

УДК 621.565.3

Особенности экспериментального и предпроектного исследования камер фруктоовощехранилищ с регулируемой газовой средой

Канд. техн. наук Е. Т. ПЕТРОВ¹, канд. техн. наук А. А. КРУГЛОВ²,
А. Ф. ОПАЛИХИН³

¹petrov_et@refropkb.ru, ²kruglov@refropkb.ru, ³opalihin@refropkb.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Представлены особенности экспериментального и предпроектного исследования камер фруктоовощехранилищ с регулируемой газовой средой (РГС). Рассмотрены виды технологий хранения продукции с использованием РГС. Сформированы скоординированные этапы оптимального проектирования и управления объектом, предложены методы формирования объемно-планировочных решений камер с РГС с учетом элементов логистики и экономики планирования на этапе предпроектных исследований, предложены методы расчета и управления холодильным технологическим оборудованием, обеспечивающим нормативный уровень равномерности теплофизических параметров парогазового потока в стесненном объеме камер хранения продукции. Рассмотрены особенности структурно-параметрической оптимизации холодильного оборудования в ходе предпроектных исследований. Предложены методы экспериментального исследования натуральных образцов и физических моделей камер фруктоовощехранилищ.

Ключевые слова: холодильная камера, регулируемая атмосфера, фруктоовощехранилище, математическая модель, оптимизационное исследование.

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.07.2016, принята к печати 08.07.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-3-62-67

Ссылка для цитирования

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.

Features research of experimental and predesign chamber fruits and vegetables store with controlled atmosphere

Ph. D. E. T. PETROV¹, Ph. D. A. A. KRUGLOV², A. F. OPALIKHIN³

¹petrov_et@refropkb.ru, ²kruglov@refropkb.ru, ³opalihin@refropkb.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

In this paper the features of considered experimental and predesign research fruit and vegetables store with controlled atmosphere (CA). Formed coordinated steps optimal control object, methods of formation of space-planning decisions of cameras with the CA based on elements of the logistics and cost of planning at the stage of predesign research suggested methods of calculation and control the refrigeration process equipment providing the standard level of uniformity of thermal parameters of the vapor-gas stream in a constrained volume storage chambers products. The features of structural and parametric optimization of refrigeration equipment in the course of predesign research. Methods of experimental study of natural samples and physical models fruit and vegetables store.

Keywords: controlled atmosphere, fruit and vegetables store.

В связи с повышением требований к качеству продукции растительного происхождения при решении продовольственной программы страны возникает необходимость проектирования и строительства новых холодильников с камерами хранения, где предполагается использование регулируемой газовой среды [1, 2]. Проектирование указанных сооружений требует повышенной технологичности, качества строительных и теплоизоляционных конструкций, высокого уровня автоматизации. Требования к строительным сооружениям формируются

на основе технологического регламента, тепловлажностного и газового баланса в каждом из охлаждаемых помещений. При этом повышаются требования к техническим средствам, обеспечивающим поддержание требуемых параметров технологического регламента (температура, относительная влажность, концентрация газов).

В настоящее время применяют следующие виды технологий хранения продукции с использованием РГС [3, 4]:

1. Технология хранения с ультранизким содержанием кислорода ULO (Ultra Low Oxygen), содержание

кислорода в камере менее 1–1,5%, содержание углекислого газа 0–2%.

2. Традиционная технология хранения РГС (Traditional Controlled Atmosphere) с содержанием кислорода 3–4%, углекислого газа 3–5%.

3. Хранение в динамической РГС (DCA — dynamic controlled atmosphere).

4. Хранение в полиэтиленовых контейнерах с диффузионными вставками.

Для конкретного объекта и вида продукции концентрации газов могут уточняться.

Предпроектные исследования камер с РГС сводятся к формированию и реализации следующих последовательно скоординированных этапов:

— формирование объемно-планировочных решений камер холодильников с учетом элементов логистики и экономического планирования по реализации продукции;

— оптимальное проектирование холодильно-технологического камерного оборудования, обеспечивающее нормативный уровень равномерности теплофизических параметров парагазового потока в грузовом объеме камер;

— оптимальное проектирование основного холодильного оборудования на базе методов математического моделирования и структурно-параметрической оптимизации [5–7].

Реализация предпроектных исследований для таких объектов осуществляется с использованием метода структурно-параметрической оптимизации [5–7] на базе совмещения принципов декомпозиции и композиции.

Использование указанных принципов позволяет реализовать последовательный синтез и оптимизацию отдельных подсистем с привлечением методов сопряжения с остальными подсистемами на базе имитационного или регрессионного моделирования (рис. 1).

Варианты объемно-планировочных решений формируются на основе исходной информации и параметров

оптимизации, в качестве которых выступают значения ширины камеры (с учетом размеров контейнеров и зазоров между ними), количество ярусов при складировании контейнеров, размеры распределительного и сборного прямоугольных коллекторов, размер пространства над грузовым объемом камеры. Длина камеры устанавливается при этом исходя из значения вместимости камеры по продукту. Размеры распределительного и сборного прямоугольных коллекторов в значительной степени зависят от значения удельного расхода воздуха на 1 тонну хранимой продукции и способа воздухораспределения. Сформированная конфигурация камеры позволяет в последующем решать задачу, связанную с определением оптимальной толщины изоляции. При этом дополнительно определяется тепловая нагрузка на холодильное оборудование с помощью решения системы уравнений описывающей тепловлажностное равновесие в камере, которое может быть представлена в следующем упрощенном виде:

$$Q_0 = G_r \cdot C_{pr} \cdot (t_{r1} - t_{r2});$$

$$Q_0 = Q_1 + (Q_2 + Q_{2_{дых}}) + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6;$$

$$W_0 = G_r \cdot (d_{r1} + d_{r2});$$

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6,$$

где Q_0 — холодопроизводительность, Вт; G_r — массовый расход газовой смеси через воздухоохладитель, кг/ч; t_{r1} , t_{r2} — температура газовой смеси на входе и выходе воздухоохладителя, °С; Q_1 — теплоприток через ограждающие конструкции камеры, Вт; Q_2 — теплота, аккумулированная фруктами и овощами, и отводимая при охлаждении продукции, Вт; $Q_{2_{дых}}$ — теплота, выделяемая фруктами и овощами в процессе дыхания, Вт; Q_3 — теплоприток, обусловленный обменом газовой смеси камеры с наружным воздухом через неплотности в ограждениях, гидроклапан и оборудование для регулирования состава газовой смеси; Q_4 — эксплуатационный теплоприток, Вт; Q_5 — теплоприток, связанный с искусствен-

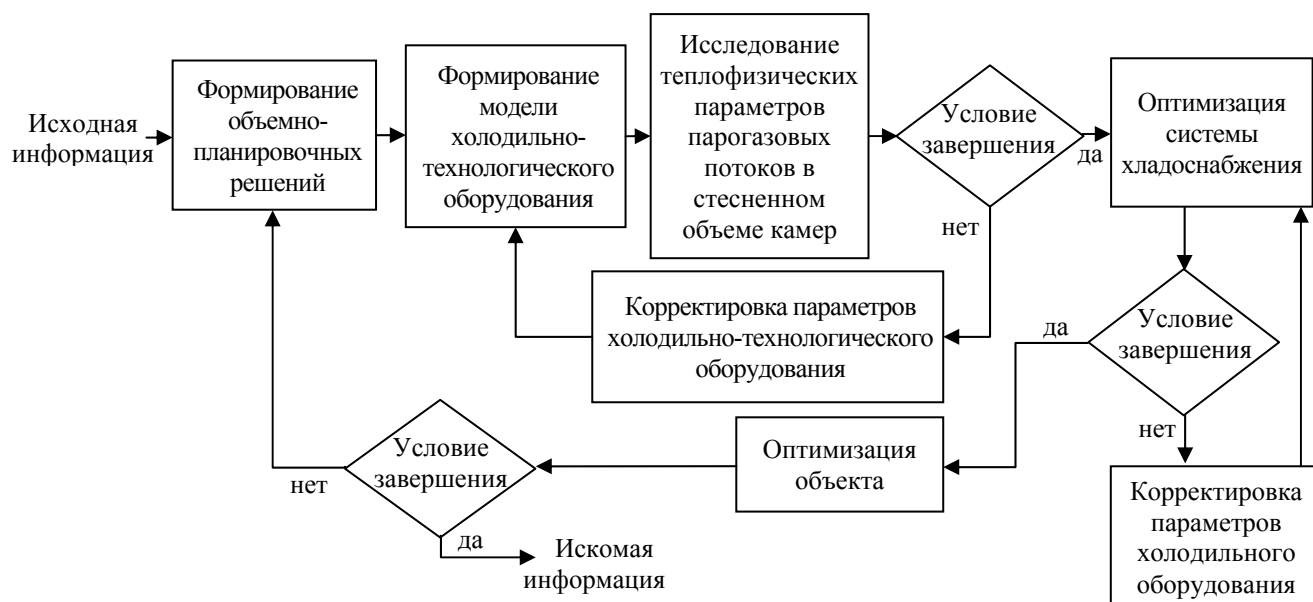


Рис. 1. Координирование отдельных этапов оптимального проектирования объекта

ным увлажнением газовой смеси в камере, Вт; Q_6 — теплоприток, связанный с работой установки регулирования газовой смеси, Вт; W_0 — количество влаги, отводимое воздухоохладителями, кг/ч; d_{r1}, d_{r2} — влагосодержание газовой смеси на входе и выходе воздухоохладителя, кг/кг; W_1 — влагоприток, вызванный диффузией водяных паров через ограждения, кг/ч; W_2 — влаговыделение от продуктов, кг/с; W_3 — влагоприток, обусловленный обменом газовой смеси камеры с наружным воздухом через неплотности в ограждениях, гидроклапан и установку регулирования газовой смеси, кг/ч; W_4 — эксплуатационный влагоприток, включающий влаговыделения от людей, которые находятся в камере, и влагоприток при воздухообмене во время открывания дверей, кг/ч; W_5 — влагоприток от увлажняющей установки, кг/ч; W_6 — влагоприток от установки регулирования газовой смеси, кг/ч.

Полученные объемно-планировочные решения (с учетом особенностей климатических условий в зоне размещения холодильника) и значения тепловой нагрузки на холодильное оборудование обеспечивают возможность оптимизации толщины изоляции по условию минимизации приведенных затрат. Стоимость производства холода при этом определяется по результатам предварительных оптимизационных исследований холодильных установок с учетом особенностей круглогодичной эксплуатации.

Оптимальное проектирование холодильно-технологического оборудования камер с РГС имеют свою специфику, заключающуюся в том, что кроме тепловлажностного равновесия в камерах необходимо поддерживать концентрацию газовой смеси.

Равномерность температурно-влажностных полей и полей концентрации газов в охлаждаемых помещениях холодильников с РГС в значительной степени определяется газодинамикой паргазового потока в стесненном объеме камер, что требует дополнительного объема исследований [8–10].

В настоящий момент при расчете и подборе холодильно-технологического оборудования, с учетом аэродинамики бесканальных систем воздухораспределения, используется ряд эмпирических зависимостей [11–14].

Наибольшие погрешности параметров паргазовых смесей характерны для проектирования высотных холодильников.

Использование эмпирических зависимостей и отсутствие методов управления равномерностью температурно-влажностных полей ограничивают количество оптимальных объемно-планировочных решений и выбор холодильно-технологического оборудования. При этом может иметь место достаточно высокая неравномерность температурно-влажностных полей, образование застойных зон и порча продукции.

Повышение требований к условиям хранения вызывает необходимость повышения эффективности работы камер. Задача сводится к разработке методов расчета параметров потоков газовой смеси в стесненном пространстве камер при наличии локальных газодинамических и тепловых возмущений.

В общем случае, важно не только поддержать определенную концентрацию газов, но и обеспечить требуемую равномерность во всем объеме камеры.

Для реализации данных задач, связанных с повышением работы камер, необходимо:

- сформировать автономную систему управления РГС;

- обеспечить необходимую равномерность газодинамических и термодинамических параметров смеси в объеме камер;

- разработать методы оптимального проектирования и управления как технологического, так и холодильного оборудования.

Предполагается формирование фруктоовощехранилищ с РГС с различными схемами подачи воздуха в стесненные объемы камер с контейнерным способом хранения продукции.

Пространство, занимаемое грузом, рассматривается в виде ячеечной структуры, где каждый контейнер формирует отдельную ячейку.

Наиболее перспективным методом решения оптимизационных задач является использование математической модели на основе газодинамики и тепловых процессов в стесненных объемах камер.

Эмпирические зависимости, обобщающие результаты экспериментальных исследований, не учитывают всех действующих факторов и не могут быть использованы для анализа всех возможных вариантов технических решений. Наиболее перспективным представляется использование математической модели на базе соотношений Навье — Стокса, которая представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений неразрывности, сохранения количества движения и энергии, уравнения состояния, дополненную соответствующей моделью турбулентности [15].

При этом важной составляющей успешного решения указанной математической модели является корректное задание граничных и начальных условий, что требует отдельного математического описания.

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 (значения плотностей тепловых потоков всех видов ограждений q_{rn} ; температура внутренних поверхностей ограждений t_{rn} 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 воздуха на каждой поверхности ограждений и поверхностях контейнеров с продукцией на основе исходного состояния конструкций ограждений камер и геометрии контейнеров (рис. 2).

Условия обтекания каждой ячейки определяются общей картиной воздухораспределения во всем объеме камеры (рис. 3) при наличии газодинамического и теплового воздействий со стороны приборов охлаждения,

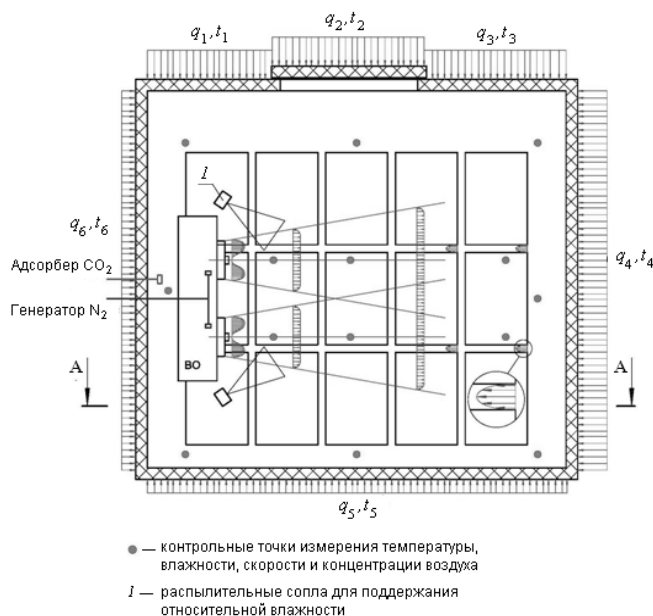


Рис. 2. План размещения оборудования и контрольно-измерительных приборов в камере. Начальные и граничные условия математической модели

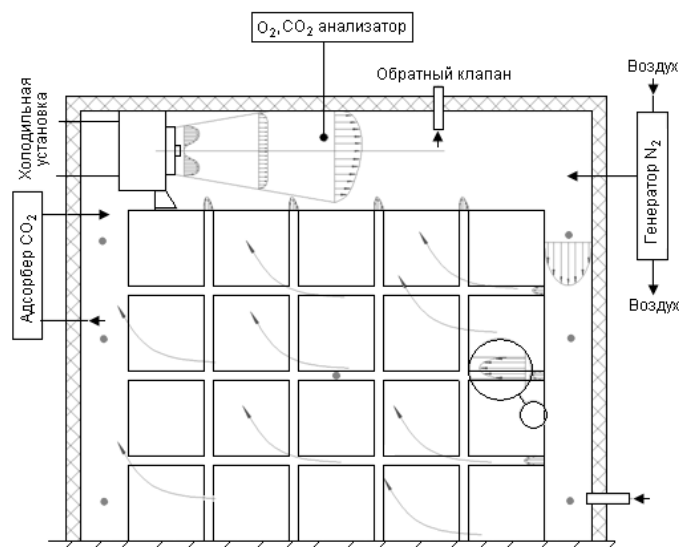


Рис. 3. Вертикальный разрез камеры (A — A). Схема воздухо-распределения в объеме камеры

теплого воздействия от стеновых ограждений и поверхности груза. Объемный расход воздуха, 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 ячейечной 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.

Эпюры распределения скорости потока газовой смеси на выходе из воздухоохладителей зависят от размещения вентиляторов. При установке вентиляторов на входе в воздухоохладитель эпюра распределения потока газовой смеси принимается условно равномерной, при этом предусматривается возможность установки дефлектора для управления параметрами выходного потока. При установке вентиляторов на выходе из воздухоохладителей эпюра распределения формируется исходя из аэродинамических характеристик отдельных вентиляторов в каждой точке (с учетом возможности установки дефлектора).

Задача комплексной оптимизации холодильника в процессе предпроектных исследований сводится к достижению чистого дисконтированного дохода $\max \text{ЧДД}(H, X, U)$ [16]:

$$\text{ЧДД} = a \sum_{j=1}^{j=\tau_p} \left[\sum_{i=i_{nj}}^{i=i_{ij}} (C_{2ij} M_{2ij} - C_{1ij} M_{1ij}) - \mathcal{E}_j - K_j \right],$$

где a — коэффициент дисконтирования; τ_p — рабочий ресурс холодильного оборудования, лет; C_{1ij} , C_{2ij} — закупочная стоимость и стоимость реализации продукции i -го месяца и j -го года; M_{1ij} , M_{2ij} — значение масс поступившей и реализованной продукции i -го месяца и j -го года; \mathcal{E}_j , K_j — эксплуатационные и капитальные затраты в течение j -го года; H — вектор структурных и геометрических параметров; X — вектор внутренних оптимизационных параметров; U — вектор параметров управления.

Математические модели, полученные по результатам оптимизационных исследований в ходе формирования объемно-планировочных решений и холодильно-технологического оборудования камер хранения продукции, используются совместно с математической моделью основного холодильного оборудования при оптимизации всего объекта в целом. При этом общие капитальные затраты на объект складываются из затрат указанных отдельных подсистем. При расчете эксплуатационных затрат в течение года учитывается характер их изменения при понижении температуры окружающего воздуха, соответствующем снижении тепловой нагрузки на холодильное оборудование и повышении тепловой нагрузки на систему обогрева камеры в зимнее время года. При этом появляется возможность анализировать характер изменения суммарных эксплуатационных затрат в процессе эксплуатации холодильника (рис. 4), что позволяет решать задачу оптимального управления объектом. На графике представлена зависимость относительной величины приведенных эксплуатационных затрат \bar{E} от температуры наружного воздуха t_b .

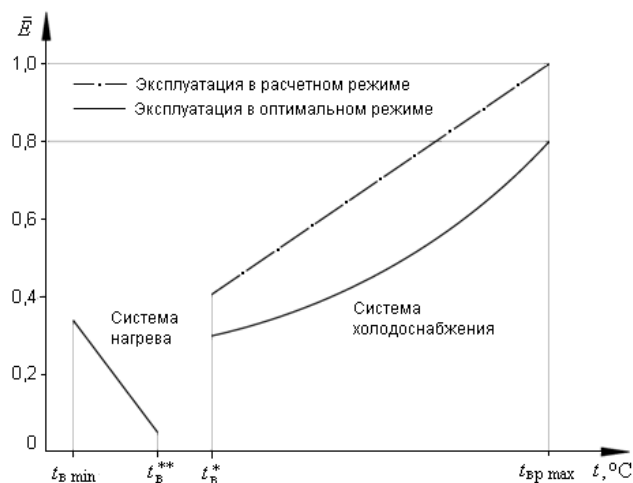


Рис. 4. Характер изменения суммарных эксплуатационных затрат в процессе эксплуатации холодильника:

$t_{вр}$ — расчетная температура воздуха; $t_{в}^*$ — температура воздуха, при которой отключается система охлаждения; $t_{в}^{**}$ — температура воздуха, при которой включается система нагрева; $t_{в min}$ — минимальная температура воздуха

Необходимость решения сопряженных задач газодинамики с объединением разнообразных зон в объеме камер и формированием соответствующих граничных условий требует проведения вспомогательных экспериментальных исследований натуральных образцов камер или экспериментальных камер, построенных на принципах геометрического и газодинамического подобия. При этом следует учитывать как конструктивные особенности каждой зоны, так и режимы течения газодинамических потоков. Датчики размещаются в точках

на участках с равномерным движением газовой смеси и стабилизированным балансом энергии по сечению потока.

Экспериментальные исследования позволяют определить области существования той или иной схемы сопряжения зон, наличие их газодинамического взаимодействия, методы формирования граничных и начальных условий. Результаты могут быть использованы для проверки математических моделей на адекватность.

Формирование информационно-измерительного комплекса для проведения таких исследований базируется на комплексном использовании:

- средств измерений температурно-влажностных параметров газовой смеси в контрольных точках стесненного пространства камер;
- средств измерений скорости потоков;
- средств контроля концентрации используемых газов.

Предполагается контролировать параметры потоков:

- в распределительном и сборном пространствах;
- в стеллажном пространстве;
- на входе и выходе из воздухоохладителей.

С учетом требований технологического кондиционирования камер газации разработана методика проведения испытаний и соответствующая информационно-измерительная система (рис. 5).

Исходя из рассмотренных особенностей экспериментального и предпроектного исследования камер фруктоовощехранилищ с РГС, можно сделать следующие выводы:

- реализация предпроектной оптимизации исследований холодильников с РГС возможно на основе математического моделирования и структурно-параметрической оптимизации;

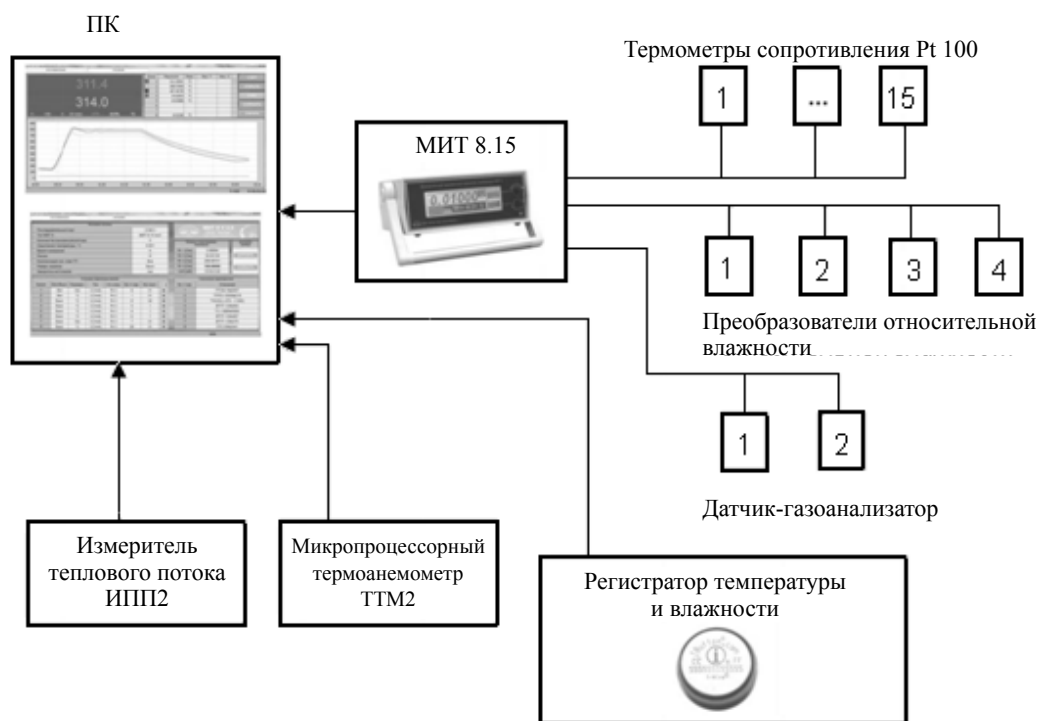


Рис. 5. Информационно-измерительная система

— повышение эффективности работы камер с РГС, достижение необходимой равномерности теплофизических параметров парогазовых потоков в грузовом объеме обеспечивается с помощью использования математическом моделировании на базе соотношений Навье — Стокса, формирование граничных и начальных условий требует разработки дополнительного программного обеспечения;

— необходимость решения сопряженных задач газодинамики и формирование новых граничных условий в процессе предпроектных и проектных исследований требуют проверки математической модели на адекватность и проведения экспериментальных исследований.

Литература

1. Анализ рынка холодильных складов России // Холодильный бизнес. 2008. № 5. 23–25 с.
2. Гудновский В. А., Семашко В. Я. Промышленный опыт хранения фруктов в регулируемой газовой среде. — Алма-Ата, КазНИИТИиТЭИ, 1977.
3. Ильинский А. С., Карпов С. Б., Пугачев В. Ю. Сохранение качества и предотвращение развития физиологических заболеваний яблок при хранении в регулируемой атмосфере с минимально допустимыми концентрациями кислорода // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2012. № 4. с. 91–99.
4. Ильинский А. С., Гладков Е. В. Прогрессивная технология хранения фруктов и овощей // Холодильный бизнес. 2008. № 9. 26–28 с.
5. Петров Е. Т. Особенности автоматизированного проектирования системы хладоснабжения предприятий большой мощности // Известия СПбГУНиПТ. 2004. № 1.
6. 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.: ЦНИИТ Энефтехим, 1982.
7. Курьяев Е. С., Петров Е. Т., Михновская Е. Л. Автоматизированное проектирование холодильных установок // Холодильная техника. № 5. 1981.
8. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. — М.: Наука, 1984. 515 с.
9. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 319 с.
10. Печатников М. З. Закономерности струйного воздухораспределения в холодильных камерах: Дисс. канд. техн. наук. — Л.: ЛТИХП, 1966. —145 с.
11. Эглит А. Я., Skorobogatov A. B., Яновский С. И. Воздухораспределение в камерах хранения мороженных продуктов с помощью РГС // Холодильная техника. 1980. № 12. С. 9–11.
12. 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.
13. Балан Е. Ф., Кюркчу И. И. Новая система бесканального воздухораспределения в камерах фруктохранилища // Холодильная техника, 1991, № 3. — 2–6 с.
14. Жадан В. З., Дидык Н. Н. Особенности влагообмена в холодильных камерах с регулируемой газовой средой // Холодильная техника и технология. 1981. № 32. 103–105 с.
15. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc. 2015. 812 p.
16. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Утверждено Госстроем России, № 7–12/47, 31 марта 1994, Стройинформ-СПб., Спец. Выпуск, 1995.

References

1. Market Analysis refrigeration store in Russia. *Kholodil'nyi biznes*. 2008, No 5. p. 23–25. (in Russian)
2. Gudnovsky V. A., Semashko V. Y. Industrial experience in the storage of fruit in controlled atmosphere. Alma-Ata, KazNIINTIITEI 1977. (in Russian)
3. Ilyinsky A. S., Karpov S. B., Pugachev V. Y. Protection of the quality and the prevention of the development of physiological diseases of apples in storage in a controlled atmosphere with the minimum allowable concentrations of oxygen. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. No 4. p. 91–99. (in Russian)
4. Ilyinsky A. S., Gladkov E. V. Progressive technology of storing fruit and vegetables. *Kholodil'nyi biznes*. 2008. No 9. 26–28 p. (in Russian)
5. Petrov E. T., Features of computer-aided design systems, cold supply large power enterprises. *Izvestija SPbGUNiPT*. 2004. No 1. (in Russian)
6. 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.» NPNH, 1982. (in Russian)
7. Kurylev E. S. Petrov E. T., Mikhnovsky E. L. Automated Design of refrigeration units. *Kholodil'naya tekhnika*. No 5. 1981. (in Russian)
8. Abramovich G. N. The theory of turbulent jets. Moscow. 1984. 515 p. (in Russian)
9. Grititlin M. I. Air distribution in the premises. St. Petersburg: AVOK Northwest, 2004. 319 p. (in Russian)
10. Pechatnikov M. Z. Laws of the jet of air distribution in cold rooms: Diss. Ph. D. Sciences. Leningrad, LTIHP, 1966. 145 p. (in Russian)
11. Eglit A. Y., Skorobogatov A. B., Yanovsky S. I. Air distribution in the cells of storage of frozen products using the MEI. *Kholodil'naya tekhnika*. 1980. No 12. p. 9–11. (in Russian)
12. Avenir G. D., Alekseev A. V. Relative humidity in the storage chambers of food on the operating conditions of cooling devices. *Kholodil'naya tekhnika*. 1992. No 1. 17–20 p. (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. Zhadan V. Z., Didyk N. N. Features of water exchange in cold stores with controlled atmosphere. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*. 1981. No 32. 103–105 p. (in Russian)
15. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc. 2015. 812 p.
16. Methodical recommendations according to efficiency of investment projects and their selection for funding. Approved by the State Construction Committee of Russia, No 7–12 / 47, on March 31, 1994, Stroyinform-SPb., Spec. Issue 1995. (in Russian)