

УДК 543.272.62:664

**Челомбитько М.А.**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,  
**Корко В.С.**, кандидат технических наук, доцент, **Назаренко Р.А.**  
Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

## **ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ЭКСТРУЗИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Сегодня здоровье и питание – самые сложные области, и эта тенденция сохранится и в будущем. Снижение питательных качеств пищевых продуктов из-за высокой температуры во время обработки является проблемой для большинства традиционных методов приготовления, которую можно решить с помощью нескольких различных технологий обработки. Процесс экструзии – одно из важнейших новшеств 20 века, применяемое во многих отраслях промышленности. Сверхкритический диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), как нетоксичный, негорючий и недорогой, применяется во многих процессах, в том числе в экструзионной технологии. Процесс экструзии сверхкритическим CO<sub>2</sub> (SCFX-supercritical CO<sub>2</sub> extrusion process) нашел свое применение в первую очередь в обработке и производстве пластика, но в последнее время все больше и больше начинает применяться в производстве и переработке пищевых продуктов. Научные исследования в этой области основаны на производстве экструдатов с улучшенными свойствами по сравнению с обычным процессом экструзии без добавления CO<sub>2</sub>.

Представленный материал является результатом анализа имеющихся международных исследований в области использования сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности.

Самые популярные продукты, приготовленные методом экструзии, включают: закуски прямого экструдирования, сухие завтраки RTE (ready-to-eat-готовые к употреблению), гранулы для снеков, детское питание, быстрорастворимые концентраты, корм для домашних животных, корма для аквакультуры, текстурированные растительные белки, хрустящие хлебцы, панировочные сухари, эмульсии и пасты, продукты баротермической обработки для фармацевтической, химической, бумажной и пивоваренной промышленности, различные виды сладостей, жевательная резинка, стабилизатор рисовых отрубей, полуфабрикаты или термически модифицированные крахмалы, мука и зерно. Обогащение экструдированных закусок питательно ценными ингредиентами все чаще практикуется во многих исследованиях. Добавление ингредиентов, богатых белком и клетчаткой, таких как бобовые или сывороточный протеин, или различных видов муки, а также добавление фруктов и овощей широко используется в пищевой промышленности, как для конечных продуктов, так и для модификации муки для хлебопекарной промышленности. Поскольку экструзия представляет собой высокотемпературный / кратковременный (HT/ST – high-temperature/short time) процесс, он сводит к минимуму разложение питательных веществ пищи и улучшает усвояемость белков (денатурируя) и крахмалов (путем желатинизации). Экструзионная варка при высоких температурах также разрушает ингибитор трипсина и нежелательные ферменты, такие как липазы, липоксидазы и микроорганизмы.

Другими преимуществами экструзии являются повышенная перевариваемость волокон, повышенная биодоступность минералов, инактивация некоторых компонентов, например глюкозинолата, госсипола, гликоалкалоидов и афлатоксина. Однако, как и у любого другого процесса, есть некоторые недостатки. Углеводы и белки подвергаются реакциям Майяра, и существует риск образования акриламидов и гидроксиметилфурфуrolа. Процесс экструзии можно комбинировать со сверхкритической жидкостью, где наиболее часто используемой жидкостью является экологически чистый CO<sub>2</sub>. Процесс сверхкритической жидкостной экструзии (SCFX) имеет потенциал для производства широкого спектра воздушных про-

дуктов с улучшенной текстурой, цветом и вкусом. Использование низкотемпературных условий процесса с малым сдвигом обеспечивает минимальные технологические потери термолabileльных питательных веществ.

*Суперкритическая жидкость (SCF- super critical fluid).* Чистый компонент считается находящимся в сверхкритическом состоянии, если его температура и давление выше критических значений давления и температуры. Плотность сверхкритической жидкости чрезвычайно чувствительна к незначительным изменениям температуры и давления вблизи критической точки. В соответствии с этим, сверхкритические жидкости обладают свойствами между газами и жидкостями. Ряд соединений был исследован как сверхкритические экстракционные растворители: этан, пропан, гексан, пентан, этилен, диметиловый эфир, бутан, закись азота и т. д. Фактически, любой растворитель может использоваться в качестве сверхкритического растворителя; однако техническая жизнеспособность (критические свойства), токсичность, стоимость и сольватационная способность определяют наиболее подходящий растворитель для конкретного применения. CO<sub>2</sub> представляет особый интерес как SCF из-за подходящих критических констант (T<sub>c</sub> = 31,1 °C, P<sub>c</sub> = 7,38 МПа). В то же время он нетоксичен, невзрывоопасен и легко доступен. Кроме того, тот факт, что CO<sub>2</sub> представляет собой газ в условиях окружающей среды, который может быть очень легко удален из продукта, что позволяет избежать дорогостоящих процессов сушки или удаления растворителя, является очень важным при обработке пищевых продуктов. SCF уже применялся в нескольких процессах в фармацевтической, пищевой и текстильной промышленности. SCF использовался в различных новых методах обработки пищевых продуктов, таких как экструзия.

*Экструзия сверхкритической жидкостью.* Экструзия сверхкритической жидкостью (SCFX) была разработана и запатентована Rizvi & Mulvaney (1992). Это процесс, в котором сверхкритический CO<sub>2</sub> вводится вспенивающим агентом для контроля вспучивания при экструзии и пластификатора для снижения вязкости. Экструдаты имеют пористую внутреннюю часть с гладкой внешней поверхностью. Закачка CO<sub>2</sub> служит недорогой альтернативой расширению продуктов при более низких температурах. Сверхкритический CO<sub>2</sub> может достичь быстрой солиubilизации за счет повышения растворимости жидкости в технологической матрице и снижения эффектов поверхностного натяжения. Растворимость CO<sub>2</sub> может быть увеличена при повышении давления или понижении температуры. Использование SCF в процессе экструзии основано на четырехэтапном процессе, который включает: 1) формирование теста с газодерживающими свойствами путем смешивания или варки (желатинизации), смешивания и охлаждения, при необходимости ниже 100°C; 2) введение сверхкритического CO<sub>2</sub> в тесто или расплав со скоростью, не превышающей предел насыщения, и перемешивание для создания единой фазы внутри цилиндра экструдера; 3) создание контролируемой термодинамической нестабильности путем манипулирования давлением и / или температурой в экструдере; 4) контроль степени роста клеток во время схватывания продукта посредством соответствующей отборки матрицы и постэкструзионных процессов сушки и охлаждения.

Рабочие параметры SCFX, такие как скорость закачки сверхкритического CO<sub>2</sub> и скорость падения давления, имеют решающее значение и могут быть отрегулированы для получения широкого диапазона размеров ячеек, плотности и расширения продукта. Профиль давления в цилиндре экструдера может быть связан с реализованной конфигурацией шнека и размером матрицы. Жидкий CO<sub>2</sub> сначала охлаждается, а затем сжимается до сверхкритического давления. Затем CO<sub>2</sub> под высоким давлением хорошо нагревается до сверхкритической фазы. Этот CO<sub>2</sub> может быть непосредственно введен в процесс экструзии под давлением в полностью приготовленное тесто в экструдере. Расширение или раздувание продукта происходит за счет расширения и диффузии газа, причем расширение происходит постепенно изнутри наружу, оставляя центральную сердцевину пустого пространства и естественно сформированный расширенный внешний слой или оболочку.

Контроль температуры сверхкритического CO<sub>2</sub> очень важен для поддержания стабильной плотности во всей системе. После введения в процесс он равномерно распределяется по всему продукту, и при точном контроле потока сверхкритического CO<sub>2</sub> можно получить очень стабильное и легко регулируемое расширение для конечного продукта. Сверхкритический CO<sub>2</sub> изменяет реологические свойства материала внутри экструдера, и он производит продукты с менее интенсивным вспучиванием, что приводит к более гладкой поверхности и более однородной внутренней структуре ячеек. Сверхкритический CO<sub>2</sub> – эффективный пластификатор крахмало-водной смеси, понижающий вязкость расплава. Его также можно использовать для регулирования pH продукта в экструдере (за счет образования угольной кислоты в цилиндре). В некоторых областях применения использование более низких температур (менее 100 °C) и присутствие сверхкритического CO<sub>2</sub> может позволить избежать использования воды в качестве расширительного агента. Результаты видны в снижении влажности продукта и образовании пара при падении давления. Процесс SCFX привносит визуальную, функциональную и текстурную новизну в существующие пищевые продукты. Удельная механическая энергия (SME – specific mechanical energy) в процессе экструзии без впрыска газа CO<sub>2</sub> значительно выше, чем в процессе экструзии с впрыском газа CO<sub>2</sub>. Низкотемпературная экструзия и значительно пониженное давление на выходе матрицы предотвращают повреждение термочувствительных компонентов и питательных веществ, что позволяет производить новые функциональные пищевые продукты или ингредиенты, а также инкапсулировать ароматизаторы и биоактивные вещества на внутренней поверхности клетки.

Некоторые из наиболее важных преимуществ SCFX: производство экструдированных продуктов при низких температурах и малом расширении сдвига; двойная текстура (пористая внутренняя часть с гладкой внешней поверхностью), с переменным количеством и размером ячеек для управления текстурой; управление давлением и температурой в цилиндре во время обработки дает дополнительные возможности для создания микросотовых композитных (сэндвич) структур различной морфологии и механических свойств; возможность добавления термочувствительных ингредиентов (ароматизаторы, красители и др.); возможность реактивной экструзии с контролем pH за счет образования угольной кислоты в цилиндре; снижение вязкости расплава и pH (из-за большого эффекта растворимости) обеспечивает большую степень свободы для изменения реологических и химических свойств экструдатов.

В соответствии со всеми этими преимуществами с помощью SCFX можно производить большой перечень продуктов, таких как: сухие завтраки, закуски, макаронные изделия, шоколад и кондитерские изделия, кофе, закваска из теста и хлеба, чипсы из молочного белка и сывороточного белка и т. д., с улучшенными свойствами и более высокими питательными качествами, чем при использовании традиционной экструзии.

#### Список использованной литературы

1. Bilgi Boyacı B., Han J.Y., Masatcioglu M.T., Yalcin E., Celik S., Ryu G.H., Koxsel H. Effects of cold extrusion process on thiamine and riboflavin contents of fortified corn extrudates, *Food Chem.* 2012, vol. 132, pp. 2165–2170.
2. Chaughule V., Thorat B., Jangam S.V., Law C.L., Mujumdar A.S. (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, Singapore. 2011, vol. 3, pp. 39–62.
3. Jokić S., Bijuk M., Aladić K., Bilić M., Molnar M. Optimization of supercritical CO<sub>2</sub> extraction of grape seed oil using response surface methodology, *Int. J. Food Sci. Tech.* 2016, vol. 51, pp. 403–410.