

Качаев А.Е., канд. техн. наук
 ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель»
 Чемерицко Г.И., канд. техн. наук, доц.
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ДИНАМИКА ПРЕРЫВИСТЫХ ТЕЧЕНИЙ В ДЕЗИНТЕГРАТОРАХ МОКРОГО ПОМОЛА

doctor_cement@mail.ru

Используемое при производстве строительных материалов современное оборудование обладает потенциально широкими технологическими возможностями. Так, например, в дезинтеграторных мельницах, предназначенных для тонкого помола материалов низкой и средней твердости (не более 6 единиц по шкале Мооса), в дополнение к «сухому» помолу возможно измельчать материалы в жидкой среде.

В ходе исследований установлено, что нестационарный гидромеханический процесс, возникающий при мокром помолу в дезинтеграторах, реализуется прерывистыми течениями и моделируется течением рабочей жидкости через канал с переменным сопротивлением. При этом режим разгона реализуется при уменьшении этого сопротивления, а режим торможения – при его увеличении. В результате получено математическое описание процесса в дезинтеграторе мокрого помола.

Ключевые слова: мокрый помол, гомохронность, скорость течения, ускорение потока, разгон и торможение жидкости.

Введение. В технологическом оборудовании для мокрого помола дезинтеграторного типа [6], принцип действия которого основан на нестационарном гидромеханическом процессе, реализуются прерывистые течения: например, обрабатываемой жидкости с частицами (волокна, твердые частицы сырьевых материалов). Скоростные характеристики двухфазного потока в дезинтеграторах мокрого помола определяются скоростью движения жидкой фазы, потому что среда с большей плотностью, обладающая спецификой неразрывности, испытывает в агрегатах данного типа большие сопротивления движению, нежели твердые частицы, распределенные в ее объеме.

Сущность прерывистых течений основана на процессах разгона обрабатываемой двух- или многофазной жидкой среды с частицами и ее торможения. Режим прерывистых течений характерен для гидродинамического дезинтегратора [6] и может быть смоделирован посредством течения рабочей жидкости через канал с переменным сопротивлением. Причем, установлено [7], что режим разгона реализуется при уменьшении этого сопротивления, а режим торможения при его увеличении. Математическим описанием такого движения жидкости служит следующее уравнение [8]:

$$\frac{dU}{dt_{6,p.}} + Ho \xi(t_{6,p.})U^2 = 1, \quad (1)$$

где U – среднерасходная скорость рабочей жидкости (суспензии или эмульсии) через канал с сопротивлением (преградой) является функцией

безразмерного времени $t_{6,p.}$; Ho – критерий гомохронности [9]; $\xi(t)$ – коэффициент сопротивления как функция времени. Все составляющие уравнения (1) – величины безразмерные.

Критерий гомохронности Ho – мера нестационарности течения, изменяющаяся от 0 до $+\infty$, причем нулевое значение критерия гомохронности соответствует бесконечно быстрым процессам, бесконечно большое – стационарным, бесконечно медленным процессам.

Уравнение (1) нелинейно и аналитического решения в общем случае не имеет. Для решения уравнения (1) численными методами целесообразно перейти от критерия гомохронности к предложенному С.К. Карепановым в работе [10] коэффициенту нестационарности K_n , связанному с критерием гомохронности следующим соотношением:

$$K_n = \frac{1}{Ho + 1}, \quad 0 \leq K_n \leq 1. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dU}{dt_{6,p.}} + \frac{1 - K_n}{K_n} \xi(t_{6,p.})U^2 = 1. \quad (3)$$

Основная часть. Решение уравнения (3) численными методами для случая переменного во времени сопротивления (показано на рис.1) позволяет установить, что для величин K_n , близких к 1, функция $U(t_{6,p.})$ для этапа разгона жидкости линейна (рис. 1). Данный факт можно установить и аналитически, если сделать предположение, что: при течении жидкости под воздействием постоянного напора через канал с

уменьшающимся во времени сопротивлением потоку (на стадии разгона) скорость нарастания среднерасходной скорости течения с увеличением степени нестационарности потока стремится к постоянной величине и зависит от закона изменения сопротивления.

Данное предположение можно объяснить аналитически следующим образом.

Выразим производную скорости по времени из уравнения (1):

$$\dot{U}(t_{б.п.}) = \frac{dU}{dt_{б.п.}} = \frac{K_H - 1}{K_H} \xi(t_{б.п.}) U^2 + 1. \quad (4)$$

Найдем предел функции "ускорение-время" при стремлении коэффициента нестационарно-

сти K_H к единице, учитывая то, что никаких неопределенностей в правой части уравнения (4) при этом не возникает:

$$\lim_{K_H \rightarrow 1} \dot{U}(t_{б.п.}) = \lim_{K_H \rightarrow 1} \left(\frac{K_H - 1}{K_H} \xi(t_{б.п.}) U^2 + 1 \right) = 1. \quad (5)$$

Независимо от функции $\xi(t_{б.п.})$ скорость нарастания среднерасходной скорости течения при высокой степени нестационарности потока является постоянной величиной, а сама среднерасходная скорость в этом случае является линейной скоростью времени:

$$\dot{U}(t_{б.п.}) = U(0) + t_{б.п.} \quad (6)$$

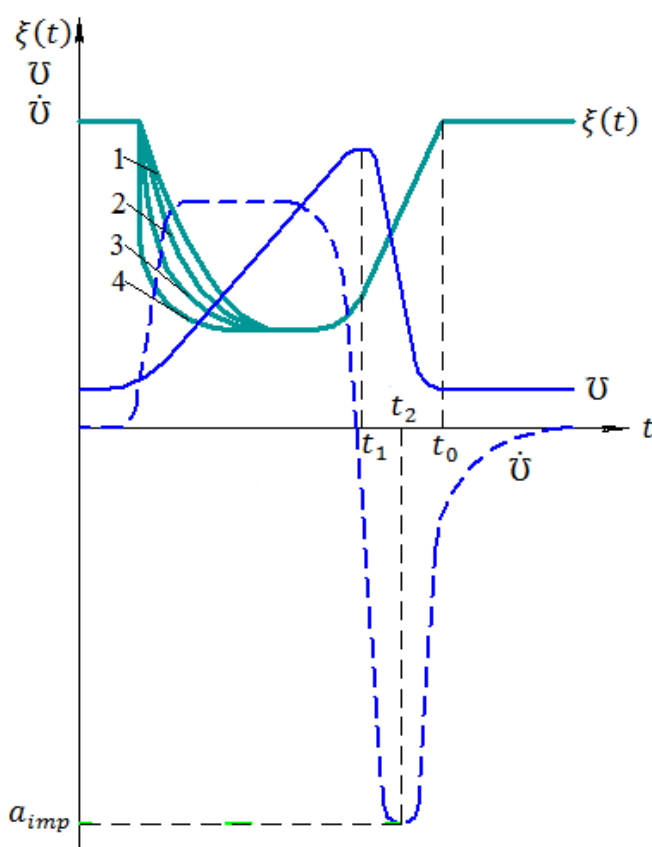


Рис. 1 Безразмерные характерные графические зависимости $\xi(t)$, U , \dot{U} от t для этапов разгона и торможения жидкости в камере гидродинамического дезинтегратора при совпадении и перекрытии каналов: 1, 2, 3, 4 – варианты функции $\xi(t)$.

Данный факт отражен на рис. 1: показаны характеры четырех вариантов функции $\xi(t_{б.п.})$ на первом этапе (на этапе разгона) - при этом функции $U(t_{б.п.})$ и $\dot{U}(t_{б.п.})$ численно и по характеру существенно друг от друга не отличаются.

Формулировка сделанного выше предположения справедлива в размерном виде (для раз-

мерных величин времени, скорости и ускорения) - изменится лишь внешний вид уравнений (5) и (6). Такие размерные показатели уравнений как скорость U , ускорение \dot{U} и время t связаны с соответствующими безразмерными величинами \bar{U} , $\bar{\dot{U}}$ и $t_{б.п.}$ следующими соотношениями из теории гидродинамики [9]:

$$U = \frac{\Delta P b_k}{\rho_{ж} l v_p} \bar{U}; \quad \dot{U} = \frac{\Delta P}{\rho_{ж} l} \bar{\dot{U}}; \quad t = \frac{b_k}{v_p} t_{б.п.} \quad (7)$$

Здесь ΔP – перепад давления на длине канала l , МПа; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $b_{к}$ – ширина канала, м; v_p – окружная скорость ротора, выполняющего функцию задвижки, которая перекрывает поток при его прохождении через канал, которая тем самым реализует закон изменения сопротивления $\xi(t_{6.p.})$, м/с.

Значит, с учетом подстановок (7), уравнения (5) и (6) примут вид:

$$U(t) = \frac{\Delta P}{\rho_{ж} l} \cdot t; \quad (8)$$

$$\dot{U} = \frac{\Delta P}{\rho_{ж} l}; \quad (9)$$

Получается, что в данном случае скорость линейно зависит от времени, а ускорение (скорость изменения скорости) жидкости постоянно.

Рассмотрим по аналогии второй этап – этап торможения жидкости (двухфазного потока).

Если сделать допущение, что: при течении жидкости под воздействием постоянного напора через канал с увеличивающимся во времени сопротивлением потоку (на стадии торможения) глубина импульса среднерасходного ускорения жидкости прямо пропорциональна производной по времени коэффициента сопротивления, то подобным методом аналитически решается и эта задача.

При рассмотрении сущности предположения о разгоне жидкости в дезинтеграторе используем рис 1. В период увеличения сопротив-

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = -2H_0 \cdot U \cdot \xi(t) \cdot \frac{dU}{dt} - H_0 \cdot U^2 \cdot \frac{d\xi}{dt}. \quad (11)$$

В момент времени t_2 (рис. 1) функция $a(t) = \frac{dU}{dt}$ достигает экстремума, поэтому её произ-

$$\left. \frac{d^2 U}{dt^2} \right|_{t=t_2} = -2H_0 \cdot U(t_2) \cdot \xi(t_2) \left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=t_2} - H_0 \cdot U^2(t_2) \cdot \left. \frac{d\xi}{dt} \right|_{t=t_2} = 0. \quad (12)$$

Так получаем из уравнения (12) после сокращения на множитель $(H_0 \cdot U)$ выражение для глубины импульса ускорения:

$$a_{imp}(t) = \left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=t_2} = - \left. \frac{U(t_2) \cdot d\xi}{2\xi(t_2) dt} \right|_{t=t_2}. \quad (13)$$

Таким образом, глубина импульса ускорения a_{imp} пропорциональна скорости изменения сопротивления в момент достижения ускорением наибольшей глубины. Анализ выражения (13) позволяет сделать выводы о том, что увеличение глубины импульса ускорения (агрегаты с такими режимами работы наиболее эффектив-

ления $\xi(t = t_{6.p.})$ среднерасходная скорость жидкости некоторое время в виду инерционности процесса увеличивается. Это возможно при убывающей с определенной быстротой производной скорости по времени, при достижении $t = t_1$ (рис. 1) нулевого значения (при этом скорость достигает максимума). Далее ускорение, оставаясь отрицательным, увеличивается по абсолютной величине, достигает максимальной глубины при $t = t_2$ (рис. 1) и начинает увеличиваться (уменьшаться по абсолютной величине), стремясь к нулю.

Именно такова динамика разгонно-тормозного режима течения жидкости через канал с переменным сопротивлением в дезинтеграторе мокрого помола [6]. Данный режим приводит к генерации импульса ускорения. Увяжем глубину этого импульса с коэффициентом сопротивления, используя уравнение (1). Кажется, что в этом уравнении ускорение и коэффициент сопротивления являются пропорциональными величинами:

$$\frac{dU}{dt_{6.p.}} = -H_0 \xi(t) U^2 + 1. \quad (10)$$

Однако это не так. В слагаемом U^2 потенциально заложено влияние \dot{U} и $\xi(t)$. Именно поэтому, для определения характера влияния потенциальных величин \dot{U} и $\xi(t)$ в уравнении (10) используем следующий подход.

Находим вторую производную скорости:

водная $\frac{da}{dt} = \frac{d^2 U}{dt^2}$ в этот момент равна нулю, следовательно:

ны) достигается при уменьшении величины сопротивления в момент времени t_2 и при увеличении скорости, которая вызвана возрастанием степени нестационарности потока и уменьшении величины сопротивления в момент времени t_2 .

На рис. 2 показано соответствие трех кривых для функции $\xi(t)$ и трех кривых для ускорения a_{imp} . Наиболее эффективным является прерывание потока, реализуемое ступенчатым изменением сопротивления – как это видно из приведенного графика.

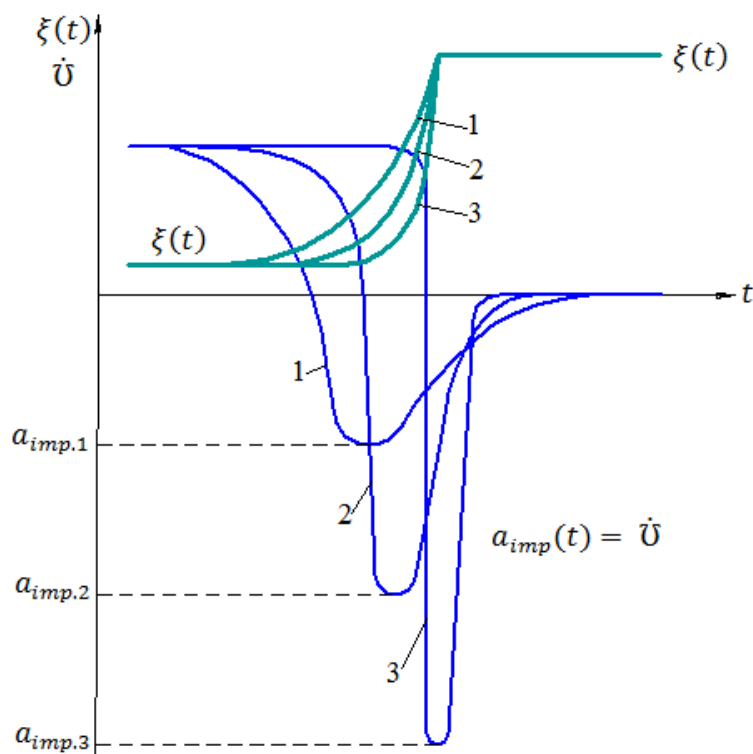


Рис. 2 Безразмерные характерные графические зависимости $\xi(t)$ и a_{imp} от времени t при ступенчатом перекрытии канала во время вращения роторов гидродинамического дезинтегратора: 1, 2, 3 – варианты функции для $\xi(t)$ и a_{imp} .

Помимо этого, из предположения об этапе торможения вытекает то, что становится очевидным целесообразность усилий, направленных на поиск формы поперечного сечения канала как функции времени $S(t)$, обеспечивающей наибольшую скорость изменения площади.

Известна связь коэффициента сопротивления канала, как функции времени $\xi(t)$, и площади поперечного сечения канала, как функции времени $S(t)$ [9]:

$$\xi(t) = \left(\frac{S_{max}}{S(t)} - 1 \right)^2, \quad (14)$$

где S_{max} – максимально возможная площадь поперечного канала, m^2 .

В безразмерных переменных последнее соотношение принимает вид:

$$\xi(t) = \left(\frac{1}{S(t)} - 1 \right)^2. \quad (15)$$

Производная по времени функция $\xi(t)$ имеет вид:

$$\frac{d\xi}{dt} = 2 \left(\frac{1}{S(t)} - 1 \right) \cdot \left(-\frac{1}{S^2(t)} \right) \cdot \frac{dS}{dt}. \quad (16)$$

Выводы. Таким образом, и действительно это так, скорость изменения функции "сопротивление-время" абсолютно определяет скорость изменения функции "площадь поперечно-

го сечения канала - время". Надо обратить внимание на то, что на стадии торможения потока в помольной камере дезинтегратора производная $\frac{d\xi}{dt}$ положительна, а производная $\frac{dS}{dt}$ – отрицательна. Данное положение следует из анализа уравнения (16) и приведенных выше предположений. Для более полной математической модели гидродинамических процессов в дезинтеграторе мокрого помола уравнение (1) должно быть дополнено (модифицировано) энергетической величиной доли от потерянных скоростей противоположно вращающихся роторов агрегата (по теореме Карно), которая также связана физическим смыслом со скоростью, ускорением и временем движения жидкости при ее прерывистом течении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Массалимов И.А. Дезинтеграторная технология – метод повышения эффективности технологических процессов // Труды XVI Международной научно-технической конференции «РЕАКТИВ – 2004». Уфа, 2004. С. 107–109.
2. Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Михайличенко С.А., Сиваченко Т.Л., Фарафонов А.А. Исследование процесса движения волокнистой суспензии в разгонном узле дезинтегратора мокрого помола // Вестник Белорусско-

российского университета. 2016. №1 (50). С. 60–68.

3. Блиничев В.Н., Журавлев В.С. Разработка и исследование высокоэффективной кавитационно-коллоидной мельницы // VI регион. студ. конф. "Фундаментальные науки - студенту нового века". Иваново, 2006. С. 169.

4. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение 1, 2001. 260 с.

5. Качаев, А.Е. Динамика волокнистой суспензии в разгонном узле дезинтегратора мокрого помола // Успехи современной науки. 2015. №2. С. 37–43.

6. Пат. 2377070 Российская Федерация, В02С 13/22 Дезинтегратор. Авторы: Гридчин А. М., Севостьянов В. С., Лесовик Р. В., Глаголев Е. С., Севостьянов М. В., Качаев А. Е., Солопов Н. В., Алфимова Н. И., заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова, завял.

06.05.2008 - заявка №2008118079/03, опубл. 27.12.2009 в бюл. №36.

7. Зимин А.И. О бифуркационных явлениях в нестационарных гидродинамических процессах // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т.31. № 5. С. 238–242.

8. Зимин, А.И. Бифуркации и аномалии в теории и практике гидродинамического диспергатора // Уголь. 1997. № 2. С. 29–30.

9. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 215 с.

10. Карепанов, С.К. Математическая модель течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора // Сб. докл. Междунар. науч.-практ семинара "применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория и практика"/ Изд. Беларускі дом друку.- Минск, 1998, 80 с.

Kachaev A.E., Chemerichko G.I.

THE DYNAMICS OF THE INTERRUPTIAL FLOWS IN THE WET GRINDING DISINTEGRATORS

Used in the production of building materials, modern industrial equipment has potentially broad technological capabilities. For example, in disintegrator mills designed for fine grinding of low and medium hardness materials (no more than 6 units on the Mohs scale), in addition to "dry" grinding, it is possible to grind materials in liquid media.

During conducted research it has been found that non-standard hydro-mechanical process that occurs with wet grinding in disintegrators is occurring in interruptial flows and can be modelled by liquid flow through a channel with variable resistance. During this process flow acceleration is achieved by reducing the resistance and deceleration – by increasing resistance. As a result, mathematical description of hydro-mechanical process in wet grinding disintegrators was derived.

Key words: *wet grinding, homochronism, flow velocity, flow acceleration, acceleration and deceleration of liquid*

Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук.

ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель» ПАО «Горнопромышленная финансовая компания».

Адрес: Россия, 140200, Московская область, г. Воскресенск, ул. Гаражная, 1.

E-mail: doctor_cement@mail.ru

Чемеричко Галина Ивановна, кандидат технических наук, доцент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.