

Научная статья

УДК 664-436.1

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-4-37-45

## Исследование процесса уноса мелкодисперсной фракции при производстве инстантированных продуктов

К.Б. Плотников\*, А.М. Попов, И.О. Плотникова, И.Б. Плотников, Ю.В. Устинова

*Кемеровский государственный университет  
Кемерово, Россия, \*k.b.plotnikov.rf@gmail.com*

**Аннотация.** Проведена серия экспериментов по определению пылеуноса из барабанного сушильного агрегата с управляемыми сегрегированными потоками с целью поиска пути его снижения. Определяли влияние механической активации нативного картофельного крахмала как одного из исходных компонентов на процесс пылеуноса. Получены зависимости пылеуноса от основных режимных и конструктивных параметров в барабанном виброагрегате. Выявлено, что наибольшее влияние на унос мелкодисперсной фракции оказывают скорость сушильного агента и частота вращения ленточной мешалки, поскольку при увеличении последней происходит повышение частоты образования нисходящих потоков гранул с лопаток. Также увеличение частоты вращения мешалки приводит к образованию мелкодисперсной фракции за счет истирания гранул на участке соответствующему достижению равновесной влажности высушиваемого продукта и теплоносителя. Доля уносимых частиц менее 20 мкм составляет порядка 35% от общего количества по массе. Установлено, что инстантированный продукт на основе картофельного крахмала, подвергнувшись твердофазной механической активации, меньше подвержен истиранию за счет более плотной укладки частиц в грануле, вследствие чего наблюдался меньший пылеунос с сушильным агентом. Полученные экспериментально-статистические модели позволяют подобрать аппаратное оформление процесса газоочистки для линии производства инстантированных напитков. В качестве системы газоочистки по результатам работы предложена двухступенчатая схема очистки отработавшего теплоносителя. Для второй ступени газоочистки рекомендован мокрый способ очистки газов в аппаратах с внутренней циркуляцией жидкости с целью возвращения продукта в виде эмульсии на стадию подготовки связующего раствора.

**Ключевые слова:** грануляция; снижение пылеуноса; инстантированные напитки; барабанный виброагрегат

Original article

## Fine fraction loss process in the production of instantized products

Konstantin B. Plotnikov\*, Anatoly M. Popov, Irina O. Plotnikova, Igor B. Plotnikov, Yulia V. Ustinova

*Kemerovo State University  
Kemerovo, Russia, \*k.b.plotnikov.rf@gmail.com*

**Abstract.** A series of experiments on determining the dust loss from a drum drying unit with controlled segregated flows in order to find a way to reduce it was carried out. The influence of mechanical activation of native potato starch as one of the initial components on the dust loss was determined. Dependences of dust loss at the basic mode and design parameters in a drum vibration unit were obtained. It was found that the speed of the drying agent and the frequency of rotation of the belt agitator have the greatest influence on the fine fraction loss, since increasing the speed leads to increasing the frequency of formation of downward flows of granules from the blades. Also increasing the frequency of rotation of the agitator leads to the formation of a fine fraction due to the abrasion of the granules in the area that corresponds to the achievement of equilibrium humidity of the dried product and coolant. The proportion of particles under 20 microns carried away is about 35% of the total by mass. It was found that the instantized product based on potato starch, subjected to solid-phase mechanical activation, is less subject to the abrasion due to a denser packing of particles in the granule, due to which less dust loss with the drying agent was observed. The experimental and statistical models obtained allow selecting the apparatus configuration of the gas purification process for the instantized beverage production line. As a gas purification system, according to the results of the work, a two-stage scheme of purification of the coolant spent was proposed. For the second stage of gas purification a wet method of gas purification in apparatuses with internal liquid circulation to return the product in the form of emulsion to the stage of preparation of binder solution was proposed.

**Keywords:** granulation process; decrease of dust loss; instantized beverages; drum vibration unit

## Введение

В современных реалиях высокой занятости населения актуальным становится вопрос применения в ежедневном рационе высокобиологически ценных продуктов, которые будут удобны в употреблении. Такими продуктами могут выступать инстантированные напитки, которые в силу своей универсальности позволяют применять различные исходные компоненты в зависимости от конечных задач функциональной направленности продукта [1]. Они обычно выпускаются в виде гранул из полидисперсных материалов, заключительной стадией при производстве которых является наиболее энергоемкий процесс сушки гранулята. Во время сушки вместе с сушильным агентом из аппарата уносится мелкодисперсная фракция, что негативно сказывается не только на экологии, но и на производственном цикле, поскольку теряется готовый продукт [2–4].

На сегодняшний день на рынке представлены инстант-напитки различных производителей, при этом большая их часть предлагается в виде гранулята различной формы и размеров. Это обстоятельство объясняется тем, что при использовании гранулированных продуктов возможно расходование упаковок больших размеров, поскольку при порционировании легко отмерить нужное количество продукта для дальнейшего его разведения с водой и при этом в нем будет содержаться равное количество исходных компонентов [5]. При применении просто смеси сыпучих компонентов в больших упаковках не возникает возможности дозирования точной пропорции компонентов в смеси, поскольку в процессе транспортировки возможно перераспределение частиц [6–8].

Гранулированные продукты возможно получать различными способами, которые имеют свои преимущества и недостатки. Способ производства также зависит от физико-механических свойств исходных компонентов и готовой продукции. Так возможно получение с высокой производительностью гранулята в экструдерах непрерывного действия, но температура в предматричной зоне достигает значений, при которых происходит разрушение термолабильных элементов. Одним из наиболее простых с точки зрения аппаратурного оформления является процесс получения гранул методом окатывания. Для данного типа структурообразования используют зачастую тарельчатые и барабанные грануляторы [9–12].

Заключительной стадией производства инстантированных гранулированных продуктов питания является процесс сушки. Наиболее часто используют конвективную сушку. При этом с целью интенсификации процесса удаления влаги создают более развитую поверхность контакта теплоносителя с сушильным агентом. Поскольку при снижении размера гранул происходит их более плотная укладка, это существенно снижает эффективность сушильного оборудования. С этой целью высушиваемый продукт подвергается перемешиванию, в результате чего образуется мелкодисперсная фракция, что особенно заметно на финальном этапе сушки за счет соударения и истирания частиц. В этой связи актуальным становится вопрос исследования процесса уноса сушильным агентом мелкодисперсной фракции [13].

Цель работы – исследование уноса мелкодисперсной фракции сушильным агентом, определение его дисперсности при различных режимных и конструктивных параметрах, а также вывод рекомендаций о применении систем очистки отработанного теплоносителя.

## Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования был выбран барабанный виброагрегат новой конструкции [14], который позволяет получать гранулы методом окатывания в управляемых сегрегированных потоках и их сушку. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки, которая состоит из барабанного виброгранулятора (БВГ) и барабанного виброокатывателя-сушилки (БВО-С). Агрегат работает следующим образом: исходные сыпучие компоненты поступают в БВГ через загрузочный патрубок, где под действием вибрации продукт переводится в виброоживленное состояние и перемещается в зону распыла связующего раствора (в качестве связующего раствора использовался концентрированный экстракт ягод клюквы), затем перемещается к разгрузочному патрубку. В процессе перемещения продукта происходит образование гранул за счет соударения частиц между собой (возникают силы различной природы: электростатические, силы Ван-дер-Ваальса, поверхностного натяжения и т.д.). Образованные гранулы имеют неодинаковые размеры, и в результате наложения вибрационного поля

происходит сегрегация потока, при этом мелкие гранулы занимают нижнее положение, поскольку имеют меньшую потенциальную энергию. Затем ленточная мешалка с лопатками, погруженная в продукт, перемещает несформированные гранулы в зону распыла связующего раствора, а гранулы заданного размера перемещаются в БВО-С, где на них также накладывается вибрационное поле, в результате чего сформированные гранулы переводятся в виброожидженное состояние, и наблюдается сегрегация потока. Гранулы перемещаются вдоль аппарата за счет его наклона относительно горизонтальной поверхности. Тепловой агент подается через тангенциально установленный патрубок и получает спиралеобразную траекторию движения в БВО-С.

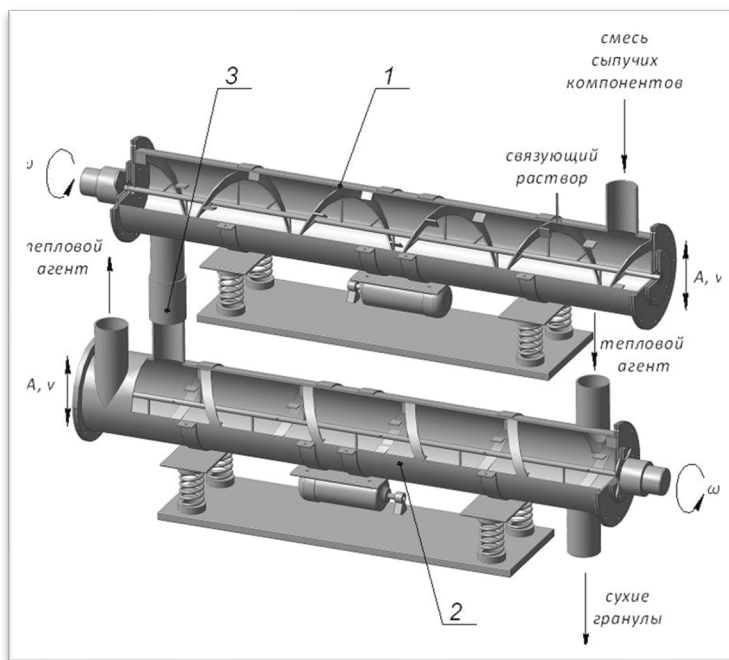


Рисунок 1 – Барабанный виброагрегат: 1 – барабанный виброгранулятор; 2 – барабанный виброкатыватель-сушилка; 3 – эластичный рукав

Figure 1. Drum vibrating unit: 1 – drum vibrating granulator; 2 – drum vibratory dryer-dryer; 3 – elastic sleeve

Гранулы меньшего размера захватывались мешалкой в нижних слоях БВО-С и перемещались на лопасти прямоугольного сечения, расположенных под углом  $45^\circ$  по периферии внутренней поверхности корпуса, откуда ссыпались под действием сил тяжести. Контакт теплоносителя и высушиваемого материала (рисунок 2) наблюдается в нижней части аппарата  $Q_1$ , а также в зоне снисходящего потока с лопастей мешалки условно изображенных  $Q_2$  и  $Q_3$ .

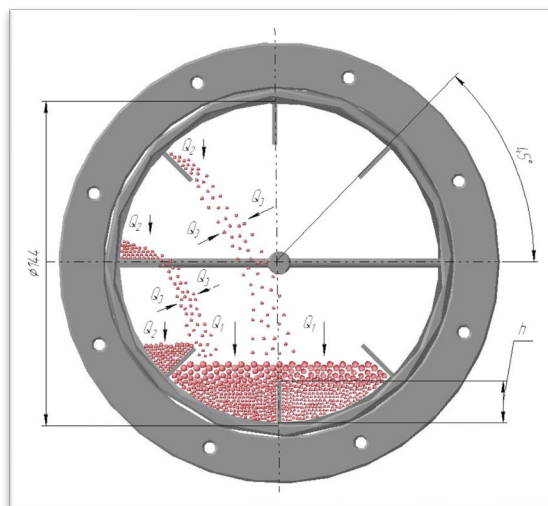


Рисунок 2 – Схема поперечного сечения  
Figure 2. Cross-sectional diagram

Перевод дисперсной среды в управляемый сегрегированный поток должен способствовать увеличению времени нахождения гранул большего размера в непосредственном контакте с теплоносителем на поверхности слоя материала в силу того, что их укладка менее плотная. Гранулы меньшего размера с целью увеличения времени контакта с сушильным агентом подвергались перемешиванию и образованию снисходящих потоков с лопаток мешалки. Перемешивание частиц меньшего размера необходимо в силу их более плотной укладки.

Экспериментальная установка включалась в следующей последовательности: включали привод вибровозбудителя подключенный через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для возможности регулирования частоты колебаний (для осуществления регулирования амплитуды колебаний использовался набор сменных дебалансов), после прохождения зоны резонанса и установления необходимой частоты и амплитуды колебаний включали привод мешалки, также подключенной через ЛАТР, и подавали сушильный агент, затем подавали исходный продукт и связующий раствор. С целью визуализации процесса сегрегации и подбора необходимых параметров установки, барабанный виброагрегат (БВА) изготавливался из plexiglas (XT/GS).

В работах [15, 16] указывалось на то, что при проведении процесса гранулирования и сушки в разных аппаратах в последнем возможно увеличение скорости сушильного агента за счет увеличения гранулометрического состава и отсутствия распыляемого связующего раствора. Эти мероприятия в свою очередь должны привести к интенсификации процесса конвективной сушки. Однако в процессе конвективной сушки в аппаратах барабанного типа происходит истирание гранул с образованием мелкодисперсной фракции, которая обладая меньшей потенциальной энергией, может быть увлечена сушильным агентом и вынесена за пределы аппарата.

Перед установкой пылезаборной трубки был произведен расчет статического и динамического напора в сечении газохода для определения диаметра трубки, а также скорость газа в месте дальнейшего забора проб запыленного газа. Пылезаборная трубка была соединена с вентилятором и фильтром.

Концентрацию уносимой пыли определяли по расходу сушильного агента и массе фильтра до и после отбора проб. В математическом виде данная зависимость имеет следующий вид

$$C_{\Pi} = \frac{\Delta M}{\Pi}, \text{ г/м}^3,$$

где  $\Pi$  – расход сушильного агента, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta M = M_1 - M_2$ :  $M_1$  – масса фильтра до эксперимента, г;  $M_2$  – масса фильтра после окончания эксперимента, г.

Продолжительность отбора проб зависела от параметров проведения процесса. После окончания эксперимента фильтр доставали из крепления в газоход и помещали в эксикатор на 24 ч для удаления избытков влаги и доведения до равновесной влажности, подвергался взвешиванию на аналитических весах с последующим определением дисперсного состава микроскопическим методом.

При проведении процесса конвективной сушки в БВО-С серия экспериментов по определению количества и дисперсного состава уносимого продукта с сушильным агентом проводилась в следующем диапазоне варьируемых параметров: амплитуда колебаний  $A = 0,5-1,5$  мм; частота колебаний  $\nu = 20-50$  Гц; частота вращения мешалки  $n = 1-9$  об/мин; угол наклона  $\alpha = 0,5-4^\circ$ ; температура воздуха подаваемого в аппарат  $t = 40-60^\circ\text{C}$ ; скорость воздуха в аппарате  $V = 1-3$  м/с. Процесс пылеуноса на прямую связан с процессом истирания гранул, поэтому большой интерес вызывает влияние механической активации картофельного крахмала на эти процессы. С этой целью была проведена серия экспериментов для выявления эффективности использования крахмала после активации по сравнению с нативным. Механическая активация крахмала проводилась с помощью лабораторного дезинтегратора. С целью снижения погрешности измерений все показания строго контролировались и поддерживались на постоянном уровне.

## Результаты и их обсуждение

Одной из характеристик сушильных установок является унос мелкодисперсной фракции, что в свою очередь приводит к необходимости установки дополнительных систем газоочистки при условии

повышенного запыления отработанного сушильного агента, а это в итоге влияет на рентабельность производства в целом. Результаты исследований зависимости уноса мелкодисперсной фракции от скорости сушильного агента представлены на рисунках 3, 4 и 5.

В результате математической обработки экспериментальных данных были установлены зависимости пылеуноса от варьируемых параметров процесса. Согласно полученным результатам, частота вращения мешалки оказывает большее влияние на процесс пылеуноса в рассматриваемой конструкции по сравнению с амплитудой и частота колебаний. Это связано с величиной взаимодействия гранул между собой, поскольку при образовании нисходящего потока агломерированные частицы падают на свободную поверхность материала. Варьирование частоты и амплитуды колебаний в пределах создания виброоживленного слоя, поэтому силы взаимодействия частиц продукта были ниже. На первой стадии сушки происходит уплотнение гранул за счет динамического воздействия в БВО-С. Поэтому снижение варьируемых параметров в итоге может привести к снижению прочности гранул. В связи с этим при подборе рациональных параметров процесса необходимо рассматривать их комплексное влияние на конечный продукт и экономические затраты на его получение.

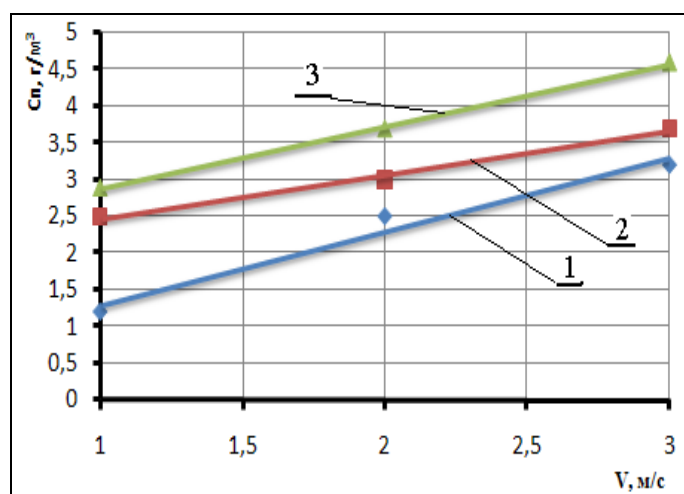


Рисунок 3 – Зависимость пылеуноса от скорости газа ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $A = 0,5 \text{ мм}$ ;  $\nu = 20 \text{ Гц}$ ):

1 –  $n = 1 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 –  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ ; 3 –  $n = 9 \text{ мин}^{-1}$

Figure 3. Dependence of dust entrainment on the gas velocity ( $\alpha = 0.5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $A = 0.5 \text{ mm}$ ;  $\nu = 20 \text{ Hz}$ ):

1 –  $n = 1 \text{ min}^{-1}$ ; 2 –  $n = 5 \text{ min}^{-1}$ ; 3 –  $n = 9 \text{ min}^{-1}$

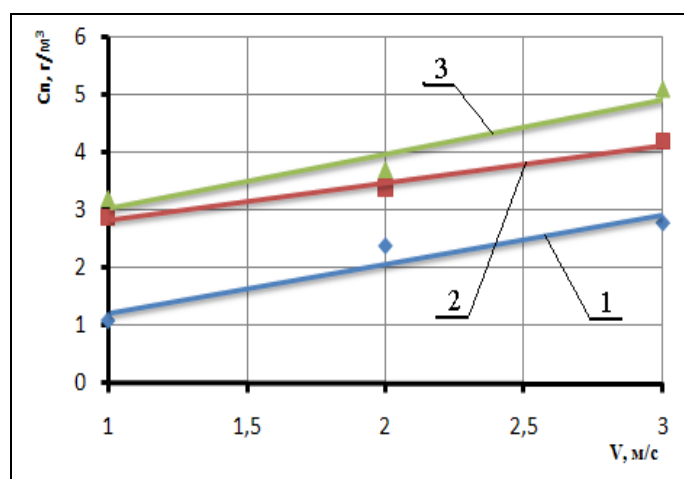


Рисунок 4 – Зависимость пылеуноса от скорости газа ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\nu = 20 \text{ Гц}$ ):

1 –  $A = 0,5 \text{ мм}$ ; 2 –  $A = 1 \text{ мм}$ ; 3 –  $A = 1,5 \text{ мм}$

Figure 4. Dependence of dust entrainment on gas velocity ( $\alpha = 0.5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ min}^{-1}$ ;  $\nu = 20 \text{ Hz}$ ):

1 –  $A = 0.5 \text{ mm}$ ; 2 –  $A = 1 \text{ mm}$ ; 3 –  $A = 1.5 \text{ mm}$



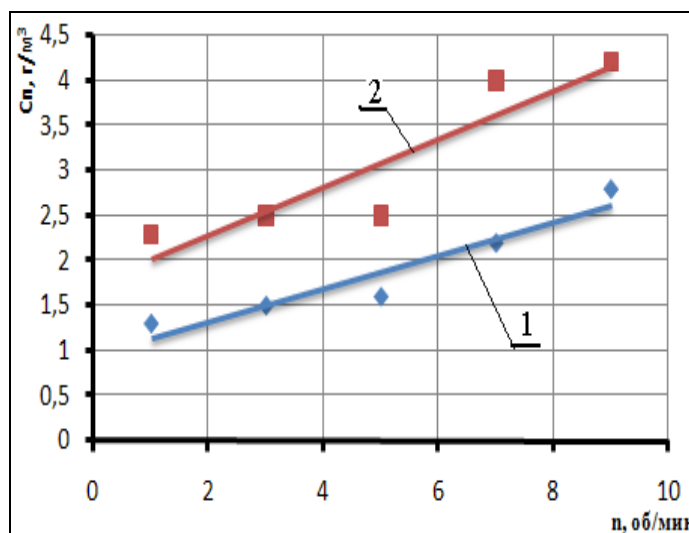


Рисунок 5 – Зависимость пылеуноса от частоты вращения ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ ;  $A = 0,5 \text{ мм}$ ):  
 1 –  $\nu = 20 \text{ Гц}$ ; 2 –  $\nu = 50 \text{ Гц}$

Figure 5. Dependence of dust entrainment on rotation frequency ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ min}^{-1}$ ;  $A = 0.5 \text{ mm}$ ):  
 1 –  $\nu = 20 \text{ Hz}$ ; 2 –  $\nu = 50 \text{ Hz}$

Как указывалось в обзоре современных конструкций и методов интенсификации процессов [17, 18], на время сушки, а также сопутствующих процессов (структурообразование, истирание, пылеунос и т.д.) возможно оказывать влияние и с помощью изменения структурно-механических свойств исходного сырья или полуфабриката.

Как видно из графиков (рисунок 6, 7), пылеунос при различных режимных параметрах при проведении процесса конвективной сушки гранул инстантированного киселя на основе картофельного крахмала, подвергнутого твердофазной механической активации существенно ниже, чем при сушке гранул на основе нативного крахмала. На наш взгляд, это связано с изменением в структуре крахмала.

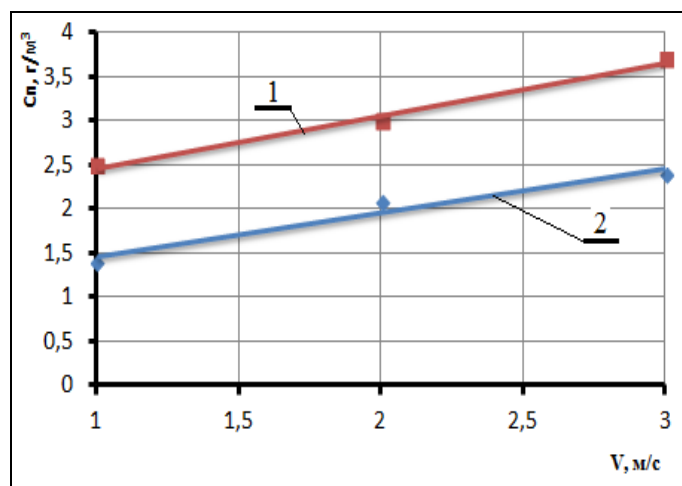


Рисунок 6 – Зависимость пылеуноса от скорости газа ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $A = 0,5 \text{ мм}$ ;  $\nu = 20 \text{ Гц}$ ):  
 1 – гранулы на основе нативного картофельного крахмала; 2 – гранулы на основе картофельного крахмала, подвергнутого твердофазной механической активации

Figure 6. Dependence of dust entrainment on gas velocity ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $A = 0.5 \text{ mm}$ ;  $\nu = 20 \text{ Hz}$ ):  
 1 – granules based on native potato starch; 2 – granules based on potato starch subjected to solid-phase mechanical activation

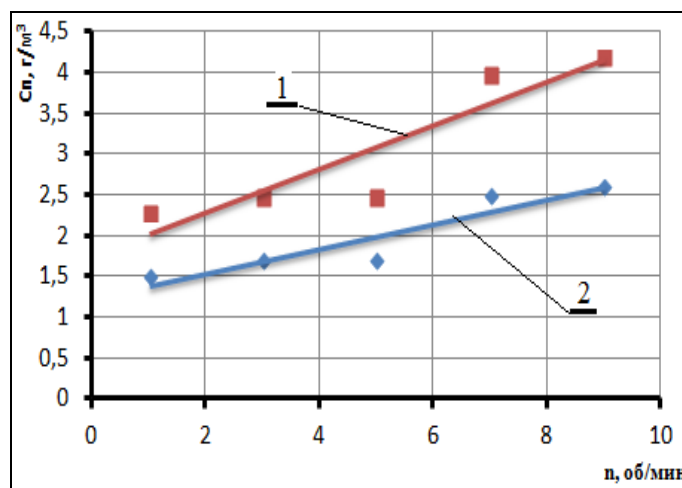


Рисунок 7 – Зависимость пылеуноса от частоты вращения ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ ;  $A = 0,5 \text{ мм}$ ):  
1 – гранулы на основе нативного картофельного крахмала; 2 – гранулы на основе картофельного крахмала, подвергшегося твердофазной механической активации

Figure 7. Dependence of dust entrainment on rotation frequency ( $\alpha = 0.5^\circ$ ;  $t = 50^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ min}^{-1}$ ;  $A = 0.5 \text{ mm}$ ):  
1 – granules based on native potato starch; 2 – granules based on potato starch subjected to solid-phase mechanical activation

При структурообразовании гранул уже присутствуют центры агломерации, полученные при измельчении крахмала, которые позволяют осуществить процесс гранулирования с более плотной укладкой частиц исходной сыпучей смеси компонентов, а силы их взаимодействия снижают количество мелкодисперсной фракции, образуемой в результате взаимодействия гранул, что в итоге влияет и на пылеунос в БВО-С.

На рисунке 8 представлена плотность распределения пылевидной фракции, выносимой за пределы БВО-С. Из гистограммы видно, что преобладающее значение имеет количество частиц мелкодисперсной фракции. Доля частиц менее 20 мкм составляет порядка 35% от общего количества по массе.

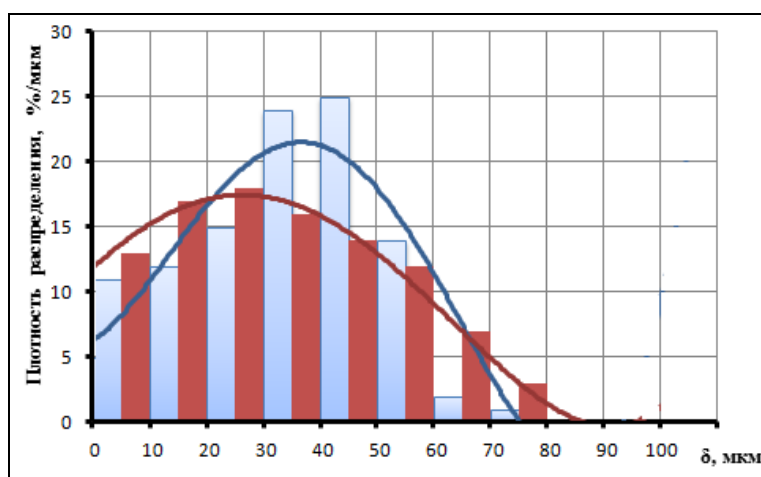


Рисунок 8 – Гистограмма плотности распределения частиц продукта, уносимых с сушильным агентом ( $\alpha = 0,5^\circ$ ;  $t = 65^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ ;  $A = 0,5 \text{ мм}$ ): 1 – при сушке гранул на основе нативного картофельного крахмала; 2 – при сушке гранул на основе картофельного крахмала, подвергшегося твердофазной механической активации

Figure 8. Histogram of the distribution density for the product particles carried away with drying agent ( $\alpha = 0.5^\circ$ ;  $t = 65^\circ\text{C}$ ;  $n = 5 \text{ min}^{-1}$ ;  $A = 0.5 \text{ mm}$ ): 1 – when drying granules based on native potato starch; 2 – when drying granules based on potato starch subjected to solid-phase mechanical activation

При этом, сопоставляя значения дисперсного состава исходного сырья для сушки (гранулы) и данные гистограммы, видно, что количество мелкодисперсной фракции увеличивается. Это связано с истиранием гранул с появлением частиц размеров менее 20 мкм, однако при рассмотрении данных дисперсного состава при сушке гранул на основе картофельного крахмала, подвергшегося механической активации, видно, что количество мелкодисперсной фракции снизилось, что в итоге это может снизить

расходы на очистку отработанного сушильного агента.

Выходным параметром при определении количества уносимой мелкодисперсной фракции во время проведения процесса сушки являлась запыленность отработанного сушильного агента (концентрация пыли)  $C_{\text{п}}$ .

$$C_{\text{п}} = 0,3791 + 0,817 \cdot V + 0,238 \cdot n + 0,11 \cdot A - 0,09 \cdot v + 0,231 \cdot A \cdot V + 0,369 \cdot v \cdot V$$

Для уравнения коэффициент корреляции составил  $R = 0,928$ . Пылеунос является сложным процессом, поскольку напрямую связан с процессом истирания гранул во время их перемещения и сушки. Из выражения видно, что наибольшее влияние на процесс пылеуноса оказывает скорость сушильного агента, при этом парные связи в виде скорости газа и частоты колебаний усиливают эффект, поскольку повышение частоты колебаний увеличивает количество мелкодисперсной фракции, а повышение скорости газа увеличивает их унос. Аналогичная картина наблюдается при рассмотрении других парных связей.

## Заключение

Анализируя данные проведенных исследований по уносу мелкодисперсной фракции, можно сделать вывод, что режимные параметры оказывают существенное влияние на выходной параметр, и при выборе режима необходимо учитывать технико-экономические показатели. Например, повышение прочности и скорости протекания процесса сушки за счет увеличения скорости теплоносителя способствует росту пылеуноса и, следовательно, приводит к необходимости использования более дорогостоящего оборудования для второй ступени очистки сушильного агента, поэтому для повышения рентабельности необходимо рассматривать комплексное влияние параметров на процессы, протекающие в агрегате. Наряду с этим влияние изменения структурно-механических свойств исходного сырья оказывает положительное влияние на пылеунос, который за счет более плотной укладки частиц в гранулах предотвращает их унос. В результате проведенных исследований была получена экспериментально-статистическая модель, пригодная для расчетной практики и описывающая зависимость пылеуноса в БВО-С от режимных параметров.

В качестве газоочистного оборудования при анализе дисперсного состава уносимой пыли можно использовать двухступенчатую очистку. В качестве первой ступени могут выступать циклоны различной конструкции, а на второй желательнее использование мокрого способа очистки газов с внутренней циркуляцией рабочей жидкости, поскольку возможно насыщение рабочей жидкости целевым компонентом с целью последующего смешивания его со связующим раствором в определенных пропорциях.

## Литература/References

1. Guo L., Tao H.T., Cui B., Janaswamy S. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules. *Food Chemistry*. 2019, V. 277, pp. 504–514.
2. Yuan Q., Gong H., Xi H., Xu H., Jin Z., Ali N., Wang K. Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate. *Journal of Environmental Sciences*. 2019, V. 84, pp. 144–154.
3. Veronica N., Goh H.P., Kang C.Y.X., Liew C.V., Heng P.W.S. Influence of spray nozzle aperture during high shear wet granulation on granule properties and its compression attributes. *International Journal of Pharmaceutics*. 2018, V. 553, pp. 474–482.
4. De Simone V., Caccavo D., Lamberti G., d'Amore M., Barba A.A. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization. *Powder Technology*. 2018, V. 340, pp. 411–419.
5. Popov A.M., Plotnikov K.B., Donya D.V. Determination of dependence between thermophysical properties and structural and phase characteristics of moist materials. *Foods and Raw Materials*. 2017, V. 5, no. 1, pp. 137–143.
6. Prosekov A.Yu., Ivanova S.A. Providing food security in the existing tendencies of population growth and political and economic instability in the world. *Foods and Raw Materials*. 2016, V. 4, no. 2, pp. 201–211.
7. Latkov N.Yu., Vekovtsev A.A., Nikityuk D.B., Poznyakovskiy V.M. Specialized product of antioxidant activity for sports nutrition. *Human. Sport. Medicine*. 2018, 1 V. 8, no. 5, pp. 125–134. (In Russian)
8. De Simone V., Lamberti G., Dalmoro A., Caccavo D., d'Amore M., Barba A.A. HPMC granules by wet granulation process: effect of vitamin load on physicochemical, mechanical and release properties. *Carbohydrate Polymers*. 2018, V. 181, pp. 939–947.



9. Palis S. Control induced instabilities in fluidized bed spray granulation. *Journal of Process Control*. 2020, V. 93, pp. 97–104.
10. Talybly I.A., Samedzade G.M., Masyeva L.F., Mammadov A.N., Gasimova A.M., Shadlinskaya G.B. Modeling the process of granulation of dusty-type clay with dipper method on a pelletizing granulator. *Kimya Problemleri*. 2020, V. 18, no. 1, pp. 68–77.
11. Krmela J., Artyukhova N., Artyukhov A. Investigation of the convection drying process in a multistage apparatus with a differential thermal regime. *Manufacturing Technology*. 2020, V. 20, no. 4, pp. 468–473.
12. Majzoobi M., Farahnaky A. Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications – A review. *Food Hydrocolloids*. 2021, V. 111, article 106393.
13. Nugmanova A.A., Aleksanian I.Y., Nugmanov A. H.-H., Maksimenko Y.A., Khaybulov R.A. Substantiation of a rational method for drying granules in a fluidized bed and the hydrodynamic regime of their interaction with a fluidizing agent. *Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2021, V. 24, no. 3, pp. 287–298. (In Russian)
14. Popov A.M., Plotnikova I.O., Plotnikov K.B., Donya D.V., Konyaev A.V. Drum vibratory granulator. *Patent RF*, no. 2693772 C2. 2019. (In Russian)
15. Soares G.S., Tuchtenhagen S.N., Pinto L.A., Felipe C.A.S. Monitoring of the fluidized bed particle drying process by temperature and pressure drop measurements. *Drying Technology*. 2021, pp. 1–13.
16. Levchenko D., Manzharov A., Artyukhov A., Artyukhova N., Krmela J. Comparative exergy analysis of units for the porous ammonium nitrate granulation. *Energies*. 2021, V. 14, no. 2, 280.
17. Cheng S., Su W., Yuan L., Tan M. Recent developments of drying techniques for aquatic products: with emphasis on drying process monitoring with innovative methods. *Drying Technology*. 2021, V. 29, Is. 11 pp. 1577–1594.
18. He S.Y., Gan J.Q., Yu A.B., Zhou Z.Y., Pinson D. Radial segregation of binary-sized ellipsoids in a rotating drum. *Powder Technology*. 2019, V. 357, pp. 322–330.

#### Информация об авторах

Константин Борисович Плотников – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем  
Анатолий Михайлович Попов – д-р техн. наук, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем  
Ирина Олеговна Плотникова – старший преподаватель кафедры агроинженерии  
Игорь Борисович Плотников – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем  
Юлия Владиславовна Устинова – канд. техн. наук, доцент кафедры управления качеством

#### Information about the authors

Konstantin B. Plotnikov, Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems  
Anatoly M. Popov, D. Sc., Professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems  
Irina O. Plotnikova, Senior Lecturer of the Department of Agricultural Engineering  
Igor B. Plotnikov, Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems  
Yulia V. Ustinova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Quality Management

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 19.10.2021

Одобрена после рецензирования 03.12.2021

Принята к публикации 10.12.2021

The article was submitted 19.10.2021

Approved after reviewing 03.12.2021

Accepted for publication 10.12.2021