

Анализ смесительного оборудования с учетом сегрегации кормосмеси и ее однородности

¹*ИСКАКОВ Руслан Маратбекович, к.т.н., ассоциированный профессор, rus.iskakov79@mail.ru,

¹ИСЕНОВ Султанбек Сансызбаевич, к.т.н., ассоциированный профессор, isenov_sultan@mail.ru,

²ӘБІЛЖАНҰЛЫ Тоқтар, д.т.н., профессор, abilzhanuly.kazniimesh@mail.ru,

¹КУБЕНТАЕВА Гүлмира Кусаиновна, к.т.н., старший преподаватель, gulmirakk@mail.ru,

¹ҚАСЫМ Руслан Тоқтасынұлы, магистр, преподаватель, kasym.ruslan@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Нур-Султан, пр. Женис, 62,

²ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», Казахстан, Алматы, пр. Райымбека, 312,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы заключается в обобщении новых исследований в области сегрегации, что значительно влияет на однородность кормовой смеси. Решение данной задачи возможно за счет внедрения результатов современных научных исследований в мире. Выявлено, что в исследованиях особое внимание уделяется на осевую и активную сегрегацию, перколяцию, загрузку компонентов в смеситель, добавление жидкостей в смесь, режимы подачи компонентов и их концентрации. Результаты демонстрируют появление сегрегации из-за разницы размеров частиц, особенностей смесителей, режимов смешивания. Улучшение коэффициентов вариации (КВ) происходит интенсивнее в смесях, где разница в размерах компонентов является большей. Выявлено, что добавление жидкости при смешивании ингредиентов вызывает частичную агломерацию и влияет на гомогенность смеси, а однородность распределения жидкости может быть достигнута в диапазоне $KB \leq 0,15\%$, тогда как очень однородное распределение характеризуется $KB \leq 0,05\%$. Снижение гранулометрического состава кормосмеси или уменьшение доли более мелких частиц во время приготовления корма снижает сегрегацию частиц по размерам. Одним из путей совершенствования смесителей следует обозначить разработку конструктивных технических решений на базе лопастного смесителя.

Ключевые слова: перемешивание, смесители, сегрегация, компоненты кормов, перколяция, однородность, кормосмесь, дифференциация, концентрация частиц, циклы смешивания.

Введение

Сегрегация частиц – хорошо известное явление, имеющее важные практические последствия (Heinen et al., 1985). Уильямс (1976) идентифицировал размер частицы как наиболее важный фактор в сегрегации, а также отметил такие факторы как плотность, форма и упругость частиц. Уильямс также перечислил три механизма, а именно траекторное расслоение (из-за большей инерции крупных частиц), просачивание мелких частиц и подъем крупных частиц при вибрации. Это может быть показано геометрически, когда перколяция будет происходить спонтанно в статическом слое крупных частиц, и когда меньший диаметр частиц составляет менее 15,47% диаметра более крупных частиц; но перколяция может происходить при большем соотношении тонкой/грубой фракции, когда слой течет или вибрирует (Rosato et al., 1987).

Важнейшим показателем работы смесителя следует отметить достигаемую однородность кор-

мовой смеси. На однородность смеси могут влиять многие факторы, в том числе конструкция смесителя, размер частиц ингредиентов и время перемешивания. Предыдущие исследования определили минимальное время смешивания, чтобы оптимизировать эффективность смешивания, но некоторые предполагают то, что чрезмерное смешивание может привести к сегрегации ингредиентов. Однако имеются ограниченные данные о влиянии продолжительного перемешивания и соответствующего размера частиц [1]. Проблема сегрегации неизбежна в промышленных условиях, особенно когда промышленные рецептуры представляют собой многокомпонентные смеси в виде сыпучих материалов, что представляет большой интерес [2] и поэтому их изучение имеет важное значение.

Результаты исследований

В работе [3] приводятся эксперименты и численное моделирование процессов смешивания

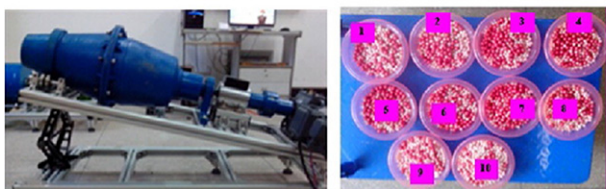
с выгрузкой двухразмерных частиц (рисунок 1). Было проведено моделирование для количественного исследования перехода осевой сегрегации.

Результаты показали, что разница размеров частиц и структура барабана смесителя обуславливают возникновение осевой сегрегации в процессе перемешивания. Мелкие частицы вытесняют крупные частицы со дна барабана, в конечном итоге способствуя осевой сегрегации.

В работе [4] явление перколяции является наиболее важным механизмом сегрегации. Выявлено, что скорость лопастного колеса смесителя является наиболее важным фактором для контроля сегрегации частиц по размеру. Исследования включали две скорости вращения лопастного колеса (24 и 72 об/мин) и две скорости вращения матричных дисков (29 и 57 об/мин). Результаты выявили влияние подающей рамы на свойства смеси и показали сегрегацию по размеру внутри подающей рамы и при заполнении матрицы [5].

В работе [6] предлагается конкретный порядок загрузки компонентов в смеситель. На рисунке 2 а показана загрузка частиц диаметром 1 мм (желтого цвета) в зону циркуляционного контура, которая образовалась за счет частиц диаметром от 1,5 мм до 3 мм (черный цвет) в поперечном сечении вращающегося барабана. На рисунке 2 б показано распределение компонентов через три минуты вращения барабана. Несмотря на то, что

Эксперименты



Моделирование

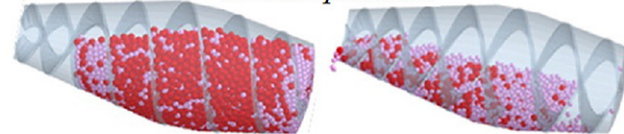
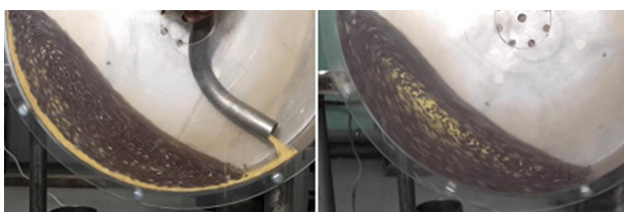


Рисунок 1 – Фрагменты экспериментов и численного моделирования процессов смешивания (Deng, R. et al., 2017)



а)

б)

Рисунок 2 – Распределение ключевого компонента во вращающемся барабане [6]

зона, в которой концентрировались частицы желтого цвета, не выражена, очевидно видно, что максимум частиц желтого цвета располагается вблизи центра циркуляции.

Качество смеси оценивается по КВ, который для смесей обычно называют коэффициентом неоднородности

$$k_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (c_i - \bar{c})^2},$$

где k_c – коэффициент неоднородности, %; $\bar{c}$ – средняя концентрация ключевого компонента в образце; c_i – концентрация в i образце; n – количество проанализированных образцов.

Как известно, чем меньше КВ, тем лучше смесь. На рисунке 3 показано изменение КВ для смесей А+В и А+С. Размер частиц компонента А от 0,15 до 0,20 мм, компонента В от 0,08 до 0,09 мм и компонента С от 0,04 до 0,045 мм. Из рисунка 3 видно, что минимальное значение КВ для смеси А+С происходит быстрее, чем для смеси А+В, т.к. частицы компонента В примерно в 2 раза меньше частиц компонента А, а частицы компонента С примерно в 4 раза меньше, чем частицы А. Следует отметить, что после достижения минимального значения КВ происходит его увеличение и качество смеси ухудшается. На рисунке 4 показано изменение КВ для смеси А+В+С, где по своему характеру кривая аналогична кривым, показанным на рисунке 3.

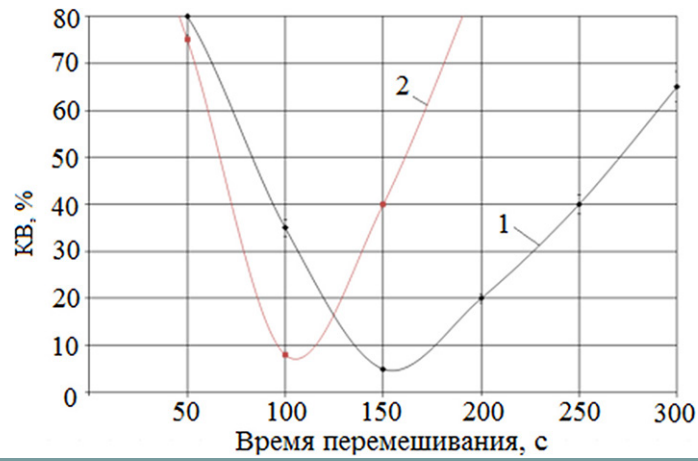
В работе [7] использована установка (рисунок 5), состоящая из загрузочного кормового бункера и коллекторной камеры. Загрузочный кормовой бункер был выбран для обеспечения массового потока и минимизации сегрегации во время разгрузки. На выходе из кормового бункера установлен золотниковый клапан с ручным управлением. Метод отбора проб включал конструкцию из пяти зондов, состоящих из труб с наружным диаметром 69 мм и длиной 500 мм (рисунок 6 а). К внутреннему краю (рисунок 6 б) каждого образца добавлялся конус зонда. Сведение сегрегации к минимуму было достигнуто за счет наклона загрузочного бункера, чтобы можно было загружать смесь материалов у основания секции бункера, избегая любого свободного падения материала.

В работе [8] было изучено влияние добавления жидкости в корм на достижимую однородность смешивания. Пробы отбирали непосредственно в конце добавления жидкости, а также в конце дополнительного цикла смешивания (ДЦС). Однородность оценивалась по КВ. Различное состояние смеси во время смешивания описывается как интенсивность сегрегации

$$I = \frac{\sigma(t)^2}{\sigma_0^2},$$

где I – интенсивность сегрегации (введенная P.V. Danckwerts, 1952); σ_0 – дисперсия полностью сегрегированной смеси.

Таким образом, интенсивность перемешива-



1 – смесь компонентов А и В; 2 – смесь компонентов А и С
Рисунок 3 – Изменение коэффициента вариации во времени [6]

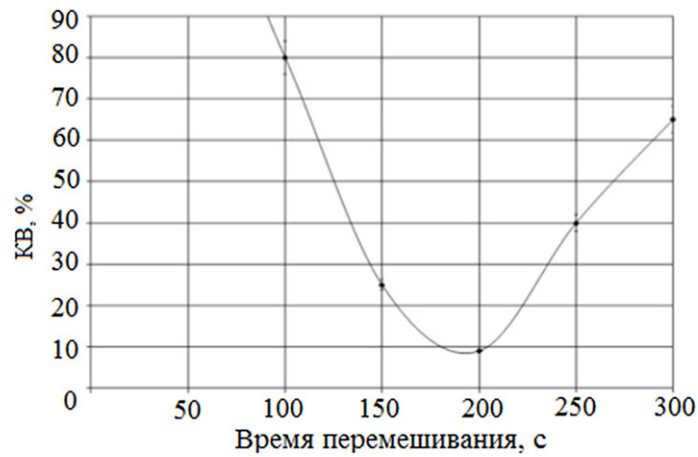


Рисунок 4 – Изменение во времени коэффициента вариации смеси компонентов А, В и С [6]



Рисунок 5 – Испытательная установка [7]

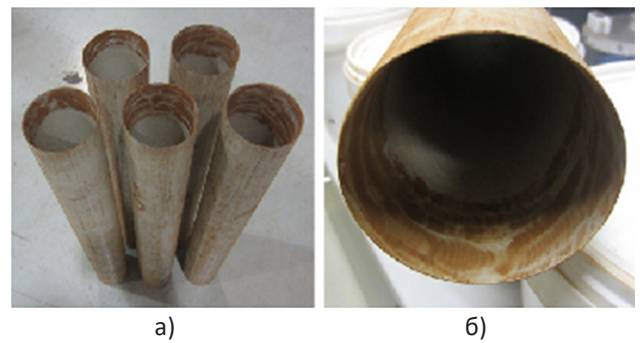


Рисунок 6 – Конструкция зонда, используемая для извлечения образцов испытаний на анализ сегрегации [7]

ния M

$$M = 1 - \sqrt{I} = 1 - \frac{\sigma(t)}{\sigma_0},$$

где I – интенсивность сегрегации; $\sigma(t)$ – различное

состояние смеси во время смешивания; σ_0 – дисперсия полностью сегрегированной смеси.

Отношение среднеквадратического отклонения (СД) к арифметическому среднему значению концентрации образца $\bar{x}$ определяется как КВ

$$KB = \frac{CD}{\bar{x}}.$$

Результаты показаны на рисунке 7. Диапазон распределения гранулометрического состава показал эффективность влияния на полученную однородность распределения жидкости в смесителе. Установлено сравнительно равномерное распределение обеих жидкостей. В целом можно предположить, что однородность распределения жидкости может быть достигнута в диапазоне $KB \leq 0,15\%$, тогда как очень однородное распределение характеризуется $KB \leq 0,05\%$. Добавление жидкости при смешивании кормовых ингредиентов может вызвать частичную агломерацию и повлиять на гомогенность смеси.

Для описания интенсивности сегрегации смесей разноразмерных частиц при заполнении двумерного бункера предложены индексы сегрегации, которые адекватно отражали влияние

условий эксплуатации на явления сегрегации, полученные экспериментально [9]. В результате было обнаружено, что предлагаемые индексы сегрегации увеличиваются при более низкой скорости подачи и более низкой концентрации наименьшего компонента.

В работе [10] влияние подачи, режима вращения и типа крыльчатки на характеристики микроперемешивания коаксиальных смесителей исследовалось численно с помощью концептуальной модели вихревой диссипации, а безразмерная оценочная корреляция индекса сегрегации устанавливалась на основе π -теоремы Бэкингема. Результаты показали, что подача вблизи нагнетательной зоны рабочего колеса благоприятствует микроперемешиванию.

В работе [11] были скорректированы конструктивные параметры смесителей с большими сдвиговыми усилиями для изучения характеристик микроперемешивания в полупериодической системе с использованием реакционной системы Виллермо/Душмана.

В статье [12] определено влияние подачи корма на сегрегацию корма. Выяснено, что для частиц сырья размером < 1180 мкм явления сегрегации не так критичны, как для более крупных частиц. Одна модель представляет собой сегрегацию сверху вниз или перколяцию, сегрегацию просеивания или и то, и другое [13]. Вторая модель, поперечная сегрегация, заключающаяся в том, что более мелкие частицы отделялись от смеси и осаждались по мере продвижения цепной системы подачи корма. Возможность сужения гранулометрического состава кормовой смеси минимизировала сегрегацию частиц по размерам.

В работе [14] использован горизонтальный ленточный смеситель (длина 40 см, диаметр 9 см) с двойным слоем спирали лопатки (рисунок 8). Скорость вращения варьировалась от 10 до 90 об/мин. Было замечено, что более мелкие частицы корма требуемой однородности достигаются за более короткий промежуток времени при меньшей частоте вращения, а затянувшиеся периоды высокоскоростного перемешивания приводят к расслоению смеси.

Одной из перспективных конструкций является разработанный лопастной смеситель [15], обеспечивающий высокую однородность готовой смеси в результате высокоэффективного смешивания частиц и предотвращающий выброс смешиваемых частиц из загрузочного отверстия наружу в процессе смешивания. Предлагаемый лопастной смеситель (рисунок 9) содержит корпус 1 с загрузочным отверстием 2 и разгрузочным отверстием 3, опорную раму 4, вал 5 с лопастями 6, пластинами 7, решетками 8 с отверстиями 9 и козырьками 10, отбойниками 11, вставленными в загрузочном отверстии 2.

Лопастной смеситель работает следующим образом. Во внутреннюю часть корпуса 1, уста-

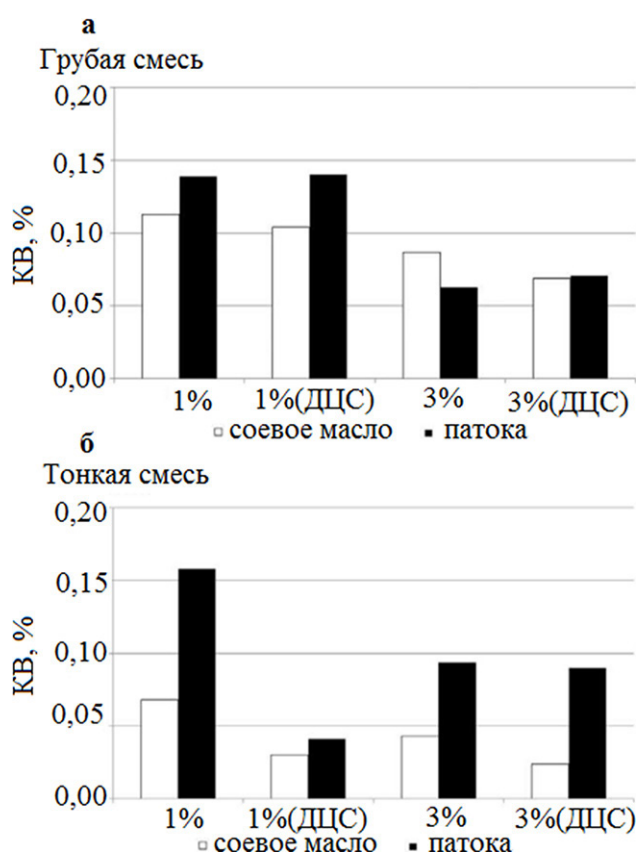


Рисунок 7 – Распределение патоки и соевого масла в смесях [8]



Рисунок 8 – Ленточный смеситель периодического действия [14]

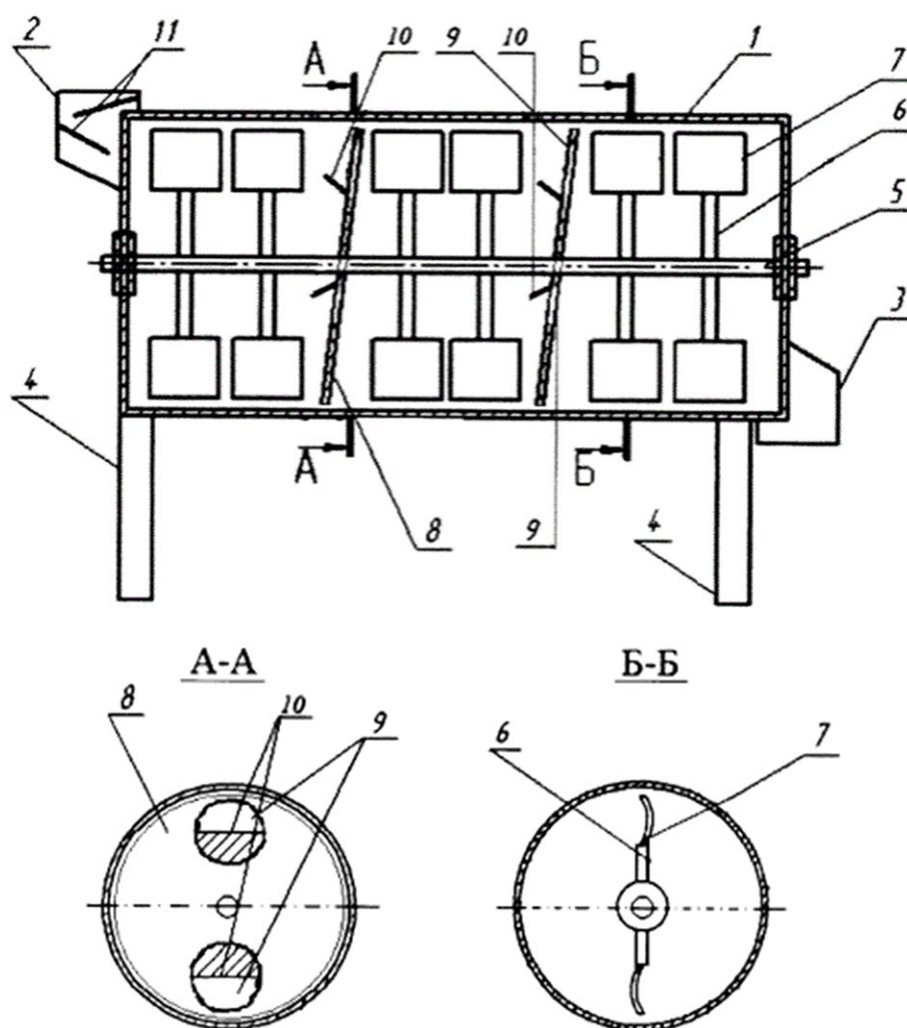


Рисунок 9 – Лопастной смеситель

новленного на опорной раме 4, через загрузочное отверстие 2 непрерывно загружают компоненты смеси. Посредством привода приводится во вращательное движение вал 5 с лопастями 6, пластинами 7, решетками 8, в результате чего смешиваемые частицы высоко поднимаются и разбрасываются с помощью вращающихся лопастей 6 и пластин 7, тем самым эффективно смешиваясь в закрученном продольно-спиральном движении. Далее через отверстия 9 с козырьками 10 решетки 8 смешиваемые частицы получают поперечно-разбрызгивающее движение, что приводит к высокоэффективному смешиванию. Затем смешиваемые частицы опять высоко поднимаются и разбрасываются с помощью вращающихся лопастей 6 и пластин 7, тем самым эффективно смешиваясь в закрученном продольно-спиральном движении.

Далее через отверстия 9 с козырьками 10 решетки 8 смешиваемые частицы получают опять поперечно-разбрызгивающее движение, что приводит к высокоэффективному смешиванию. Затем смешиваемые частицы опять высоко поднимаются и разбрасываются с помощью вращающихся лопастей 6 и пластин 7, тем самым

эффективно смешиваясь в закрученном продольно-спиральном движении, и поступают окончательно смешанными в разгрузочное отверстие 3. Отбойники 11 предотвращают выброс смешиваемых частиц из загрузочного отверстия наружу в процессе смешивания.

Выводы

Анализ научных публикаций выявил ряд причин возникновения и ликвидации сегрегационных явлений в работе смесителей, учет которых может оптимизировать производство кормосмеси с высокой однородностью. Для рационального перемешивания следует эксплуатировать специальные конструкции смесителей, производить эффективную наладку режимов их работы с учетом знания характеристик всех смешиваемых компонентов. Выявлено, что начало сегрегационных явлений зарождается в результате изменения объемов частиц, конструктивных изменений смесителей, режимов работы смесителей. Установлено, что включение жидкости при смешивании ингредиентов влияет на однородность смеси, а снижение содержания более мелких частиц в процессе приготовления корма уменьшает сегре-

гацию частиц. Одним из путей совершенствования смесителей следует обозначить разработку конструктивных технических решений на базе лопастного смесителя, содержащего опорную раму, корпус с загрузочным отверстием, снабженным отбойниками для предотвращения выброса смешиваемых частиц из загрузочного отверстия

наружу в процессе смешивания, разгрузочное отверстие, вал, лопасти с пластинами, с дополнительно снабженными решетками, отверстиями и козырьками для создания высокоэффективного поперечно-разбрызгивающего движения смешиваемых частиц. Оригинальность конструкции подтверждена патентом RU № 168897 U1.

Данная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН № AP09259673, финансируемого в рамках грантового финансирования от Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marut Saensukjaroenphon, Cassandra K. Jones, Charles H. Fahrenholz, Charles R. Stark. (2018). The Effect Of Extended Mix Times and Sample Preparation With Different Salt Particle Sizes On The Uniformity Of Mix Of a Corn-SBM Swine Diet. Transactions Of The Asabe, 61(2): 743-746.
2. Krolczyk J.B., Rezwikow A., Tukiendorf M. (2014). Mixing of biomass and coal in a static mixer as an example of technological solutions involving implementation of renewable energy sources. Ecol CHEM ENG S. 4(21): 685-696. DOI: 10.1515/eces-2014-0050.
3. Deng, R., Tan, Y.Q., Zhang, H., Xiao, X.W., Jiang, S.Q. (2017). Experimental and DEM Studies on the Transition of Axial Segregation in a Truck Mixer. Powder Technology. 314: 148-163 Специальный выпуск SI DOI 10.1016/j.powtec.2016.08.013.
4. Mateo-Ortiz, D., Muzzio, Fernando J., Mendez, R. (2014). Particle Size Segregation Promoted by Powder Flow in Confined Space: The Die Filling Process Case. Powder Technology, 262: 215-222 DOI 10.1016/j.powtec.2014.04.023.
5. Sin Tung Yeow, Asnawi Shahar Norashikin, Abdul Aziz Mohd, Shamsul Anuar Yus, Aniza Yusof Farah Saleena. (2011). The Influence of Operational Parameters and Feed Preparation in a Convective Batch Ribbon Powder Mixer. Drug Design Development and Therapy, 5: 465-469.
6. Mansour, W., Melekhin, D., Pasko, A. (2020). Continuous Production of Multicomponent Powder Mixtures. International Scientific Practical Conference Materials Science, Shape-Generating Technologies and Equipment. Серия книг MATEC Web of Conferences, 315: Номер статьи 04003. DOI 10.1051/mateconf/202031504003.
7. Hastie, D.B. (2015). On the Difficulties of Sampling Bulk Powder Blends in Determining Segregation Propensity – A Case Study. Powder Technology, 286: 164-171. DOI 10.1016/j.powtec.2015.08.013.
8. Kirchner, A., Feil, A., Colovic, R., Vukmirovic, D., Levic, J. (2013). Discontinuous Addition of Small Volumes of Liquids in an Intensive Mixer to Animal Supplement Feed With Different Particle Size Distributions. Powder Technology. 239: 358-365 DOI 10.1016/j.powtec.2013.02.018.
9. Shinohara, K., Golman, B. (2002). Segregation Indices of Multi-Sized Particle Mixtures During the Filling of a Two-Dimensional Hopper. Advanced Powder Technology. 13(1): 93-107 DOI 10.1163/15685520252900974.
10. Liu, B.Q., Sun, N., Jin, Z.J., Zhang, Y.K., Sunden, B. (2019). Numerical Investigation and Estimating Correlation of Micromixing Performance of Coaxial Mixers. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(49): 22376-22388 DOI 10.1021/acs.iecr.9b04406.
11. Li, X.N., Yang, L., Guo, J.H., Li, W., Zhou, M.L., Zhang, J.L. (2021). Micromixing Performance of the Teethed High Shear Mixer Under Semi-Batch Operation. Frontiers of Chemical Science and Engineering DOI 10.1007/s11705-021-2069-3.
12. Tang, P., Patterson, P.H., Puri, V.M. (2006). Effect of Feed Segregation on the Commercial Hen and Egg Quality. Journal of Applied Poultry Research, 15(4): 564-573 DOI 10.1093/japr/15.4.564.
13. Tang, P., Puri, V.M. (2005). An Innovative Device for Quantification of Percolation and Sieving Segregation Patterns-Single Component and Multiple Size Fractions. Part. Sci. Technol., 23: 335-350.
14. Sin, T.Y., Asnawi, S., Norashikin, A.A., Mohd, S.A., Yus, A.Y., Farah, S.T. (2011). The Influence of Operational Parameters and Feed Preparation in a Convective Batch Ribbon Powder Mixer. Drug Design, Development and Therapy. 5: 465-469.
15. Искаков Р.М., Хасанов К.К. Лопастной смеситель. Патент Российской Федерации № 168897, опубл. 27.02.2017, бюл. № 6.

Азық қоспасының сегрегациясын және оның біркелкілігін ескере отырып, араластырғыш жабдықты талдау

¹*ИСКАКОВ Руслан Маратбекович, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, rus.iskakov79@mail.ru,

¹ИСЕНОВ Султанбек Сансызбаевич, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, isenov_sultan@mail.ru,

²ӘБІЛЖАНҰЛЫ Тоқтар, т.ғ.д., профессор, abilzhanuly.kazniimesh@mail.ru,

¹КУБЕНТАЕВА Гульмира Кусаиновна, т.ғ.к., аға оқытушы, gulmirakk@mail.ru,

¹ҚАСЫМ Руслан Тоқтасынұлы, магистр, оқытушы, kasyim.ruslan@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Нұр-Сұлтан, Жеңіс даңғылы, 62,

²«Агроинженерия ғылыми-өндірістік орталығы» ЖШС, Қазақстан, Алматы, Райымбек даңғылы, 312,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – жем қоспасының біркелкілігіне айтарлықтай әсер ететін сегрегация саласындағы жаңа зерттеулерді талдау және қорытындылау. Бұл мәселені шешу қазіргі заманғы ғылыми зерттеулердің нәтижелерін әлемге енгізудің арқасында мүмкін болып отыр. Зерттеулерде осьтік және активті сегрегацияның пайда болуына, перколяция құбылыстарына, кластерлік талдауға, араластырғышқа компоненттерді тиеу ретіне, қоспаға сұйық компоненттерді қосуға, қоспаны беру режимдеріне, компоненттері және олардың концентрациясына мұқият назар аударылатыны анықталды. Зерттеу нәтижелері бөлшектердің өлшемдерінің, араластырғыштардың конструкциялық ерекшеліктерінің, араластыру режимдерінің айырмашылығына байланысты сегрегацияның пайда болуын көрсетеді. Вариация коэффициенттерінің (ВК) жақсаруы құрамдас бөліктердің өлшемдеріндегі айырмашылық үлкенірек болатын қоспаларда қарқынды жүреді. Азық ингредиенттерін араластыру кезінде сұйықтықты қосу ішінара агломерацияны тудыруы және қоспаның біртектілігіне әсер етуі мүмкін екендігі анықталды, ал сұйықтықтың таралуының біркелкілігіне $ВК \leq 0,15\%$ диапазонында қол жеткізуге болады, бұл ретте өте біртекті таралу $ВК \leq 0,05\%$ сипатталады. Азық қоспасының бөлшектердің өлшемді таралуын азайту немесе азықты дайындау кезінде ұсақ бөлшектердің үлесін азайту бөлшектердің өлшемдерін бөлуді азайтады. Араластырғыштарды жетілдіру жолдарының бірі қалақшалы араластырғыш негізінде конструктивті техникалық шешімдерді әзірлеу болуы керек.

Кілт сөздер: араластыру, араластырғыштар, сегрегация, азық компоненттері, перколяция, біртектілік, азық қоспасы, дифференциация, бөлшектердің концентрациясы, араластыру циклдері.

Analysis of Mixing Equipment, Taking into Account the Segregation of the Feed Mixture and Its Uniformity

¹*ISKAKOV Ruslan, PhD, Associate Professor, rus.iskakov79@mail.ru,

¹ISENOV Sultanbek, PhD, Associate Professor, isenov_sultan@mail.ru,

²ABILZHANULY Toktar, Dr. of Tech. Sci., Professor, abilzhanuly.kazniimesh@mail.ru,

¹KUBENTAIEVA Gulmira, PhD, Senior Lecturer, gulmirakk@mail.ru,

¹KASSYM Ruslan, master, Teacher, kasyim.ruslan@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University», Kazakhstan, Nur-Sultan, Zhenis Avenue, 62,

²«Scientific and Production Center of Agroengineering» LLP, Kazakhstan, Almaty, Raiymbek Avenue, 312,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the work is to analyze and summarize new research in the field of segregation, which significantly affects the uniformity of the feed mixture. The solution of this problem is possible due to the introduction of the results of modern scientific research in the world. It has been revealed that in studies, close attention is paid to the occurrence of axial and active segregation, percolation phenomena, cluster analysis, the sequence of loading components into the mixer, the addition of liquid components to the mixture, the modes of supply of components and their concentrations. The research results demonstrate the appearance of segregation due to the difference in particle sizes, design features of mixers, mixing modes. The improvement in the coefficients of variation (CV) occurs more intensively in those mixtures where the difference in the sizes of the components is greater. It was found that the addition of liquid when mixing feed ingredients can cause partial agglomeration and affect the homogeneity of the mixture, and the uniformity of liquid distribution can be achieved in the range of $CV \leq 0.15\%$, while a very homogeneous distribution is characterized by $CV \leq 0.05\%$. Reducing the particle size distribution of the feed mixture or reducing the proportion of finer particles during feed preparation reduces particle size segregation. One of the ways to improve mixers should be the development of constructive technical solutions based on a paddle mixer.

Keywords: mixing, mixers, segregation, feed components, percolation, homogeneity, feed mixture, differentiation, particle concentration, mixing cycles.

REFERENCES

1. Marut Saensukjaroenphon, Cassandra K. Jones, Charles H. Fahrenholz, Charles R. Stark. (2018). The Effect Of Extended Mix Times and Sample Preparation With Different Salt Particle Sizes On The Uniformity Of Mix Of a Corn-SBM Swine Diet. *Transactions Of The Asabe*, 61(2): 743-746.
2. Krolczyk J.B., Rezwiakow A., Tukiendorf M. (2014). Mixing of biomass and coal in a static mixer as an example of technological solutions involving implementation of renewable energy sources. *Ecol CHEM ENG S*. 4(21): 685-696. DOI: 10.1515/eces-2014-0050.
3. Deng, R., Tan, Y.Q., Zhang, H., Xiao, X.W., Jiang, S.Q. (2017). Experimental and DEM Studies on the Transition of Axial Segregation in a Truck Mixer. *Powder Technology*. 314: 148-163. Специальный выпуск SI DOI 10.1016/j.powtec.2016.08.013.
4. Mateo-Ortiz, D., Muzzio, Fernando J., Mendez, R. (2014). Particle Size Segregation Promoted by Powder Flow in Confined Space: The Die Filling Process Case. *Powder Technology*, 262: 215-222 DOI 10.1016/j.powtec.2014.04.023.
5. Sin Tung Yeow, Asnawi Shahar Norashikin, Abdul Aziz Mohd, Shamsul Anuar Yus, Aniza Yusof Farah Saleena. (2011). The Influence of Operational Parameters and Feed Preparation in a Convective Batch Ribbon Powder Mixer. *Drug Design Development and Therapy*, 5: 465-469.
6. Mansour, W., Melekhin, D., Pasko, A. (2020). Continuous Production of Multicomponent Powder Mixtures. *International Scientific Practical Conference Materials Science, Shape-Generating Technologies and Equipment. Серия книг MATEC Web of Conferences*, 315: Номер статьи 04003. DOI 10.1051/mateconf/202031504003.
7. Hastie, D.B. (2015). On the Difficulties of Sampling Bulk Powder Blends in Determining Segregation Propensity – A Case Study. *Powder Technology*, 286: 164-171. DOI 10.1016/j.powtec.2015.08.013.
8. Kirchner, A., Feil, A., Colovic, R., Vukmirovic, D., Levic, J. (2013). Discontinuous Addition of Small Volumes of Liquids in an Intensive Mixer to Animal Supplement Feed With Different Particle Size Distributions. *Powder Technology*. 239: 358-365 DOI 10.1016/j.powtec.2013.02.018.
9. Shinohara, K., Golman, B. (2002). Segregation Indices of Multi-Sized Particle Mixtures During the Filling of a Two-Dimensional Hopper. *Advanced Powder Technology*. 13(1): 93-107 DOI 10.1163/15685520252900974.
10. Liu, B.Q., Sun, N., Jin, Z.J., Zhang, Y.K., Sunden, B. (2019). Numerical Investigation and Estimating Correlation of Micromixing Performance of Coaxial Mixers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(49): 22376-22388 DOI 10.1021/acs.iecr.9b04406.
11. Li, X.N., Yang, L., Guo, J.H., Li, W., Zhou, M.L., Zhang, J.L. (2021). Micromixing Performance of the Teethed High Shear Mixer Under Semi-Batch Operation. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* DOI 10.1007/s11705-021-2069-3.
12. Tang, P., Patterson, P.H., Puri, V.M. (2006). Effect of Feed Segregation on the Commercial Hen and Egg Quality. *Journal of Applied Poultry Research*, 15(4): 564-573 DOI 10.1093/japr/15.4.564.
13. Tang, P., Puri, V.M. (2005). An Innovative Device for Quantification of Percolation and Sieving Segregation Patterns-Single Component and Multiple Size Fractions. *Part. Sci. Technol.*, 23: 335-350.
14. Sin, T.Y., Asnawi, S., Norashikin, A.A., Mohd, S.A., Yus, A.Y., Farah, S.T. (2011). The Influence of Operational Parameters and Feed Preparation in a Convective Batch Ribbon Powder Mixer. *Drug Design, Development and Therapy*. 5: 465-469.
15. Isakov R.M., Khasanov K.K. Paddle mixer. Patent of the Russian Federation No. 168897, publ. 02/27/2017, bul. No. 6.