камере до достижения заданной температуры и может быть легко зафиксирован инструментально [1-9].

**Постановка задачи.** Для моделирования процессов охлаждения и замораживания продуктов авторами был создан экспериментальный стенд. Стенд предназначен для исследования влияния скорости и температуры воздуха на время охлаждения и замораживания пищевых продуктов, а также для изучения нестационарных процессов теплообмена и теплопереноса. Принципиальная схема лабораторного стенда показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема лабораторного стенда**

**1 – исследуемый объект; 2 – теплоизолированная камера; 3 – вентилятор с электродвигателем; 4 – оребренный испаритель; 5 – компрессор холодильной машины; 6 – конденсатор; 7 – дроссельный вентиль**

**Fig. 1. Scheme of the laboratory stand**

**1 - the object under study; 2 - heat-insulated chamber; 3 – fan with electric motor; 4 – finned evaporator; 5 – refrigerator compressor; 6 - capacitor; 7 - throttle valve**

Исследуемый продукт 1 располагается в теплоизолированной холодильной камере 2. Вентилятор 3 создает принудительное движение охлажденного воздуха у поверхности продукта с заданной скоростью м/с. Холодильный агент в испарителе холодильной машины 4 воспринимает теплоту от охлаждаемого продукта, кипит, и его пары поступают в компрессор 5, где они сжимаются до давления конденсации и поступают в конденсатор 6, в котором пары охлаждаются и конденсируются. После этого жидкий холодильный агент дросселируется в дроссельном вентиле 7 до давления кипения, после чего поступает в испаритель 4. В качестве измеряемой температуры применяются медь-константановые термопары. Для установки термопар в исследуемом продукте необходимо предварительно его подготовить (выполнить отверстия диаметром 3 мм и глубиной R, где R – это величина

на равная половине толщины пластины продукта). До начала испытаний необходимо подготовить стенд к работе (заблаговременно запустить в работу холодильную машину для обеспечения стабильного режима термообработки) [10-18].

**Методы исследования.** Продолжительность холодильного воздействия  $\tau_{\text{общ}}$  состоит из двух слагаемых:  $\tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \tau_2$ :

где  $\tau_1$  – продолжительность охлаждения, т.е. периода времени, соответствующего достижению на поверхности продукта криоскопической температуры, с;

$\tau_2$  – продолжительность замораживания, т.е. периода достижения заданной среднеобъемной температуры продукта, с [19].

Для определения продолжительности охлаждения  $\tau_1$ , с, воспользуемся формулой:

$$\tau_1 = \varphi \cdot \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R^2}{\lambda_1} \cdot \left[ \left( \frac{2.3}{Bi_1} + 0,8 \right) \cdot \log \left( \frac{t_n - t_{oc}}{t_{n1} - t_{oc}} \right) + 0,12 \right]; \quad (1)$$

где  $\varphi$  – коэффициент формы продукта;

$c_1$  – удельная теплоёмкость продукта, Дж/(кг·К);

$\rho_1$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;

$R$  – расстояние от поверхности до термического центра, м;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$Bi_1$  – теплообменный критерий Био;

$t_n$  – начальная температура поверхности продукта, °С;

$t_{oc}$  – температура окружающей среды, °С;

$t_{n1}$  – конечная температура охлаждения, °С.

$$Bi_1 = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_1};$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{\delta};$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;

$\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$\delta$  – определяющий размер для определения числа Нуссельта (длина поверхности продукта в направлении потока воздуха), м.

$$Nu = 0,245 \cdot Re^{0,6};$$

где  $Re$  – числа Рейнольдса.

$$Re = \frac{\omega \cdot \delta}{\nu_B};$$

где  $\omega$  – скорость воздуха у поверхности продукта, м/с;

$\nu_B$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

$$t_{n1} = t_{кр} + \frac{Bi_1}{n} \cdot (t_{кр} - t_{oc}) \cdot (1 - \psi);$$

где  $t_{кр}$  – криоскопическая температура, °С;

$n$  – показатель степени функции распределения температуры по толщине объекта; в нестационарных процессах холодильной технологии зависит от многих факторов и, в первую очередь, от теплофизических свойств тела, его размеров, а также от коэффициента теплоотдачи. Для технологических расчётов с достаточной точностью можно принять  $n = 2$ ;

$\psi$  – параметр, который зависит от геометрии объекта (для тел простейших форм его величину можно определить по формулам: для пластины  $\psi = \frac{1}{n+1}$ ).

Продолжительность замораживания  $\tau_2$ , с, определяется по формуле:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \frac{\rho_2 \cdot R^2 \cdot W \cdot r}{\lambda_2 \cdot (t_k - t_{n2})} \cdot \left[ 1 - \frac{t_k}{t_k - \frac{(t_k - t_{n2}) \cdot z}{2 \cdot \left( \frac{1}{Bi_2} + z \right)}} \cdot \left( z^2 + \frac{2 \cdot z}{Bi_2} \right) \right]; \quad (2)$$

где  $\rho_2$  – плотность продукта после охлаждения, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – относительное начальное влагосодержание, доли единицы;  
 $r$  – теплота фазового перехода, Дж/кг;  
 $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности после охлаждения, Вт/(м·К);  
 $t_{н2}$  – конечная температура заморозки, °С;  
 $Bi_2$  – теплообменный критерий Био после охлаждения;  
 $z$  – относительная толщина замороженного слоя.

Относительная толщина замороженного слоя зависит от конечной заданной среднеобъемной температуры, начального относительного влагосодержания, определяющего размера объекта (расстояния от поверхности до термического центра) и от условий организации теплообмена; определяется из системы четырех уравнений. Однако, если температура охлаждающей среды не опускается ниже минус 50 °С, а коэффициент теплоотдачи на поверхности теплообмена не превышает 70-80 Вт/(м<sup>2</sup>·К), то относительную толщину замороженного слоя можно принять равной единице ( $z=1$ ), что соответствует условиям замораживания в современных воздушных скороморозильных аппаратах [20].

**Обсуждение результатов.** Экспериментальные исследования и моделирования процесса охлаждения и замораживания продукции осуществлялось для следующих условий: сырая тощая говядина; форма - пластина,  $\varphi=1$ ;  $c_1 = 3349$  Дж/(кг·К);  $\rho_1 = 1070$  кг/м<sup>3</sup>;  $R = 0,015$  м;  $\lambda_1 = 0,453$  Вт/(м·К);  $t_{н1} = +10$  °С;  $t_{oc} = -30$  °С;  $\lambda_B = 2,20 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К);  $\delta = 0,125$  м;  $\omega = 1,5$  м/с;  $v_B = 10,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $t_{кр} = -2$  °С;  $\rho_2 = 1070$  кг/м<sup>3</sup>;  $W = 0,7$ ;  $r = 335000$  Дж/кг;  $\lambda_1 = 1,392$  Вт/(м·К);  $t_{н2} = -8$  °С.

Расчёт основного режима:

$$Re = \frac{1,5 \cdot 0,125}{10,8 \cdot 10^{-6}} = 1,736 \cdot 10^4.$$

$$Nu = 0,245 \cdot (3,472 \cdot 10^4)^{0,6} = 85,687.$$

$$\alpha = \frac{85,687 \cdot 2,20 \cdot 10^{-2}}{0,125} = 15,081 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

$$Bi_1 = \frac{15,081 \cdot 0,015}{0,453} = 0,499.$$

$$t_{н1} = -2 + \frac{0,499}{2} \cdot (-2 + 30) \cdot \left( 1 - \frac{1}{2 + 1} \right) = 2,661 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

$$\tau_1 = 1 \cdot \frac{3349 \cdot 1070 \cdot 0,015^2}{0,453} \cdot \left[ \left( \frac{2,3}{0,499} + 0,8 \right) \cdot \log \left( \frac{10 + 30}{2,661 + 30} \right) + 0,12 \right] = 1,061 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_2};$$

$$Bi_2 = \frac{15,081 \cdot 0,015}{1,392} = 0,163;$$

$$t_{н2} = t_{кр} + \frac{Bi_2}{n} \cdot (t_{кр} - t_{oc}) \cdot (1 - \psi);$$

где  $t_{кр}$  – конечная температура продукта, °С.

$$t_{н2} = -8 + \frac{0,163}{2} \cdot (-8 + 30) \cdot \left( 1 - \frac{1}{2 + 1} \right) = -6,808 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{1070 \cdot 0,015^2 \cdot 0,7 \cdot 335000}{1,392 \cdot (-8 + 6,808)} \cdot \left[ 1 - \frac{-8}{-8 - \frac{(-8 + 6,808) \cdot 1}{2 \cdot \left( \frac{1}{0,163} + 1 \right)}} \cdot \left( 1^2 + \frac{2 \cdot 1}{0,163} \right) \right]$$

$$= 2,382 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

$$\tau_{\text{общ}} = 1,061 \cdot 10^3 + 2,382 \cdot 10^3 = 3,443 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

При моделировании проведены расчёты для скоростей воздуха над поверхностью продукта:  $\omega=1,0$  м/с;  $\omega=1,5$  м/с;  $\omega=3,0$  м/с. При переменном расстоянии от поверхности до

термического центра:  $R=0,01$  м;  $R=0,015$  м;  $R=0,02$  м. И длине поверхности продукта в направлении потока воздуха:  $\delta=0,1$  м;  $\delta=0,125$  м;  $\delta=0,15$  м.

В результате получено, что если скорость воздуха у поверхности продукта будет 1,5 м/с, то время заморозки свежего тощего мяса с начальной температуры у поверхности продукта  $+10^{\circ}\text{C}$  до конечной температуры у поверхности продукта  $-8^{\circ}\text{C}$  будет составлять  $3,443 \cdot 10^3$  с. Если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до 3,0 м/с, то время заморозки уменьшится и будет составлять  $2,941 \cdot 10^3$  с для  $R = 0,015$  м и  $\delta = 0,125$  м [21]. Итоговые результаты моделирования процесса охлаждения и замораживания приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

**Таблица 1. Зависимость времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и расстояния от поверхности продукта до термического центра**

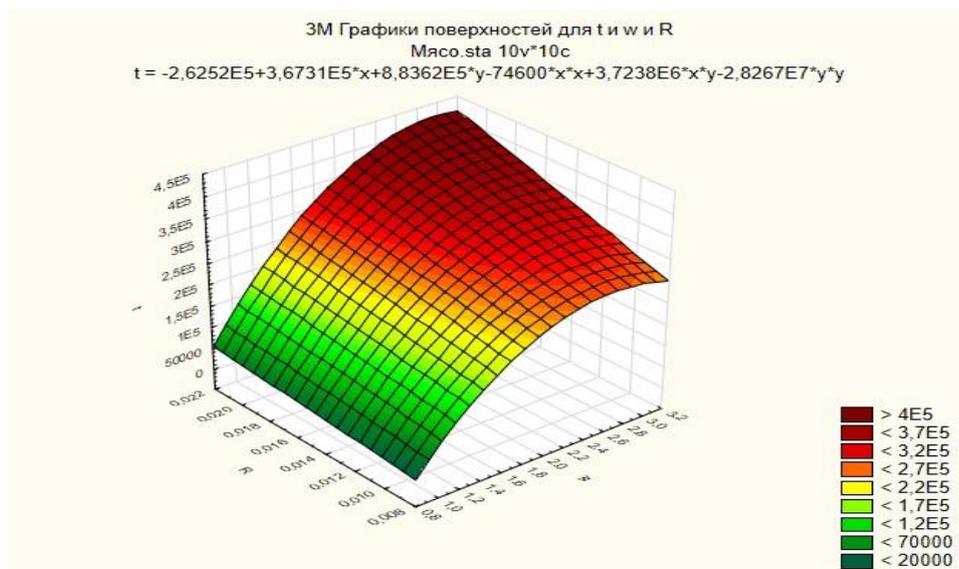
**Table 1. The dependence of the time of the cooling process with the freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the distance from the surface of the product to the thermal center**

| $\omega$ \ R | 0,01 м            | 0,015 м           | 0,02 м            |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1,0 м/с      | $\tau = 77720$ с  | $\tau = 92680$ с  | $\tau = 107000$ с |
| 1,5 м/с      | $\tau = 176900$ с | $\tau = 211300$ с | $\tau = 244200$ с |
| 3,0 м/с      | $\tau = 287000$ с | $\tau = 342700$ с | $\tau = 396300$ с |

**Таблица 2. Зависимость времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и длины поверхности продукта в направлении потока воздуха**

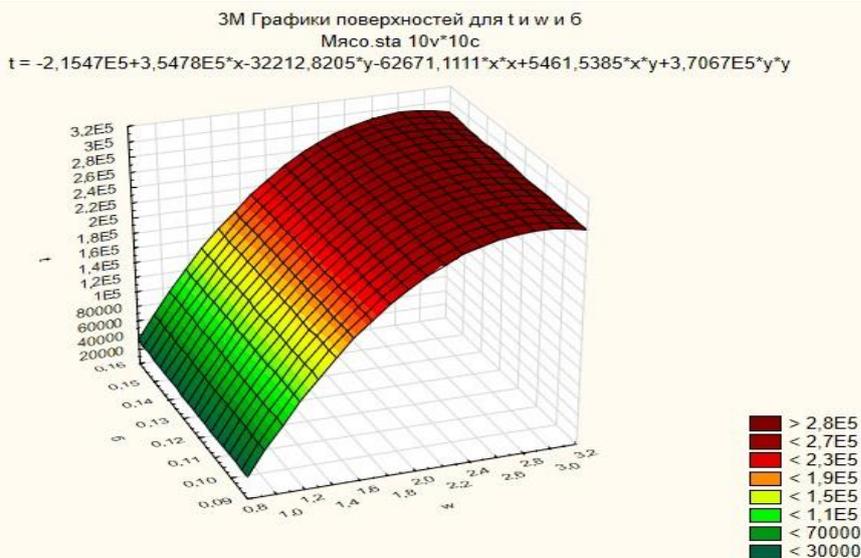
**Table 2. The dependence of the time of the cooling process with the freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the length of the product surface in the direction of the air flow**

| $\omega$ \ $\delta$ | 0,1 м             | 0,125 м           | 0,15 м            |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1,0 м/с             | $\tau = 77720$ с  | $\tau = 79110$ с  | $\tau = 80890$ с  |
| 1,5 м/с             | $\tau = 176900$ с | $\tau = 178500$ с | $\tau = 180500$ с |
| 3,0 м/с             | $\tau = 287000$ с | $\tau = 288600$ с | $\tau = 290800$ с |



**Рис. 2. График поверхностей зависимости времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и расстояния от поверхности продукта до термического центра**

**Fig. 2. Graph of surfaces of the dependence of the time of the cooling process with freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the distance from the surface of the product to the thermal center**



**Рис. 3. График поверхностей зависимости времени процесса охлаждения с замораживанием от продукта скорости воздуха у поверхности продукта и длины поверхности продукта в направлении потока воздуха**

**Fig. 3. Graph of surfaces of the dependence of the time of the process of cooling with freezing on the product of the air speed at the surface of the product and the length of the product surface in the direction of air flow**

**Вывод.** Учитывая начальные и конечные условия процесса охлаждения и замораживания, модель и стенд позволяют достаточно точно определять продолжительность холодильного воздействия, как для мяса, так и для любых других пищевых продуктов в целом, выявлять оптимальные значения и режимы для различных пищевых продуктов. Также нужно знать характеристики холодильного оборудования и в данном примере, если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до 3 м/с, то получим сокращение времени на 502 с при условии  $R = 0,015$  м и  $\delta = 0,125$  м.

#### Библиографический список:

1. Жлобо Р.А., Степанова Е.Г., Бзегежев А.З. Зависимость коэффициента сжимаемости фтортрихлорметана от давления при различных температурах//Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. Краснодар, 2020. 909-913 с.
2. Жлобо Р.А., Степанова Е.Г., Гармаш А.П. Зависимость коэффициента сжимаемости трифтортрихлорэтана от давления при различных температурах//Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. Краснодар, 2020. 893-897 с.
3. Зависимость коэффициента сжимаемости трифторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, А. Ю. Трудников [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 494-502.
4. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафторэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, И. Е. Полушкин [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 472-480.
5. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, О. А. Пятыхин [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 465-472.
6. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафтордихлорэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Н. Д. Капитанов [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 457-465.

7. Зависимость коэффициента сжимаемости дихлорфторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, М. П. Тихомиров [и др.] // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года.* – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 276-284.
8. Зависимость коэффициента сжимаемости дифтордихлорметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, А. Е. Лебедев [и др.] // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года.* – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 268-276.
9. Зависимость коэффициента сжимаемости хлордифторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, И. В. Томашев [и др.] // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года.* – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 486-494.
10. Зависимость коэффициента сжимаемости трифторхлорметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Р. В. Масленников [и др.] // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года.* – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 502-510.
11. Зависимость коэффициента сжимаемости оксафторциклобутана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Г. Г. Черненко [и др.] // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года.* – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 338-344.
12. Зависимость коэффициента сжимаемости пропилена от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, М. В. Шамаров, Д. Р. Мойдинов [и др.] // *Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года.* – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 40-43.
13. Зависимость коэффициента сжимаемости пропана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, А. В. Гукасян, А. А. Султанов [и др.] // *Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года.* – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 53-56.
14. Зависимость коэффициента сжимаемости метана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, С. Ю. Ропот [и др.] // *Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года.* – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 57-60.
15. Расчет и проектирование сопла Лавала / Ю. С. Беззаботов, Р. А. Жлобо, Д. Р. Мойдинов, Е. Г. Степанова // *Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции, Керчь, 14–17 мая 2020 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина.* – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – С. 172-175.
16. Приборы и техника низкотемпературных систем: учеб. пособие / Е.Г. Степанова, Б.Ю. Орлов, Р.А. Жлобо. – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2021. – 291 с.
17. Жлобо, Р. А. Зависимость коэффициента сжимаемости дифторэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, И. Е. Сязин, А. Г. Биденко // *Молодежь и наука : Материалы XVIII международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов. В 2-х томах, Нижний Тагил, 27 мая 2022 года. Том 1.* – Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт - филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", 2022. – С. 34-36.
18. Жлобо, Р. А. Зависимость коэффициента сжимаемости этана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, А. С. Зайцев // *Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сборник материалов Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 18–19 мая 2022 года.* – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2022. – С. 73-75.
19. Степанова, Е. Г. Исследование процесса охлаждения рыбы с применением бинарного льда / Е. Г. Степанова, Р. А. Жлобо, И. Е. Трофименко // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания.* – 2022. – № 3. – С. 262-266. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-262-266.
20. Андреев, И. А. Перспективы применения углекислотных холодильных машин в системах холодоснабжения / И. А. Андреев, М. В. Шамаров // *Механика, оборудование, материалы и технологии: 4*

международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 518-526.

21. Научно-технические достижения и перспективы института механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем КУБГТУ в области образования и компрессоростроения / М. В. Шамаров, А. В. Гукасян, Ю. С. Беззаботов, И. Е. Сязин // Эффективное применение в проектах компрессорного, газоразделительного и энергосберегающего оборудования: Сборник трудов III-й научно-технической конференции, станица Динская, 07–08 октября 2021 года. – Краснодар: ООО "Контур", 2021. – С. 53-57.

#### References:

1. Zhlobo R.A., Stepanova E.G., Bzegezhev A.Z. "Dependence of the compressibility factor of fluorotrichloromethane on pressure at different temperatures". *Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference*. Krasnodar. 2020; 909-913 [In Russ]
2. Zhlobo R.A., Stepanova E.G., Garmash A.P. "Dependence of the compressibility coefficient of trifluorotrichloroethane on pressure at different temperatures". *Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference/* Krasnodar. 2020; 893-897 [In Russ]
3. Dependence of the compressibility coefficient of trifluoromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, A. Yu. , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;494-502. [In Russ]
4. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluoroethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, I. E. Polushkin [et al.]. *Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: 4th international scientific and practical conference*, Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;472-480. [In Russ]
5. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluoromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, O. A. Pyatyshin [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 465-472. [In Russ]
6. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluorodichloroethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, N. D. Kapitanov [et al.] .*Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 457-465. [In Russ]
7. Dependence of the compressibility coefficient of dichlorofluoromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, M. P. Tikhomirov [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021. - P. 276-284. [In Russ]
8. Dependence of the compressibility coefficient of difluorodichloromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, A. E. Lebedev [et al.]. *Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 268-276. [In Russ]
9. Dependence of the compressibility coefficient of chlorodifluoromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, I. V. Tomashev [et al.] *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 486-494. [In Russ]
10. Dependence of the compressibility coefficient of trifluorochloromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, R. V. Maslennikov [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;502-510. [In Russ]
11. Dependence of the compressibility coefficient of oxafuorocyclobutane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, G. G. Chernenko [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021.- Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 338-344. [In Russ]
12. Dependence of the propylene compressibility coefficient on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, M. V. Shamarov, D. R. Moidinov [et al.] // *Innovative directions of integration of science, education and production: collection of materials of the III International Scientific -practical conference*, Kerch, May 11–15, 2022. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 40-43. [In Russ]
13. Dependence of the propane compressibility coefficient on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, A. V. Gukasyan, A. A. Sultanov [et al.]. *Innovative directions of integration of science, education and production: collection of materials of the III International Scientific -practical conference*, Kerch, May 11–15, 2022. - Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 53-56. [In Russ]
14. Dependence of the compressibility coefficient of methane on pressure at different temperatures / R. A.

- Zhlobo, E. G. Stepanova, S. Yu. -practical conference, Kerch, May 11–15, 2022. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 57-60. [In Russ]
15. Calculation and design of the Laval nozzle / Yu. S. Bezzabotov, R. A. Zhlobo, D. R. Moidinov, E. G. Stepanova. Innovative directions for the integration of science, education and practical conference, Kerch, May 14–17, 2020 / Under the general editorship of E.P. Masyutkin. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2020; 172-175. [In Russ]
  16. Devices and technology of low-temperature systems: textbook. Allowance. E.G. Stepanova, B.Yu. Orlov, R.A. Redneck. - Krasnodar: Ed. FGBOU VO "KubGTU", 2021; 291. [In Russ]
  17. Zhlobo, R. A. Dependence of the compressibility coefficient of difluoroethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, I. E. Syazin, A. G. Bidenko. *Youth and Science: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of High School Students, students and graduate students. In 2 volumes, Nizhny Tagil, May 27, 2022. Volume 1.* - Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Institute of Technology - a branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin", 2022; 34-36. [In Russ]
  18. Zhlobo, R. A. Dependence of ethane compressibility coefficient on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, A. S. Zaitsev. Promising materials and highly efficient processing processes: collection of materials of the All-Russian Youth Conference, Saratov, May 18–19 2022. - Saratov: Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, 2022;73-75. [In Russ]
  19. Stepanova, E. G. Study of the fish cooling process using binary ice / E. G. Stepanova, R. A. Zhlobo, I. E. Trofimenko. *Technologies of the food and processing industry of the AIC - healthy food products.* 2022; 3: 262-266. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-262-266. [In Russ]
  20. Andreev, I. A. Prospects for the use of carbon dioxide refrigeration machines in refrigeration systems / I. A. Andreev, M. V. Shamarov. Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference, Krasnodar, 25–26 November 2021. Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 518-526. [In Russ]
  21. Shamarov M. V., Gukasyan A. V., Bezzabotov Yu. S., Syazin I. E. Scientific and technical achievements and prospects of the Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems of KUBGTU. Effective application in projects of compressor, gas separation and energy-saving equipment: Proceedings of the III scientific and technical conference, Dinskaya village, October 07–08, 2021. - Krasnodar: Kontur LLC, 2021; 53-57. [In Russ]

**Сведения об авторах:**

Жлобо Руслан Андреевич, старший преподаватель кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; Rzhlobo@bk.ru; ORCID 0000-0003-2568-2872

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; Schmax@mail.ru

Алёшин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; vladimir01121946@mail.ru

**Сведения об авторах:**

Ruslan A. Zhlobo, Senior Lecturer, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Rzhlobo@bk.ru; ORCID 0000-0003-2568-2872

Maksim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Schmax@mail.ru

Vladimir I. Alyoshin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; vladimir01121946@mail.ru

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию/Received** 22.12.2022.

**Одобрена после рецензирования/ Revised** 27. 01.2023.

**Принята в печать/Accepted for publication** 27.01.2023.