

Математическая модель агломерации твёрдой дисперсной фазы в циклоне с жидкостно-капельным орошением

Игорь А. Саранов	¹	mr.saranov@mail.ru
Газибег О. Магомедов	¹	mgazibeg@mail.ru
Виктор И. Рязских	²	kaf.prmath@yandex.ru
Сергей В. Шахов	³	s_shahov@mail.ru

¹ кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² кафедра прикладной математики и механики, Воронеж. гос. техн. ун-т, Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026, Россия

³ кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. В работе рассмотрен процесс получения порошков с агломерированной структурой при распылительной сушке жидких пищевых и химических сред. Развитием этого направления служит метод, основанный на столкновении в циклонной камере диспергируемых жидких частиц и закрученного потока частиц уже высушенных, возвращаемых из системы отделения высокодисперсной фракции от отработанного теплоносителя. Таким образом, твёрдые частицы сталкиваются с каплями жидкости, смачиваясь при этом, за счёт этого при дальнейшем столкновении сухой частицы со смоченным участком другой сухой частицы образуется пространственная структура. Повторение такого процесса приводит к укрупнению частиц и к получению их агломератов или гранул. Для построения адекватной модели процесса агломерирования использование фундаментальных уравнений переноса импульса и массы затруднительно, поэтому для построения модели было решено применить принцип кинетических превращений при химических реакциях. Для учёта нанесения тонких плёнок жидкости на частицу и образования агломератов предлагается использовать кинетические коэффициенты, а при наложении гидродинамики идеального вытеснения задача записывается в виде Коши. Решение данной задачи происходит численным методом Эйлера по конечностно-разностной схеме. Качественный анализ результатов расчёта показывает, что эффективные режимы агломерации возможны в том случае, если кинетический коэффициент образования агломератов выше кинетического коэффициента образования плёнки на частицах, а также концентрация частиц твёрдой фракции должна быть выше концентрации частиц жидкой фракции, что в условиях стандартных распылительных сушилок с возвратом высокодисперсной фракции осуществить невозможно без разработки специальных узлов агломерации для сушильных установок

Ключевые слова: распылительная сушка, агломерация, гранулирование, инстант-продукты, моделирование, флуктуация

Mathematical model of the agglomeration of solid disperse phase in the cyclone with a liquid-drip irrigation

Igor A. Saranov	¹	mr.saranov@mail.ru
Gazibeg O. Magomedov	¹	mgazibeg@mail.ru
Viktor I. Ryazhskikh	²	kaf.prmath@yandex.ru
Sergey V. Shahov	³	s_shahov@mail.ru

¹ bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² department of applied mathematics and mechanics, Voronezh state technical university, Moscow Av., 14, Voronezh, 394026, Russia

³ machinery and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Summary. The paper concerns a process for producing an agglomerated structure powder by spray drying of liquid food and chemical environments. The development of this direction is the method based on collision in the cyclone chamber dispersible liquid particles and previously dried up particles of swirling stream, returned from the separation system of finely fraction from spent heat medium. Thus, the solid particles collide with droplets of liquid wetting at the same time, due to this with further dry the particles collision with the moistened portion of another dry particles the spatial structure is formed. Repeating of this process leads to enlargement of particles and to the obtaining of their agglomerates or granules. To build an adequate model of the process of agglomeration the use of the fundamental momentum and mass transfer equations is difficult, therefore, to build the model, it was decided to apply the principle of kinetic transformations in chemical reactions. To registrate the application of thin liquid films on the particle and the formation of agglomerates use the kinetic coefficients is proposed, and upon application of hydrodynamics of ideal displacement the task is written in the form of Cauchy. The solution to this task is done with numerical Euler method for end-difference scheme. Qualitative analysis of the calculation results shows that effective modes of agglomeration are possible if the kinetic coefficient and the agglomerates formation is higher than the kinetic coefficient of film formation on the particles, and the concentration of particles of solid fractions should be higher than the concentration of the liquid fraction particles, which in the conditions of standard spray dryers with return highly dispersed fraction can not be implemented without the development of special agglomeration units for drying plants.

Keywords: spray drying, agglomeration, granulation, instant-foods, modeling, fluctuation

Для цитирования

Саранов И.А., Магомедов Г.О., Рязских В.И., Шахов С.В. Математическая модель агломерации твёрдой дисперсной фазы в циклоне с жидкостно-капельным орошением // Вестник ВГУИТ. 2016. № 4. С. 49–55. doi:10.20914/2310-1202-2016-4-49-55

For citation

Saranov I. A., Magomedov G. O., Ryazhskikh V. I., Shahov S. V. Mathematical model of the agglomeration of solid disperse phase in the cyclone with a liquid-drip irrigation. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 4. pp. 49–55. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-4-49-55

Введение

Современные тенденции получения пищевых порошков доказали целесообразность использования многостадийных распылительных сушильных установок с возвратом высушенной высокодисперсной фракции из циклона (далее твердые частицы) в область диспергирования с целью получения агломерированных частиц (рисунок 1) и последующим их досушиванием [1-3].

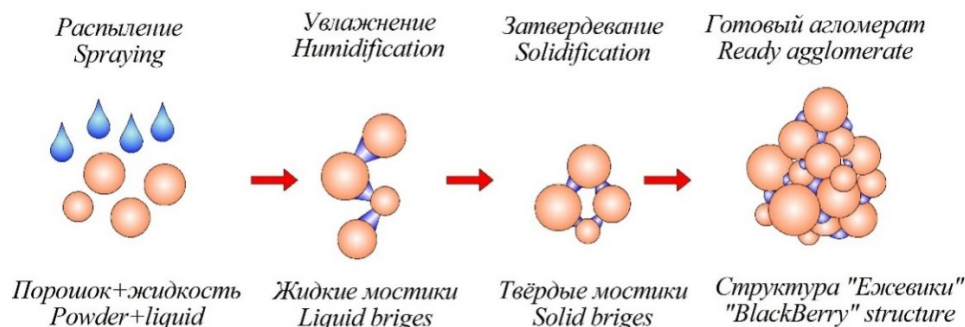


Рисунок 1. Схема образования агломератов увлажнением сухих частиц

Figure 1. Scheme of formation of agglomerates during wetting of dry particles

Физическая модель получения быстрорастворимых порошков показана на схеме (рисунок 2), которая предполагает, что твёрдые частицы в виде газозвеси подаются в кольцевой зазор коллектора 4 где газозвесь закручивается и, проходя через равные по площади щелевые зазоры между лопатками 5, рассекается на равные потоки, образуя вихрь во внутренней части коллектора 4 направленный к его оси. Для механической агломерации суспензия продукта с помощью распылителя 3 диспергируется внутри коллектора 4, непосредственно в уже упомянутый вихрь газозвеси для столкновения диспергированных частиц жидкой фракции продукта и сухих твердых частиц из газозвеси. Газодинамика коллектора 6 организована таким образом, что достигается высокая интенсивность образования агломератов и исключение контакта диспергированных влажных частиц с внутренней поверхностью коллектора, образованной лопатками 5. При дальнейшем движении влажных высокодисперсных частиц и агломератов предполагается удаление избытка растворителя конвективной сушкой в конической 6 и цилиндрической 7 частях сушильной камеры и дальнейшее отделение сухих твердых частиц для последующего агломерирования [5].

В [6] отмечается, что получены результаты по локальному взаимодействию частиц, а также математическое описание формирования агломератов в масштабах аппарата в целом практически отсутствует.

Отсутствие корректного теоретического обоснования схем агломерации в масштабах установок делает невозможным рациональный выбор технологических режимов и конструкторских

Разработка эффективных технологических схем производства быстрорастворимых порошкообразных пищевых материалов требует не только разработки нового оборудования, способного интенсифицировать процессы сушки и агломерирования [3, 4], но, и теоретического обоснования происходящих при этом массообменных процессов.

решений, а уже накопленный опыт реализации подобных схем [7] позволяет сделать вывод об актуальности проблемы.

Для анализа предложенной схемы рассмотрим циклонную камеру для агломерации твёрдых частиц, поступающих с тангенциальным вводом газовой несущей среды и с орошением закрученного потока дисперсной жидкостью распыливающей форсункой (рисунок 2). Картина агломерации в этом случае такова: твёрдые частицы сталкиваются с каплями жидкости, смачиваясь при этом; твёрдые частицы с плёнкой жидкости на поверхности в силу турбулентных пульсаций дисперсионной среды при соприкосновении удерживаются силами поверхностного натяжения жидкости. Многократное повторение такого процесса приводит к укрупнению частиц и к получению их агломератов.

Для теоретического описания физической картины использование фундаментальных уравнений переноса импульса (уравнение Навье-Стокса) и массы (уравнение конвективной диффузии) затруднительно по причине неясности в постановке условий на границе раздела твердых и жидких частиц в флуктуирующем турбулентном потоке несущей газовой среды [8, 9].

Поэтому для построения модели совокупных процессов в циклонной камере применим принцип аналогичный с химическими превращениями в рамках кинетических превращений. Будем обозначать твёрдые частицы, поступающие в циклонную камеру, через субстанцию А, а распыливаемые форсункой капли раствора через субстанцию В. Соединение субстанций А и В приводит к образованию новой субстанции S (твёрдые частицы с плёнкой на поверхности):

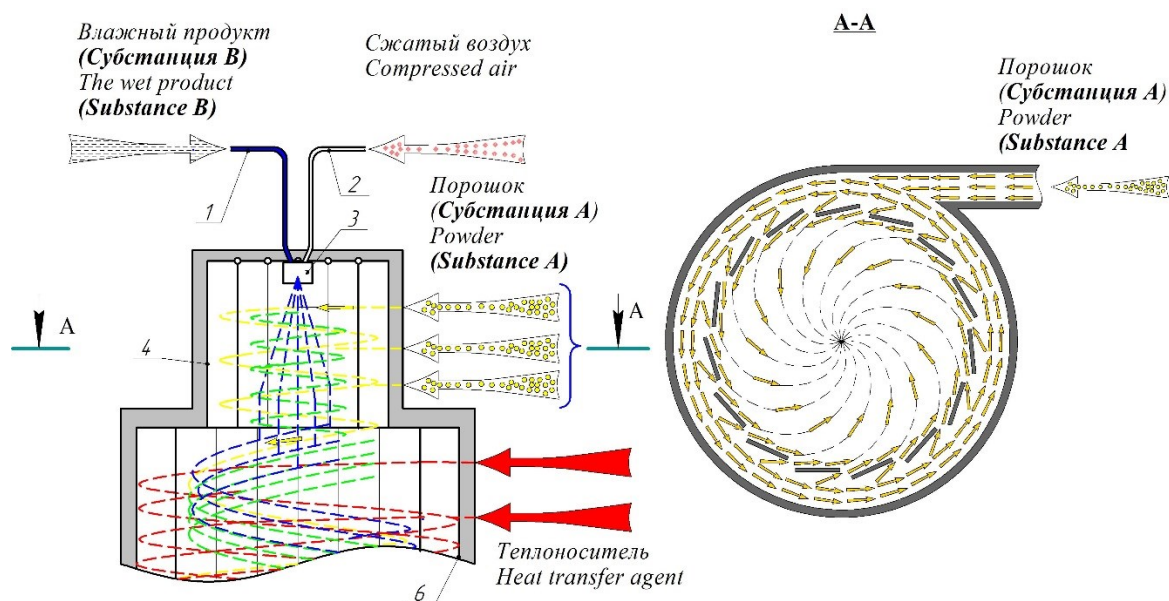
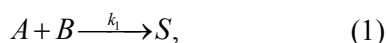


Рисунок 2. Схема агломерации в башне распылительной сушилки: 1 – патрубок подачи жидкого продукта, 2 – линия подачи сжатого воздуха, 3 – пневматическая форсунка, 4 – коллектор, 5 – лопатки, 6 – коническая часть сушильной камеры, 7 – цилиндрическая часть сушильной камеры

Figure 2. Agglomeration scheme in the tower spray dryer: 1 – supply of the liquid product nozzle, 2 – the compressed air line, 3 – pneumatic nozzle, 4 – collector, 5 – vane, 6 – a conical part of the drying chamber, 7 – the cylindrical part of the drying chamber



Причём кинетика этого процесса определяется кинетическим коэффициентом k_1 . Превращение по соотношению (1) описывается системой уравнений гетерогенной химической реакции со стохастическим единичным эквивалентом, т. е.:

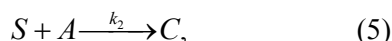
$$\frac{dC_A(t)}{dt} = -k_1 C_A(t) C_B(t); \quad (2)$$

$$\frac{dC_B(t)}{dt} = -k_1 C_A(t) C_B(t); \quad (3)$$

$$\frac{dC_S(t)}{dt} = -k_1 C_A(t) C_B(t); \quad (4)$$

где t – текущее время; $C_A(t)$, $C_B(t)$, $C_S(t)$ – концентрации субстанций соответственно A , B и S .

Процесс образования агломератов, которые обозначим через субстанцию C , протекает по схеме соединения:



где k_2 – кинетический коэффициент, характеризующий скорость протекания этого процесса. В соответствии с (5) запишем:

$$\frac{dC_S(t)}{dt} = -k_2 C_A(t) C_S(t); \quad (6)$$

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = -k_2 C_A(t) C_S(t); \quad (7)$$

$$\frac{dC_C(t)}{dt} = k_2 C_A(t) C_S(t); \quad (8)$$

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = -2C_A(t) [k_1 C_B(t) + k_2 C_S(t)]; \quad (9)$$

$$\frac{dC_B(t)}{dt} = -k_1 C_A(t) C_B(t); \quad (10)$$

$$\frac{dC_S(t)}{dt} = -2C_A(t) [k_1 C_B(t) + k_2 C_S(t)]; \quad (11)$$

$$\frac{dC_C(t)}{dt} = k_2 C_A(t) C_S(t); \quad (12)$$

Свяжем полученную систему кинетических уравнений (9)–(12) с гидродинамикой в циклонной камере исходя из того, что вращающийся поток можно представить как поток идеального вытеснения, т. е. использовать соотношение $u = z/t$ где z – координата в направлении закрученного потока, u – скорость потока; тогда система (9)–(12) запишется в виде задачи Коши:

$$u \frac{dC_A(z)}{dz} = -2C_A(z) [k_1 C_B(z) + k_2 C_S(z)]; \quad (13)$$

$$u \frac{dC_B(z)}{dz} = -k_1 C_A(z) C_B(z); \quad (14)$$

$$u \frac{dC_S(z)}{dz} = 2C_A(z) [k_1 C_B(z) - k_2 C_S(z)]; \quad (15)$$

$$u \frac{dC_C(z)}{dz} = k_2 C_A(z) C_S(z); \quad (16)$$

с начальными условиями:

$$C_A(0) = C_A^0; C_B(0) = C_B^0; \quad (17)$$

$$C_S(0) = C_C(0) = 0; \quad (18)$$

Для анализа математической модели (13)–(18) запишем её в безразмерном виде, сократив при этом число определяющих параметров:

$$\frac{dX_A(Z)}{dZ} = -2X_A(Z)[X_B(Z) + K \cdot X_C(Z)]; \quad (19)$$

$$\frac{dX_B(Z)}{dZ} = -X_A(Z)X_B(Z); \quad (20)$$

$$\frac{dX_S(Z)}{dZ} = 2X_A(Z)[X_B(Z) - K \cdot X_C(Z)]; \quad (21)$$

$$\frac{dX_C(Z)}{dZ} = K \cdot X_A(Z)X_S(Z); \quad (22)$$

с начальными условиями:

$$X_A(0) = 1, X_B(0) = \xi; \quad (23)$$

$$X_S(0) = X_C(0) = 0; \quad (24)$$

где:

$$Z = z k_1 C_A^0 / u, X_A(Z) = C_A(z) / C_A^0,$$

$$X_B(Z) = C_B(z) / C_A^0, X_S(Z) = C_S(z) / C_A^0,$$

$$X_C(Z) = C_C(z) / C_A^0, \xi = C_B^0 / C_A^0, K = k_2 / k_1;$$

Система (19)–(24) относится к классу нелинейных и может быть проинтегрирована только численно, например, простейшим явным методом Эйлера по конечностно-разностной схеме:

$$X_A^{i+1} = X_A^i - 2X_A^i(X_B^i + K \cdot X_C^i)\Delta Z; \quad (25)$$

$$X_B^{i+1} = X_B^i - X_A^i X_B^i \Delta Z; \quad (26)$$

$$X_S^{i+1} = X_S^i + 2X_A^i(X_B^i - K \cdot X_C^i)\Delta Z; \quad (27)$$

$$X_C^{i+1} = X_C^i + K \cdot X_A^i X_S^i \Delta Z; \quad (28)$$

$$X_A^0 = 1; X_B^0 = \xi; X_S^0 = 0; X_C^0 = 0; i = 0, 1, \dots; \quad (29)$$

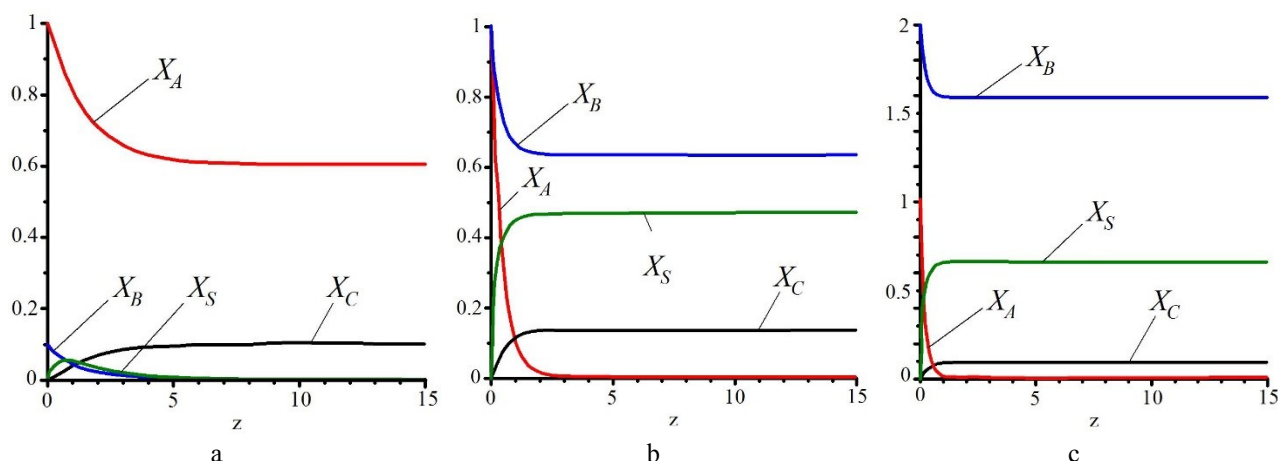


Рисунок 3. Кинетика процесса агломерации при $K=1$ и различных значениях ξ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

Figure 3. The kinetics of the sintering process at $K=1$ and different values of ξ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

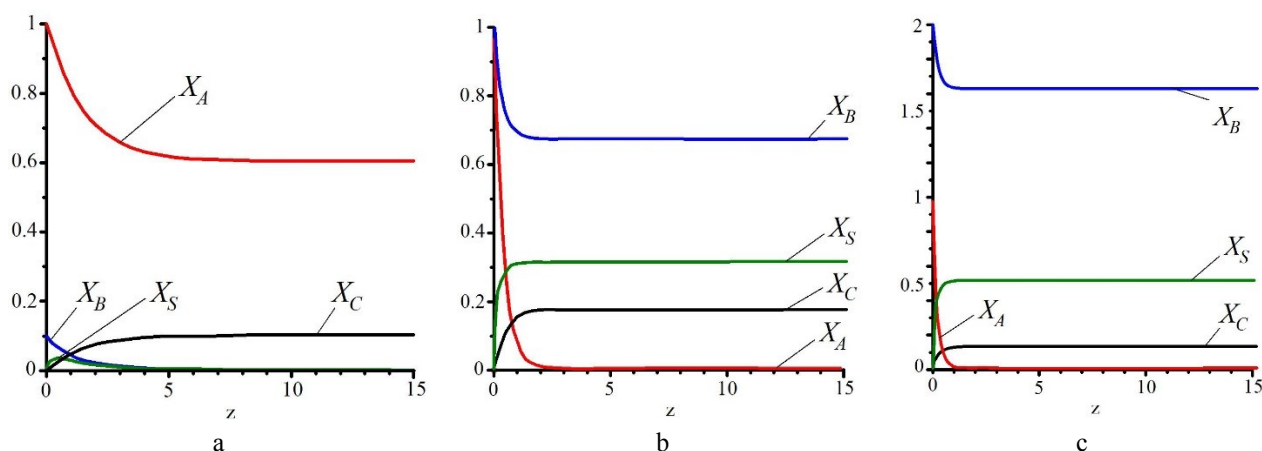


Рисунок 4. Кинетика процесса агломерации при $K=2$ и различных значениях ξ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

Figure 4. The kinetics of the sintering process at $K=2$ and different values of ξ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

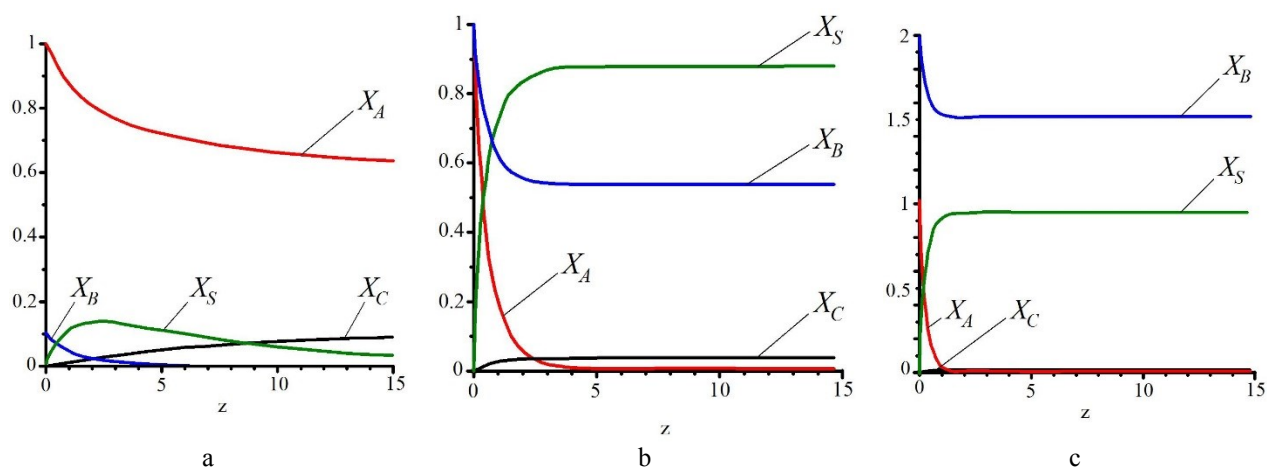


Рисунок 5. Кинетика процесса агломерации при $K=0,1$ и различных значениях ζ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

Figure 5. The kinetics of the sintering process at $K=0,1$ and different values of ζ : а – 0,1; б – 1,0; в – 2,0;

Реализация численного эксперимента выполнена в кодах математического пакета MAPLE – 15.

Расчёты показывают, что при равенстве кинетических коэффициентов процессов образования плёнки на частицах и агломерации наибольший выход агломерированных частиц наблюдается в случае одинаковых величин концентраций твёрдых частиц в газозвеси и капель на выходе из орошающей форсунки (рисунок 3). Причём, величины агломератов достигали $\approx 15\%$, при значительном количестве мелких частиц $\approx 45\%$, но не с эффективным использованием капель раствора. Следует заметить, что затравочные частицы практически отработаны.

Если превалирует процесс агломерации над процессом создания плёнки на твёрдых частицах в циклонной камере (рисунок 4), то по-прежнему равенство концентраций твёрдых частиц и капель является наилучшим режимом в смысле получения максимального количества агломератов, при этом картина с остальными фракциями остаётся практически такой же, как и в случае, когда $K=1$.

Если наоборот, процесс нанесения плёнки на частицы является лимитирующим, по сравнению с их агломерацией (рисунок 5), то ситуация с образованием агломератов хуже, по сравнению с предыдущими вариантами развития процесса.

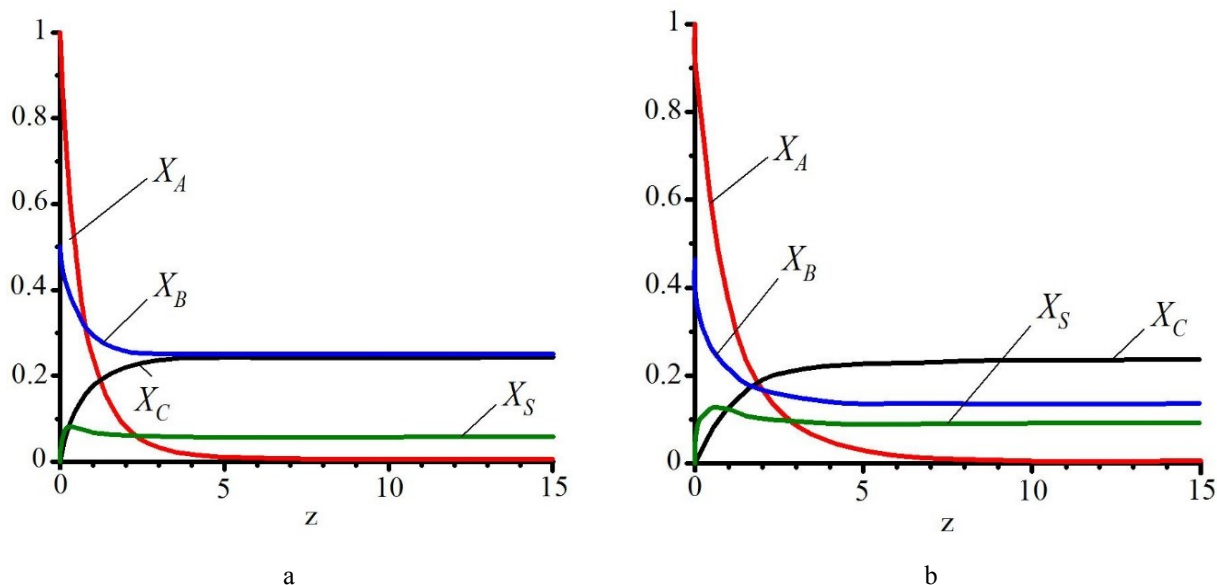


Рисунок 6. Вариант эффективных режимов агломерации: а – $K=5$; $\zeta=0,5$; б – $K=2$; $\zeta=0,4$

Figure 6. Alternative modes of effective agglomeration: а – $K=5$; $\zeta=0,5$; б – $K=2$; $\zeta=0,4$

Качественный анализ процесса агломерации показывает, что существуют эффективные режимы, но в области, когда $k_2 > k_1$ и $C_A^0 > C_B^0$. Однако на практике реализация такого режима вызовет затруднения по причине первичности процесса образования плёнки на частицах (рисунок 6). Выход из данной ситуации заключается в разработке специальных узлов в распылительных сушилках, увеличивающих вероятность столкновения частиц за счёт

увеличения времени нахождения твердых и жидких частиц в зоне агломерации.

Закключение

Представленная математическая модель кинетики процесса агломерации позволяет определить области рациональных режимов и спрогнозировать концентрацию частиц по «интегральной» фракционности на выходе из циклонной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Вестергаард В. Технология производства сухого молока. Выпаривание и распылительная сушка. Копенгаген, Niro A/S, 304 с.
- 2 Sommerfeld M., Stbing S. Lagrangian modelling of agglomeration for applications to spray drying // International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements (ETMM 9), Thessaloniki, Greece. 2012.
- 3 Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепло-массообмен. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 562 с
- 4 Волков К., Емельянов В. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. М.: Физматлит, 2016.
- 5 Пат. 2570536 РФ, МПК F26B17/10(2006.01), 3/12 (2006.01) Установка для сушки и агломерации пищевых сред / Г.О. Магомедов, М.Г. Магомедов, С.В. Шахов, И.А. Саранов, С.С. Мурусидзе, (РФ), заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. техн. № 014135829/06; заявл. 02.09.2014; опубл. 10.12.2015 Бюл. № 34.
- 6 Pawar S.K. Multiphase flow in a spray dryer: experimental and computational study. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2014.
- 7 Винокуров В. М. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Моделирование химико-технологических процессов» для студентов направления 240100 «Химическая технология». Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013.
- 8 Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. Рипол Классик, 2013.
- 9 Карышев А. К., Жинов А. А., Шевелев Д. В. Конденсация пара в струйной турбулентной зоне смешения теплообменного аппарата // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. №. 2-2. С. 40-46.

REFERENCES

- 1 Vestergaard V. Technology of production of dried milk. Evaporation and spray drying. Copenhagen, Niro A/S, 304 p.
- 2 Sommerfeld M., Stbing S. Lagrangian modelling of agglomeration for applications to spray drying. International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements (ETMM 9), Thessaloniki, Greece. 2012.
- 3 Tsvetkov F. F., Grigoriev B. A. Teplo-masssoobmen [Heat-mass exchange] Moscow, MPEI, 2011. 562 p. (in Russian)
- 4 Volkov K., Emelyanov V. Vychislitel'nye tekhnologii v zdachakh mekhaniki zhidkosti I gaza [Computational technologies in problems of mechanics of liquid and gas] Moscow, Fizmatlit, 2016. (in Russian)
- 5 Magomedov G. O., Magomedov M. G., Shakhov S. V., Saranov I. A. et al. Ustanovka dlya sushki I aglomeratsii pishchevykh sred [Installation for drying and agglomeration in food environments] Patent RF, no. 2570536, 2015. (in Russian)
- 6 Pawar S.K. Multiphase flow in a spray dryer: experimental and computational study. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2014.
- 7 Vinokurov V. M. Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Mathematical modeling of chemical processes guidelines for laboratory works on discipline "Modeling of chemical-technological processes" for students of direction 240100 "Chemical technology"] Barnaul, AltGTU, 2013. (in Russian)
- 8 Demidovich B. P., Maron I. A., Shuvalova E. Z. Chislennye metody Analiza. Priblizhenie funktsii, differentsial'nye I integral'nye uravneniya [Numerical methods of analysis. Approximation of functions, differential and integral equations] Ripol Klassik, 2013. (in Russian)
- 9 Karasev A. K., Zhinov A. A., Shevelev D. V. Condensation of steam jet in a turbulent zone of mixing heat exchanger, Aktual'nye problem gumanitarnykh I estestvennykh nauk [Actual problems of humanitarian and natural sciences] 2016, no. 2-2, pp. 40-46. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь А. Саранов аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции 19, Воронеж, 394036, Россия, mr.saranov@mail.ru

Газибег О. Магомедов д. т. н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции 19, Воронеж, 394036, Россия, mgazibeg@mail.ru

Виктор И. Рязжских д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический, Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026, kaf.prmath@yandex.ru

Сергей В. Шахов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, s_shahov@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Игорь А. Саранов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Газибег О. Магомедов предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Виктор И. Рязжских консультация в ходе исследования

Сергей В. Шахов предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 14.10.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 01.12.2016

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Igor A. Saranov graduate student, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mr.saranov@mail.ru

Gazibeg O. Magomedov doctor of technical science, professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mgazibeg@mail.ru

Viktor I. Ryazhskikh doctor of technical sciences, professor, head of department, department of applied mathematics and mechanics, Voronezh state technical university, Moscow Av., 14, Voronezh, 394026, Russia, kaf.prmath@yandex.ru

Sergey V. Shahov doctor of technical science, professor, machinery and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, s_shahov@mail.ru

CONTRIBUTION

Igor A. Saranov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Gazibeg O. Magomedov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Viktor I. Ryazhskikh consultation during the study

Sergey V. Shahov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 10.14.2016

ACCEPTED 12.1.2016