

Новые установки быстрого замораживания пищевых продуктов низкотемпературным воздухом, расширенным в турбодетандере

Д-р техн. наук **А.М. АРХАРОВ**, МГТУ им. Н.Э. Баумана
канд. техн. наук **А.Ш. КОБУЛАШВИЛИ**, канд. техн. наук **Т.М. РОЗЕНОЕР**,
Институт механики МГУ
канд. техн. наук **И.Н. ЖУРАВЛЕВА**, ООО "Газхолодтехника"
д-р техн. наук **К.П. ВЕНГЕР**, д-р техн. наук **А.А. АНТОНОВ**, МГУ ПБ

A possibility of use of turborefrigerators of type ATR working on the principle of the air refrigeration cycle for food technological processes is considered. The characteristics of turborefrigerators and turbo-detanders whose standard sizes were adapted to parametric range of screw compressors are presented.

On the basis of ATR and appropriate compressors the air refrigerating units ARA are created, that have become the basis for freezing-refrigerating-thermal stations (MHTS) producing cold for quick-freezing apparatuses and also low potential heat.

Characteristics of a tunnel quick-freezing apparatus STAB, which obtains refrigeration from turborefrigerator are given, and its comparison with other types of tunnel apparatuses is carried out.

Мировой научной общественностью дискутируется тезис о надвигающейся экологической катастрофе, в том числе и под воздействием широко распространенных в настоящее время средств и методов производства холода для нужд пищевой промышленности с использованием экологически опасных хлорфторсодержащих холодильных агентов.

Актуальность проблемы отражена в известных Монреальском и Киотском протоколах по ограничению, а в дальнейшем запрету промышленного использования такого рода хладагентов. Россия подписала Монреальский протокол.

Однако жизнедеятельность и космические циклы для горячей планеты Земля далеко не изучены, и возникает много сомнений в степени влияния на экологические процессы конкретно этих хладагентов. Не вполне однозначна и экономическая сторона как Монреальского, так и в особенности Киотского протоколов для стран с различными экономическими потенциалами. Соединенные Штаты Америки, к примеру, Киотский протокол не подписали. Тем не менее проблема существует, и поиск путей выхода из сложившейся ситуации ставит перед исследователями новые задачи.

С другой стороны, а именно технологической, холодильной технике все настойчивее предъявляется требование существенного увеличения скорости замораживания пищевых продуктов, обеспечивающего гарантированное сохранение их качества. Наиболее просто это требование может быть удовлетворено снижением температуры и увеличением скорости движения охлаждающей среды (хладоносителя). Ряд зарубежных и отечественных фирм пошел по пути использования в качестве хладоносителя жидкого азота (температура около -196°C) и применения систем его газофикации. Жидкий азот дорог (сегодня его цена составляет около 6000 руб. за 1 т) и небезопасен в эксплуатации: «глоток» газообразного азота вызывает у человека защитную реакцию – спазм дыхания, который может оказаться смертельным. В настоящее время до 20 % общего объема процессов замораживания осуществляется жидким азотом. И хотя эта цифра в ближайшие годы может еще возрасти, все же жидкий азот не может удовлетворить все потребности в низкотемпературном холоде.

Опыт эксплуатации как отечественных, так и зарубежных машин показывает, что при сроках полной амортизации оборудования до 5 лет воздушные низкотемпературные холодильные установки в 3—5 раз (в зависимости от температуры охлаждения) более экономичны, чем работающие на жидком азоте.

В этой ситуации открываются широкие перспективы для новых технологических процессов быстрого замораживания продуктов питания в скороморозильных аппаратах, использующих в качестве генератора холода экологически чистые холодильные газовые (воздушные) машины с турбодетандерами.

Воздушные холодильные машины, появившиеся в 60-х годах XIX в. (раньше парокомпрессионных), оказались неконкурентоспособными в области температур до -50°C . Однако по мере практического продвижения низких температур в различные области народного хозяйства интерес к ним возобновился. Например, еще в 60-х годах XX в. в СССР были построены первые коммерческие воздушные турбохолодильные машины ТХМ-300, ТХМ1-25 и их модификации, работавшие по так называемому русскому вакуумному циклу (В.С. Мартыновский, М.Г. Дубинский, С.К. Туманский). Эти машины экспортировали и сегодня экспортируют и устанавливают на крупных рыболовных судах и базах переработки морепродуктов [6, 7, 14].

Профессорами В.С. Мартыновским, М.Г. Дубинским, И.В. Марфениной, Е.И. Микулиным,

Л.З. Мельцером; доцентами Л.Ф. Бондаренко, В.И. Ардашевым, В.М. Кулаковым, И.М. Шнайдом, Ю.Д. Навроцким, К.К. Соколовым, А.П. Старостиным были теоретически и экспериментально исследованы многие проблемы создания подобных машин [4, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15]. Было доказано, что при температурах ниже -70°C воздушные холодильные машины эффективнее парокомпрессионных.

Первая низкотемпературная воздушная холодильная установка с турбодетандером (НХВУ) на температурном уровне $-176...-173^{\circ}\text{C}$ была построена и испытана также в середине XX в. в МВТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора И.В. Марфениной. Установка предназначалась для переконденсации насыщенных паров жидкого кислорода при длительном хранении. Испытания полностью подтвердили теоретические выводы [8].

Накопленный в последние годы опыт криогенного турбодетандеростроения и аппаратостроения позволил существенно приблизить воздушный холодильный цикл к нуждам пищевых технологий. В частности, коллективами СКТБ "Турборефрижераторы", Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова и кафедры холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны методология и технические средства экологически лояльного стабильного и надежного производства холода в диапазоне рабочих температур $-120...-70^{\circ}\text{C}$ (в пределе примерно до -176°C).

В последние годы построен ряд турборефрижераторов АТР, работающих по принципу газового холодильного цикла низкого давления с использованием в качестве хладагента и одновременно хладоносителя экологически нейтральной и доступной рабочей среды – атмосферного воздуха.

АТР состоит из турбодетандерного агрегата, теплообменной аппаратуры и органов управления и контроля.

Отличительные особенности турбодетандеров для АТР определяются широким диапазоном частот вращения ротора ($30\,000...300\,000$ об/мин) при относительно большой мощности турбины, что нагружает ротор дополнительными внешними динамическими нагрузками. Этот диапазон параметров относится, по существу, к неосвоенной промежуточной области в турбодетандеростроении, лежащей между параметрами маломощных турбодетандеров криогенных гелиевых установок с одной стороны, и крупных турбин воздухоразделительных установок низкого давления – с другой.

Предложенные технические решения основаны на многолетнем опыте, накопленном при создании отечественных конструкций малорасходных высокоскоростных турбодетандеров для криогенных систем. Турбодетандеры для АТР разработаны в соответствии с концепцией динамики высокоскоростных турбин при работе в так называемом особом асимптотически устойчивом режиме дробно-частотной стабилизации ротора [3]. Эта концепция базируется на представлении Эйлера о движениях ротора как системы материальных точек, согласно которому поперечные перегрузки на смазочный слой подшипников со стороны ротора даже с заведомо большим экваториальным моментом инерции резко снижаются при относительно небольшой частоте прецессии ротора благодаря стабилизирующему гироскопическому воздействию самих вращающихся масс консольно расположенных рабочих колес. Этот процесс замедляет развитие наиболее опасных противофазных автоколебаний, и динамическая устойчивость поддерживается до на-

ступления синфазных автоколебаний.

Новая методология конструирования высокоскоростных турбодетандеров существенно расширяет традиционные представления о физических основах возможного топографического оформления ротора турбины и о допустимых значениях масс консольно расположенных рабочих колес.

На ее основе разработан типоразмерный ряд турбодетандеров серии RET, и при этом достигнут высокий уровень унификации конструкций машин по двум направлениям:

- параметрическому ряду;
- схемным решениям подшипникового узла.

Принятая дискретность рядов позволяет создавать турбодетандеры с оптимальными конструктивными и режимными параметрами каждой ступени:

- степенью радиальности $\mu = 0,45...0,55$;
- углом выхода потока из направляющего аппарата $\alpha_1 = 8...13^{\circ}$;
- углом выхода потока из рабочего колеса $\beta_2 = 30...34^{\circ}$;
- степенью реактивности $\rho = 0,45...0,5$;
- коэффициентом относительной скорости $U_1/C_s = 0,65...0,7$.

Турбодетандеры серии RET выполнены по принципу взаимозаменяемости модульно-блочных сборочных технологических единиц по качествам точности [12, 13].

В итоге создан унифицированный типоразмерный ряд турбодетандеров, удовлетворяющий современным технологическим требованиям серийного прецизионного производства, что является необходимым условием их широкого внедрения.

Модельный ряд турборефрижераторов АТР построен в соответствии с типоразмерами RET. По рабочим параметрам ряды RET и АТР адаптированы к принятому в международной практике парамет-

Таблица 1

Модель компрессора	Производительность, $\text{нм}^3/\text{ч}$	Модель ATR	Типоразмер RET	Диаметр колеса, мм	Частота вращения, тыс. об/мин
11	100	a		25	255
15	130	1 b	1/8	30	186
18	166	c a		35	170
22	200	2 b	2/12	40	155
30	278	a c		45	132
37	347	3 b	3/16	50	119
45	417	c a		55	108
55	528	4 b	4/22	60	101
75	706	a c		70	87
90	870	5 b	5/28	75	79
110	1056	c a		85	70
132	1265	6 b	6/32	95	62
160	1500	a c		105	56
200	1960	7 b	7/36	115	51
250	2482	c		125	47
500	5000	8	8/40	170	38
1000	10000	9	9/42	250	31

Примечание. Обозначение модели ATR включает ее порядковый номер и модификацию (a, b, c), обозначение типоразмера RET – номер типоразмера/диаметр вала, мм.

рическому ряду винтовых компрессоров производительностью 100...2500 $\text{нм}^3/\text{ч}$ и к турбокомпрессорам производительностью 5000 и 10 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (табл.1).

Первые 7 моделей ATR формируются таким образом, что каждая модель охватывает параметры последней модификации предыдущей модели и первой модификации последующей модели. Две крупные модели 8 и 9 адаптированы к параметрам турбокомпрессоров.

Турбодетандеры серии RET в соответствии с динамическими условиями работы могут выполняться с газостатическими и гидростатическими подшипниками (рис.1).

Все 9 моделей типоразмерного ряда турбодетандеров с газостатическими подшипниками (модели RET-GB-K) имеют в качестве нагрузочного устройства центробежную турбокомпрессорную ступень (см. рис. 1, a).

1–4-я модели типоразмерного ряда с гидростатическими под-

шипниками не имеют дополнительного нагрузочного устройства (модели RET-OB); эти же модели для работы при низких температурах (ниже -80°C) оснащаются комбинацией “холодного” газостатического подшипника и “теплого” гидростатического подшипника (модели RET-GOB, см. рис. 1, б); 5–9-я модели этого ряда турбодетандеров имеют центробежную турбокомпрессорную ступень (модели RET-OB-K, см. рис. 1, в).

Успехи отечественного аппаратостроения позволили применить в турборефрижераторах ATR компактные и эффективные пластинчато-ребристые теплообменники из алюминиевых сплавов, наиболее перспективные (в сравнении с другими типами теплообменных аппаратов) для воздушных установок низкого давления.

Теплообменники разработаны и изготовлены ООО “Газхолодтехника” с использованием технологий и оборудования для прецизионных штамповки-гибки и прокат-

ки, бесфлюсовой вакуумной пайки и аргоно-дуговой сварки. Создан типоразмерный ряд пластинчато-ребристых теплообменников для ATR, адаптированных к параметрическому ряду винтовых компрессоров.

Благодаря применению компактных и эффективных пластинчато-ребристых теплообменников габаритные размеры ATR в несколько раз, а масса в десятки раз меньше, чем у блока охлаждения TXM-300, где эти параметры в значительной мере определялись используемой теплообменной аппаратурой (в частности, переключающимися регенераторами с насадкой из галет, намотанных из алюминиевых гофрированных лент).

На базе ATR вместе с автономным компрессорным оборудованием, включающим блоки подготовки воздуха, создана система воздушных холодильных агрегатов ARA, производящих наряду с холодом низкопотенциальную теплоту на уровне 60 и 100°C . При ком-

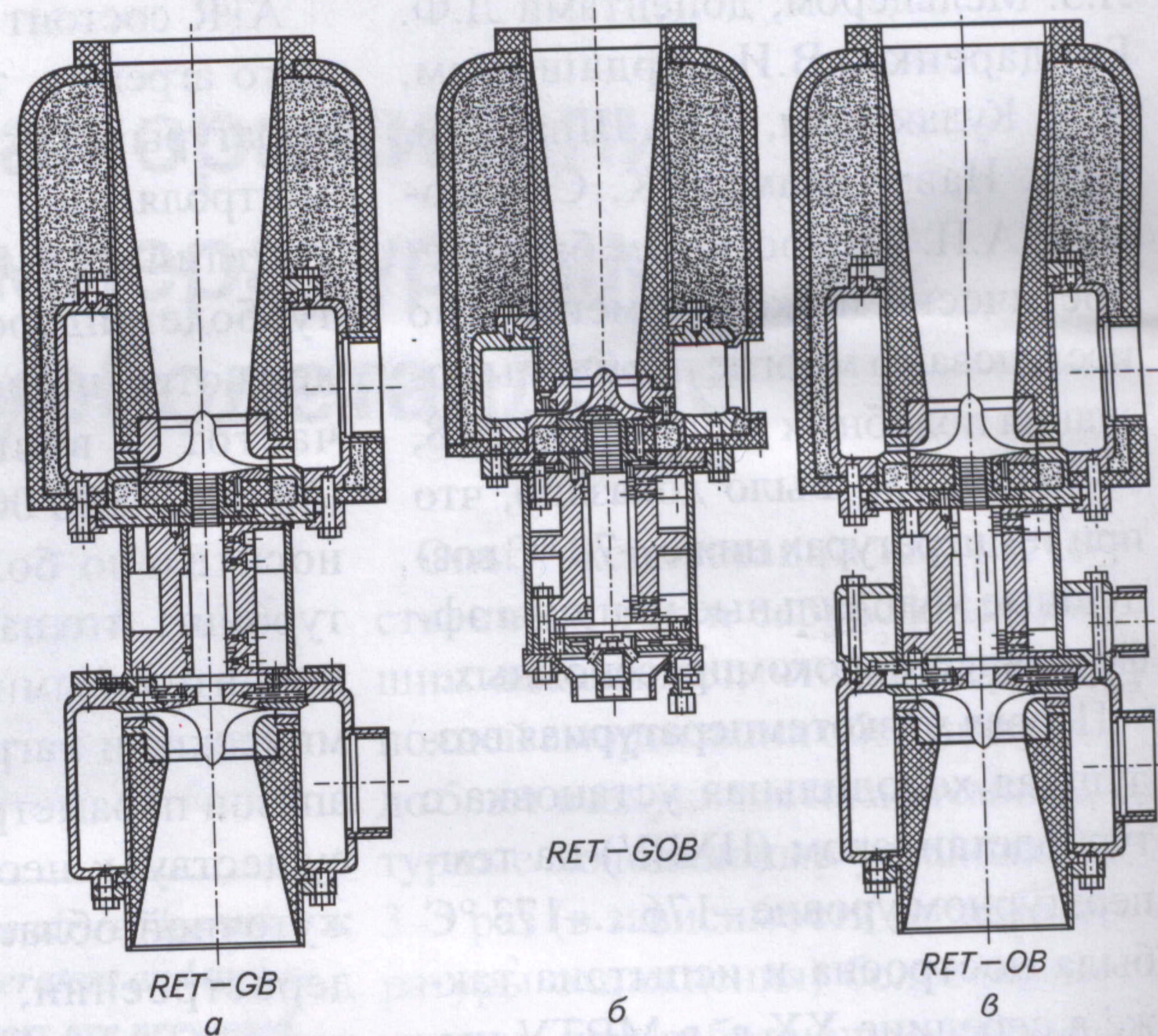


Рис. 1. Базовые конструкции турбодетандеров серии RET: а – турбодетандер с газостатическими подшипниками (RET-GB); б – турбодетандеры для температур ниже -80°C с комбинацией газостатического и гидростатического подшипников (RET-GOB); в – турбодетандеры с гидростатическими подшипниками (RET-OB)

В настоящее время ООО "Темп-

При выборе способа подачи воздуха в аппарат необходимо учитывать условия обеспечения интенсивного равномерного обдува конкретного замораживаемого продукта, а также стоимостные пока-

Анализ полученных данных показал, что влажность пищевых продуктов заметно влияет на расход воздуха. Большой расход воздуха необходим при замораживании пищевых продуктов классов

[illegible]

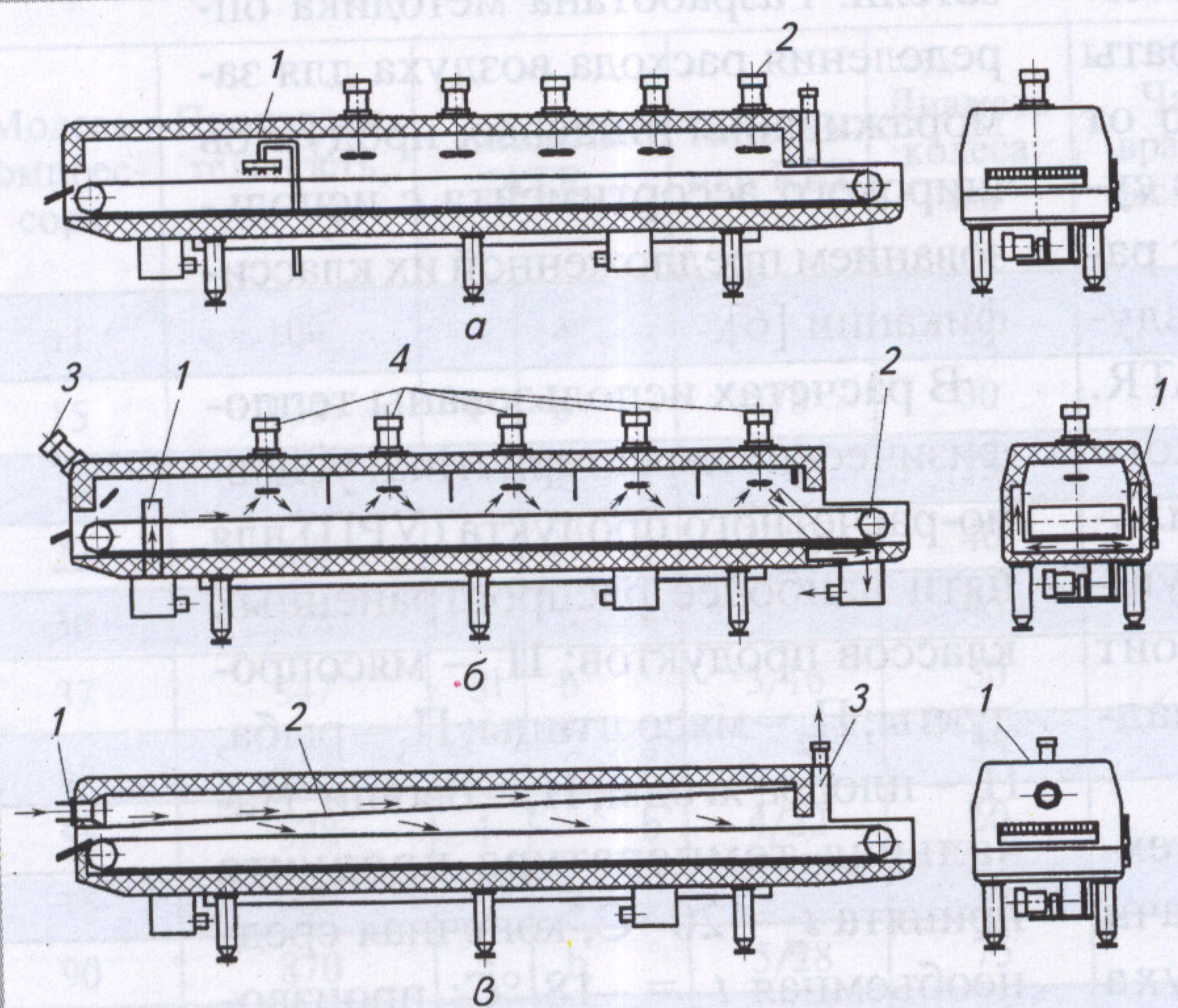


Рис. 3. Способы подачи низкотемпературного воздуха от турборефрижератора в туннельный скороморозильный аппарат: а — через распределительный коллектор; 1 — распределительный коллектор; 2 — система отсоса отработавшего воздуха; б — по специальным каналам-воздуховодам: 1 — канал для подачи воздуха в аппарат; 2 — канал для отвода воздуха из аппарата; 3 — боковой вентилятор для создания

направленного потока воздуха в аппарате; 4 — циркуляционные вентиляторы; в — наклонный решетчатый экран: 1 — канал для подвода воздуха; 2 — решетчатый экран; 3 — канал для отвода воздуха

Таблица 3

Расход подаваемого в туннель воздуха в зависимости от его температуры для СТАВ производительностью 500 т/ч

Класс продукта	Суммарная тепловая нагрузка Q_0 , кВт	Расход воздуха V (м³/ч) при $t_{\text{под}}, ^\circ\text{C}$			
		-60	-80	-100	-120
П1 – мясопродукты	40,7	2915	1595	1036	737
П2 – мясо птицы	29,04	2080	1138	739	525
П3 – рыба	42,02	3010	1647	1070	760
П4 – плоды, ягоды	48,84	3499	1914	1244	883
П5 – овощи	58,63	4200	2298	1493	1060

P_4 (плоды, ягоды) и P_5 (овощи), значения относительной влажности которых находятся в интервалах 80–85 % и 85–95 % соответственно.

Влияет на расход и температура подаваемого в аппарат воздуха. При ее понижении с -60 до -80 $^{\circ}\text{C}$ расход уменьшается примерно в 1,8 раза; с -80 до -100 $^{\circ}\text{C}$ — в 1,5 раза, а с -100 до -120 $^{\circ}\text{C}$ — в 1,4 раза.

Была проведена сравнительная оценка энергетической эффективности туннельных скороморозильных аппаратов, использующих проточную систему холодоснабжения жидким азотом и низкотемпературным воздухом от турбодетандера [2].

Расчет проводили для следующих условий: температуры подаваемого от турбодетандера воздуха $t_{\text{под}} = -120^\circ\text{C}$ и выходящего из туннеля воздуха $t_{\text{вых}} = -30^\circ\text{C}$; температуры жидкого азота $t_{\text{ж.аз}} = -196^\circ\text{C}$ и газообразного криоагента на выходе из аппарата $t_{\text{г.аз}} = -50^\circ\text{C}$; скорости циркуляции воздуха $\omega_{\text{в}} = 10$ м/с, азота $\omega_{\text{аз}} = 5$ м/с. При этом использовались усредненные характеристики для пяти рассмотренных классов продуктов (продукт класса $\Pi_{\text{ср}}$). Правомерность такого усреднения доказана расчетами, показавшими, что класс продукта ($\Pi_1 \dots \Pi_5$) существенно не влияет на энергетические показатели.

Согласно результатам расчетов применение в туннельном аппарате воздуха от турбодетандера с температурой -120°C взамен жидкого азота позволяет повысить энергетическую эффективность в 2,6 раза.

Были рассчитаны приведенные затраты (Π_3) при замораживании низкотемпературным воздухом пищевых продуктов классов $\Pi_1 \dots \Pi_5$ толщиной $\delta = 0,008 \dots 0,4$ м от начальной температуры $t_n = 20^\circ\text{C}$ до конечной среднеобъемной $t_v = -18^\circ\text{C}$. Стоимость элект-

роэнергии принималась 0,5; 1,0 и 1,5 руб/(кВт·ч); температура подаваемого воздуха $t_{\text{под}} = -120 \dots -60^\circ \text{C}$; производительность аппарата 500 кг/ч.

Продолжительность процесса замораживания для данных условий рассчитывали с использованием разработанной математической модели.

На базе полученных данных построены номограммы, одна из которых для продукта класса П_{ср} при стоимости электроэнергии 1,0 руб/(кВт·ч) представлена на рис. 4. Показан пример использования номограммы: задаваясь толщиной продукта δ и температурой подаваемого воздуха $t_{\text{под}}$, можно определить продолжительность процесса τ и величину приведенных затрат Π_3 на замораживание.

Анализ показал, что использование в скороморозильном аппарате низкотемпературного воздуха взамен жидкого азота в интервале температур $t_{\text{под}} = -120 \dots -60^\circ \text{C}$ позволяет сократить приведенные затраты в 20...25 раз. При этом низкотемпературный воздух обеспечивает значения скорости процесса, характерные для условий сверхбыстрого замораживания пищевых продуктов, которые определены МИХ (Париж) [2].

Высокая скорость замораживания продукции в предлагаемых аппаратах практически исключает потери массы от усушки, что является одним из основных факторов ресурсосбережения, гарантирует высокое качество и товарный вид продукции, а также позволяет включать процесс замораживания в общую технологическую линию производства.

Кроме того, выходящий из аппарата воздух, имеющий достаточно низкую температуру (около -30°C), можно использовать в таких технологических операциях, как предварительное охлаждение продукта (например, овощей после их блан-

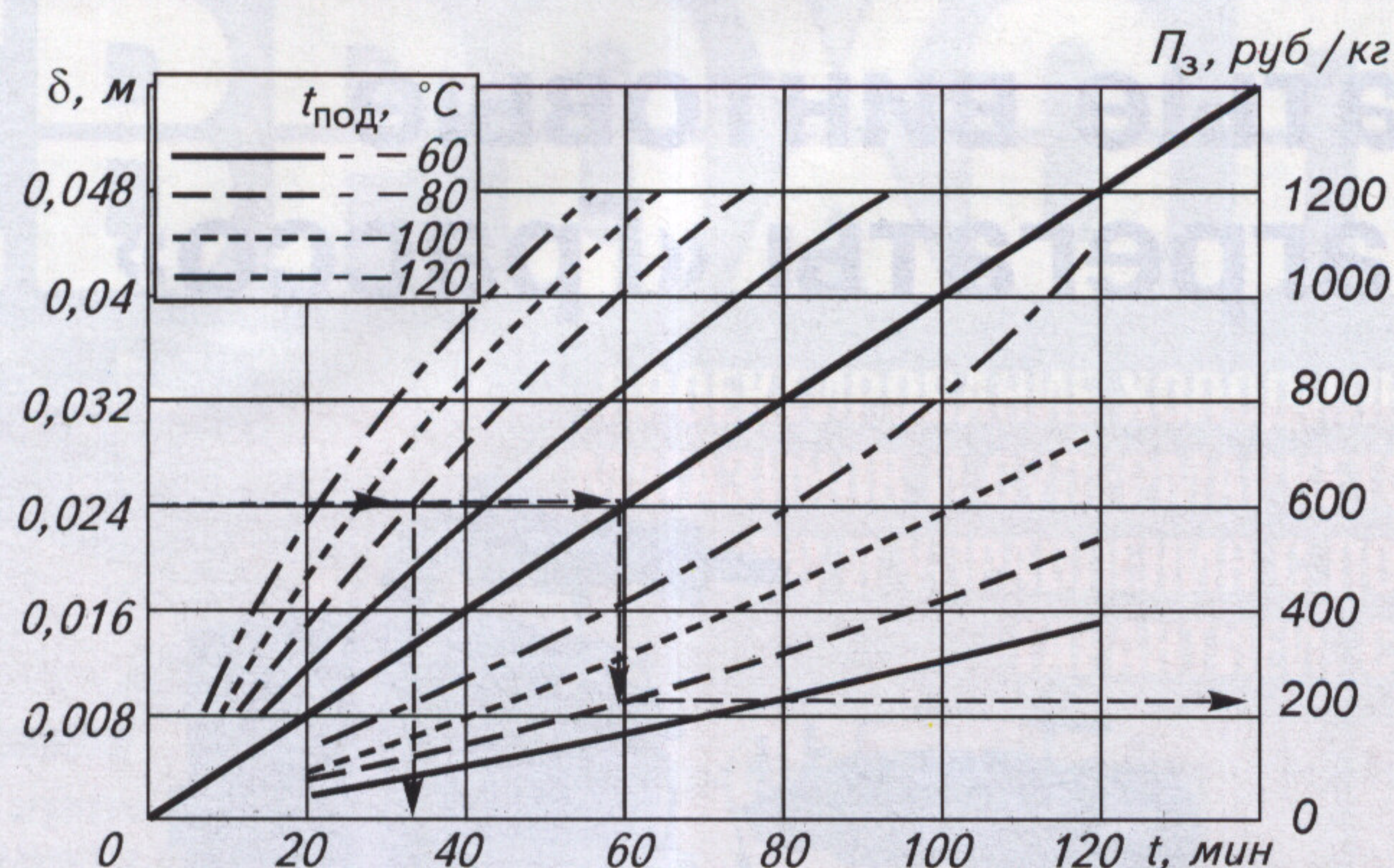


Рис. 4. Номограмма определения приведенных затрат P_z и времени τ замораживания низкотемпературным воздухом в зависимости от толщины δ и температуры подаваемого воздуха $t_{под}$ для замораживания пищевых продуктов класса $P_{ср}$ ($P_1...P_3$)

Сравнение различных типов туннельных скороморозильных аппаратов одинаковой производительности

Показатели	Я10-ОАС-500	АСТА-500	СТАВ-500
Годовая производительность, т	1860	1860	1860
Общие капитальные затраты, тыс. руб.	3395	1628	2380
Удельные капитальные затраты, руб/т	1830	870	1280
Текущие затраты за год, тыс. руб.	2025	4820	1177
Текущие затраты на 1 т продукции, руб/т	1089	2591	633
Годовой экономический эффект при применении СТАВ, тыс. руб.	*	**	1360* 3261**
Срок окупаемости, мес	—	—	8

*, ** Варианты, с которыми проводится сравнение.

ширования) или хранение замороженной продукции. В этом случае эффективность использования турборефрижератора значительно повышается.

В табл. 4 приведены результаты технико-экономической оценки трех туннельных скороморозильных аппаратов одинаковой производительности (500 кг/ч): воздушного Я10-ОАС-500 с машинной замкнутой системой холодоснабжения; азотного АСТА-500 и воздушного СТАВ-500 с рефрижератором.

Проведенное сравнение показало эффективность использования аппарата СТАВ-500. Годовой экономический эффект от его применения вместо аппарата Я10-ОАС составляет 1360 тыс. руб., а взамен АСТА — порядка 3500 тыс.руб.

Срок окупаемости СТАВ — 8 месяцев.

Таким образом, к преимуществам воздушной системы холодоснабжения по сравнению с жидкоазотной следует отнести энергоэффективность, экономичность, высокую надежность работы АТР, длительный ресурс непрерывной работы, компактность турборефрижератора, его экологическую безопасность.

В нашей стране накоплен уникальный опыт создания воздушных холодильных машин, на основе которого мы можем занять передовые позиции в создании техники нового поколения для быстрого замораживания широкого ассортимента пищевых продуктов, гарантирующей высокое их качество и товарный вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А.А., Бобков А.В., Венгер К.П., Пчелинцев С.А. Классификация пищевых продуктов для унификации расчетов холодильного оборудования // Мясная индустрия. 2002. № 5.
2. Антонов А.А., Венгер К.П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов. — Рязань: Узоречье, 2002.
3. Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н. Расчет и конструирование турбодетандеров. — М.: Машиностроение, 1987.
4. Дубинский М.Г. Воздушные турбохолодильные машины. Серия ХМ-7. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1982.
5. Дубинский М.Г., Гуревич Е.С. Установка с воздушной турбохолодильной машиной для быстрого замораживания ягод, плодов, овощей// Холодильная техника. 1974. № 11.
6. Мартыновский В.С., Мельцер Л.З. Температурные границы рационального использования воздушных холодильных машин// Холодильная техника. 1955. № 2.
7. Мартыновский В.С., Мельцер Л.З. Шнайд И.М., Бондаренко Л.Ф., Навроцкий Ю.Д. и др. Исследование работы воздушной турбохолодильной машины ТХМ-300 с термокамерой// Холодильная техника 1968. № 11.
8. Марфенина И.В. Оптимальные параметры низкотемпературной установки с газовым регенеративным циклом// Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 1972. № 7.
9. Марфенина И.В., Микулин Е.И. К анализу регенеративного газового холодильного цикла// Химическое машиностроение. 1962. № 2.
10. Патент 2123647 РФ Турбохолодильная машина — варианты.
11. Патент 2168123 РФ. Способ и установка для обеспечения сохранности пищевых продуктов/ К.П. Венгер, А.В. Бобков, О.А. Феськов и др. Опубл. 27.05.2001. Бюл. № 15.
12. Патент 2205277 РФ. Бескорпусная высокоскоростная турбомашин / А.Ш. Кобулашвили, В.М. Гнилицкий и др. Опубл. 27.05.2003.
13. Патент 2206755 РФ. Высокоскоростная турбомашин / А.Ш. Кобулашвили, В.М. Гнилицкий и др. Опубл. 20.06.2003.
14. Старостин А.П., Соколов К.К. Воздушные турбохолодильные машины. — М.: ООО "Франтера", 2003.
15. Техника низких температур/ Под ред. Е.И. Микулина, И.В. Марфениной, А.М. Архарова. — М.: Энергия, 1975.