

## **ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ВАКУУМНО- ИСПАРИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ**

**Бузуев В.С., Данилов В.А., к.т.н. Галаган Т.В.**

**ОрелГТУ**

Процессы охлаждения и нагрева изучаются веками и несправедливо считать, что они изучены досконально и полно. Источники тепла и способы его подвода многообразны и по времени протекания процесса порой просто несравнимы, как конвективный поверхностный способ нагрева и нагрев токами высокой частоты и микроволнами. А для отвода тепла (охлаждения) до сих пор в серьез рассматривали только поверхностный способ. Объемный способ охлаждения быстрый, в несколько десятков или сотен раз, считался утопией. В последнее время появились попытки использовать для объемного охлаждения вакуумно-испарительное охлаждение, которое положительно зарекомендовало себя при охлаждении овощей и фруктов, хотя в их случае оно использовалось как более быстрый поверхностный способ охлаждения. Этот способ охлаждения требует размещения изделий в вакуумной камере с остаточным давлением, соответствующим температуре насыщенных паров воды, близкой к +2 °С. При этом влага изделия интенсивно испаряется и тем охлаждает его. Скорость испарения влаги и соответствующая ей скорость охлаждения определяются производительностью системы вакуумирования.

Традиционные способы охлаждения пищевых продуктов конвективным потоком холодного воздуха не всегда могут быть использованы для промежуточного охлаждения пищевых продуктов. Это связано с ограничениями по температуре охлаждающей среды, которая, будучи достаточно низкой, должна оставаться положительной и не допускать замораживания продукта. Из-за малых перепадов температур ( $T_{\text{прод}} - T_{\text{камеры}}$ ) длительность процесса растет, (особенно на его последней стадии) становятся существенными усушка и неравномерность распределения влаги по объему охлаждаемого объекта. Все это приводит к ухудшению условий последующего хранения и отклонению от стандартов качества продукта по внешнему виду, кислотности, микрофлоре и т.п.

Альтернативой этим способам является вакуумно-испарительное охлаждение, в котором влажный охлаждаемый продукт сам по себе служит регулируемым по температуре

хладагентом . Только одно основное требование предъявляется к продукту подлежащему охлаждению вакуумно-испарительным способом – это достаточно большая пористость, позволяющая парам, образованным внутри капиллярно-пористого тела, свободно покидать его и удаляться вместе с откачиваемым воздухом.

Вакуумно-испарительное охлаждение осуществляется в результате отбора теплоты от продукта при испарении влаги из него . Испарение влаги вызывается понижением давления (созданием вакуума). В связи с достаточно равномерным распределением свободной влаги в изделиях охлаждение так же идет во всем объеме охлаждаемого изделия. Положительным свойством вакуумно-испарительного охлаждения является простота регулирования скорости процесса. При вакуумно-испарительном охлаждении повреждения кристаллами льда структуры пористых изделий невозможны из-за положительных температур на весь период охлаждения.

Эти качества вакуумно-испарительного охлаждения пищевых продуктов используются для охлаждения влажных растительных продуктов: грибов, салата, зеленных культур и др. Во всех случаях отмечалась высокая скорость охлаждения, а обезвоживание продукта соответствовало количеству испаренной воды и степени его охлаждения.

Для полного изучения процесса вакуумно-испарительного охлаждения необходимо было подобрать пищевой продукт являющимся идеальным капиллярно-пористым телом. Им стал хлеб. Были рассмотрены публикации о вакуумно-испарительном охлаждении различных пищевых продуктов, в том числе полуфабрикатов и готовых хлебобулочных изделий [1,2,3]. В них отмечалось, что охлаждение под вакуумом может ускорить охлаждение хлебобулочных изделий. Например, тонкие изделия типа panettoni (итальянский пирог) могут быть охлаждены за 4 минуты под вакуумом по сравнению с двадцати четырех часовым конвективным охлаждением. Это привело к тому, что многие итальянские производители данного изделия перешли на новую технологию охлаждения [5]. Однако из-за структурных изменений, вызванных избыточным перепадом давления пара в области низкой газопроницаемости (хлебной корочки), необходима специализированная программа достижения вакуума. Использование модулируемого вакуумного холодильника (MVC) позволяет получить быстрое охлаждение хлебобулочных изделий без неблагоприятного изменения их объема и структуры [3]. Вместо того чтобы применять вакуумирование с постоянной скоростью откачки, давление в герметичной камере изменяется по заданному закону в течение всего времени охлаждения. Вакуумно-испарительное охлаждение хлебобулочных изделий осуществляется в температурном диапазоне 98...30°C, который сопровождается потерей массы изделия примерно на 1 % при снижении его температуры на каждые 10°C, или на 6,8 % при снижении температуры от 98°C до 30°C. В то же время,

обычное конвективное охлаждение приводит к потере массы на 3-5 % в зависимости от скорости охлаждающего воздуха [1, 3]. Разница между потерями массы незначительна. Пшеничный хлеб –2-килограммовые буханки, французские батоны, пироги с мясом, печенье и пироги, охлаждаемые традиционно за  $1\pm 3$  часа, могут быть охлаждены за время от 30 секунд до 5 минут в вакуумно-испарительной установке.

Процесс вакуумно-испарительного охлаждения имеет преимущества как по качеству и по внешнему виду изделия, так и за счет сокращения времени охлаждения, когда уменьшается количество потребляемой энергии. Кроме того, продукция может долгое время храниться при плюсовых температурах. Увеличенный срок годности изделий из-за отсутствия заражения микробами в течение охлаждения несомненно является большим достоинством вакуумно-испарительного способа охлаждения.

Проводимые исследования были направлены на выявление кинетических закономерностей и разработку физической модели тепло- и массообмена во взаимосвязанных процессах обезвоживания, охлаждения, переноса влаги при вакуумно-испарительном охлаждении.

Способ вакуумно-испарительного охлаждения основывается на процессе в котором свободная и распределенная в объеме продукта влага, испаряясь, отбирает теплоту. Процесс релаксации между изменениями давления насыщенных паров и температуры жидкости протекает быстро. На основе систематизации сведений о физических процессах, протекающих при вакуумно-испарительном охлаждении пищевых продуктов, физическая модель (рисунок 1) строилась на следующих представлениях и допущениях:

- хлебобулочное изделие после первого этапа выпечки рассматривается как капиллярно-пористое тело с пористостью 70...80% и высокой паропроницаемостью;
- в процессе вакуумно-испарительного охлаждения может происходить перераспределение массы влаги по объему заготовки, при этом влажность охлаждаемого полуфабриката достаточна для его вакуумно-испарительного охлаждения без образования сухих зон и сплошных границ фазовых переходов;
- фазовые переходы «жидкость – пар» происходят во всем объеме полуфабриката одновременно в соответствии с локальными значениями температуры и давления в каждой точке охлаждаемого изделия;
- фазовый переход происходит при отсутствии подвода тепла извне за счет уменьшения внутренней энергии изделия и, как следствие, сопровождается уменьшением температуры изделия;
- задача рассматривается как одномерная: перенос массы и теплоты осуществляется только в направлении оси X.

Принципиальными являются первое и третье допущения. В соответствии с ними при удалении водяных паров от охлаждаемых продуктов, помещенных в герметичную камеру вакуумированием, внутри продукта создаются условия для объемного адиабатического испарения и кипения жидкости. В отсутствие теплопритоков извне испарение и кипение жидкости приводит к одновременному охлаждению каждой частицы продукта до температуры насыщенных паров воды, соответствующей давлению в камере.

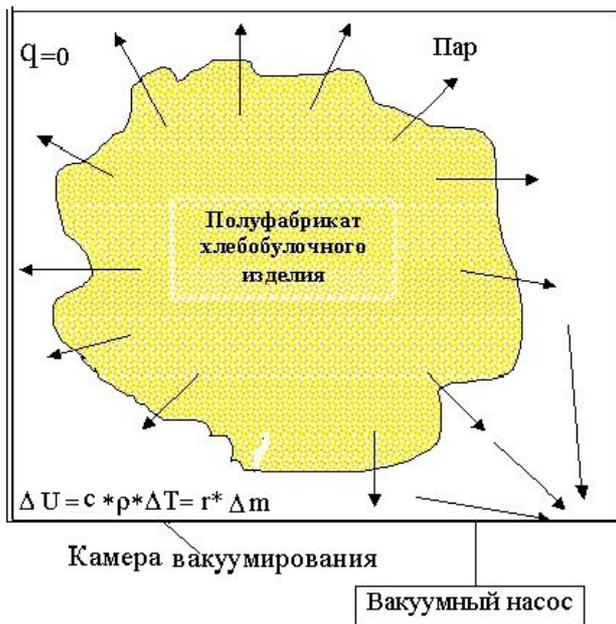


Рисунок 1 – Схема развития процесса вакуумно-испарительного охлаждения

жидкости. В отсутствие теплопритоков извне испарение и кипение жидкости приводит к одновременному охлаждению каждой частицы продукта до температуры насыщенных паров воды (рисунок 2).

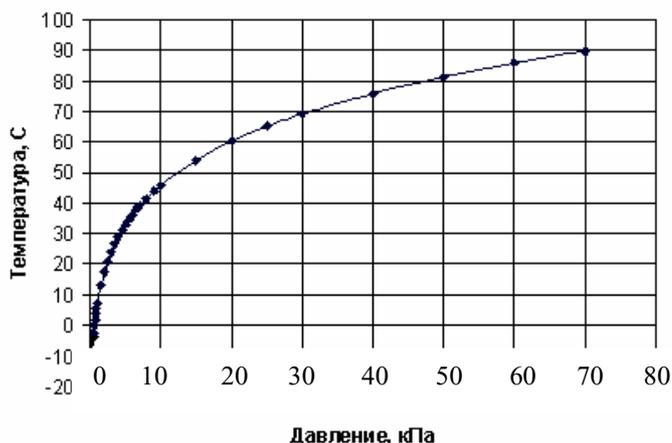


Рисунок 2 – Зависимость температуры насыщенных паров воды от давления

Так как паропроницаемость изделий принята высокой, то в объеме полуфабриката не возникают заметные градиенты давления и соответствующие им градиенты равновесной температуры.

Поэтому по мере откачивания газов давление насыщенных паров над свободной поверхностью жидкости можно отождествить с давлением в камере охлаждения. При откачке воздуха и водяных паров, поступающих в камеру от охлаждаемых продуктов, внутри влажного пористого продукта создаются условия для изоэнтропного объемного испарения и кипения

В явлении вакуумно-испарительного охлаждения такие медленные процессы, как диффузия и теплопроводность, не играют заметной роли, поэтому вакуумно-испарительное охлаждение протекает относительно быстро и во всем объеме изделия одновременно.

В результате проведенных численных исследований установлено, что вакуумно-испарительное охлаждение намного интенсивнее кон-

вективного. Оно обеспечивает охлаждение продукта от 80°C до температуры 0...2°C за 3...6 минут.

При этом в отличие от конвективного при вакуумно-испарительном охлаждении температуры на поверхности и в глубине теста-хлеба одинаковы по всему объему изделия. При увеличении скорости вакуумирования продолжительность охлаждения резко уменьшается. Увеличение массы охлаждаемых изделий наоборот пропорционально увеличивает время охлаждения. Показано, что произведение времени на отношение скорости откачки к массе охлаждаемого продукта может быть приведено к безразмерной величине  $F_w$ , аналогичной критерию Фурье, не связанной, однако, с линейными размерами охлаждаемого изделия. Большое значение имеет влажность охлаждаемого продукта. На основании расчетов установлено, что при охлаждении продукта от 90 °С до 2°C количество свободной влаги в продукте должно быть не менее 12 % от массы охлаждаемого изделия. Влияние объема камеры на процесс вакуумно-испарительного охлаждения может проявляться двояким образом: через увеличение объема откачиваемой среды и увеличение площади поверхности теплообмена камеры с окружающей средой. При этом абсолютная разница во времени охлаждения для камер различных объемов связана с разностью времен откачивания начального объема воздуха. Таким образом, во всех случаях объем камеры должен как можно меньше отличаться от объема охлаждаемого продукта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of freezing and frozen storage of doughs on bread quality. Ribotta Pablo D., (Facultad de Ciencias Agropecuarias, Argentina and Centro de Investigation y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos). J. Agr. and Food Chem. 2001. 49, № 2, pp. 913-198.
2. Have M., Mankai M., Le Bail A. Influence of the freezing condition on the Baking performances of French frozen dough. (Dept. Genie des Precedes Alimentaires, ENITIAA, BP 82225, France. J. Food Eng. 2000. 45, Ms 3, pp. 139-145.
3. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. K. McDonald, D.-W. Sun / Journal of Food Engineering 45 (2000)– pp. 55±65.
4. Di Risio, T. Vacuum cooling in food processing Prepared Foods, 159. (1990). – pp. 195±197.
5. Не теряя формы.– Гамбург: f2m food multimedia gmbh. Хлеб+выпечка. Ноу-хау от профи для профи. Первый русский выпуск. 2000 г. с. 8-10.