

Воздушный турбохолодильный агрегат для быстрого замораживания растительной продукции во флюидизационном слое

Д-р техн. наук **К.П. ВЕНГЕР**, канд. техн. наук **О.А. ФЕСЬКОВ**, Г.Б. ШАХМЕЛИЯН
Московский государственный университет прикладной биотехнологии (МГУПБ),
канд. биол. наук **Н.С. ШИШКИНА**
ГНУ ВНИИ консервной и овощесушильной промышленности

On the basis of the air turborefrigerating unit (VTHA) an experimental plant was manufactured, which allowed obtaining of the experimental data on the process parameters of fluidized freezing for a wide range of plant products in the air temperature range of $-60...-64^{\circ}\text{C}$ and its flow rate $5 \dots 25 \text{ m/s}$. The results of quality study, proving the technological efficiency of the obtained process parameters of freezing of these products, were obtained. The design of the fluidized freezing apparatus with VTHA has been developed, for which a patent of RF was issued.

В Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова на базе воздушного турбохолодильного агрегата (ВТХА) была изготовлена опытная установка, позволившая провести исследования процесса замораживания продукции растительного происхождения во флюидизационном слое.

Исследования проводились совместно со специалистами НИИ механики под руководством канд. техн. наук А.П. Викулова.

Основные преимущества ВТХА: использование экологически безопасного хладагента (атмосферный воздух), а так-

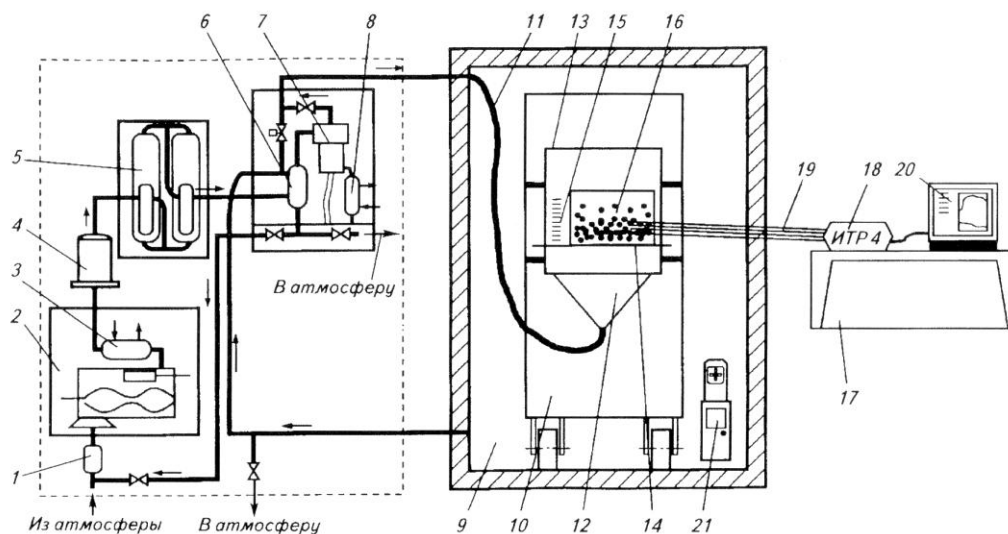


Рис. 1. Принципиальная схема опытной скороморозильной установки на базе воздушного турборефрижераторного агрегата:

- 1 — фильтр; 2 — винтовой маслозаполненный холодильный компрессор; 3 — конечный холодильник; 4 — маслолагоотделитель; 5 — блок осушки; 6 — рекуперативный теплообменник; 7 — турбодетандер; 8 — масляный теплообменник; 9 — холодильная камера; 10 — тележка; 11 — гибкий трубопровод; 12 — расширительный канал; 13 — флюидизационное устройство; 14 — сетчатый поддон; 15 — шкала измерения высоты флюидизации; 16 — продукт; 17 — стол с контрольно-измерительной аппаратурой; 18 — прибор — измеритель температуры и тепловых потоков; 19 — термопары и датчики тепловых потоков; 20 — портативный компьютер; 21 — электронный анемометр

же возможность получения низкотемпературного воздуха ($-60...-120^{\circ}\text{C}$) в интервале скоростей $5...25\text{ м/с}$.

Опытная установка (рис. 1) состоит из винтового холодильного компрессора, блока осушки сжатого воздуха, турбодетандера с масляным агрегатом, холодильной камеры и контрольно-измерительной системы.

Атмосферный воздух, всасываемый через фильтр 1, сжимается винтовым маслозаполненным компрессором 2 и нагнетается в концевой холодильник 3, где охлаждается проточной водой, после чего направляется во влагомаслоотделитель 4. Очищенный от крупнодисперсной взвеси масла и воды воздух поступает в блок осушки 5, где окончательно осушается с помощью гранулированных адсорбентов, затем в рекуперативном теплообменнике 6 охлаждается обратным потоком воздуха от турбодетандера и поступает в решетки направляющего аппарата турбинной ступени турбодетандера 7, где его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую. На лопатках рабочего колеса происходит изменение момента количества движения, и кинетическая энергия струи воздуха преобразуется в механическую энергию, воспринимаемую нагрузочным устройством, происходит адиабатическое расширение воздуха с отдачей внешней работы и понижением его температуры в диапазоне ($-60...-120^{\circ}\text{C}$). Турбодетан-

дер снабжен отдельной масляной системой с масляным теплообменником 8.

После турбодетандера общий поток холодного воздуха разделяется на два: основная часть направляется в холодильную камеру 9, а другая, минуя холодильную камеру, дросселируется в регулирующем вентиле (с целью выравнивания давлений) и, смешиваясь с потоком воздуха, отводимого из камеры, поступает в рекуперативный теплообменник 6, где забирает тепло от предварительно охлаждаемого воздуха перед детандером.

В холодильной камере 9 на технологической тележке 10 смонтировано специальное флюидизационное устройство 13, основным элементом которого является днище, образованное сетчатым поддоном 14. Внизу короба имеется расширительный канал 12, к которому подведен гибкий трубопровод 11 для подачи низкотемпературного воздуха от турбодетандера 7.

Благодаря создаваемой в турбодетандере 7 скорости струи подаваемого воздуха, контролируемой электронным анемометром 21, штучные продукты 16 приобретают подвижность во флюидизационном слое, высота которого фиксируется по специальной шкале 15 в коробе флюидизационного устройства 13 (см. рис. 1).

Отработанный воздух с температурой -30°C отводится из камеры 9 через специальный канал в рекуперативный

Таблица 1

Массогабаритные характеристики исследуемых пищевых продуктов

Класс продукта	Наименование продукта	Эквивалентный диаметр единицы продукта $d_{\text{эк}}$, мм	Средняя масса единицы продукта $m_{\text{ед}}$, г	Плотность продукта ρ , кг/м^3	Насыпная плотность продукта $\rho_{\text{н}}$, кг/м^3	Порозность насыпного слоя ϵ_0
П ₄	Клюква	8...14	1	1080	500	0,54
	Черника	10...12	1	1060	550	0,48
	Голубика	10...14	1,2	1050	560	0,47
	Смородина	8...14	1	1070	560	0,48
	Земляника	20...30	8,5	1070	560	0,48
	Вишня	16...19	3	1030	560	0,46
	Сливы	16...28	12	1070	640	0,4
	Яблоки	12...14	1,1	1070	590	0,45
	Киви	14...17	2	1080	560	0,48
	Ананасы	18...24	3,6	1070	670	0,37
П ₅	Горошек	8...10	1,2	1020	750	0,26
	Картофель	12...14	1,1	1060	670	0,37
	Морковь	12...14	1,1	1080	640	0,41
	Свекла	12...18	1,8	1075	640	0,4
	Огурцы	20...24	5,2	1090	640	0,41
	Шампиньоны	22...26	8,5	1060	670	0,37

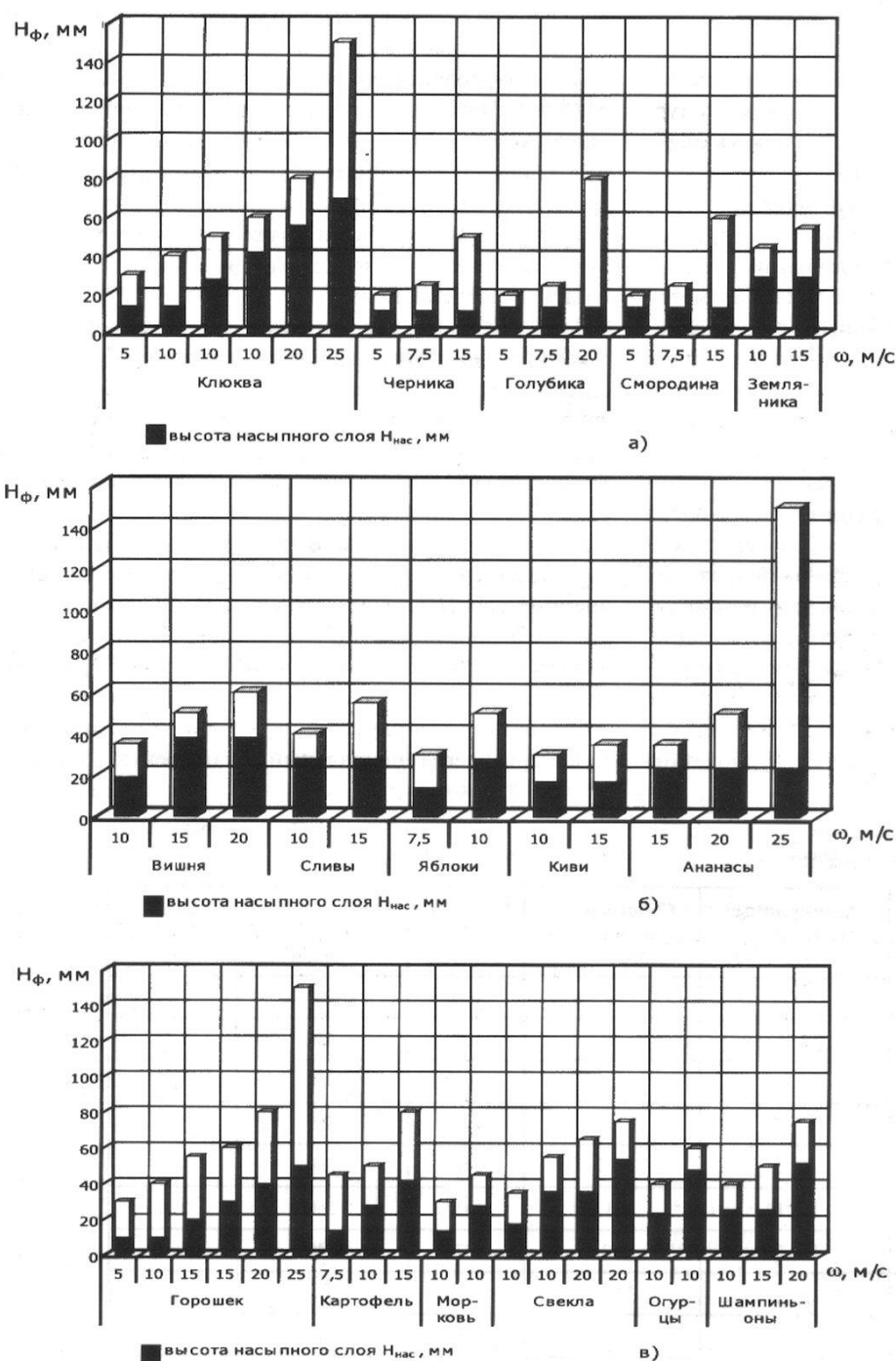


Рис. 2. Гистограммы зависимости высоты флюидизационного слоя H_f от скорости воздушных потоков ω и высоты насыпного слоя $H_{\text{нас}}$ при замораживании ягод (а), плодов (б), овощей (в)

теплообменник 6, либо удаляется в атмосферу. При этом в случае повторного использования воздух дополнительно очищается и осушается. Нагретый воздух обратного потока из теплообменника 6 вновь направляется на всасывание в компрессор 2, необходимая подпитка которого осу-

ществляется через фильтр низкого давления 1.

В качестве объектов замораживания была использована растительная продукция классов P_4 (плоды, ягоды) и P_5 (овощи) по классификации [1]:

- класс P_4 : клюква, черная смородина, черника, голубика, яблоки, ананасы, киви, земляника садовая, вишня кислая, сливы;

- класс P_5 : картофель, морковь, свекла, шампиньоны, огурцы.

Технология подготовки растительной продукции к замораживанию соответствовала общепринятым рекомендациям (ТУ, ТИ, ВНИИКОП). При этом резаные картофель и морковь замораживали после мойки, очистки, резки на кубики с гранями 10...15 мм, бланширования и предварительного охлаждения до температуры 20...22 °С.

Основные массогабаритные характеристики рассматриваемых объектов приведены в табл. 1. В качестве характерного размера рассматриваемых объектов был принят эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$, определяемый как диаметр шара с объемом, равным объему единицы продукта. Поскольку штучные продукты одного наименования имеют различные габаритные размеры, в таблице указан диапазон этой величины.

Порозности насыпного слоя продукции определяли как:

$$\epsilon_0 = 1 - (\rho_n / \rho) \quad (1)$$

Исследования проводили при температуре подаваемого детандером воздуха $t_{\text{ср}} = -60 \dots -64$ °С и скорости воздушного потока в интервале $\omega_n = 5 \dots 25$ м/с. В задачу исследований входило измерение высоты подвижного флю-

Таблица 2

Процессные параметры замораживания во флюидизационном слое растительной продукции исследуемого ассортимента

Наименование продукта	Параметры продукта		Параметры воздуха		Продолжительность замораживания до $t_v = -18^\circ\text{C}$ τ , мин	Линейная скорость замораживания $\omega_d \cdot 10^6$, м/с
	Эквив. диаметр d_s , мм	Высота флюидизационного слоя H_f , мм	Температура t_v , $^\circ\text{C}$	Скорость ω_v , м/с		
Картофель	12	40...50	-62	10	6,2	50
Земляника	24	30...45	-64	10	7,7	40
Черника	12	40...50	-61	15	2,7	95,2
Голубика	14	20...25	-63	7,5	3,6	49,4
Сливы	16	30...40	-62	10	13,8	13,3
Киви	14	30...35	-61	15	10,2	13,6
Ананасы	18	45...55	-60	20	14,5	11,7
Свекла	18	40...50	-61	10	18	10
Морковь	14	30...45	-60	10	12	12,1
Шампиньоны	22	35...40	-62	10	8,5	30,6
Огурцы	20	30...40	-62	10	23,2	8,6

идизационного слоя H_f исследуемых пищевых продуктов.

Результаты исследований, представленные гистограммами (рис. 2), позволяют определить условия организации флюидизационного замораживания с использованием ВТХА для заданного вида растительной продукции.

Следующий этап исследований был связан с определением продолжительности и скорости замораживания растительной продукции.

Получены графические зависимости температурного поля (термограммы), на базе которых определена продолжительность процесса τ до среднеобъемной температуры t_v . Линейную скорость ω_d замораживаемого продукта определяли из соотношения

$$\omega_d = L/\tau_1, \quad (2)$$

где L – определяющий размер продукта ($d_s/2$), м;

τ_1 – время, в течение которого температура изменяется от криоскопической на поверхности до криоскопической в центре продукта.

В табл. 2 представлены процессные параметры замораживания низкотемпературным воздухом от ВТХА во флюидизационном слое растительной продукции исследуемого ассортимента.

Полученные значения ω_d соответствуют ре-

Таблица 3

Результаты органолептической оценки по отдельным показателям качества замороженной растительной продукции после 7 мес хранения

Наименование продукции	Вариант замораживания	Усредненные данные оценки органолептических показателей, баллы						Общая оценка
		Внешний вид	Окраска		Консистенция	Вкус	Аромат	
			внешняя	срез				
Картофель, резанный кубиками бланшир.	Исходное	5	5	5	4,8	5	5	4,97
	К	4	4	4	3	3	3	3,5
	О _н	5	5	5	4,5	5	5	4,92
Морковь, резанная кубиками бланшир.	Исходное	5	5	5	5	5	4,5	4,92
	К	3,5	4	4	3	4	3,5	3,66
	О _н	5	5	5	5	5	4	4,83
Огурцы свежие резанные	Исходное	5	5	5	5	5	5	5
	К	3,5	4	3	3	2	3,5	3,17
	О _н	4,5	5	4	4	3,5	4,5	4,25
Земляника садовая свежая	Исходное	4,5	5	4,5	4,5	5	4,5	4,66
	К	3,5	3,5	3,5	3,5	5	3	3,75
	О _н	4,5	4,5	4,5	4,5	5	4,5	4,58
Клюква свежая после хранения	Исходное	3,5	3,5	3,5	4,5	4	4	3,83
	К	3	3	3,5	4	4	4	3,58
	О _н	3,5	3,5	3,5	4	4	4	3,77

Таблица 4

Влияние способа замораживания на физиолого-биохимические показатели дефростированной растительной продукции

Наименование продукции	Сухие вещества, %		Сухие растворимые вещества, %		Влагоотдача при падающей нагрузке, %	
	O _п	K	O _п	K	O _п	K
Картофель	17,5	17,3	4,7	3,45	29,7	33,3
Морковь	10,62	10,08	11,45	9,23	53,1	55,6
Огурцы	5,89	5,45	6,62	4,1	63,7	64
Клюква	12,78	12,74	8,3	8,0	55,8	56,2
Земляника садовая	8,85	7,74	8,3	8,05	42,7	43,9

комендованным Международным институтом холода (МИХ) для быстрого и сверхбыстрого замораживания данной продукции.

Важным этапом исследований было установление технологической эффективности полученных процессных параметров при замораживании растительной продукции.

Специалистами ГНУ ВНИИ консервной и овощесушильной промышленности проведена оценка качества растительной продукции, замороженной во флюидизационном слое на опытной установке. В качестве объектов замораживания использовали картофель, морковь, огур-

цы, землянику садовую, клюкву. Режимы замораживания и процессные параметры данных продуктов см. в табл. 2.

Контрольные партии сырья *K* замораживали в неподвижном слое в традиционной холодильной камере при температуре воздуха -25°C и скорости потока 3 м/с. Замороженную продукцию упаковывали в пакеты из пищевого полиэтилена емкостью по 0,5 кг, после чего хранили в течение 7 мес в камере при температуре -18°C .

После 7 мес хранения опытные образцы *O_п* показали более высокий уровень сохранения органолептических показателей, чем контрольные (табл. 3). Так, замороженные картофель и морковь имели органолептическую оценку в опытном варианте 4,8...4,92 балла, что составило 98,2 – 98,9 % от исходного уровня, а в контрольном варианте – 70,4 – 74,4 % от исходного.

При этом опытные образцы картофеля и моркови полностью сохраняют показатели внешнего вида, окраски, консистенции и вкуса (5 баллов). Контрольные же образцы этих овощей имеют оценку по указанным показателям на уровне 3...4 баллов (60 – 80 % от исходного уровня). Высокие органолептические показатели отме-

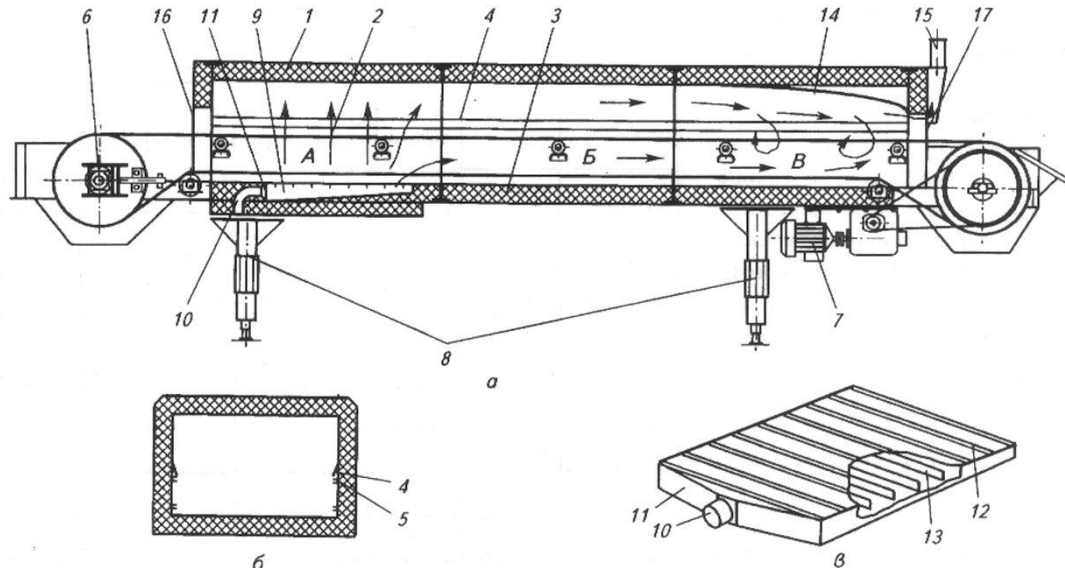


Рис. 3. Общий вид флюидизационного скороморозильного аппарата: а – продольное; б – поперечное сечение; в – воздухораспределительное устройство; А, Б, В – модули скороморозильного аппарата; 1 – теплоизолированный корпус; 2 – конвейер; 3 – несущая рама; 4 – боковое защитное ограждение конвейера; 5 – направляющие салазки; 6 – натяжное устройство; 7 – привод конвейера; 8 – опоры; 9 – воздухораспределительное устройство; 10 – подводящий патрубок; 11 – расширительный канал; 12 – плоские прямоугольные сопла; 13 – направляющие пластины; 14 – изогнутый потолочный элемент; 15 – вытяжное устройство; 16, 17 – окна загрузки/выгрузки

Таблица 5
Геометрические характеристики
воздухораспределительных устройств разработанного
типоразмерного ряда

Рабочая ширина конвейера $B_{\text{кн}}$, мм	Габаритные размеры воздухораспределительного устройства $l_{\text{в}} \times b_{\text{в}}$, мм	Габаритные размеры сопел $l_{\text{с}} \times b_{\text{с}}$, мм	Количество плоских прямоугольных сопел $n_{\text{с}}$
1100	995 × 1000	14 × 1000	10
900	990 × 800	18 × 800	10
700	987 × 600	24 × 600	10
500	980 × 400	25 × 400	14

чены и у опытных образцов $O_{\text{п}}$ ягод земляники садовой и клюквы (см. табл. 3).

В результате исследований установлено, что замороженная в опытном варианте $O_{\text{п}}$ растительная продукция характеризуется при дефростации, несколько меньшей, чем в контрольном K , влагоотдачей при падающей нагрузке 500 г/см^2 , что свидетельствует о лучшей сохранности структуры растительного сырья (табл. 4).

В опытном варианте после замораживания выявлено более значительное снижение микробиологической обсемененности растительного сырья, чем в контрольном. Количество жизнеспособных спор бактерий в опытном варианте замораживания было меньше у картофеля в 10 раз, у моркови — в 1,6 раза, у огурцов — в 3,2 раза, у земляники — в 5 раз. Количество жизнеспособных спор плесневых грибов сокращалась в опытном варианте в 2 — 3,4 раза по сравнению с контрольным.

Проведенные исследования показали, что быстрое замораживание растительной продукции низкотемпературным (на уровне -60°C) воздухом от ВТХА во флюидизационном слое обеспечивает сохранение в течение 7 мес высокого ее товарного и органолептического качества, а также пониженный уровень микробиологической обсемененности.

Исследования показали работоспособность опытной установки в целом, а также ее ответственного узла — флюидизационного устройства.

На основе полученных результатов была разработана конструкция флюидизационного скороморозильного аппарата, на которую получен патент РФ [2] (рис. 3).

Предлагаемый аппарат состоит из трех модулей — флюидизационного подмораживания A , замораживания B , домораживания B . Подлежащий замораживанию продукт после предварительной обработки располагается на конвейере 2 со стороны окна загрузки 16. С помощью привода 7 обеспечивается перемещение продукта на конвейере,

вследствие чего он последовательно поступает в модули аппарата A , B и B . Через подводящий патрубок 10 и расширительный канал 11 низкотемпературный воздух от ВТХА подается в воздухораспределительное устройство 9, откуда через плоские прямоугольные сопла 12 и направляющие пластины 13 он распределяется по площади конвейера 2 модуля A . Потоки воздуха проходят через сетку конвейера 2 со скоростью, позволяющей подсушить и подморозить продукт во взвешенном (флюидизационном) состоянии, исключая возможность адгезии. Затем подмороженный продукт поступает в модуль замораживания B , где воздушные потоки продольно обтекают его, обеспечивая замораживание до криоскопической температуры в центре. В модуле B благодаря изогнутому потолочному элементу 14 и вытяжному устройству 15 происходит перемешивание потоков воздуха, идущих из модуля B над конвейером и между его ветвями, чем обеспечивается интенсивное домораживание с выравниванием температуры продукта до заданной среднеобъемной. Через вытяжное устройство 15 воздушный поток отводится из аппарата. Замороженная продукция выходит через окно выгрузки 17, после чего упаковывается и направляется на хранение в холодильную камеру.

Разработан типоразмерный ряд воздухораспределительных устройств в зависимости от рабочей ширины конвейера скороморозильного аппарата $B_{\text{кн}}$, основные геометрические характеристики которых приведены в табл. 5.

Все вышеизложенное доказывает перспективность использования для быстрого замораживания растительной продукции ВТХА, позволяющего одновременно обеспечить низкую температуру и высокую скорость воздуха, необходимую для организации флюидизационного слоя, тогда как в традиционных флюидизационных скороморозильных аппаратах подача воздуха осуществляется высоконапорными вентиляторами, а для обеспечения низкой температуры воздуха (порядка -30°C) используется холодильная машина.

Список литературы

1. Венгер К. П., Пчелинцев С. А., Феськов О. А. Классификация объектов быстрого замораживания в морозильных аппаратах // Вестник МАХ. 2001. Вып. 1.
2. Патент РФ № 2278337 «Скороморозильный флюидизационный аппарат» / А. А. Антонов, К. П. Венгер, А. Ш. Кобулашвили, Г. Б. Шахмеликян, О. А. Феськов, опубл. в БИ ФИПС № 17 от 20.06.05.