

УДК: 621.57

Особенности замораживания продуктов в воздушном скороморозильном аппарате модульного типа

*Д-р техн.наук, проф., академик МАХ О.Н.БУЯНОВ, А.А.ГОРОХОВ, А.Ю.КУЛЕШОВ
Кемеровский технологический институт пищевой промышленности*

In given article the theoretical substantiation and the comparative analysis kinetics of heat-conducting path in tunnel and two-modular "quick freeze" devices is described. Object of refrigerating processing is the unpacked combined product « a dough + a stuffing » (pies with a meat stuffing). Also prospects of use two-modular "quick freeze" device are analyzed at designing lines of a line production.

Аппараты воздушного типа наиболее распространены в промышленности и используются для замораживания практически любой пищевой продукции (ПП). Достоинство этих аппаратов заключается в возможности замораживания продуктов, представленных эквивалентными телами простой формы в виде пластины, цилиндра или шара, а также телами, отклоняющими от трех классических форм по условиям симметрии как в упакованном, так и в неупакованном виде.

В то же время эти аппараты имеют ряд существенных недостатков, а именно: высокий уровень энергозатрат на замораживание, нерациональное использование имеющихся холодильных мощностей и, как следствие этого, несовершенство технологического процесса замораживания ПП. Поэтому важным является вопрос разработки такого технологического оборудования, которое сможет решить поставленные задачи.

По результатам экспериментальных исследований получены значения продолжительности замораживания неупакованного комбинированного ПП "тесто + начинка" (пироги с мясной начинкой). В качестве скороморозильного аппарата использовали экспериментальную установку, представляющую собой два теплоизолированных модуля, разделенных теплоизолированной пе-

регородкой. Температура в первом модуле составляла -50°C , во втором -30°C . Скорость движения воздуха 5 и 3 м/с соответственно.

В результате проведенных экспериментов были определены продолжительности замораживания продукта в воздушном скороморозильном аппарате модульного типа (см. таблицу).

Весь процесс замораживания классически делится на три этапа: 1 – охлаждение до криоскопической температуры, 2 – кристаллизация, 3 – доведение температуры объекта до конечной (выравнивание температуры по всему объему), а для вычисления отведенного тепла от продукта применяют формулы, суммирующие соответствующие тепловыделения на каждой стадии. Теоретически график кинетики теплоотвода изображен на рис. 1.

Точка A является началом процесса холодильной обработки продукта. Линия графика A – B соответствует охлаждению продукта до криоскопической температуры на поверхности. Как только плотность теплового

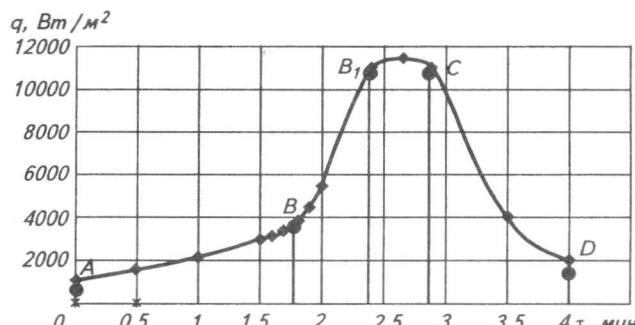


Рис. 1. График теоретической кинетики теплоотвода в туннельном аппарате:

A – B – охлаждение до криоскопической температуры на поверхности; B – C – замораживание до криоскопической температуры в центре; C – D – распределение температуры по всему объему

потока q достигает точки B , на поверхности продукта начинается процесс кристаллизации воды, характеризующийся резким увеличением теплового потока (линия $B - B_1$). При достижении q точки B_1 процесс кристаллизации выходит на стационарный уровень, характеризующийся постоянным значением теплоты, выделяемой продуктом при фазовом превращении жидкости в лед. Это происходит тогда, когда скорость перемещения границы раздела фаз в продукте постоянна (линия $B_1 - C$). Реально этот участок графика получить практически невозможно. Точка C характеризует завершение процесса кристаллизации. После его завершения величина теплового потока резко падает, и линия $C - D$ соответствует доведению продукта до конечной среднеобъемной температуры.

Действительный же график кинетики теплоотвода выглядит следующим образом (рис. 2). Точка A является началом процесса холодильной обработки продукта. Линия $A - B$ соответствует охлаждению продукта до криоскопической температуры на его поверхности. В точке B на поверхности продукта начинается кристаллизация, вследствие чего значение теплового потока растет до точки B_1 . На практике участок графика, соответствующий стационарному теплоотводу, выделить невозможно, эта часть процесса кристаллизации происходит в очень короткий промежуток времени в точке B_1 и ее окрестностях (при быстром замораживании ПП, имеющего небольшие поперечные размеры), вследствие чего мы имеем не плавный переход от B_1 к C (как на рис. 1), а экстремум в точке B_1 . В точке C кристаллизация завершается. Линия $C - D$ соответствует количеству теплоты, выделяющемуся при выравнивании температуры по толщине продукта.

Результаты проведенных многими авторами опытов [2] позволяют предполагать, что кристаллизация в пе-

реохлажденном материале начинается обязательно там, где достигается предельная температура переохлаждения, и именно в момент ее достижения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что кристаллизация начинается в периферийных слоях, так как именно они переохлаждаются быстрее всего. Поскольку многим продуктам присуща значительная неоднородность внутреннего строения и распределения влаги, то можно предположить, что частичная кристаллизация поверхности происходит до достижения q точки B . Глубокое переохлаждение способствует этой частичной кристаллизации, которая стимулирует весь процесс замораживания.

Пусть $q_{\text{внутр}}$ будет среднеинтегральным значением теплового потока, отводимого от продукта за весь цикл замораживания, а $q_{\text{внеш}}$ — максимальным тепловым потоком, который способен отвести от продукта воздух с заданными теплофизическими характеристиками. Отношение этих двух величин определяет эффективность холодильной обработки продукта, а их разность представляет собой неиспользованный холодильный потенциал. Исходя из вышесказанного, $q_{\text{внутр}}$ будет представлять собой тепловой поток, выделяющийся при охлаждении, а $q_{\text{ост}}$ — неиспользованный холодильный потенциал при охлаждении (рис. 3).

При разработке двухмодульного скороморозильного аппарата основное внимание уделялось организации теплоотвода на модели программного замораживания пищевых продуктов. Особенность модели заключается в изменении параметров охлаждающей среды в зависимости от стадии замораживания. Реализация заключалась в формировании двух температурных полей с независимыми характеристиками. Аналитически было определено, что процесс кинетики теплоотвода будет соответствовать показанному на рис. 4.

Здесь точка A — начало процесса замораживания. Линия $A - B$ соответствует охлаждению продукта до криоскопической температуры на поверхности. В криогенных аппаратах при достижении этой точки продукт перемещается в следующую зону обработки, что в

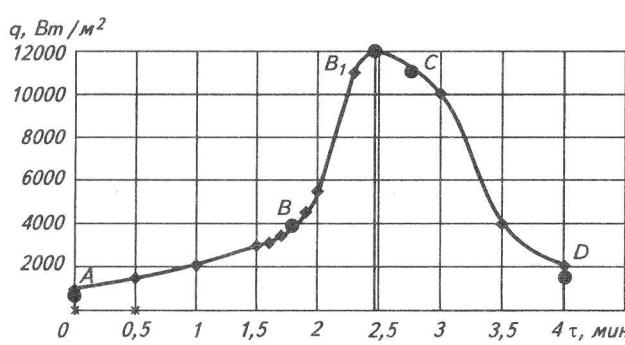


Рис. 2. График действительной кинетики теплоотвода в туннельном аппарате:

$A - B$ — охлаждение до криоскопической температуры на поверхности; $B - C$ — замораживание до криоскопической температуры в центре; $C - D$ — распределение температуры по толщине

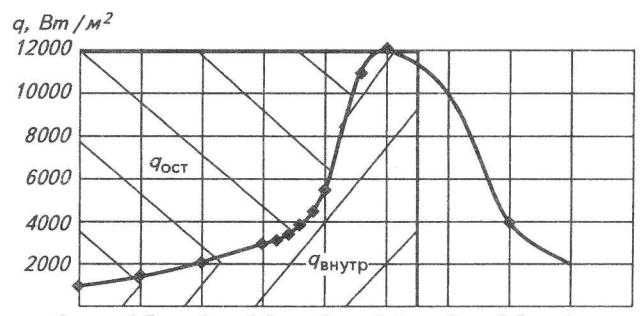


Рис. 3. Соотношение тепловых потоков

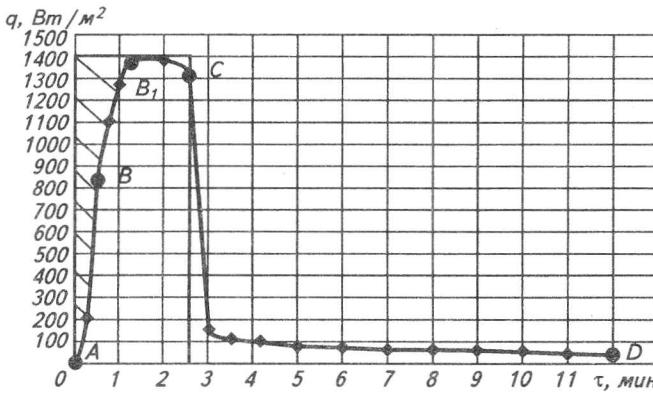


Рис. 4. График теоретической кинетики теплоотвода в двухмодульном аппарате:

A – B – охлаждение ПП до криоскопической температуры на поверхности; B – C – замораживание до криоскопической температуры в центре; C – D – доведение температуры до конечной среднеобъемной

определенной степени нарушает целостность процесса [1]. В двухмодульном же аппарате продукт остается в модуле, характеристики которого не меняются. Вследствие этого происходит последовательное отведение и теплоты охлаждения, и теплоты замораживания. В какой-то момент времени q достигает точки B_1 , соответствующей началу стационарного теплоотвода фазового превращения, и процесс характеризуется линией $B_1 - C$. В точке C кристаллизация заканчивается, и значение теплового потока резко уменьшается. В этот момент продукт перемещается во второй модуль, имеющий более низкую способность теплоотвода ($q_{\text{внеш}}$), в котором объект замораживания доохлаждается до необходимой среднеобъемной температуры. Линия $C - D$ соответствует распределению температуры по всему объему продукта.

При проведении экспериментальных исследований была получена следующая характеристика процесса (рис. 5). При нахождении продукта в первом модуле его температура понижается до $t_{\text{кр}}$ на поверхности (точка B). Вследствие глубокого переохлаждения кристаллизация начинается в первые минуты процесса, и перед переходом продукта во второй модуль весь продукт заморожен (точка C). Глубокое переохлаждение продукта интенсифицирует образование кристаллов, которые равномерно распределяются по всей толще замораживаемого ПП. С помощью термограммы определена средняя линейная скорость замораживания объекта как отношение расстояния от поверхности продукта до его термического центра к промежутку времени достижения температуры на поверхности 0 °С и в термическом центре на 10 °С ниже криоскопической при половине толщины продукта 15 мм, так как в рас-

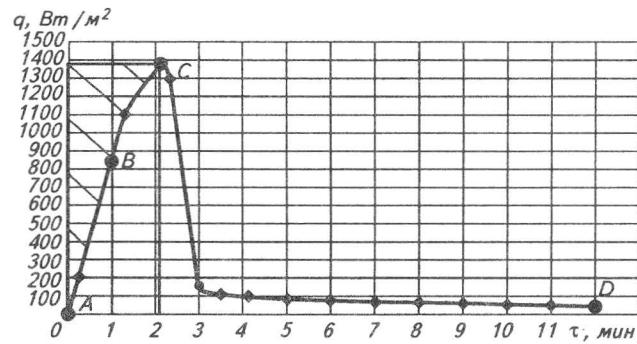


Рис. 5. График действительной кинетики теплоотвода в двухмодульном аппарате:

A – B – охлаждение до криоскопической температуры на поверхности; B – C – замораживание до криоскопической температуры в центре; C – D – распределение температуры по всему объему

сматриваемом случае характерен симметричный теплоотвод. Эта скорость составляет $14,87 \cdot 10^{-6}$ м/с. Полученное значение соответствует понятию быстрой скорости замораживания. При такой скорости крупные кристаллы льда не образуются. Кроме того, при быстром замораживании вода в продукте почти без перемещения переходит в лед там, где она находилась до замораживания, и нативная структура продукта не изменяется. Кроме того, быстрое образование поверхностной ледяной корки способствует уменьшению потери продукта от усушки. Благодаря этому качество замороженного продукта не ухудшается. После перемещения продукта во второй модуль происходит распределение температуры по всему объему ПП до среднеобъемной температуры -18 °С, равной температуре дальнего хранения (линия C – D).

Сравнивая графики на рис. 4 и 5, видим, что теоретическая и действительная кинетики теплоотвода, за небольшим исключением, совпадают, так как в действительной кинетике неиспользованный холодильный потенциал больше, что обусловлено воздействием нерегулируемых внешних факторов (на рисунках заштрихованы).

Сравнение кинетики теплоотвода существующих аппаратов и экспериментальной установки показало, что неиспользованный холодильный потенциал у двухмодульного скроморозильного аппарата примерно в 2 раза меньше на стадии замораживания за счет того, что в первом модуле отводится тепло охлаждения и кристаллизации.

Основная часть времени замораживания уходит на доведение ПП до необходимой температуры в центре. Оно составляет примерно 60 % всего времени, затраченного на холодильную обработку, что связано с не-

обходимостью расходовать часть холода на поддержание ПП в стабильном замороженном состоянии, а часть на отведение теплоты доохлаждения. Однако понижение температуры во втором модуле не позволяет существенно уменьшить время в противовес существенному увеличению энергетических затрат. Поэтому формирование доохлаждения изменением температуры среды кроме увеличения энергетических затрат ничего не дает. Однако сократить продолжительность этого периода технологического процесса можно, увеличивая скорость потока воздуха в пределах энергетически эффективного диапазона.

Непрерывность технологического процесса замораживания очень важна, но она возможна в том случае, когда время нахождения продукта в первом модуле будет равно времени нахождения его во втором, т.е. $\tau_1 = \tau_2$. Этого можно добиться, если добавить дополнительных три-четыре модуля, соответствующих второму по условиям теплоотвода, либо объединить эти дополнительные модули в единый туннель с конвейером. Если длина второго модуля составляет, например, L , то длина единого туннеля не будет превышать $(3\dots 4)L$, что не увеличит громоздкость оборудования.

Таким образом, аппараты воздушного модульного типа позволяют осуществлять процесс программного замораживания ПП, который заключается в изменении параметров охлаждающей среды в зависимости от стадии замораживания. Это позволяет оптимально использовать холодильные мощности на производстве, уменьшить энергозатраты и время замораживания. В ходе проведенных исследований установлено, что процесс быстрого замораживания ПП в двухмодульном скороморозильном аппарате более экономичен. Технологические режимы работы первого и второго модулей позволяют замораживать ПП в предельно короткое время без лишних энергетических затрат. Создание многомодульного комплексного аппарата позволит осуществлять оптимальный непрерывный технологический процесс.

Список литературы

1. Венгер К.П. и др. Исследование процесса быстрого замораживания пищевых продуктов в трехзонном азотном аппарате // Вестник международной академии холода. 2001. № 2.
2. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979.