

УДК 641.1:543.3:66.047.35

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ И МЕХАНИЗМА КАПИЛЛЯРНОГО ВЛАГООБМЕНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРАНУЛ БЫСТРОРАСТВОРИМЫХ НАПИТКОВ

**Попов А.М., Доня Д.В., Тихонов Н.В., Березина И.Ю., Михайлова И.А.,
Макковеев М.А.**

*ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», Кемерово, Россия
(650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47), e-mail: office@kemtipp.ru.*

Изложены исследования кинетики и механизма капиллярного влагообмена в уплотненном слое дисперсного материала при гранулировании окатыванием. Показано, что в реальных условиях процесса скорость самопроизводительного влагообмена мала, а влияние плотности слоя частиц дисперсного материала на скорость капиллярного перемещения воды в процессе пропитки весьма существенна и проявляется в том большей мере, чем тоньше слой, т.е. на ранних стадиях пропитки и для интенсификации ее необходимо создавать в комкуемом материале флуктуации по плотности, которые характеризуются, в свою очередь, через критические состояния этих дисперсий, через показатели наименьшей и максимальной капиллярных влагоемкостей и через соответствующие им коэффициенты скорости капиллярного влагообмена.

Ключевые слова: влагообмен, капилляр, пропитка, влагоёмкость, интенсификация.

RESEARCH OF KINETICS AND THE MECHANISM OF CAPILLARY MOISTURE EXCHANGE MECHANISM DURING THE FORMATION WHEN FORMING OF GRANULES IN INSTANT DRINKS

**Popov A.M., Donya D.V., Tikhonov N.V., Berezina I.Y., Mikhaylova I.A.,
Makoveev M.A.**

*FSBEI HVE Kemerovo Institute of Food Science and Technology, (47 Stroiteley Boulevard, 650056 Kemerovo, Russia),
e-mail: office@kemtipp.ru*

Research of kinetics and the mechanism of capillary moisture exchange in the condensed layer of a disperse material of a granulation balling stage are stated. In actual practice the self-productive moisture exchange speed is small, and the influence of particles layer density of a disperse material on the speed of capillary movement of water in the course of impregnation is very essential. In fact, the speed is bigger in the thinnest layers, i.e. it is necessary to create density fluctuations in a clotted material at the early stages of impregnation for its intensification. Density fluctuations are characterized by critical conditions of these dispersions as well as and by the lowest by the highest capillary moisture exchange speed.

Keywords: moisture, capillary, impregnation, moisture content, intensification.

Для процесса мокрого гранулирования смеси дисперсных материалов важна не только смачиваемость, но и скорость этого процесса, так как время контакта поверхности частиц с концентратом сока в процессе гранулирования ограничено. Малые скорости смачивания будут лимитировать последующие процессы капиллярного массообмена и структурообразования и ограничивать скорость гранулообразования и прочность гранул. Скорость смачивания поверхности частиц сахара, крахмала и ягоды находятся в обратной зависимости от прочности сцепления молекул воды с активными центрами поверхности и, следовательно, от расстояния движущегося слоя пленки воды от поверхности.

Подвижность воды в слое дисперсного материала, имеющего разные геометрические конфигурации и размеры, а следовательно, и различную толщину пленок сорбированной воды, отображающая многообразие явлений взаимодействия твердой и жидкой фаз, несомненно, может быть использована также и для оценки эффективности процесса мокрой агрегации частиц. Так, малая подвижность воды, как правило, характеризует высокую энергию связи твердой и жидкой фаз и, соответственно, повышенную прочность влажных агрегатов, с другой стороны, скорость капиллярного перемещения воды при увлажнении слоя частиц определяет размеры зародышей гранул и скорость их образования [1]. Большое влияние при этом оказывает то, в каком состоянии - в подвижном или неподвижном - находятся частицы смеси и скорость и траектория их движения.

Наконец, нельзя забывать о влиянии межмолекулярных водородных связей на характер течения жидкости в капиллярах [5; 7]. Это положение тем более важно, что в процессе капиллярного впитывания воды в слое дисперсного материала имеют место явления поверхностного растворения, диспергирования и набухания, сопровождающиеся образованием коагуляционно-структурированной сетки в приповерхностных слоях жидкости, с соответствующим изменением эффективных значений поверхностного натяжения и вязкости паровой суспензии. Специфика изучения кинетики капиллярного влагообмена при мокром гранулировании на тарельчатых грануляторах с активатором заключается в том, что дисперсная система подвергается уплотнению под действием внешних сил. При этом подвижность воды уменьшается из-за снижения капилляров, но в то же время капиллярный потенциал растет. Предельные состояния системы будут определяться максимумами подвижности воды и капиллярного потенциала [2; 3]. Эти предельные состояния дисперсной системы будут характеризоваться соответствующими критическими влагосодержаниями.

Для экспериментального изучения кинетики капиллярной пропитки слоя частиц в зависимости от степени уплотнения последнего использовали различные комбинации пропорций составляющих киселей, сахарной пудры, крахмала, порошка ягоды, имеющих различную природу поверхности и размеры. Опыты проводили на установке, являющейся упрощенной модификацией обычно используемых для изучения кинетики пропитки приборов. Дисперсные материалы перед опытом высушивали и загружали в пропиточную трубу равномерно плотным слоем высотой 100 мм. Контроль количества впитанной воды осуществляли как по измерительному капилляру, так и прямым определением влагосодержания слоя после пропитки. В качестве пропиточного материала использовали

как чистую воду, так и сок ягоды различной концентрации, полученный в вакуум-выпарном аппарате при $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с последующим быстрым охлаждением.

Зависимость квадрата объема воды, впитанной через единицу объема сечения слоя (V , $\text{м}^6/\text{м}^4$), от времени пропитки (τ) имела для всех сочетаний материалов прямолинейный характер. При этом угол наклона прямых ($V^2 - \tau$) был тем меньше для каждого конкретного набора компонентов, чем выше была степень предварительного уплотнения слоя частиц. Таким образом, эксперимент, как и следовало ожидать, подтвердил известные кинетические закономерности процесса пропитки. Однако задача заключалась, главным образом, в выявлении зависимости скорости пропитки от плотности слоя. В качестве критерия капиллярной подвижности воды мы использовали коэффициент скорости пропитки слоя частиц $K_c = V^2/\tau$, $\text{м}^2/\text{сек}$.

Для выявления зависимости капиллярной подвижности воды и влагосодержания пропитанного слоя результаты серии испытаний при различном предварительном уплотнении слоя выражали через соотношение коэффициента скорости пропитки и объемного влагосодержания пропитанного слоя (W_0). Необходимость и целесообразность использования показателя влажности в качестве критерия степени уплотнения, вместо общепринятого показателя пористости, диктуется тем важным для процесса мокрой агрегации фактом, что при взаимодействии воды со слоем материала в последнем всегда защемляется определенное количество воздуха [4].

Оказалось, что зависимость между объемным влагосодержанием и скоростью пропитки – прямолинейная. Интересно отметить, что графически прямые зависимости ($K_c - W_0$) исходят не из начала координат, а пересекаются с осью W_0 . Это приводит к заключению, что скорость капиллярного перемещения воды в слое дисперсного материала должна достигать минимума, практически равного нулю, при определенном влагосодержании смеси, соответствующем максимальному уплотнению слоя частиц. Известно, что ограниченной подвижностью обладают такие формы влаги, как адсорбированная, пленочная и пендулярная [6]. Таким образом, есть основание предположить, что при $K_c=0$ объемное влагосодержание W_c равно суммарному содержанию адсорбированной и капиллярно-неподвижной воды, что соответствует наименьшей капиллярной влагоемкости $W_{нк}$.

Гранулообразование в процессе окатывания влажного дисперсного материала завершается как раз в тот момент, когда влага под действием внешних сил уже не перемещается в грануле. Соответствующая этому состоянию системы влагоемкость является, очевидно,

нижним пределом влажности, необходимой для эффективного гранулообразования дисперсного материала.

Эксперименты показали, что с увеличением степени дисперсности материала величина K_c снижается. Капиллярное давление при этом для смесей сахар - крахмал - измельченный шрот ягоды в пропорции 5:2:3, состоящий из частиц с размерами в мкм 900, 100, 500 – в первом случае и 10, 15, 80 – в другом случае, увеличивается почти в два раза, достигая величины около 200 мм H_2O .

При разрыхлении слоя дисперсного материала количество впитанной влаги и коэффициент скорости пропитки пропорционально увеличиваются вплоть до постоянного влагосодержания, соответствующего максимальной капиллярной влагоемкости W_{mk} . Дальнейшее разрыхление материала не приводит к повышению влагосодержания, так как в нем будет происходить самопроизвольная усадка до плотности, соответствующей максимальному проявлению капиллярности системы. При этом чрезмерное разрыхление слоя приводит к уменьшению коэффициента скорости пропитки, так как впитывание влаги в поры сверхкапиллярного размера не будет происходить до тех пор, пока не произойдет их сужение до капиллярных размеров вследствие усадки. Таким образом, максимальные значения показателей капиллярного влагосодержания пропитанного слоя и коэффициента скорости капиллярной пропитки можно считать постоянными параметрами структурного состояния влажных дисперсий, и будут определяться, в общем случае, комплексом таких частных свойств, как крупность и форма частиц, гранулометрический состав, гидрофильность, удельная поверхность, гигроскопичность и другими физико-химическими свойствами.

Для выяснения капиллярного влагопереноса в уплотняемом слое были проведены специальные опыты пропитки при изменяющихся параметрах начальной влажности и гидрофильности дисперсных материалов, а также при различной плотности слоя по высоте трубки. В качестве критериев для оценки кинетики пропитки использовали опытно-расчетные показатели А.А. Роде [4] и изменения весовой влажности пропитанного слоя.

Известно, что начальная влажность влияет на насыпной вес. Максимальное значение насыпного веса получается при влажности, близкой к максимальной молекулярной влагоемкости – W_{mm} . Поэтому сравнение кинетических показателей пропитки материала с различной влажностью возможно лишь при одинаковых плотностях слоя частиц. Как выявлено из опытов, при одинаковом насыпном весе слоя, рассчитанном относительно сухой массы скелета, коэффициент скорости капиллярной пропитки для всех смесей возрастает с увеличением плотности слоя, конечные же влажности пропитанных слоев

остаются одинаковыми. Очевидно, замедление скорости капиллярной пропитки при предварительном увлажнении материала обусловлено уменьшением живого сечения всасывающих капилляров за счет образования пленок воды на их поверхности.

Как мы уже отмечали, для экспериментов использовались смеси, состоящие из разных по форме, размерам и соотношениям частиц. В зависимости от этого формируется поровое пространство гранулы, от которого зависит и форма капилляров. Это отражается в зависимости высоты подъема жидкости $l = V^2 x t^{n-1}$, в которой показатель n изменяется в пределах $n=0,45-0,6$, отражая эти изменения. Таким образом, фильность поверхности частиц дисперсного материала, определяющая его смачиваемость, оказывает влияние только на показатель коэффициента скорости пропитки.

Как известно [6], эффективность процесса мокрой агрегации при гранулообразовании зависит от флуктуации по плотности и влажности слоя дисперсного материала. Это влияние в значительной мере определяется спецификой капиллярного массообмена при наличии таких флуктуаций. Опыт пропитки по выяснению влияния флуктуаций плотности и влажности на кинетические показатели производили в разборных трубках. При этом варьировали плотность и начальную влажность в верхней и нижней половинках трубок. При более плотной нижней части слоя конечная влажность его меньше, чем для более рыхлой верхней части. Эта разница тем больше, чем в большей мере различаются значения соответствующих показателей n и K_c , зависящие от начальной плотности и влажности слоя материала. При обратном расположении рыхлой и плотной части слоев влажность нижней рыхлой части оказывается больше. При этом абсолютная величина влажности рыхлого слоя и разница влажности верха и низа значительно больше, чем для первого варианта чередования слоев.

Особого внимания заслуживает факт резкого снижения значений показателей n и, наоборот, увеличение K_c , относящихся к предварительно увлажненным разрыхленным верхним частям слоя. Этот факт особенно четко проявляется в том случае, когда начальная влажность нижней части слоя меньше влажности более плотной верхней части. Очевидно, в этом случае впитывание воды происходит под действием большого капиллярного потенциала, возникающего в смоченных в узких капиллярах верхней, более плотной части слоя. Таким образом, при вторичном увлажнении дисперсного материала, состоящего из смеси увлажненных, уплотненных агрегатов и рыхлой порошкообразной массы, влага будет усваиваться преимущественно агрегатами вплоть до полного насыщения их порового пространства. Этим можно объяснить установленный в практике гранулирования [6] факт

переувлажненного состояния более плотной оболочки гранулы по сравнению с разрыхленным и менее обводненным ядром.

Характер и направление самопроизвольного влагообмена при флуктуациях влажности в слое дисперсного материала без доступа внешней воды изучали на 2-слойных трубках с различным предварительным увлажнением материала верхней и нижней части. Утрамбованные последовательно верхнюю и нижнюю части трубок выдерживали в контакте в течение получаса, а затем определяли конечную влажность в обеих частях.

Во всех случаях, при наличии градиента влажности, наблюдается влагообмен с уменьшением начальной величины градиента с направлением потока от более влажной к менее влажной части слоя. Скорость влагообмена была пропорциональна величине первоначального градиента влажности. Наименьшая скорость влагообмена была зафиксирована для случая, когда одна часть слоя имела влажность, близкую к максимальной капиллярной, а другая к нижней капиллярной. Это позволяет сделать вывод, что в реальных условиях процесса гранулирования методом окатывания скорость самопроизвольного влагообмена мала, и для интенсификации ее необходимо создавать в комкуемом материале флуктуации по плотности (например, введением в гранулятор механического вибратора-активатора). Действительно, влияние плотности слоя частиц дисперсного материала на скорость капиллярного перемещения воды в процессе пропитки весьма существенна и проявляется в тем большей мере, чем тоньше слой, т.е. на ранних стадиях пропитки [5; 7].

Анализируя результаты исследований кинетики и механизма капиллярного влагообмена в уплотненном слое дисперсного материала, можно сделать заключение, что выявленные закономерности достаточно полно отображают явления, происходящие при окомковывании аналогичных дисперсий. Критические состояния этих дисперсий могут быть однозначно охарактеризованы через показатели наименьшей и максимальной капиллярных влагоемкостей и через соответствующие им коэффициенты скорости капиллярного влагообмена.

Список литературы

1. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основные процессы технологии гранулирования минеральных удобрений. – М. : Химия, 1990.
2. Лотов В.А. Основы управления процессами структурообразования во влажных дисперсных системах / Гурин В.В., Попов А.М. - Кемерово – М. : Российские университеты Кузбасс-вузиздат – АСТШ, 2006. - 295 с. : ил. 41.

3. Попов А.М. Идентификация процесса гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором / Макковеев М.А., Асташенко Е.Б., Чупин А.В. // Техника и технология пищевых производств. - 2010. - № 2. - С. 60-65. - ISSN 2074-9414.
4. Ребиндер П.А. Избранные труды. – М. : Наука, 1978-1979. - Т. 1 и 2.
5. Руднев С. Д. Поверхностные свойства межклеточного вещества растительного сырья / Попов А.М., Шелеметева Е. А. // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. – № 4. – С. 17–19.
6. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем материалов. – М. : Химия, 1988.
7. Хейфец Л.Н. Многофазные процессы в пористых средах / Неймарк А.В. – М. : Химия, 1982.

Рецензенты:

Шевченко Т.В., д.т.н. профессор, профессор кафедры «Физическая и коллоидная химия», ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», г.Кемерово.

Лобасенко Б.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств», ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», г.Кемерово.