

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.83; 66.047.7

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА РЖИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ

*В. А. Шаршунов, М. А. Киркор, Е. Н. Урбанчик, Р. А. Бондарев,
А. В. Евдокимов, И. О. Алексеенко*

Приведены результаты экспериментальных исследований комбинированного процесса сушки и измельчения пророщенного зерна ржи в аппарате с закрученными потоками. Получены критериальные уравнения, позволяющие рассчитать конструктивные размеры аппарата, а также определить основные технологические параметры совмещенного процесса сушки и измельчения пророщенного зерна. Определен сложный характер комбинированного процесса, выражающийся во взаимной значимости параметров в зависимости от начальной влажности материала, производительности установки, температуры сушильного агента и частоты вращения ротора измельчителя.

Введение

Пророщенное зерно активно используется в пищевых производствах. Масштаб его применения непрерывно возрастает и стабильно расширяет ассортимент товаров, содержащих в своем составе пророщенное зерно различных культур. Наиболее часто пророщенное зерно является сырьем при производстве муки, которая регламентируется по целому ряду параметров, в том числе влажности и дисперсности. Активное технологическое использование муки из пророщенного зерна требует совершенствования термомеханических процессов, являющихся ключевыми этапами его переработки, а также требует создания высокоэффективного оборудования для их осуществления.

При производстве муки из пророщенного зерна наиболее сложными и энергоемкими являются процессы сушки и измельчения. Пророщенное зерно, отличается от сухого, высокой влажностью (до 45 %) и обладает ярко выраженными пластическими свойствами, что значительно усложняет процесс динамического разрушения. Низкая эффективность ударного измельчения такого продукта обусловлена тем, что значительная часть энергии удара расходуется на упругие и необратимые пластические деформации вместо его разрушения. При данных условиях наиболее рациональным технологическим решением является предварительная сушка пророщенного зерна перед процессом измельчения. Однако строение самого зерна затрудняет процесс сушки из-за наличия оболочки, препятствующей отводу влаги из его внутренних слоев. Взаимозависимые факторы особенностей переработки пророщенного зерна формируют актуальную задачу – организацию эффективного комбинированного процесса сушки и измельчения в едином рабочем объеме аппарата.

Совмещение в одном рабочем пространстве тепловых, массообменных и механических процессов является весьма перспективным, так как оно обеспечит минимальное время нахождения сырья в зоне обработки, обеспечит сохранность биологически активных веществ

в продукте, а также позволит более рационально использовать производственные площади.

В настоящее время исследования, касающиеся совмещения термомеханических процессов переработки растительного сырья, не позволяют в промышленном масштабе создать эффективные комбинированные аппараты для сушки и измельчения. Основная проблема заключается в отсутствии зависимостей адекватно описывающих протекание совмещенных процессов.

Целью исследования является изучение влияния конструктивных и технологических параметров на эффективность переработки пророщенного зерна.

Результаты исследований и их обсуждение

Эксперименты по сушке и измельчению пророщенного зерна ржи были проведены в несколько этапов. На первом этапе определялись основные технологические параметры, оказывающие существенное влияние на процесс термомеханической обработки зерна. Степень влияния каждого из параметров определялась путем предварительного однофакторного эксперимента. Полученные данные не обладали устойчивыми зависимостями, что позволило сделать вывод о комплексности поставленной задачи, объясняющейся сложной взаимосвязью отдельных факторов между собой. В результате был спланирован и проведен многофакторный эксперимент по плану 2^4 со звездой.

Факторами варьирования выступали: начальная влажность пророщенного зерна (W_1 , %), производительность установки по исходному продукту (G , кг/с), температура сушильного агента (t , °C), частота вращения роторного измельчителя (n , c^{-1}).

В качестве выходных параметров приняты: конечная влажность получаемого продукта (W_2 , %), среднее время пребывания материала в установке (τ_{cp} , с) и медианный диаметр получаемого продукта (δ_{50} , мкм).

При проведении исследований контролировался ряд вспомогательных параметров, используемых для промежуточных расчетов, таким параметром являлась температура окружающей среды, а также температура материала до и после осуществления процесса.

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью пакета прикладных программ для математического и статического анализа данных STATGRAPHICSPlus, STATISTICA [1, 2].

Предварительно был произведен модульный анализ предстоящего исследования, в результате чего были выделены решаемые технологические задачи, а ряд входных и выходных параметров преобразован.

Начальная и конечная влажность продукта, а также производительность по влажному материалу, были объединены и выражены в виде единого безразмерного параметра Δ , показывающего удельное количество влаги, отведенной от продукта в аппарате (1):

$$\Delta = \frac{L}{W} = \frac{G(W_1 - W_2) \times 10^{-2}}{GW_1 \times 10^{-2}} = \frac{W_1 - W_2}{W_1}, \quad (1)$$

где L – количество влаги, испаренной из материала, кг;

W – количество влаги, внесенной в аппарат, кг;

G – производительность установки по исходному продукту, кг/с.

Описанный параметр характеризует количество влаги испаренной из материала к количеству влаги внесенной в аппарат. Данный параметр может служить качественной оценкой эффективности процесса сушки, в идеальном случае он стремится к единице.

Полученные в ходе эксперимента данные позволили установить зависимость между удельным количеством влаги извлеченной из материала в установке Δ , частотой вращения роторного измельчителя n и температурой сушильного агента t .

Зависимость описывается уравнением (2):

$$\Delta = 0,695 + 1,7 \times 10^{-3} n - 11,9 \times 10^{-3} t. \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученной зависимости показана на рисунке 1.

Анализ поверхности отклика показывает, что с ростом температуры сушильного агента удельное количество влаги извлеченной из материала возрастает, так как увеличение температуры является одним из факторов, повышающих интенсивность процесса сушки.

С ростом частоты вращения ротора удельное количество влаги извлеченной из материала также возрастает, что объясняется увеличением свободной поверхности, способной принять участие в процессе тепломассообмена [3].

Стоит отметить, что зависимость (2) является воспроизводимой только на исследуемой лабораторной установке. Для того чтобы воспользоваться уравнением при расчете промышленных аппаратов, необходимо провести моделирование данных условий с учетом масштабного фактора. В данном случае наиболее удобным является выражение переменных в виде критериев подобия, раскрывающих физический смысл каждого параметра.

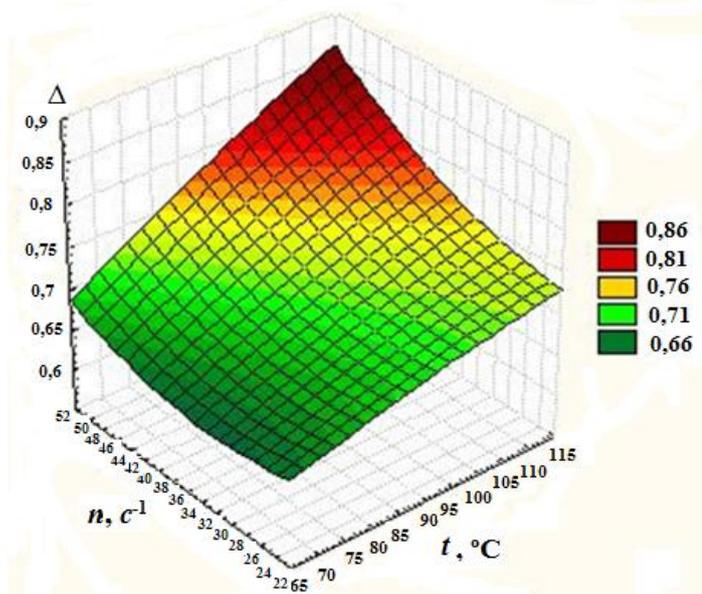


Рисунок 1 – Зависимость удельного количества влаги извлеченной из материала Δ от частоты вращения роторного измельчителя n и температуры сушильного агента t

Механическое воздействие роторного измельчителя на воздушно-продуктовый слой представлено в виде безразмерного соотношения инерционных сил к силам вязкого трения при вращательном движении, которое описывается центробежным критерием Рейнольдса Re_u , определяемого по формуле (3)

$$Re_u = \frac{n^2 D}{\nu}, \quad (3)$$

где n – частота вращения роторного измельчителя, c^{-1} ;

D – определяющий геометрический размер, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды, m^2/c .

Адаптируя данный критерий к конструкции сушилки-диспергатора, в качестве определяющего геометрического размера принят диаметр ротора измельчителя, так как в данной зоне происходит наибольшее инерционное воздействие.

Вязкость среды была определена вязкостью воздуха при температуре сушильного агента, что является допущением. Однако для среды с низкой и средней концентрацией материала, где воздушный поток проявляет однородные свойства, данное допущение может быть применено [4].

Тепловое воздействие на продукт представлено в виде критерия подобия – безразмерной

температуры θ , который определяется по формуле (4) [5] и является функцией критериев Био и Фурье.

$$\theta = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c}, \quad (4)$$

где t – текущая температура тела, °С;
 t_0 – начальная температура тела, °С;
 t_c – температура среды, °С.

В процессе расчета технологических параметров, температура измельченного зерна на выходе из аппарата выступала в качестве текущей температуры. Начальная температура тела была принята равной температуре продукта перед попаданием в аппарат. Температура среды равнялась температуре сушильного агента в точке входа в вихревую рабочую камеру.

Математическое преобразование позволило получить зависимость удельного количества влаги извлеченной из материала в установке в критериальном виде (5):

$$\Delta = -2,37 + 8,89 \times 10^{-6} Re_{\text{ц}} + 5,94 \times \theta + 2,99 \times 10^{-13} Re_{\text{ц}}^2 - Re_{\text{ц}} \times \theta \times 10^{-5} - 2,75 \times \theta^2. \quad (5)$$

Преобразованное выражение в виде поверхности отклика показано на рисунке 2. Анализ данного рисунка показывает, что процесс отвода влаги из материала протекает нелинейно и меняет свой характер в различных диапазонах. В области больших значений числа Рейнольдса $Re_{\text{ц}}$ удельное количество влаги извлеченной из материала Δ заметно падает с увеличением температурного воздействия. Данный факт объясняется быстрым попаданием частицы материала в зону выноса из рабочей камеры и дальнейшим прохождением по тракту установки.

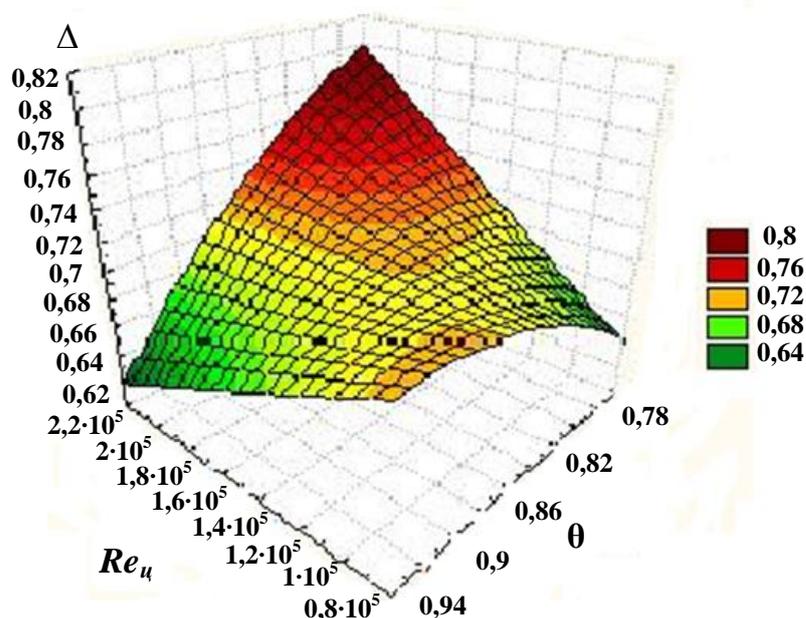


Рисунок 2 – Зависимость удельного количества влаги извлеченной из материала Δ от центробежного критерия Рейнольдса $Re_{\text{ц}}$ и безразмерной температуры θ

В то же самое время в области малых значений числа Рейнольдса наблюдается обратный процесс. Данный факт объясняется изменением характера обтекания воздушным потоком отдельных частиц порошка, а также более интенсивным теплообменом между воздушным потоком и поверхностью материала. Стоит отметить, что в данном случае также увеличивается скорость прогрева частицы, кроме этого происходит наложение градиента температуры на градиент влажности, что позволяет создать благоприятные условия для сушки частицы.

В процессе исследования изучено механическое воздействие на пророщенное зерно. Обработка опытных данных позволила установить влияние температуры сушильного агента t_c и частоты вращения ротора n на медианный размер частиц измельченного материала δ_{50} , которое описывается уравнением (6):

$$\delta_{50} = 517,86 - 1,59n - 5,08t_c \quad (6)$$

Графическое выражение уравнения (6) представлено на рисунке 3, из которого видно, что средний размер частиц линейно уменьшается с ростом температуры сушильного агента и ростом частоты вращения ротора.

Уменьшение размера частиц с ростом частоты вращения хорошо согласуется с известными теориями измельчения, и объясняется увеличением кинетической энергии удара, которая и является основным фактором хрупкого разрушения, также возрастает число повторностей приложенных нагрузок к одиночной частице.

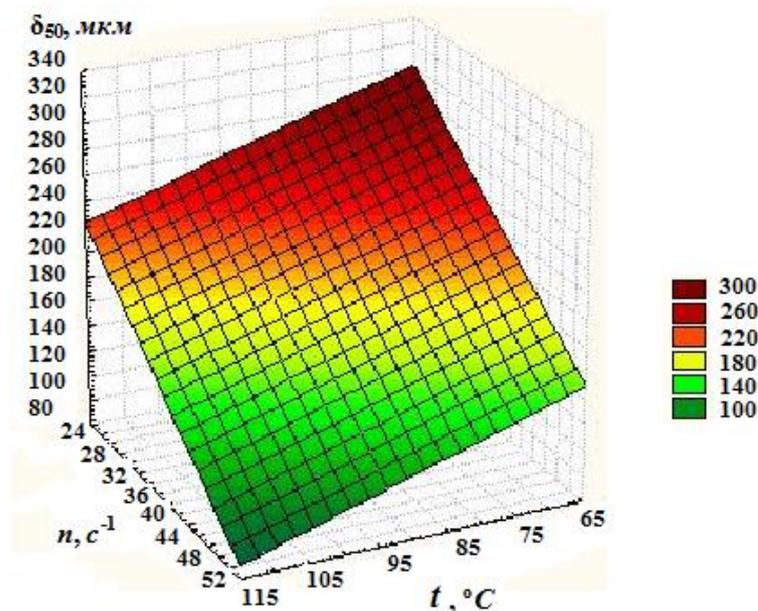


Рисунок 3 – Влияние частоты вращения ротора n и температуры сушильного агента t_c на медианный размер частиц δ_{50} переработанного материала

На процесс измельчения оказывает существенное влияние температура сушильного агента, особенно для пророщенного зерна, обладающего ярко выраженными анизотропными свойствами. Интенсивный отвод влаги, наблюдающийся при значительных температурах, вызывает изменение структурно-механических свойств материала и делает его более хрупким, а процесс ударного измельчения – более эффективным.

Полученная зависимость (6) также была представлена в критериальной форме. Для частиц материала среднего диаметра, находящихся в подвижном воздушном потоке, использован критерий Архимеда Ar [5].

Применение указанного критерия согласуется с адаптивным характером физических процессов, протекающих в аппарате, при котором частица покидает рабочую камеру аппарата только в том случае, когда подъемная сила, зависящая от размера и влажности продукта, будет преобладать над инерционными силами.

В качестве характерного размера для критерия Архимеда Ar принят медианный диаметр частиц измельченного материала. В качестве плотности тела была принята истинная плотность частиц муки пророщенного зерна ржи, а плотность и кинематическая вязкость среды принимались равной соответствующим параметрам воздуха при температуре, с которой он попадает в рабочую камеру установки.

В результате преобразований получено выражение (7):

$$Ar = -33 \times 10^2 + 22,6 \times 10^{-3} Re_{\theta} + 13,61 \times 10^2 \times \theta - 30,57 \times 10^{-9} Re_{\theta}^2 - 31,6 \times 10^{-3} Re_{\theta} \theta + 32,85 \theta^2 \quad (7)$$

Полученное выражение представлено графически и показано на рисунке 4.

Анализ рисунка 4 указывает на сложный характер комбинированного процесса обработки материала. Так, при малых значениях числа Рейнольдса влияние температурного воздействия на критерий Архимеда весьма значительно.

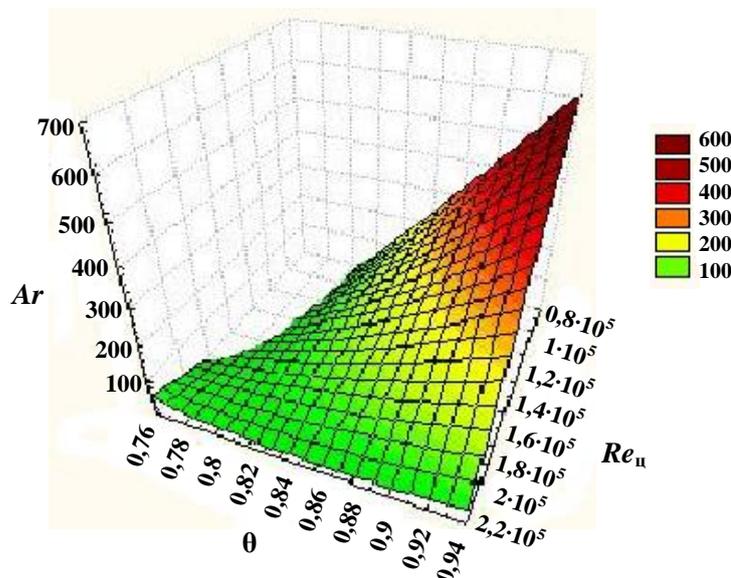


Рисунок 4 – Зависимость критерия Архимеда Ar от центробежного критерия Рейнольдса Re_{θ} и безразмерной температуры θ

При постепенном возрастании числа Рейнольдса влияние температурного воздействия на критерий Архимеда снижается практически до нуля. Увеличение числа Рейнольдса ведет к уменьшению критерия Архимеда, что объясняется большим инерционным воздействием на продукт и, как следствие, уменьшением размеров частиц материала.

Изменение характера влияния температурного воздействия на критерий Архимеда также физически обосновано. Известно, что с повышением температуры вязкость воздуха увеличивается, что является весьма значимым в условиях, когда силы вязкого трения преобладают над инерционным. В то же время, при больших значениях числа Рейнольдса подавляющее влияние имеют инерционные силы, и изменение вязкости воздушной среды не может существенно повлиять на процесс.

Критерий Архимеда, как и количество влаги извлеченной из материала, характеризуют процессы измельчения и сушки материала. Так как термомеханический процесс переработки зерна является комбинированным, то возможно связать данные критерии с некоторым параметром, в качестве которого может быть использовано время нахождения частиц продукта в установке. Время нахождения материала в аппарате характеризует интенсивность протекания как механических, так и теплообменных процессов. Частица может покинуть вихревую рабочую камеру аппарата, если она достигнет размера, при котором сила гидродинамического сопротивления, приложенная к ней, будет превышать силу тяжести и в случае уменьшения величины центробежной силы. Также причиной для уноса частиц из рабочей камеры является потеря частицей влаги, что снижает ее вес в сравнении с подъемной гидродинамической силой.

В ходе экспериментальных исследований получено уравнение (8), выражающее описанную взаимосвязь математически.

$$\tau = 81,98 - 333,33\Delta + 0,35\delta_{50} + 300,37\Delta^2 - 6,58 \times 10^{-2} \Delta\delta_{50} - 4 \times 10^{-5} \delta_{50}^2. \quad (8)$$

Уравнение (8) графически представлено на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что со снижением размера частиц процесс сушки протекает интенсивнее. Величина удельного количества влаги извлеченной из материала заметно возрастает во время нахождения пророщенного зерна в зоне измельчения при термомеханической обработке.

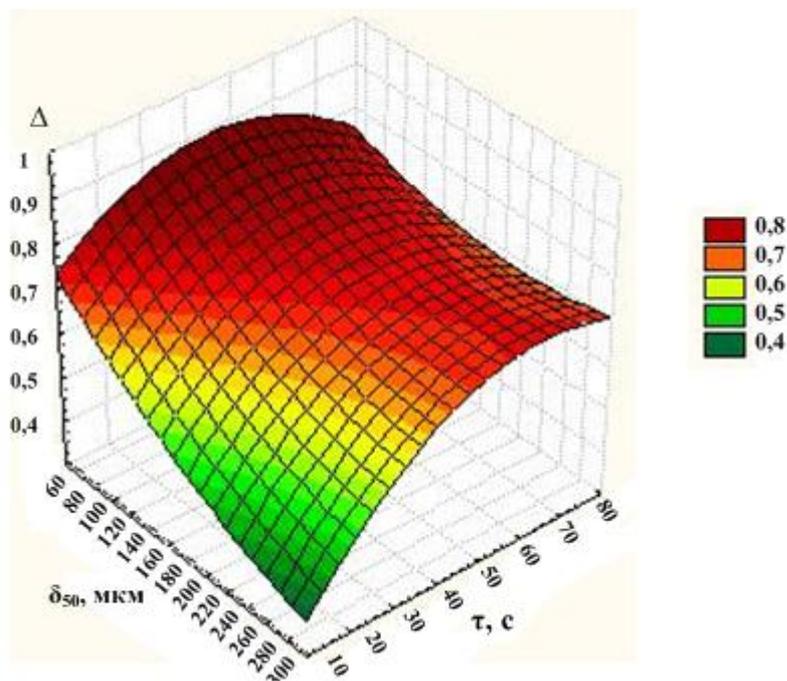


Рисунок 5 – Влияние удельного количества влаги извлеченной из материала Δ и размера частиц δ_{50} на время нахождения их в вихревой камере τ

Кроме изменения площади поверхности контакта фаз следует учитывать, что в указанной зоне расположена область наибольшего разряжения в камере, что вызывает диффузию влаги с поверхности материала в окружающее пространство. Величина удельного количества влаги извлеченной из материала уменьшается с увеличением среднего диаметра частиц и уменьшением времени пребывания продукта в рабочей камере, что связано как с уменьшением суммарной площади поверхности контакта фаз, так и с продолжительностью температурного воздействия.

В определенный момент времени на поверхности отклика наблюдается выравнивание значений удельного количества влаги извлеченной из материала. Это говорит о том, что материал приблизился к равновесному состоянию для данных условий сушки и средний размер частиц в данный момент практически не влияет на удельное количество извлеченной влаги.

В процессах, изменяющихся с течением времени, основным критерием подобия, характеризующим однородность протекания процессов, является критерий гомохронности Ho .

Критерий гомохронности Ho характеризует меру отношения переносного конвективного ускорения к ускорению в данной точке и является аналогом критерия Фурье Fo (безразмерного времени) при гидродинамическом подобии [5].

Полученное выражение представлено графически и показано на рисунке 6.

В ходе экспериментальных исследований получено уравнение (9), выражающее описанную взаимосвязь математически.

$$\Delta = 0,5 - 12 \times 10^{-4} Ho - 15 \times 10^{-4} Ar^{-1} - 1,2329 \times 10^{-6} Ho^2 + 1,3777 \times 10^{-6} HoAr + 1,4779 \times 10^{-6} Ar^2 \quad (9)$$

Величина удельного количества влаги извлеченной из материала возрастает с увеличением значения критерия гомохронности Ho и снижением значения критерия Архимеда Ar . При этом значимость критерия Архимеда Ar наиболее заметна лишь при малых значениях критерия гомохронности и существенно снижается при возрастании значения числа Ho .

Данный факт объясняется тем, что при длительном времени пребывания частиц материала в рабочей камере время сушки является достаточным как для крупных, так и для мелких частиц.

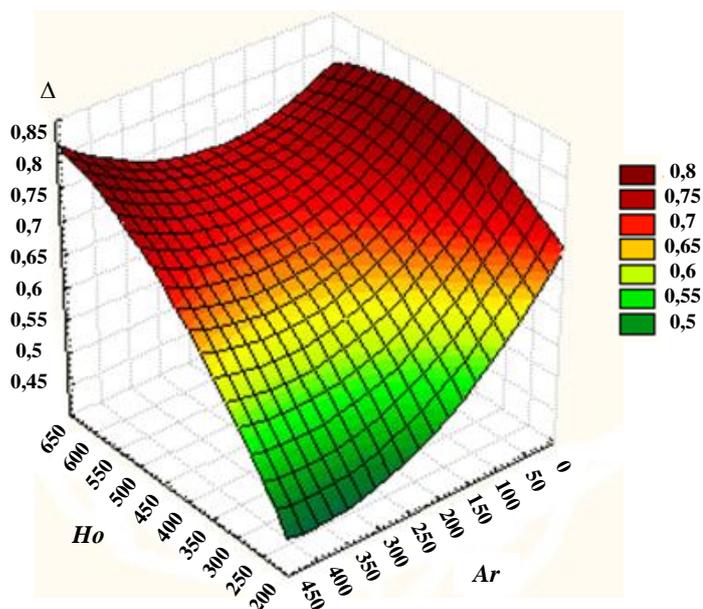


Рисунок 6 – Влияние удельного количества влаги извлеченной из материала Δ от критерия гомохронности Ho и критерия Архимеда Ar

В свою очередь, при малых значениях числа Архимеда, характеризующих развитой поверхностью контакта фаз, влияние значения критерия гомохронности Ho на удельное количество влаги, извлекаемой из материала, не столь значительно.

Проверка адекватности критериальных уравнений, представленных в разделе, реальному технологическому процессу проводилась по критерию Фишера F с допустимой вероятностью 0,95 [6, 7]. Полученные уравнения адекватны реальному процессу, корректно описывают технологический процесс в разработанной сушилке-диспергаторе и могут использоваться при расчетах и проектировании.

Заключение

Результаты исследований совмещенного процесса сушки и измельчения в комбинированном аппарате обработаны и представлены в виде критериальных уравнений. Анализ полученных зависимостей указал на сложный характер комбинированного процесса сушки и измельчения. Установлено, что удельное количество извлекаемой влаги и крупность частиц зависит от взаимного сочетания технологических и конструктивных параметров, при этом значимость каждого параметра определяется значением всех влияющих факторов.

Полученные данные могут стать основой для осуществления оптимизации процесса комбинированной обработки пророщенного зерна, а также могут быть использованы в инженерных расчетах при моделировании процесса в промышленных аппаратах.

Литература

- 1 Алямовский, А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович. – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
- 2 Прохоренко, А. В. SolidWorks. Практическое руководство / А. В. Прохоренко. – Москва: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.
- 3 Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
- 4 Шрайбер А.А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом / А. А. Шрайбер, В. Н. Милютин, В. П. Яценко – Киев: Наук, думка, 1980. – 252 с.
- 5 Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 8-е изд., перераб. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
- 6 Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 46 с.
- 7 Сычевская, И. Д. Планирование научного эксперимента / И. Д. Сычевская. – М.: ИНИИТЭИ приборостроения, 1976. – 75 с.

Поступила в редакцию 06.12.2018