

## **Исследование потребительских свойств молочных продуктов методами магнитной резонансной томографии**

Алексеев Г.В., Хрипов А. А., Яковлев А.А. [gva2003@rambler.ru](mailto:gva2003@rambler.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*В настоящее время практически во всех отраслях пищевой промышленности актуальны вопросы выявления некондиционных или фальсифицированных продуктов. Вместе с тем, ряд технологий допускает применение определенных пищевых добавок и специфических видов сырья не ухудшающих потребительские свойства продукции. Разработка новых методов теххимического контроля, позволяющих решать эти вопросы, требует разработки новых инструментальных методов, в том числе с использованием таких тонких методов как магнитная резонансная томография.*

Ключевые слова: молочные продукты, магнитная резонансная томография, связанность молекул воды.

От способности связывать воду зависят многие свойства у целого ряда коллоидных систем, имеющих большое значение в пищевой промышленности. Процесс хлебопечения, например, очень хорошо характеризуется изменением у продукта способности связывать воду. Способность связывать воду у пшеничной муки равна 44,0%, у теста — 53,5%, у горячего хлеба — 82,7%, у хлеба через 2 часа — 82,7%, через 4 часа — 81,2% , через 6 часов — 79,6% , через сутки — 72,0% , через 3 суток — 69,4% и через 5 суток — 67,4%.

Тесто и выпеченный из него пшеничный хлеб имеют практически одинаковую влажность (определяется высушиванием при 105°C). Однако по внешнему виду, на ощупь, тесто кажется значительно более влажным. В данном случае, при возрастании гидрофильности при выпечке, в хлебе большая часть воды переходит в адсорбционно-связанное состояние, и продукт обладает меньшей свободной влажностью.

При хранении хлеба в системе происходит обратный процесс, система начинает терять способность связывать воду. Происходит процесс старения, называемый черствением хлеба.

Поверхность мицелл коллоидного вещества, а также определённые радикалы громадных молекул, самостоятельно существующих в золях таких высокомолекулярных соединений, как белки, связывают часть дисперсионной среды, например воды, находящейся в непосредственной с ними близости, значительно изменяя её свойства (теплоёмкость, способность растворять, плотность и уменьшенная упругость). Такую воду называют связанной водой и она в большинстве случаев является сорбционно-связанной средой.

Всю воду желеобразной системы, учитывая сделанные замечания, можно разделить на два вида: вода адсорбционно-связанная  $\chi$  и вода неизменённая — свободная. Таким образом, величина влажности системы определяется свободной влажностью (СВ) и связанной влажностью (СЗВ), значительно отличающимися друг от друга по своим свойствам.

Кроме описанной связанной воды, система может удерживать некоторое количество воды своей структурой, подобно тому, как губка впитывает большой объём воды своими порами. Эта удержанная вода обладает неизменными свойствами свободной воды и учитывается в виде свободной влажности.

В случае гидрофильных систем, состоящих из растворяющихся (в виде отдельных молекул) в среде высокомолекулярных соединений, явление связывания воды будет идти не по поверхности раздела, а по определённым радикалам, причём к каждому радикалу может присоединиться небольшое число молекул воды. Однако, благодаря большому числу таких радикалов (НО, NH<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub> и др.), должно связываться большое число молекул воды одним граммом гидрофильного вещества.

Для характеристики веществ по их способности связывать воду надо вести её определение в строго определённых условиях. В этом случае способность связывать воду является количественной характеристикой гидрофильности дисперсной системы. Способность некоторых веществ связывать воду различна, например, связанная вода составляет для желатина 40% (считая на сухое вещество), для агара — 61%; для крахмала — 37% и для SiO<sub>2</sub> до 30%. Изменение количества связанной воды может служить признаком старения коллоидной системы, указывая, что старение связано с изменением её гидрофильности. Так, золь гидроокиси железа сразу после приготовления имеет на 1 г сухого вещества 5,37 г связанной воды, а через полтора года — лишь 0,29 г. Исследование явления синерезиса крахмала и желатина показало, что количество связанной воды и после синерезиса у этих студней почти не меняется, т. е. явление синерезиса у этих веществ больше связано с изменением структуры студня стягиванием его скелета, чем с изменением гидрофильности. Исследование коли-

чества связанной воды при набухании даёт определённый ответ на вопрос о природе воды набухания. Главное количество воды набухания не связано непосредственно с частицами студня.

Из приведенных соображений видно, что исследование связанной воды у гидрофильных систем, во-первых, характеризует степень её гидрофильности и, во-вторых, позволяет судить об изменениях свойств системы в зависимости от тех или иных условий.

Вышеизложенные представления проверялись на образцах молочных продуктов, полученных с использованием так называемого «восстановленного» молока.

Исследования проводили на базе клинического МР томографа Vectra фирмы General Electric Medical Systems (США). Индукция магнитного поля томографа — 0,5 Т, частота ЯМР на ядрах атома водорода — 21,6 МГц.

В результате проведенных опытов получены МР томограммы молочных продуктов длительного хранения 3,2 и 1,5% жирности.

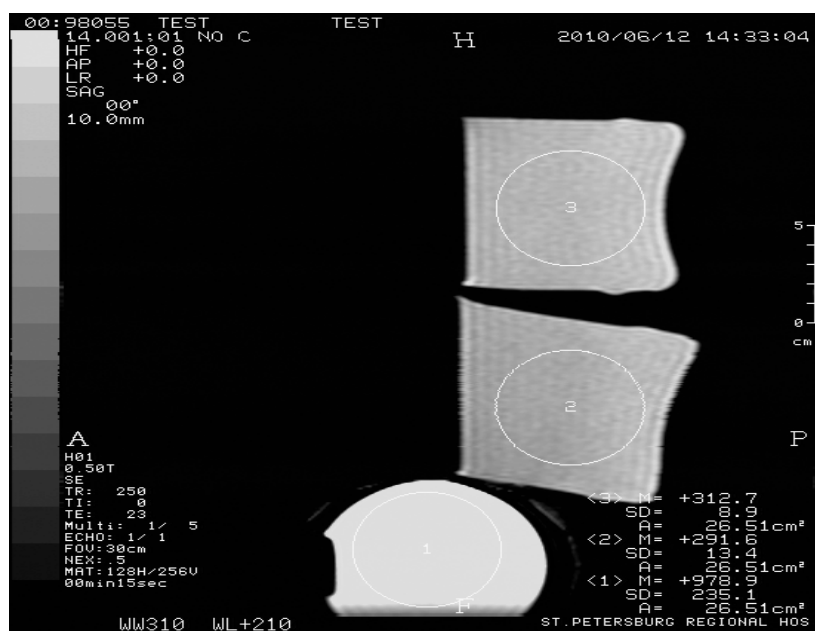


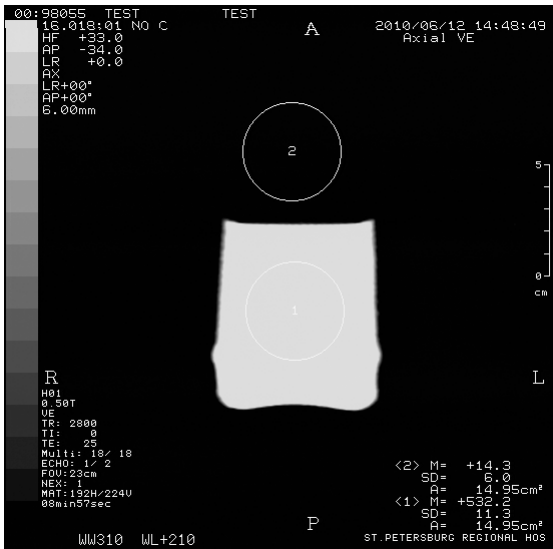
Рис. 1. Саггитальный срез протонной плотности исследуемой средой:  
1 — фантом томографа с водным раствором парамагнитной соли;  
2 — долгосрочное молоко 1,5 % жирности (торговая марка «Клевер»);  
3 — молоко пастеризованное 3,2 % жирности (торговая марка «Тема»).



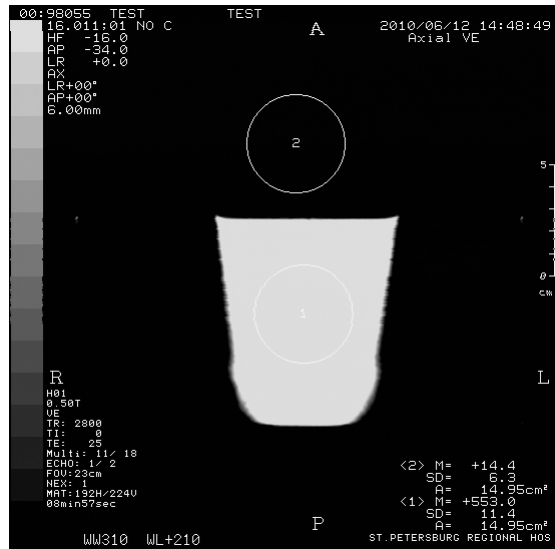
Рис. 2. Коронарный срез протонной плотности исследуемой средой.

Два вида изображений протонной плотности представлены на рис. 1 и 2, а T2-взвешенное изображение на рис. 3 (а, б). Протонная плотность служит визуализации распределения концентрации воды в образце. T2-взвешенное изображение отображает как протонную плотность, так и динамические характеристики: величину коэффициента вращательной подвижности молекулы воды (или вращательную микровязкость) и скорость химического протонного обмена между состояниями с различной вращательной подвижностью молекул.

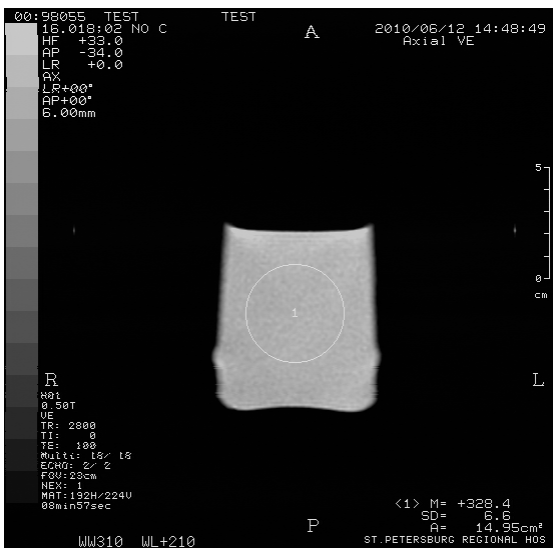
Одной из гипотез при проведении исследований было предположение о том, что на поверхности жировых шариков молекулы воды заторможены (находятся в адсорбционно-связанном состоянии) и, вследствие этого, наблюдаемое время протонной релаксации T2, усредненное по двум состояниям (молекулы воды вблизи жировых шариков и молекулы воды в объемной фазе) будет уменьшаться с увеличением концентрации жира, так как размеры молекул жира (а также и жировых мицелл и жировых шариков) много больше размеров воды.



TE = 25 мс



TE = 25 мс



а. TE = 100 мс. Долгосрочное молоко  
1,5 % жирности («Клевер»)



б. TE = 100 мс. Молоко пастеризованное  
3,2 % жирности («Тема»)

Рис. 3. T2-взвешенные срезы сосудов с молочными продуктами при TE=100 мс.

Предварительные эксперименты не подтвердили это предположение, поскольку интенсивности сигналов на T2-взвешенных изображениях молока для 1,5 % и 3,2 % жирности были одинаковые при TE=25, 100 мс и TR=2800 с.

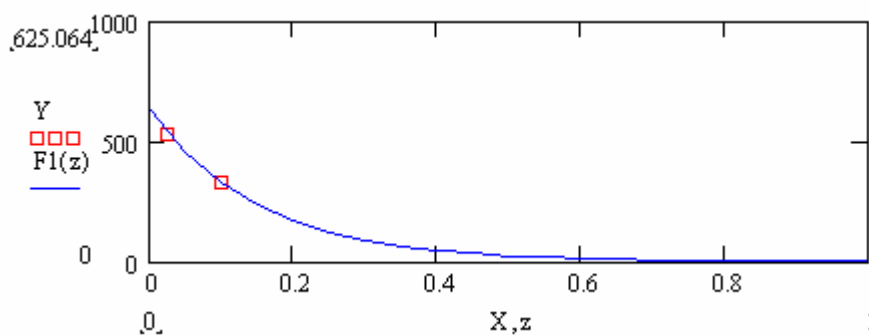


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных данных.

Полученные данные могут быть истолкованы следующим образом.

Рассчитанное из томограмм, приведенных на рис. 3, время релаксации  $T_2$  протонов воды в образцах молока с 1,5% и 3,2% жирности одинаково и равно 0,155 с (рис. 4). Это значение на порядок меньше времени  $T_2$  в дегазированной чистой воде ( $T_2=3,6$  с при  $20^\circ\text{C}$ ). Таким образом, молекулы воды слабо заторможены вблизи молекул жира, в сравнении с водой в объемной фазе. Кроме того, время  $T_2$  ЯМР релаксации протонов воды не чувствительно к концентрации жира в молоке с жирностью ниже 3,2%.

Полученные результаты для практического использования требуют дальнейших исследований на более широком спектре молочных продуктов.

## **Examination of consumer qualities of milk products by magnetic-resonance tomography**

Alexeyev G.V., Khripov A.A., Yakovlev A.A.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration  
and Food Engineering

*At the present time practically in all branches of food industry a topical question is identification of subquality and faulty products. At the same time a number of technologies permit use of certain food additives and specific kinds of raw materials that do not deteriorate consumer qualities of produce. New methods of technical-chemical control allowing solving these problems are necessary; elaboration of new instrumental methods is a must, including such method as magnetic-resonance tomography.*

Keywords: milk products, magnetic-resonance tomography, cohesion of water molecules.