

Микропористая структура макаронных изделий с нетрадиционным сырьем и влияние ее на внутреннее влагоперемещение

В.Г.ЮРЧАК, Ю.П.ЛУЦИК, Б.И.ВЕРБИЦКИЙ, Т.П.ЕВСЕЕНКО, Б.И.ХИВРИЧ

Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

Для интенсификации процесса сушки макаронных изделий и обоснования оптимальных его параметров важное значение имеет изучение характера взаимодействия воды с материалом и микропоровой структуры сырых изделий. Однако исследованию форм связи влаги, микропоровой структуры спрессованного теста и влиянию на них технологических факторов посвящено крайне мало работ.

Работами, выполненными в Национальном университете пищевых технологий, доказано положительное влияние на качество макаронных изделий улучшающих пищевых добавок-структурообразователей (пектина, карбюлозы, желатина), а также пектинсодержащего сырья, муки из бобовых культур (муки из солода гороха, люпина и соевой термически обработанной лецитинированной муки), которые увеличивают водопоглотительную способность теста и влияют на количество влаги разных форм связи [1, 2].

На основании исследования изотерм адсорбции показано, что определяющей в адсорбции молекул воды обезвоженным тестом является поверхность микропористого пространства. Для более глубокого исследования микропористой структуры макаронного теста и влияния на нее нетрадиционного сырья и пищевых добавок определяли интегральную и дифференциальную функции распределения микропор по их размерам.

Интегральное распределение микропор находили по уравнению

$$F(r) = V(r)/V(r_{\max}), \quad (1)$$

где $V(r_{\max})$ — суммарный объем микропор, радиусы которых изменяются от r_0 до r_{\max} ; V_r — объем микропор радиуса r .

Дифференциальную функцию распределения микропор по радиусам получали как производную от интегрального распределения

$$f(r) = dF(r)/dr \quad (2)$$

с помощью формул дискретного дифференцирования [3, 4]. Полученные функции $f(r)$ позволили установить интервал изменения радиусов микропор в каждом отдельном образце, т.е. от минимального радиуса r_0 микропор до их максимального значения r_{\max} .

Кроме этого для всех объектов исследования нами определены эффективные радиусы микропор $r_{\text{эф}}$ по формуле

$$r_{\text{эф}} = \frac{1}{r_{\max} - r_0} \int_{r_0}^{r_{\max}} r^2 f(r) dr. \quad (3)$$

Для получения указанных выше кривых нами использован метод [5, 6], который справедлив для ограниченно набухающих коллоидных капиллярно-пористых тел, т.е. для области их гигроскопического состояния. Поэтому в качестве исходных экспериментальных дан-

ных использованы десорбционные ветви изотерм адсорбции паров воды при $T = 293$ К.

Полученные интегральные и дифференциальные кривые представлены на рис. 1 и 2. По интегральным кривым $F(r)$ распределения микропор по их размерам видно, что почти для всех образцов объем микропор возрастает по параболическому закону, начиная от минимального значения $r_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ м до $r = 50 \cdot 10^{-10}$ м. Дальнейшее изменение этих кривых имеет линейный характер.

Дифференциальные кривые $f(r)$ распределения микропор по их размерам для указанных образцов свидетельствуют, что наибольшего значения ($40 \cdot 10^6$ м⁻¹– $60 \cdot 10^6$ м⁻¹) функция достигает при размере микропор $5 \cdot 10^{-10}$ – $9 \cdot 10^{-10}$ м. При этом в данном диапазоне размеров микропор существенной разницы в кривых $f(r)$ для разных образцов не имеется.

Влияние различных видов муки из бобовых культур и желатина на размер микропор (рис. 1) наблюдается в диапазоне $20 \cdot 10^{-10}$ – $65 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. для переходных микропор. Так, для контрольного образца кривая $f(r)$ имеет минимум при $r = 35 \cdot 10^{-10}$ м и незначительный максимум при $r = 52 \cdot 10^{-10}$ м, в опытных образцах — противоположная картина. Это говорит о том, что в контрольном образце содержится большее количество микропор с большим размером, а образцы изделий с добавками владеют более тонкопористой структурой.

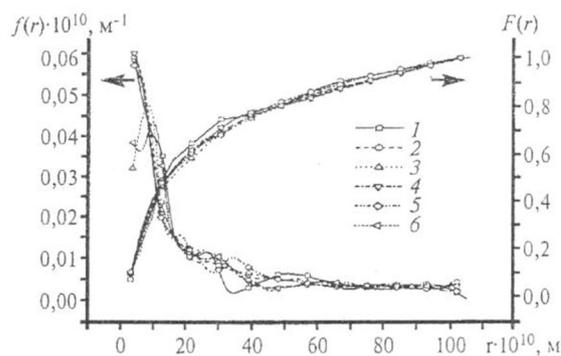


Рис. 1. Влияние муки из бобовых культур на распределение пор по размерам

Установлено (рис. 2), что внесение в тесто пектинсодержащих добавок (овощных порошков и пектинов) почти не изменяет количества микропор радиусом $< 30 \cdot 10^{-10}$ м. Однако их количество с радиусом $35 \cdot 10^{-10}$ – $65 \cdot 10^{-10}$ м возрастает теста с этими добавками по отношению к контрольному образцу и уменьшается соответственно количество микропор с большими радиусами $70 \cdot 10^{-10}$ – $140 \cdot 10^{-10}$ м. Причем использование высокодисперсного порошка приводит к образованию теста, имеющего меньшее количество крупных микропор, чем в тесте с крупнодисперсным порошком. В наибольшей степени уменьшению размеров микропор способствует пектин.

Нами рассчитаны эффективные радиусы микропор $r_{\text{эф}}$ для образцов с указанными белковыми добавками,

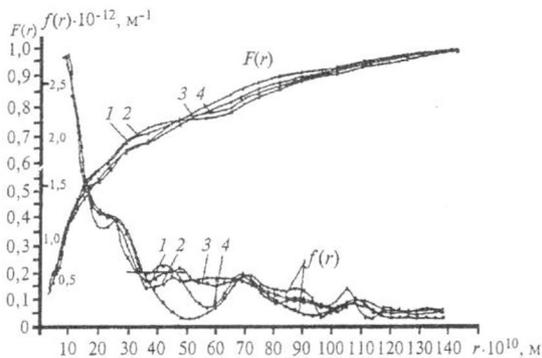


Рис. 2. Влияние пектина и овощных порошков на распределение пор по размерам: 1 – контроль (без добавок); 2 – 1 % цитрусового пектина; 3 – 3 % крупнодисперсного морковного порошка; 4 – 3 % высокодисперсного морковного порошка

что представлено в таблице. Кроме этого здесь приведено количество влаги, поглощенной образцами в моно- и полимолекулярном слоях, а также влаги гигроскопического состояния, что определялось по десорбционным кривым изотермы.

Влияние муки из бобовых культур и добавок-гелеобразователей на количество и энергию связывания влаги

Образцы макаронных изделий, дозировка добавки, % к массе муки	Значения показателей					
	Количество адсорбированной влаги, % к СВ			Энергия связывания влаги, Дж · 10 ⁻³ /моль		Эффективный радиус микропор r _{эф}
	мономолекулярного слоя U _м	полимолекулярного слоя U _п	гигроскопического состояния	мономолекулярного слоя U _м	полимолекулярного слоя U _п	
Без добавок (контроль)	3,0	10,0	16,0	5,60	1,37	12,67
С мукой солода гороха, 6	5,0	10,0	17,0	4,17	1,37	13,82
С мукой люпина, 6	6,0	10,0	17,00	3,18	1,37	13,80
С желатином, 0,4	6,0	10,0	18,0	3,19	1,37	14,16
С мукой солода гороха, 6, и с желатином, 0,4	5,0	11,0	17,0	4,17	1,05	14,16
С мукой люпина, 6 и с желатином, 0,4	5,0	11,0	17,0	4,17	1,05	12,92
С карбюлозой, 0,6	8,0	11,0	17,0	2,23	1,05	13,99

В области адсорбционной влаги с коллоидными капиллярно-пористыми телами внутренний влагоперенос в них осуществляется путем эффузии и диффузии влаги в виде пара.

Парциальное давление паров воды P согласно изотермам адсорбции является функцией влагосодержания U и температуры T , а потенциалом внутреннего влагопереноса будет отношение P/\sqrt{T} .

Академик А.В.Лыков вывел формулы для определения коэффициентов эффузии α_3 и диффузии α_m влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах [3]:

$$\alpha_3 = \frac{1}{\rho_0} 1,064 r_{эф} \sqrt{\frac{M}{R} \left(\frac{\partial Z}{\partial U} \right)_T}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \frac{\sigma \cos \theta}{4 \eta_b r^2} \int_0^r r^2 f(r) dr, \quad (5)$$

где $Z(U, T) = P/\sqrt{T}$ – потенциал эффузионного влагопереноса; ρ_0 – плотность абсолютно сухого образца; M – молекулярная масса влаги; R – универсальная газовая постоянная; $r_{эф}$ – эффективный радиус молекулярного течения пара; θ – краевой угол смачивания; $\cos \theta = 1$; σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\sigma = 7,275 \cdot 10^{-2}$ Н/м; η_b – коэффициент вязкости воды, $\eta_b = 1,14 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с).

На рис. 3,а приведены кривые зависимости $\alpha_3(U)_T$. На двух кривых этой зависимости, принадлежащих контрольному образцу и образцу с 0,6 % карбюлозы, резко выделяются два максимума. Последние соответствуют количеству влаги, адсорбированной в мономолекулярном U_m и полимолекулярном U_p слоях. При этом для образца с 0,6 % карбюлозы коэффициент α_3 достигает больших по величине значений, чем для контрольного образца. Это объясняется тем, что незначительная добавка к пшеничной муке карбюлозы, которая обладает лиофильными свойствами, приводит к накоплению большего количества влаги в указанных адсорбционных слоях, что подтверждается данными таблицы.

Для образцов, содержащих 6 % муки люпина; из 6 % муки люпина и 0,4 % желатина, 6 % муки солода гороха и 0,4 % желатина кривые зависимости $\alpha_3(U)_T$ имеют параболический вид. Максимумы этих кривых смещены в область влагосодержания полимолекулярной адсорбции U_p и занимают диапазон влагосодержания в пределах $0,08 \leq U \leq 0,1$.

В отличие от указанных образцов, коэффициент α_3 для образца с 0,4 % желатина сразу достигает значительной величины $\alpha_3 = 4,1 \cdot 10^{-11}$ м²/с и остается постоянным в области $U = U_m$. Сравнивая этот образец с контрольным, можно утверждать, что присутствие в макаронном тесте незначительной доли желатина (аналогично карбюлозе) повышает количество влаги U_m .

С другой стороны, его присутствие приводит к существенному уменьшению количества более крупных микропор в диапазоне $30 \cdot 10^{-10} - 65 \cdot 10^{-10}$ м в сравнении с

контрольным образцом, что подтверждается дифференциальной функцией $f(r)$ распределения микропор по их размерам. Таким образом, влияние этих двух факторов дает объяснение высокого по значению и постоянного по величине коэффициента α_3 в области U_m .

Полученные максимумы кривых зависимости $\alpha_3(U)_T$ для большинства объектов исследования находятся в интервале влагосодержания U , максимально приближенном к влагосодержанию U_p полимолекулярной адсорбции. Справедливость такой закономерности можно объяснить тем, что при наличии в образцах теста влагосодержания $U \approx U_p$ при изотермических условиях будет возрастать парциальное давление пара в образцах. Последнее приводит к росту потенциала эффузионного влагопереноса.

При возрастании влагосодержания U макаронного теста, превышающего U_p , значения коэффициентов эффузии α_3 , как видно из рис. 3,а, резко уменьшаются.

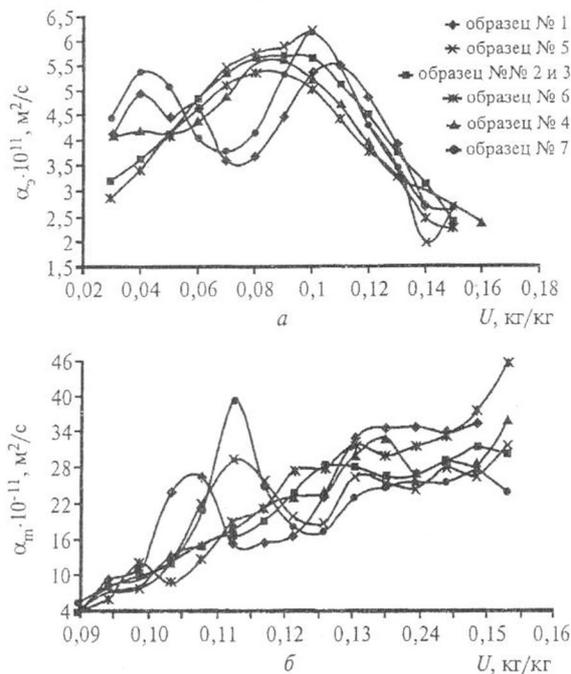


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффузии α_3 (а) и коэффициента диффузии α_m (б) влаги от влагосодержания образцов макаронных изделий при $T = 291$ К: 1 – контроль; 2, 3 – с мукой люпина 6 % и с солодом гороха 6 %; 4 – с 0,4 % желатина; 5 – с люпином 6 % и желатином 0,4 %; 6 – с солодом гороха 6 % и желатином 0,4 %

Это говорит о том, что эффузионный перенос влаги теряет свою роль. В области влагосодержания $U > U_n$ образцы владеют значительно большими размерами микропор, в которых может происходить капиллярная конденсация пара. Такое явление может одновременно привести к возникновению другого механизма внутреннего влагопереноса. Это подтверждается кривыми изменения коэффициента диффузии влаги, выражающих зависимости $\alpha_m = f(U)_T$, представленных на рис. 3, б.

Изменение хода кривых зависимости $\alpha_m(U)_T$ для образцов макаронного теста с теми же добавками также носит сложный характер. Экстремальные значения коэффициента α_m в области U_n четко просматриваются на трех кривых, принадлежащих образцам: контрольному, с 6 % люпина и 0,4 % желатина, с 0,6 % карбюлозы. При этом максимумы значений коэффициента α_m совпадают при одинаковом $U = 0,115$ кг/кг для макаронного теста с указанными добавками и несколько смещены в область большего U по сравнению с контрольным образцом. Здесь уместно отметить, что желатин, как и карбюлоза, гидрофильное вещество, которое в комплексе с люпином проявляет синергический эффект и улучшает внутреннее влагоперемещение по сравнению с добавкой одного лишь желатина. Подтверждением этого является тот факт, что в данной области влагосодержания $U \approx U_n$ коэффициент α_m достигает по абсолютной величине в два раза больших значений, т.е. $\alpha_m = 29 \cdot 10^{-11}$ м²/с. Естественно, что в данной области $U = U_n$ во всех образцах внутренний влагоперенос осуществляется путем диффузии парообразной влаги.

Практический интерес, с точки зрения технологии сушки, представляет изменение коэффициента α_m в области влагосодержаний $U_n < U \leq U_{m.g}$ (где $U_{m.g}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание образца). Анализируя характер изменения кривых зависимостей

$\alpha_m(U)_T$ на рис. 3, б, можно сказать, что в общем видна тенденция роста их в данном диапазоне влагосодержаний образцов. Однако для этого участка влагосодержаний у отдельных образцов проявляется различная интенсивность переноса влаги, которая отражается коэффициентами α_m . Особое влияние здесь на увеличение коэффициента α_m оказывают добавки: 6 % солода гороха совместно с 0,4 % желатина, 6 % муки люпина, 6 % муки солода гороха, 0,4 % желатина. В данной области влагосодержаний по интенсивности влагопереноса превосходит всех образец, содержащий 6 % солода гороха и 0,4 % желатина. Такой характер изменения коэффициентов α_m при различных влагосодержаниях определяется не только формами связи влаги с материалом, но и состоянием его пористости. Учитывая последнее и располагая данными распределения пор по размерам $f(r)$, необходимо указать, что максимальный размер микропор образцов составляет интервал $r = (80-100) \cdot 10^{-10}$ м и их крайне мало в образцах, по сравнению с более мелкими – $r = (5-30) \cdot 10^{-10}$ м. Однако в этом незначительном количестве микропор с $r \leq 100 \cdot 10^{-10}$ м возможен перенос влаги в виде жидкости за счет конденсации водяных паров на стенках микропор.

Выводы

1. Внесение в макаронное тесто добавок из пищевого нетрадиционного сырья приводит к возрастанию количества микропор малых радиусов $(35-65) \cdot 10^{-10}$ м по отношению к контрольному образцу и уменьшению количества микропор с большими радиусами, начиная от $80 \cdot 10^{-10}$ м.

2. Установлено, что внесение муки из бобовых культур и гелеобразующих веществ уменьшают энергию связи влаги с продуктом в 1,5–2 раза в области мономолекулярного слоя адсорбированной влаги.

3. Определены зависимости коэффициентов эффузии α_3 и диффузии α_m влаги от влагосодержания образцов, которые отражают механизм внутреннего влагопереноса. Показано, что максимумы кривых $\alpha_3(U)_T$ для всех образцов, а на кривых $\alpha_m(U)_T$ для отдельных образцов соответствуют влагосодержанию полимолекулярной адсорбции ($U)_T$, что свидетельствует об интенсивном переносе влаги в виде пара.

Литература

1. Юрчак В.Г. Влияние улучшающих добавок на коллоидные процессы в макаронном тесте // Хлебопечение России. 2002. № 5.
2. Дослідження впливу пектину та пектиновмісної сировини на перерозподіл води в макаронному тісті. / Г.Г.Волощук, В.Г.Юрчак, Л.С. Дегтярьов, В.В.Манк / Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергозберігаючих технологій, обладнання в галузях харчової промисловості. Ч. 2. – К.: УДУХТ, 2000.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1968.
4. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1972.
5. Луцки П.П., Луцки Ю.П., Литовчук Д.П. Коэффициенты капиллярного массопереноса пористых тел на основании кривых распределения пор // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. 27. № 2.
6. Луцки Ю.П. Исследование процесса сушки связнодисперсных пищевых продуктов: Дис. ... канд. техн. наук. 05.18.12. – К., 1983.