

УДК 621.565.7

## Особенности численного исследования теплофизических параметров парогазовых потоков в камерах холодильников с регулируемой газовой средой

Канд. техн. наук Е. Т. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, А. Ф. ОПАЛИХИН<sup>2</sup><sup>1</sup>petrov\_et@refropkb.ru, <sup>2</sup>anton@testa7.ru

Университет ИТМО

*Представлены результаты работы по формированию математической модели холодильно-технологического оборудования камер холодильников с регулируемой газовой средой (РГС) с учетом переменной аэродинамической характеристикой сети в процессе эксплуатации. Численное исследование проведено на примере камеры с вместимостью 200 т, размерами 15×8×7 м, для хранения яблок при воздействии двух основных воздействующих параметров (массового расхода и изменения угла установки дефлектора). Выделены основные параметры, определяющие эффективность системы охлаждения продукции. Выполнено численное исследование математической модели, выявлена степень воздействия основных параметров на равномерность температурно-влажностных полей в стесненном объеме камеры холодильника, выявлены основные методы оптимального управления в процессе эксплуатации, обеспечивающие выполнение требований технологических регламентов. Интенсивность циркуляции парогазовых потоков в каждый момент времени определяется из условия соответствия характеристик вентиляторов и газодинамических характеристик сетей, где определяющим являются интенсивность инееобразования в воздухоохладителе и соответствующее изменение массового расхода потока. Анализ полученных данных в ходе численного исследования показывает, что указанные два параметра оказывают значительное влияние на неравномерность температурно-влажностных полей и могут быть использованы при формировании общего алгоритма адаптивного управления.*

**Ключевые слова:** холодильная камера, регулируемая газовая среда, проект, воздухораспределение, фруктоовощехранилище, математическая модель, численное исследование.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 19.06.2017, принята к печати 28.07.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-47-52

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

*Петров Е. Т., Опалихин А. Ф.* Особенности численного исследования теплофизических параметров парогазовых потоков в камерах холодильников с регулируемой газовой средой // Вестник Международной академии холода. 2017. № 3. С. 47–52.

## Thermophysical parameters of steam gas flow in refrigerating chambers with controlled atmosphere. Numerical analysis

Ph. D. E. T. PETROV<sup>1</sup>, A. F. OPALIKHIN<sup>2</sup><sup>1</sup>petrov\_et@refropkb.ru, <sup>2</sup>opalihin@refropkb.ru

ITMO University

*The article deals with the results of the work on the development of a mathematical model for refrigeration and process equipment in refrigerated chambers with controlled atmosphere taking into account the variable aerodynamic characteristics of the network during operation. Numerical investigation was carried out using the example of a chamber with the capacity of 200 tons, with dimensions of 15×8×7 m for storing apples under the influence of two main influencing parameters (mass flow and changing the angle of installation of the deflector). The main parameters determining the efficiency of the cooling system are chosen. Numerical analysis of the mathematical model was carried out, the degree the main parameters' influence on the uniformity of temperature and humidity fields in the cramped chamber of the refrigerator was revealed, the main methods of optimal control during operation, ensuring compliance with the requirements of technological regulations, were selected. The intensity of circulation of steam-gas flows at each moment of time is determined from the condition that the characteristics of the fans and the gas dynamic characteristics are consistent, where the intensity of the frost formation on the surface of the air cooler and the corresponding change in the mass flow rate are the determining ones. An analysis of the data obtained by the numerical study shows that these two parameters have a significant effect on the unevenness of the temperature-humidity fields and can be used in the formation of a general adaptive control algorithm.*

**Keywords:** refrigerating chamber, controlled atmosphere, project, air distribution, fruit storage, mathematical model, numerical analysis.

**Article info:**

Received 19/06/2017, accepted 28/07/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-47-52

Article in Russian

**For citation:**Petrov E. T., Opalikhin A. F. Thermophysical parameters of steam gas flow in refrigerating chambers with controlled atmosphere. Numerical analysis. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 3. p. 47–52.**Введение**

Проектирование и эксплуатация холодильников с регулируемой газовой средой (РГС) требуют детального исследования теплофизических параметров потоков с целью обеспечения выполнения требований технологического регламента (равномерности температуры, относительной влажности, скорости и концентрации газов) [1–3].

На данный момент так и не решен вопрос об оптимальном способе раздачи воздуха в камерах. Подбор воздухоохладителей для бесканальных систем воздухо-распределения проектными организациями производится лишь по теплообменной поверхности и дальности струи [4], без учета аэродинамики холодильной камеры.

Указанные выше обстоятельства требуют разработки таких методов управления конвективными парогазовыми потоками в стесненном пространстве камеры, которые обеспечат достижение минимума эксплуатационных затрат при строгом выполнении технологического регламента в процессе хранения продукции.

Целью работы является численное исследование теплофизических параметров парогазовых потоков при воздействии ограниченного множества параметров оптимизации, которое используется для оценки эффективности методов оптимального адаптивного управления. Данное исследование позволит конкретизировать как перечень параметров оптимизации, так и алгоритм оптимального управления при переменных условиях эксплуатации.

**Формирование математического описания объекта**

Совершенствование способов раздачи охлаждающего воздуха или парогазового потока (для камер с РГС) — один из резервов повышения эффективности систем охлаждения фруктов и овощей.

Для нормальной работы системы воздухо-распределения необходимо предотвратить образование застойных зон и обеспечить равномерность полей контролируемых параметров в камере. Следует отметить, что на наличие и размеры застойных зон оказывают влияние естественные конвективные потоки, формируемые в камере. Формирование конвективных потоков и их характеристик определяется множеством факторов, таких, в частности, как наличие теплопритока от продукта, геометрии стесненного пространства и т. д. [5–7].

Исходными данными для расчета системы воздухо-распределения служат результаты объемно-планировочных решений (размеры камеры; размеры простран-

ства над грузовым объемом камеры, распределительного коллектора, обратного коллектора; расположение и размеры технологического оборудования; схема воздухо-распределения) [8, 9], требования к параметрам потока в камере в теплый и холодный периоды года; тепло- и влажопитоки, допустимые отклонения температуры и скорости потока парогазовой смеси в рабочей зоне [10–12].

Интенсивность циркуляции парогазовых потоков в каждый момент времени определяется условиями соответствия характеристик вентиляторов воздухоохладителей и газодинамических характеристик сетей [13–15]. Расчет характеристики сети складывается в каждом конкретном случае из расчета суммарных гидравлических потерь всех элементов газодинамического контура (рис. 1).



Рис. 1. Гидравлические потери элементов газодинамического контура

Fig. 1. Hydraulic losses of gas-dynamic circuit elements

Анализ газодинамического сопротивления сети показывает, что значительную долю потерь напора в контуре определяет гидравлическое сопротивление воздухоохладителя, которое зависит от расхода парогазовой смеси, геометрии теплообменника и толщины слоя инея на его поверхности.

Чтобы определить рабочую точку вентилятора и расход воздуха в системе необходимо решить уравнение:

$$\oint F(V, \Delta P) = 0,$$

где  $V$  — расход воздуха в системе, м<sup>3</sup>/с.

Равномерность температурно-влажностных полей и концентрации газов в охлаждаемых помещениях холодильников с РГС в значительной степени определяется газодинамикой парогазового потока и интенсивностью тепловлажностных потоков в стесненных объемах камер, что требует соответствующего математического описания и численного исследования.

Наиболее перспективным представляется использование математической модели на базе соотношений Навье–Стокса [16, 17], которая представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений неразрывности, сохранения количества движения и энергии, уравнения

состояния, дополненную соответствующей моделью турбулентности.

В этом случае, по результатам вычислений становятся известными не только интегральные, но и локальные динамические и тепловые характеристики потока. Численное решение системы дифференциальных уравнений состоит из набора чисел, по которому можно построить распределение зависимой переменной, и в этом смысле численный метод решения подобен лабораторному эксперименту.

Важной составляющей успешного решения системы уравнений Навье–Стокса является корректное задание граничных условий.

Граничные и начальные условия формируются исходя из расчетных значений, полученных при реализации загрузки камеры и подачи газа после предварительного охлаждения продукции до параметров хранения. Граничные и начальные условия в процессе эксплуатации камер (значений плотностей тепловых потоков всех видов ограждений  $q_{Ti}$ ; температур внутренних поверхностей ограждений  $t_{Ti}$  и др.) уточняются с учетом конкретных климатических условий каждого месяца эксплуатации. Это дает возможность рассматривать объект в виде квазистационарной модели и уточнять эксплуатационные затраты за конкретный технологический цикл (загрузка — хранение — выпуск).

На первом этапе расчета полей скоростей, давлений и температур в стесненном пространстве приходится принимать условия постоянства плотности теплового потока, температур, скорости движения потока на каждой поверхности ограждений и поверхностях контейнеров с продукцией на основе исходного состояния конструкций ограждений камер и геометрии контейнеров.

Условия обтекания каждой ячейки определяются общей картиной распределения потока парогазовой смеси во всем объеме камеры при наличии газодинамического и теплового воздействий со стороны приборов охлаждения, теплового воздействия от стеновых ограждений и поверхности груза. Объемный расход потока, количество вентиляторов и общее число воздухоохладителей в общем случае могут быть как оптимизационными параметрами, так и задаваться в ходе проектных исследований.

Предлагается описание тепломассообмена с помощью ячеечной модели при преимущественном влиянии конвекции с упорядоченным расположением ячеек (контейнеров) в объеме камеры. Использование указанной модели позволяет приближенно описать поле скоростей, температур и концентрации газов, как в объеме контейнеров, так и на ограничивающих поверхностях. Начальные и граничные условия для каждого контейнера формируются с помощью предварительного расчета распределения газовой смеси в стесненном пространстве между условно «непроницаемыми поверхностями», ограничивающими объемы контейнеров.

Для решения поставленной задачи выбрана двухпараметрическая модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$  с модификацией RNG [16, 17].

Модель  $k$ - $\epsilon$  с модификацией RNG, представляет собой совокупность уравнений для кинетической энергии

турбулентных пульсаций  $k$ , скорости диссипации турбулентной энергии  $\epsilon$ , выражения для турбулентной вязкости и комплект стандартных констант:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}k\bar{u}_j) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \bar{\rho}\epsilon; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\epsilon\bar{u}_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k}, \end{aligned}$$

где значения постоянных модели равны:  $C_{1\epsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\epsilon} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,3$ .

Турбулентная вязкость при этом определяется по соотношению

$$\mu_T = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon},$$

где  $C_\mu = 0,09$ ;  $k$  — кинетическая энергия турбулентных пульсаций.

Генерация кинетической энергии турбулентных пульсаций  $G_k$ , вызванная взаимодействием напряжений Рейнольдса (градиентами средней скорости потока)

$$G_b = \beta g_j \frac{\mu_T}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

где  $Pr_t = 0,85$  — турбулентное число Прандтля.

В соответствии с гипотезой Буссинеска,  $G_b$  может быть найдена через модуль тензора средней скорости деформации частиц жидкости  $S$ :

$$\begin{aligned} G_k &= \mu_T S^2; \quad S \equiv \sqrt{2S_{jk}S_{kj}}; \\ S_{jk} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \right); \\ S_{kj} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \right). \end{aligned}$$

Уравнения Навье–Стокса решаются численным методом, при этом дифференциальные уравнения в области произвольного узла сетки заменяются алгебраическими уравнениями-аналогами, описывающими изменение переменной между несколькими соседними точками. Решение аналога осуществляется итерационным методом. После каждой итерации находятся некоторые значения переменных. Они подставляются в исходные уравнения, выраженные в виде  $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = 0$ . Поскольку решение является приближенным (так как решается алгебраический аналог, а не дифференциальное уравнение), то при подстановке результата расчета получается, что  $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = R$ . Величина  $R$  называется невязкой и является критерием, по которому судят о процессе решения. Очевидно, что чем ближе значение  $R$  к нулю, тем ближе найденное ре-

шение дискретного аналога к решению исходного дифференциального уравнения.

В качестве дополнительного критерия сходимости можно использовать изменение в процессе решения какого-либо параметра потока в произвольном месте расчетной области (сигнальный параметр). Его неизменность также говорит о достижении предельной точности расчета.

Решение задачи можно считать законченным при выполнении следующих условий:

- разность расходов рабочего тела между входной и выходной границей стремится к нулю и мало меняется от итерации к итерации;
- невязки по всем уравнениям в процессе решения достигают значения меньше рекомендуемого предела;
- невязки по всем уравнениям в процессе решения не меняются существенно.

Достаточно часто возникает ситуация, когда требуемого уровня невязок добиться не удается или же они достигли предельного значения, а разность расходов рабочего тела между входом и выходом составляет значительную величину (более 1% от расхода) или же сигнальный параметр по итерациям меняется существенно.

В этой связи более надежным критерием сходимости является неизменность невязок и сигнального параметра от итерации к итерации. Постоянство невязок говорит о том, что достигнута предельная точность расчета, и ее повышение можно добиться только улучшением конечно-элементной сетки. В этом случае нижнюю границу невязок, после которой решение будет остановлено, следует сознательно выбрать существенно заниженной.

Первым этапом задачи является подготовка и настройка расчетной модели.

Подготовка расчетной модели состоит из следующих основных этапов:

- построение геометрии;
- построение конечно-элементной сетки;
- проверка качества и редактирования (при необходимости) конечно-элементной сетки;
- масштабирование сетки (при необходимости);
- выбор типа решателя и постановка задачи;

- задание свойств рабочих тел;
- выбор физических моделей, используемых в расчете;
- выбор модели турбулентности;
- задание граничных и начальных условий.

По результатам расчетов определяется равномерность распределения температурных и скоростных полей в грузовом объеме камеры, выявляется наличие застойных зон.

Было проведено численное исследование характеристик камеры с РГС размером  $15 \times 8 \times 7$  м (Д $\times$ Ш $\times$ В) для хранения яблочной продукции. Был выбран воздухоохладитель с пятью вентиляторами, установленными на входе в воздухоохладитель. Продукция укладывалась в ящики с соблюдением зазоров.

Газодинамические характеристики потоков в камере определяются рядом основных параметров:

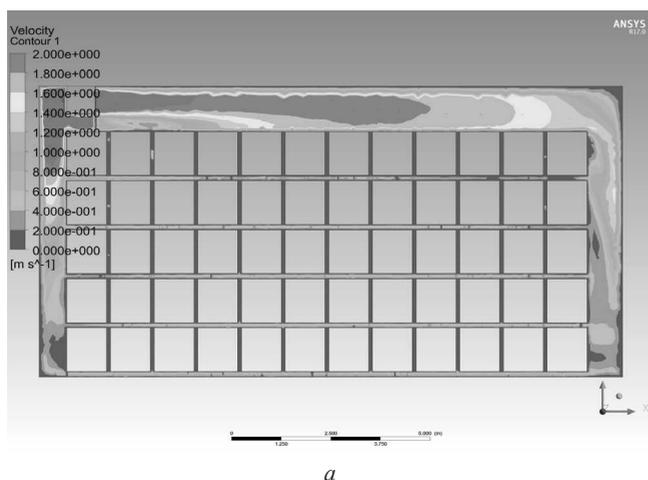
- геометрией стесненного пространства камер (размеры пространства над грузом, размера распределительного коллектора, размера сборного коллектора, геометрий воздухоохладителей и их количество);
- характеристиками вентиляторов воздухоохладителей (с учетом частотного регулирования);
- уровнем инееобразования;
- наличием дефлектора с конкретизацией угла установки.

Численное исследование было выполнено при воздействии двух основных воздействующих параметров:

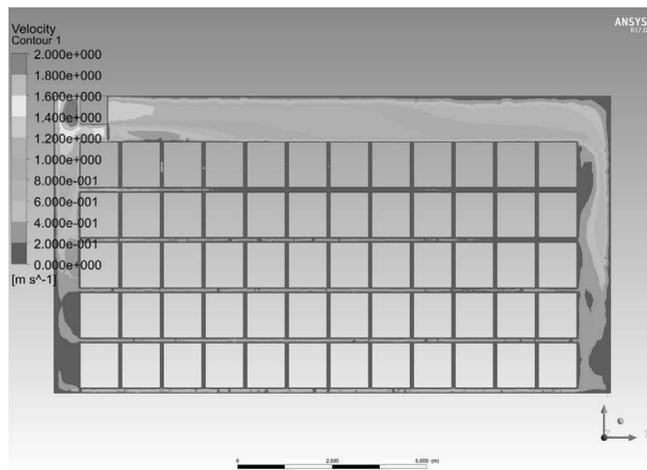
- массового расхода газа;
- изменения угла установки дефлектора.

На рис. 2 приведены результаты расчетов при массовом расходе воздуха 7 и 13 кг/с.

Результаты показали, что при массовом расходе меньше 7 кг/с неравномерность распределения температуры в грузовом объеме камеры не соответствует регламентному значению. Численные исследования показывают, что параметры технологического регламента могут быть выполнены при массовом расходе  $13 > G > 7$  кг/с. При массовом расходе, превышающем 13 кг/с имеет место нерациональное использование энергии вентиляторов.



а



б

Рис. 2. Результаты расчетов при массовом расходе воздуха: а — 7 кг/с; б — 13 кг/с

Fig. 2. The results of calculation at mass air flow rate of 7 kg/s (а) and 13 kg/s (б)

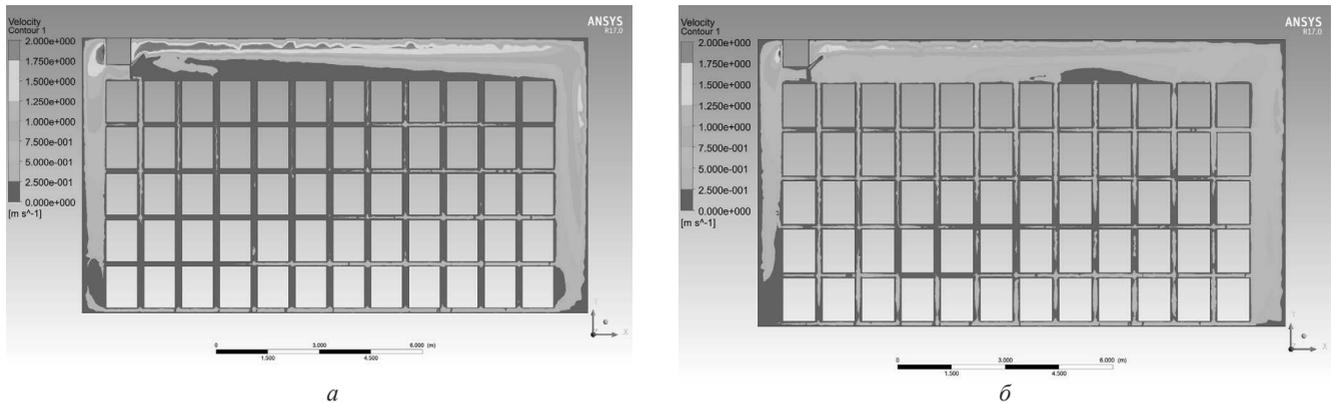


Рис. 3. Анализ изменений параметров при использовании дефлектора: а — при массовом расходе 4 кг/с; б — при массовом расходе 7 кг/с

Fig. 3. The analysis of parameters' change when deflector is used: a — at mass flow of 4 kg/s; б — at mass flow of 7 kg/s

На следующем этапе исследования определяется рациональность использования дефлектора на выходе из воздухоохладителя. Результаты расчетов скоростного поля с использованием дефлектора при массовом расходе 4 и 7 кг/с приведены на рис. 3.

### Выводы

Результаты численного исследования влияния двух основных воздействующих параметров (массового расхода потока и угла установки дефлектора) показывают:

— изменение массового расхода, обусловленное изменением аэродинамического сопротивления слоя инея в процессе эксплуатации, приводит к существенному воздействию на неравномерность температурно-влажностных полей, во всем диапазоне изменения расхода напорная характеристика вентиляторов и характеристика сети должны быть согласованы с учетом требований технологического регламента;

— оптимальным можно считать значение массового расхода потока в камере, которое обеспечивает выполнение технологического регламента при минимальных эксплуатационных затратах;

— использование дефлектора увеличивает интенсивность инжектирования теплового потока парогазовой смеси из грузового объема, что снижает неравномерность распределения температурных и скоростных полей в объеме камеры.

Очевидно, что более подробное исследование воздействия всех параметров позволит конкретизировать алгоритм и методы оптимизации системы холодоснабжения.

Анализ полученных данных позволяет утверждать о возможности использования сформулированного математического описания для детального исследования парогазовых потоков, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации камер холодильников.

### Литература

1. Рукавишников А. М., Шавель А. П., Власов А. П. РГС — система сбережения плодов и овощей. // Холодильный бизнес. 2016. № 4. С. 18–26.
2. Петров Е. Т., Круглов А. А., Опалихин А. Ф. Особенности экспериментального и предпроектного исследования камер фруктоовощехранилищ с регулируемой газовой средой // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3, с. 62–67.
3. Гудковский В. А. и др. Инновационные технологии хранения плодов // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 8. с. 72–74.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Т. 2. — М.: Наука, 1991. 600 с.
5. Аверин Г. Д., Алексеев А. В. Зависимость относительной влажности воздуха в камерах хранения пищевых продуктов от условий эксплуатации приборов охлаждения // Холодильная техника. 1992. № 1. 17–20 с.
6. Куприн Д. А. Определения интенсивности тепловыделений при хранении растительных продуктов. // Холодильная техника. 1980. № 7. с. 30–32.

### References

1. Rukavishnikov A. M., Shavel' A. P., Vlasov A. P. RGS — the system of saving of fruits and vegetables. *Kholodil'nyi biznes*. 2016. No 4. p. 18–26. (in Russian)
2. Petrov E. T., Kruglov A. A., Opalikhin A. F. Features research of experimental and predesign chamber fruits and vegetables store with controlled atmosphere. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. No. 3, 2016. P. 62–67. (in Russian)
3. Gudkovsky V. A., etc. Innovative technologies of storage of fruits. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2010. No. 8. P. 72–74. (in Russian)
4. Abramovich G. N. Applied gas dynamics. Vol. 2. Moscow, Nauka, 1991. 600 p. (in Russian)
5. Averin G. D., Alekseev A. V. Dependence of the relative humidity of air in food storage chambers from the conditions of operation of cooling devices. *Kholodil'naya tekhnika*. 1992. No 1.17–20 p. (in Russian)
6. Kuprin D. A. Determination of the intensity of heat release during storage of plant products. *Kholodil'naya tekhnika*. 1980. No 7. p. 30–32. (in Russian)

7. Aleksandrov, Y. New solution — refrigerators for fruits and vegetables that use solar energy to achieve positive temperatures. // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2017. Vol. 23. Issue 3. pp. 498–504.
8. Петров Е. Т., Михновская Е. Л. Оптимизация холодильных установок в процессе автоматизированного проектирования. // Сб. науч. трудов. «Автоматизированное проектирование трубопроводных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств». — М.: Энефтехим, 1982.
9. Петров Е. Т. Особенности автоматизированного проектирования систем хладоснабжения предприятий большой мощности // *Известия СПбГУНиПТ*. 2004. № 1.
10. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 319 с.
11. Sajjadi, H., Salmanzadeh, M., Ahmadi, G., Jafari, S. Turbulent indoor airflow simulation using hybrid LES/RANS model utilizing Lattice Boltzmann method. // *Computers and Fluids*. 2017. Vol. 150. pp. 66–73.
12. Курьлев Е. С., Петров Е. Т., Михновская Е. Л. Автоматизированное проектирование холодильных установок // *Холодильная техника*. № 5. 1981.
13. Балан Е. Ф., Кюркчу И. И. Новая система бесканального воздухораспределения в камерах фруктохранилища // *Холодильная техника*. 1991. № 3. 2–6 с.
14. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. — М.: Мир, 1990. С. 384.
15. Ferziger J. H., Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3 rd rev. ed., Berlin et al. Springer, 2002. 423 p.
16. Scaar H, Praeger U., Gottschalk K, Jedermann R. Experimental and numerical analysis of airflow in fruit and vegetable cold stores // *LANDTECHNIK* 72 (1), 2017, 1–12 p.
17. Ambaw A., Bessemans N., Gwanpua S. G. Evaluation of energy saving schemes in an apple cool store using computational fluid dynamics, Conference paper, IIR International Congress of Refrigeration, edition 24, article 636, Yokohama, Japan, August 16–22, 2015.
7. Aleksandrov, Y. New solution — refrigerators for fruits and vegetables that use solar energy to achieve positive temperatures. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2017. Vol. 23. Issue 3. pp. 498–504.
8. Petrov E. T., Mikhnovsky E. L. Optimization of refrigeration systems in the process of computer-aided design. Collection of scientific papers. «Computer-aided design of pipeline systems of oil refining and petrochemical industries.» Moscow, 1982. (in Russian)
9. Petrov E. T. Features of computer-aided design systems, cold supply large power enterprises. *Izvestija SPbGUNiPT*. 2004. No 1. (in Russian)
10. Grimitlin M. I. Air distribution in the premises. St. Petersburg, AVOK Northwest, 2004. 319 p. (in Russian)
11. Sajjadi, H., Salmanzadeh, M., Ahmadi, G., Jafari, S. Turbulent indoor airflow simulation using hybrid LES/RANS model utilizing Lattice Boltzmann method. *Computers and Fluids*. 2017. Vol. 150. pp. 66–73.
12. Kurylev E. S. Petrov E. T., Mikhnovsky E. L. Automated Design of refrigeration units. *Kholodil'naya tekhnika*. No 5. 1981. (in Russian)
13. Balan E. F., Kyurkchu I. I. The new system of ductless air distribution in a fruit storage chambers. *Kholodil'naya tekhnika*. 1991. No 3. 2–6 p. (in Russian)
14. Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. *Computational Hydro-mechanics and heat transfer*. In two volumes. Moscow, Mir, 1990. 384 p. (in Russian)
15. Ferziger J. H., Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3 rd rev. ed., Berlin et al. Springer, 2002. 423 p.
16. Scaar H, Praeger U., Gottschalk K, Jedermann R. Experimental and numerical analysis of airflow in fruit and vegetable cold stores. *LANDTECHNIK* 72 (1), 2017, 1–12 p.
17. Ambaw, A., Bessemans, N., Gwanpua, S. G. Evaluation of energy saving schemes in an apple cool store using computational fluid dynamics, Conference paper, IIR International Congress of Refrigeration, edition 24, article 636, Yokohama, Japan, August 16–22, 2015.

### Сведения об авторах

#### Петров Евгений Тимофеевич

к.т. н., доцент кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,  
Petrov\_ET@refropkb.ru

#### Опалихин Антон Федорович

аспирант кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,  
anton@testa7.ru

### Information about authors

#### Petrov Evgeniy Timofeevich

Ph.D., associate professor of Department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University,  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,  
Petrov\_ET@refropkb.ru

#### Opalikhin Anton Fedorovich

graduate student of Department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University,  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,  
anton@testa7.ru