

## МАШИНЫ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ

УДК 631.362.23

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЧАННОЙ ЖАРОВНЕ ПРИ ЖАРЕНИИ МЯТКИ КЛЕЩЕВИНЫ

*В. А. Дидур, доктор технических наук  
В. А. Ткаченко, А. В. Ткаченко, В. В. Дидур,  
кандидаты технических наук*

*А. А. Асеев, аспирант\**

*Таврический государственный агротехнологический  
университет*

*e-mail: didurva@mail.ru, tba34@mail.ru*

**Аннотация.** Разработана математическая модель гидродинамики движения частиц мятки в чане жаровни как единый процесс перемещения потоков мятки по горизонтальным концентрическим окружностям и вертикальным (меридианным), пересекающими ось чана. Основой модели является дифференциальное уравнение движения частицы по лопатке, вращающейся вокруг оси по обогреваемому днищу чана жаровни. Уравнение учитывает конструктивные особенности мешалки, частоту вращения лопастей, их длину и физическую характеристику мятки выраженные через коэффициенты трения. Решение уравнения позволяет определить скорость движения частицы в направлении лопатки и окружную скорость, время движения по лопасти. Это является исходными данными для осевого движения мятки. Время прохождения мятки по лопасти мешалки позволяет обосновать режимы кондуктивного тепло- влагообмена. Время прохождения по оси чана позволяет обосновать режимы конвективного тепловлагообмена.

Однако движение частиц по свободной лопатке отличается от движения частиц в турбулентной мешалке чанной жаровни. В пространстве, описываемом вращающейся мешалкой, наблюдается наиболее сильное уплотнение линий тока, поэтому можно предполагать, что в этой зоне будет происходить наиболее интенсивное перемешивание жидкости. В объёме аппарата выделяются две зоны – зону мешалки, в которой происходит интенсивное перемешивание, и зону циркуляции,

\*Научный руководитель – доктор технических наук В. А. Дидур

© В. А. Дидур, В. А. Ткаченко, А. В. Ткаченко, В. В. Дидур, А. А. Асеев, 2017

в которой перемешивание происходит с меньшими скоростями. Для проведения анализа гидродинамических проблем, связанных с движением мятки в чанной жаровне через межлопастные пространства ротора мешалки, использовалась теория вихревых насосов.

**Ключевые слова:** турбинная мешалка, гидродинамика перемешивания, окружная (периферийной) циркуляция, радиально-осевая циркуляция, многочанная жаровня, моделирование

**Постановка проблемы.** В многочанной жаровне производится сложный технологический процесс, цель которого вызвать определённые физико-химические изменения мятки и изменения структуры её частей, которые способствуют наилучшему эффекту при извлечении масла. Каждый чан жаровни представляет собой турбинную мешалку с наклонными плоскими лопатками. Турбулентная мешалка создаёт поток жидкости, имеющий радиальную и тангенциальную составляющие. На стенке аппарата этот поток притормаживается, меняет своё направление на осевое. Поднимается вверх до свободной поверхности и отсюда вновь поворачивает в направлении мешалки [1]. Для описания процессов, происходящих в чане жаровни необходимо знать траекторию и скорость перемещения мезги.

Таким образом, одной из главных задач изучения технологических процессов, происходящих в многочанной жаровне, есть изучение гидродинамики движения мезги в чанах жаровни.

**Анализ последних исследований.** При моделировании процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое используется два подхода [2]: статистическая модель и модель в обобщённых координатах процесса сушки. Первая модель разработана с помощью полуэмпирического зонального метода расчёта. Эта модель справедлива для математического описания кинетики процесса сушки. Математическая модель в обобщённых координатах создана для распространения результатов исследований кинетики сушки на подобные материалы. При этом учитывается инвариантность критериев и симплексов подобия. Недостатком предлагаемой модели, вероятно, является невозможность применения её в теоретическом моделировании до проведения экспериментальных исследований.

Предлагается технология ферментативной экстракции растительного масла с получением высокобелкового жмыха из семян масличных культур [3]. Ферментативная экстракционная обработка (далее – ЕАЕР), возможная альтернатива винтовому

прессованию и технологии экстракции органических растворителей, является перспективным методом одновременной экстракции масла и белка из семян масличных культур. Этот метод включает в себя измельчающие, экстракционные буферы и ферменты, позволяющие получить ряд масел и белков, хотя во время процесса возникают различные проблемы. Потребность в приемлемых и высоких свободных выходах масла и чистоте белка всегда несовместима во многих процессах.

Для использования семян клещевины в производстве касторового масла описывается метод извлечения растворимых белков, включающих токсин рицина без образования тонкого порошка опасного при ингаляции [4]. Метод включает гомогенизацию семян в толуоле с последующей экстракцией в буфер и центрифугирование. Образцы, приготовленные с использованием двух методов, имели аналогичные уровни рицина, но использование толуола и экстракции буфера приводит к более высокой пропускной способности для анализа рицина и устраняет ингаляционную опасность порошков касторового ацетона.

Проведенный анализ литературы показал, что рассматриваемой тематикой занимаются во многих странах.

Среди рассматриваемых источников не найдены исследования по кинематике и динамике движения мятки в чане многочанной жаровне. Без математического описания гидродинамики первичной и вторичной циркуляции мятки в каждом чане невозможно описать кондуктивный и конвективный тепло-влагообмен.

**Цель исследования.** Целью данной работы является установление закономерностей гидродинамических процессов, происходящих при жарении в многочанной жаровне и разработка математической модели для их описания.

**Результаты исследования.** В работе [5] каждый чан жаровни представлен как турбинная мешалка с наклонными плоскими лопатками. Движение частицы по горизонтальному, вращающемуся около вертикальной оси диску с прямыми, вертикально укрепленными к нему лопатками рассмотрено в работе [6]. При написании дифференциального уравнения движения этой частицы учитывались действие следующих сил (рис. 1):

1) силы веса  $-mg$ . При горизонтальном положении диска и вертикальном положении лопатки проекция этой силы в плоскости диска и лопатки равны нулю;

2) центробежной силы  $-mr\omega^2$ ;

3) силы трения частицы по поверхности диска  $-fmg$ . Так как частица перемещается в относительном движении в плоскости

лопатки, то эта сила тоже будет направлена в плоскости, параллельной плоскости лопатки.

4) силы Кориолиса. Величина этой силы равна  $2m\omega\xi'$ , где:  $\xi'$  – скорость относительного движения частицы. Направление этой силы перпендикулярно направлению относительной скорости  $\xi'$  и ориентировано в сторону, обратную направлению вращения;

5) силы трения частиц по поверхности лопатки  $-2f m \omega \xi'$ . Появление этой силы сопряжено с наличием давления частицы на поверхность лопатки, возникшего вследствие наличия силы Кориолиса.

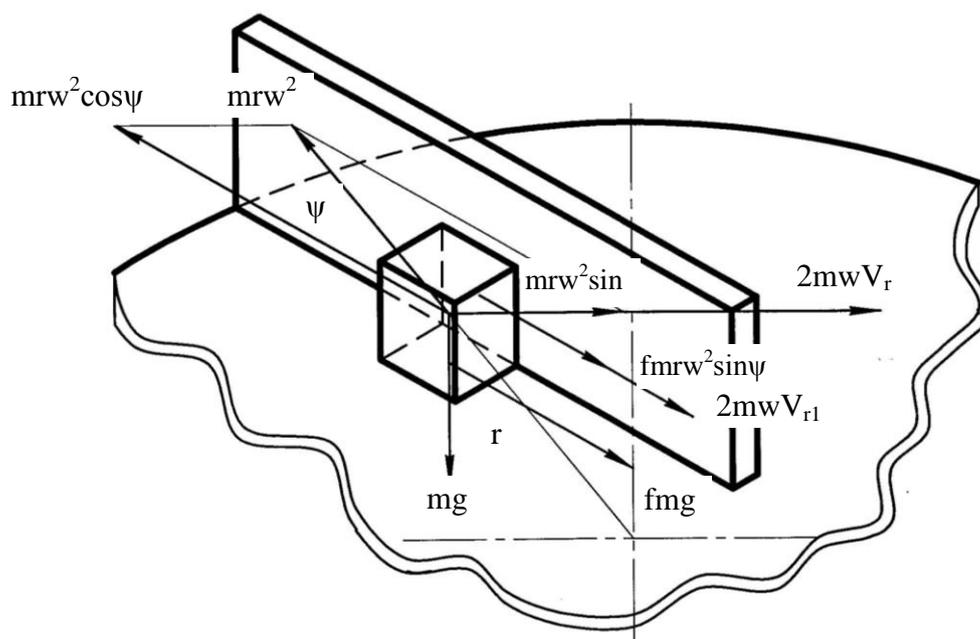


Рис. 1. Схема приложения сил на частицу мятки при движении по горизонтальному диску с прямыми лопатками [6].

Так как лопатка расположена под некоторым углом радиальному направлению, то центробежную силу  $mr\omega^2$  можно разложить на две составляющие: на составляющую  $-mr\omega^2 \cos \psi$  в направлении плоскости лопатки и на составляющую  $-mr\omega^2 \sin \psi$ , перпендикулярную к плоскости лопатки. Последняя создаёт дополнительную силу трения в плоскости касания частицы с поверхностью лопатки ( $\psi$  – угол, заключённый между радиальным направлением и направлением лопатки). Так как лопатка расположена под некоторым углом радиальному направлению, то

центробежную силу  $mr\omega^2$  можно разложить на две составляющие: на составляющую  $-mr\omega^2 \cos\psi$  в направлении плоскости лопатки и на составляющую  $-mr\omega^2 \sin\psi$ , перпендикулярную к плоскости лопатки. Последняя создаёт дополнительную силу трения в плоскости касания частицы с поверхностью лопатки ( $\psi$  – угол, заключённый между радиальным направлением и направлением лопатки). Обе силы трения будут направлены в противоположную сторону относительной скорости  $\xi'$ .

Дифференциальное уравнение движения частицы в направлении лопатки будет иметь вид:

$$m\xi'' = mr\omega^2 \cos\psi - fmg + fmr\omega^2 \sin\psi - 2f\omega\xi'. \quad (1)$$

Для простоты изложения принимается коэффициент трения частицы на поверхности диска и на поверхности лопатки одинаковым. Из рисунка видно, что для данной лопатки имеет место условие:

$$r \sin\psi = r_0 \sin\psi_0 = \text{const}, \quad (2)$$

где:  $r_0$  – расстояние начала лопатки от центра диска;

$\psi_0$  – начальное значение угла  $\psi$ .

Кроме того:

$$r \cos\psi = \xi + r_0 \cos\psi_0. \quad (3)$$

Подставив выражения (2) и (3) в уравнение (1), получим на случай, когда лопатка будет наклонена назад:

$$\xi'' + 2f\omega\xi' - \omega^2\xi = r_0\omega^2 \frac{\cos(\psi_0 - \varphi)}{\cos\varphi} - fg, \quad (4)$$

где:  $\varphi$  – угол трения.

В том случае, когда лопатка будет наклонена вперёд по направлению вращения, в уравнении (1) перед выражением  $fmr\omega^2 \sin\psi$  необходимо поставить знак минус. Поэтому в уравнение(5) вместо  $\cos(\psi_0 - \varphi)$  необходимо поставить  $\cos(\psi_0 + \varphi)$ :

$$\xi'' + 2f\omega\xi' - \omega^2\xi = r_0\omega^2 \frac{\cos(\psi_0 + \varphi)}{\cos\varphi} - fg, \quad (5)$$

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения дополнительной функции имеет вид:

$$\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega^2 = 0, \quad (6)$$

находим его корни:

$$\lambda_1 = \omega \left( \sqrt{1 + f^2} - f \right);$$

$$\lambda_2 = \omega \left( -\sqrt{1-f^2} - f \right);$$

где:  $f$  – коэффициент трения о поверхность диска;  $\omega$  – угловая скорость 1рад/с:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (7)$$

где:  $n$  – частота вращения мешалки, 1/с.

Решение уравнений (1), (4), (5) можно записать в удобной форме для практического использования при расчётах:

$$r = \sqrt{\left\{ \left( \frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - 1 \right] + r_0 \cos \psi_0 \right\} + r_0^2 \sin^2 \psi_0} \quad (8)$$

Скорость движения частицы в направлении лопатки выразим следующим уравнением; лопатки наклонены назад:

$$\xi' = v_\xi = \left( \frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 - \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right]. \quad (9)$$

где:  $t$  – время,  $\varphi$  – угол трения.

Скорость движения частицы в направлении лопатки выразим следующим уравнением; лопатки наклонены вперёд:

$$\xi' = v_\xi = \left( \frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 + \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right]. \quad (10)$$

### 1. Коэффициенты трения движения элементов растения клещевины [7].

Элементы растений	Влажность, %	Поверхности трения			
		Фанера сосновая	Полотно сноповязалки	Листовая сталь, прокат	Листовая резина
Семена	7,0	0,23	0,22	0,38	0,84
Ядро	6,8	0,37	0,34	0,35	0,85
Третинки	8,5	0,34	0,36	0,47	0,96
Стебли	75,0	0,55	0,61	0,61	0,95
Листья	72,0	0,61	0,64	0,59	0,88
Черенки листовые	85	0,77	0,70	0,68	1,05

Коэффициент трения мятки семян клещевины приравниваем к коэффициенту трения ядра семян клещевины: по листовой стали  $f = 0,35$ ;  $tg \varphi = 0,35$ ;  $\varphi = 19,29^\circ = 0,3367$  рад.;  $r = 0,4$  м;  $n = 21 \div 35$  об/мин;  $H = 350 \div 400$  мм;  $\psi_0 = 0^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ$ .

Так как переносная скорость в данном случае представлена окружной скоростью  $v_e = r\omega$ , то проектируя относительную скорость  $v_\xi$  на касательную к окружной скорости периферии диска, найдена скорость рассева частиц в этом направлении как алгебраическая сумма этих скоростей:

$$\begin{aligned} v &= v_e \pm v_\xi \sin \psi_1 = \\ &= r\omega \pm \left( \frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right] \sin \psi_1. \end{aligned} \quad (11)$$

где:  $\psi_1$  – конечное значение угла  $\psi$ .

Если лопатка закреплена радиально, то  $\psi = 0; r_0 = 0$ , и уравнение (9) принимает вид:

$$r = \frac{fg}{\omega^2} \left[ \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_2 t} - \lambda_1 e^{\lambda_1 t}) - 1 \right]. \quad (12)$$

В этом случае скорость рассева в направлении по касательной будет равна переносной скорости в конце лопатки:

$$v = v_e = r\omega. \quad (13)$$

Величина скорости абсолютного рассева в этом случае определится из уравнения  $v_o = \sqrt{v_e^2 + v_\xi^2}$ .

Угол перемещение частицы в абсолютном движении до момента схода её с лопатки можно определить из следующих соображений.

Проводя численные исследования уравнения (8), увеличивая численные значения времени  $t$ , находим время в течении которого частица находится на диске  $t = t_1$ . За этот промежуток времени лопатки мешалки повернутся на угол  $\alpha = \omega t_1$ .

За этот же промежуток времени частица переместится по лопатке в относительном движении на угол  $\psi_0 - \psi_1$ . Поэтому угловое перемещение частицы в абсолютном движении будет равно:

$$\theta = \omega t_1 - (\psi_0 - \psi_1) \quad (14)$$

для лопатки, наклонённой назад, и:

$$\theta = \omega t_1 + (\psi_0 - \psi_1) \quad (15)$$

для лопатки, наклонённой вперёд.

Таким образом, представленные уравнения дают связь между всеми параметрами, обуславливающими движение частиц.

Как отмечалось ранее, каждый чан жаровни представляет собой турбинную мешалку.

Мешалка с наклонными плоскими лопатками, расположенными у днища чана. Однако движение частиц по свободной лопатке

отличается от движения частиц в турбулентной мешалке чанной жаровни.

Для оценки работы чана жаровни с мешалкой воспользуемся понятием окружной (периферийной) и радиально-осевой циркуляцией. Эти параметры учитывают разложение общего потока жидкости от мешалки на два циркуляционных потока, где частицы жидкости совершают движение по окружностям, concentрическим к оси аппарата, в горизонтальных плоскостях, перпендикулярных к оси, а также в вертикальных (меридиональных) плоскостях, пересекающих ось аппарата.

Окружная циркуляция (называемая также первичной) связана с вращением всей массы вокруг оси вращения мешалки. Её объёмную производительность можно определить формулой:

$$V_o^* = \int_0^H \int_0^R w_t dr dz, \quad (16)$$

где:  $H$  – высота мезги в чане с мешалкой;  $R = D/2$  – внутренний радиус чана.

Радиально-осевая циркуляция, называется также вторичной циркуляцией или, циркуляцией, связанной с насосным действием мешалки. Её объёмную производительность для мезги с постоянной плотностью можно выразить формулой:

$$4\pi \int_0^{r_0} w_z r dr = 4\pi \int_0^{z_0} w_z r dr. \quad (17)$$

где:  $r_0, z_0$  – координаты центра (ядра) циркуляции  $0$  (рис. 2). Положение ядра циркуляции может подвергаться во время перемешивания небольшим колебаниям.

Вторичная циркуляция ( $V_c^*$ ) имеет существенное значение для процесса перемешивания, так как при её отсутствии не может быть и речи о конвективном перемешивании в аппарате. Величина  $V_c^*$  связана с насосным эффектом мешалки  $V_p^*$ , т.е. интенсивностью потока жидкости, отбрасываемого лопатками мешалки в радиальном и осевом направлениях.

Согласно исследованиям Нагаты, Ямамото и Уджихары для аппаратов без перегородок  $V_c^* = 1,9V_p^*$ . Звёздочка означает, что эти объёмы рассчитаны на единицу времени ( $m^3 / c$ ), т.е. соответствуют расходам.

Структура вторичной циркуляции для турбулентной мешалки в каждом чане многочанной жаровни представлена на рис. 2. Турбинная мешалка создаёт поток мятки, имеющий радиальную и

тангенциальную составляющие. На стенке аппарата этот поток притормаживается, меняет своё направление на осевое. Поднимается вверх до свободной поверхности и отсюда вновь поворачивает в направлении мешалки. Таким образом, образуются замкнутые циркуляционные петли с центром 0. Точка 0 является местом, в котором радиальная и осевая составляющие равны нулю.

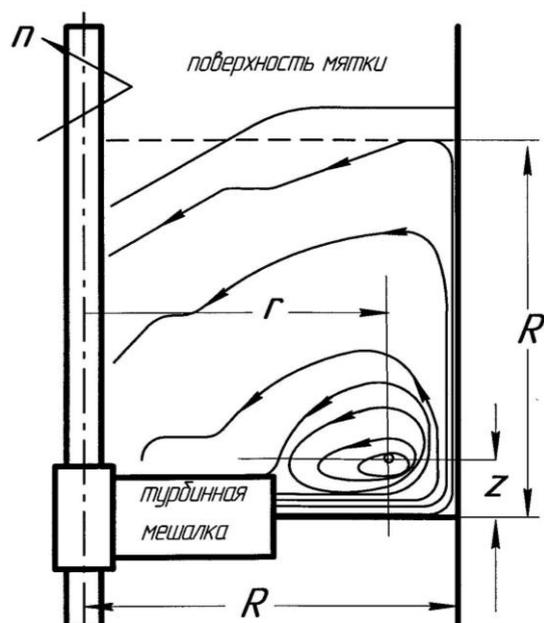


Рис. 2. Структура вторичной циркуляции потока в турбулентной мешалке [1].

Некоторые авторы [1] указывают на возможность возникновения циркуляционных петель турбинных мешалок, если высота жидкости в аппарате будет достаточно большой ( $H/D > 1$ ).

Из рис. 2 следует, что в пространстве, описываемом вращающейся мешалкой, наблюдается наиболее сильное уплотнение линий тока (там возникают наибольшие скорости и самая большая турбулентность потока жидкости), поэтому можно предполагать, что в этой зоне будет происходить наиболее интенсивное перемешивание жидкости.

Некоторые авторы [8] предлагают выделять в объёме аппарата две зоны – зону мешалки, в которой происходит интенсивное перемешивание, и зону циркуляции, в которой перемешивание является слабым жидкость течёт с меньшими скоростями. В работе [1] выделяется дополнительно объём центрального вихря в котором вообще отсутствует конвективное перемешивание. Анализ гидродинамики мятки в чанной жаровне через межлопастные пространства ротора мешалки, можно с

некоторым приближением воспользоваться упрощённой теорией вихревых насосов [9]. Эта теория предполагает полную симметричность течения относительно оси вращения ротора.

При таком течении скорость жидкости является функцией двух координат  $r$  и  $z$ . В роторах с радиальным течением меридианные составляющие становятся радиальными.

Дальнейшее упрощение состоит в том, что течение жидкости через межлопастной канал ротора рассматривается как движение частицы жидкости вдоль центральной линии канала.

Таким образом, не учитывается распределение скоростей жидкости в поперечных сечениях канала.

Следовательно, скорости жидкости становятся функцией только одной координаты – радиуса  $r$ .

Обратимся к плану скоростей жидкостей в плоскости вращения мешалки, создающей радиальное течение.

Если вал вращается с угловой скоростью  $\omega$ , то за абсолютное движение жидкости примем относительно стенки аппарата, а за относительное движение относительно вращающегося вала.

Частицы жидкости покидают лопатки мешалки с абсолютной скоростью  $c$ , направленной под углом  $\alpha$  к окружной скорости  $u$ .

Для определения состояния движения жидкости на выходе из мешалки строим план скоростей (рис. 3:  $c$  – абсолютная скорость;  $u = \omega r_m = \pi d n$  – окружная скорость (уноса);  $\omega$  – относительная скорость;  $c_r$  – радиальная составляющая абсолютной скорости;  $c_u = c \cos(\alpha)$  – окружная составляющая (тангенциальная) абсолютной скорости;  $\alpha$  – угол, по которому жидкость покидает ротор;  $\beta$  – угол наклона конца лопаток;  $k = c_u / u = \omega_c / \omega$  – коэффициент окружных скоростей (отношение угловой скорости жидкости к угловой скорости мешалки). Величина  $h$  определяет тип потока: при  $k = 1$  поток является тангенциальным (окружным), при  $k = 0$  – чисто радиальным.).

Для данного ротора известны окружная скорость  $u$  и угол наклона лопатки  $\beta$ .

Остальные величины следуют из двух указанных и связаны с конкретными условиями работы мешалки.

Представленный план скоростей относится к идеальному случаю при числе лопаток  $z = \infty$  и отсутствии энергетических потерь потока.

В реальной мешалке с конечным числом лопаток не существует идеального течения жидкости в межлопастных пространствах, вследствие чего меняется план скоростей. Уменьшается угол  $\beta$  и увеличивается угол  $\alpha$ . Снижается значение

коэффициента  $k$ . Насосный эффект для идеальной мешалки с радиальным течением жидкости представляет произведение скорости на площадь поверхности цилиндра:

$$V_p^* = \pi d b c_r. \quad (18)$$

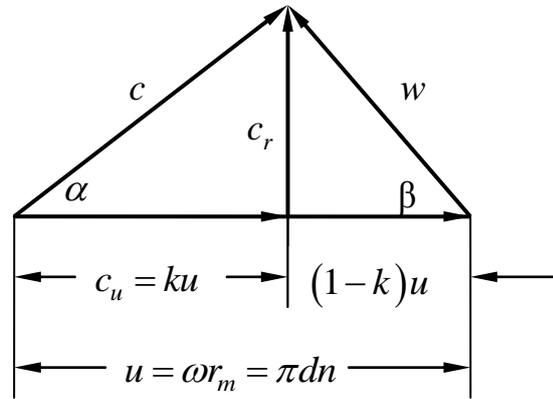


Рис. 3. План скоростей на выходе из идеального ротора.

Радиальную составляющую  $c_r$  рассчитывают по плану скоростей:

$$c_r = \sin(\beta) \sqrt{c^2 + u^2 - 2c_u u}. \quad (19)$$

Абсолютную скорость  $c$  можно рассчитать, приравняв теоретический напор мешалки  $H_t = u c_u$  к значению  $H = \frac{c^2}{2} + \frac{c_u^2}{2}$  (уравнение Бернулли):

$$u c_u = \frac{c^2}{2} + \frac{c_u^2}{2} \quad (20)$$

где:  $c^2/2$  – динамический напор;  $c_u^2/2$  – статический напор, вызванный центробежной силой.

Отсюда получаем:

$$c = \sqrt{2u c_u - c_u^2}. \quad (21)$$

После подстановки уравнения (4) в зависимости (1) и (2) при условии, что  $c_u = ku$  и  $u = \pi d n$ , имеем:

$$c_r = \pi d n \sin(\beta) \sqrt{1 - k^2}, \quad (22)$$

и

$$V_p^* = \pi^2 b n d^2 \sin(\beta) \sqrt{1 - k^2}. \quad (23)$$

При использовании семейства геометрически подобных мешалок, для которых  $b/d = i_b = \text{const}$ , можно написать:

$$V_p^* = \pi^2 i_b n d^3 \sin \beta \sqrt{1 - k^2}. \quad (24)$$

Уравнение (23) было впервые введено в таком виде в работе [1]. В работе [10] несколько модифицировали его, заменив функцию  $\sin(\beta)$  коэффициентом  $k$ :

$$\sin(\beta) = \frac{c_r}{w} = \sqrt{\frac{c^2 - c_u^2}{c^2 + u^2 - 2uc_u}}$$

Если  $c^2 = 2uc_u - c_u^2$  и  $c_u = ku$ , то:

$$\sin(\beta) = \sqrt{\frac{2k(1-k)}{1-k^2}} = \sqrt{\frac{2k}{1+k}} \quad (25)$$

Уравнение (23) примет вид:

$$V_p^* = \pi^2 b n d^2 \sqrt{2k(1-k)}, \quad (26)$$

или

$$V_p^* = \pi^2 i_b n d^3 \sqrt{2k(1-k)}, \quad (27)$$

По последнему уравнению рассчитывают коэффициент насосного эффекта:

$$L_p = \frac{V_p^*}{n d^3} = \pi^2 i_b \sqrt{2k(1-k)}, \quad (28)$$

который приобретает постоянное значение только для  $i_b = \text{const}$  и  $k = \text{const}$ .

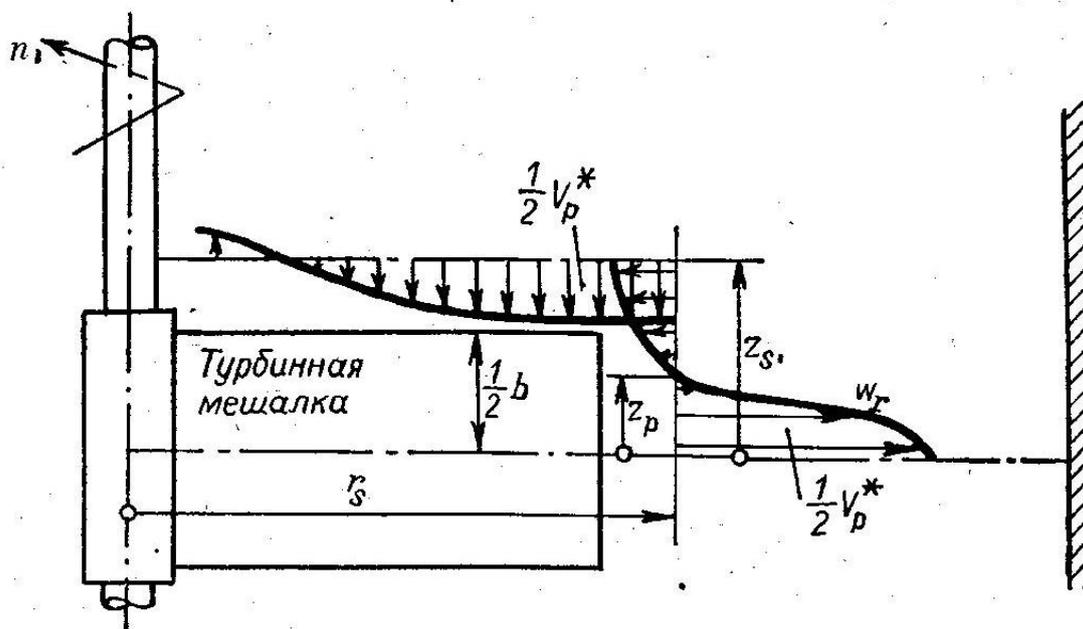


Рис. 3. Вспомогательная схема распределения скоростей для вычисления насосного эффекта мешалки [1].

Уравнения (23), (24), (26) и (27) можно применять для идеального ротора. Поэтому они имеют главным образом

теоретическое значение. Но могут также применяться для практических расчетов, если известно значение коэффициента  $k$ .

На рис. 3 представлено распределение скорости  $w_r = f(r, z)$  для аппарата с мешалкой без перегородок, причём значение  $w_r = 0$  достигается в пределах мешалки, отсюда  $z_p < b/2$ .

### Выводы

1. Разработана математическая модель гидродинамики движения частиц мятки в чане жаровни как единый процесс перемещения потоков мятки по горизонтальным концентрическим окружностям и вертикальным (меридианным), пересекающими ось чана. Гидродинамика позволяет определить время движения частиц мятки по обогреваемому днищу чана и по направлению оси чана. Время прохождения мятки по лопасти мешалки позволяет обосновать режимы кондуктивного теплообмена. Время прохождения по оси чана позволяет обосновать режимы конвективного тепло- влагообмена.

2. Установлено, что движение частиц по свободной лопатке отличается от движения частиц в турбулентной мешалке чанной жаровни. В пространстве, описываемом вращающейся мешалкой, наблюдается наиболее сильное уплотнение линий тока, поэтому в этой зоне происходит наиболее интенсивное перемешивание жидкости. В объёме аппарата выделяются две зоны – зону мешалки, в которой происходит интенсивное перемешивание, и зону циркуляции, в которой перемешивание происходит с меньшими скоростями.

3. Применена теория вихревых насосов для анализа гидродинамики движения мятки в чанной жаровне через межлопастные пространства ротора мешалки. Теория учитывает насосный эффект, влияющий на вторичную циркуляцию мятки и соответственно процесс интенсификации конвективного перемешивания и теплообмена в многочанных жаровнях.

### Список литературы

1. *Стренк Ф.* Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша, 1971. Пер. с польск. под ред. Щупляка И. А. Ленинград. Химия. 1975. 384 с.
2. *Алексян И. Ю., Тутова Л. М., Нугманов А. Х.* Моделирование процесса сушки дискретного материала в кипящем слое // *Техника и технология пищевых производств.* 2014. №3. С. 96—102.
3. *J. Liua, M. Abdalbasit, A. Gasmallaa, P. Lia, R. Yang.* Enzyme-assisted extraction processing from oilseeds: Principle, processing and application // *Innovative Food Science & Emerging Technologies.* 2016. Vol. 35. P. 184—193.
4. *Th. A. McKeon, D. L. Brandon, X. He.* Improved method for extraction of castor seed for toxin determination // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.* 2016. Vol. 5. P. 56—57.

5. *Дидур В., Ткаченко В., Ткаченко А., Дидур В.* Математическая модель процесса подготовки масличного сырья в многоканной жаровне // MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture an international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Lublin-Rzeszów. 2016. Vol. 18. № 1. P. 29—36.
6. *Василенко П. М.* Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев. Украинская академия сельскохозяйственных наук. 1960. 280 с.
7. *Справочник конструктора сельскохозяйственных машин, в четырёх томах / Под ред. М. И. Клецкина, изд. 2-е пер. и доп.* Москва. Машиностроение. 1967. 722 с.
8. *Nagata S., Yamamoto K., Hashimoto, Naruse Y.* Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 22. 1960. 68.
9. *Ziolkowski Z.* Destylacja i ректыция w przemyśle chemicznym. WNT. Warszawa, 1966. 120.
10. *Uhl V. W., Gray J. B.* Mixing Theory and Practice. T. I. Fcademie Press. New York. 1966. 240.

### References

1. *Strenk F.* (1975). Mixing and apparatus with mixers. Poland. Per. with Pol. under the editorship of I. A. Schuplyak Leningrad. Chemistry. 384.
2. *Alexanian S. Yu., Titova, L. M., Nugmanov A. X.* (2014). Modeling of drying process of a discrete material in a fluidized bed // Equipment and technology of food production. No. 3. 96-102.
3. *J. Liua, M. Abdalbasit, A. Gasmallaa, P. Lia, R. Yang.* (2016). Enzyme-assisted extraction processing from oilseeds: Principle, processing and application // Innovative Food Science & Emerging Technologies. Vol. 35. 184-193.
4. *Th. A. McKeon, D. L. Brandon, X. He.* (2016). Improved method for extraction of castor seed for toxin determination // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. Vol. 5. 56-57.
5. *Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V.* (2016). Mathematical model of the process of preparation of oilseed raw materials in mnogozonnoy brazier // MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture an international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Lublin-Rzeszów. Vol. 18. № 1. 29-36.
6. *Vasilenko P. M.* (1960). The theory of the motion of particles on rough surfaces agricultural machines. Kiev. Ukrainian Academy of agricultural Sciences. 280.
7. *Reference designer of agricultural machines, in four volumes* (1967). Under the editorship of M. S. Kleckina, ed. 2nd floor and an additional. Moscow. Engineering. 722.
8. *Nagata S., Yamamoto K., Hashimoto, Naruse Y.* (1960). Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 22. 68.
9. *Ziolkowski Z.* (1966). Destylacja i ректыция w przemyśle chemicznym. WNT. Warszawa, 120.
10. *Uhl V. W., Gray J. B.* (1966). Mixing Theory and Practice. T. I. Fcademie Press. New York. 240.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В БАГАТОЧАННІЙ ЖАРОВНІ ПРИ СМАЗЕННІ МЯТКИ РИЦИНИ**

***В. А. Дідур, В. А. Ткаченко, А. В. Ткаченко, В. В. Дідур,  
А. А. Ассєв***

**Анотація.** Розроблено математичну модель гідродинаміки руху частинок мяткі в чані жаровні як єдиний процес переміщення потоків мяткі по горизонтальних концентричних колах і вертикальним (меридіанними), що перетинають вісь чана. Основою моделі є диференціальне рівняння руху частинки по лопатці, що обертається навколо осі по обігривається днищу чана жаровні. Рівняння враховує конструктивні особливості мішалки, частоту обертання лопатей, їх довжину і фізичну характеристику мяткі виражені через коефіцієнти тертя. Рішення рівняння дозволяє визначити швидкість руху частинки в напрямку лопатки і окружну швидкість, час руху по лопаті. Це є вихідними даними для осьового руху мяткі. Час проходження мяткі по лопаті мішалки дозволяє обґрунтувати режими кондуктивного тепло- вологообмена. Час проходження по осі чана дозволяє обґрунтувати режими конвективного тепло- вологообмена.

Однак рух частинок по вільній лопатці відрізняється від руху частинок в турбулентному мешалке Чанної жаровні. У просторі, описуваному обертається мішалкою, спостерігається найбільш сильне ущільнення ліній струму, тому можна припускати, що в цій зоні буде відбуватися найбільш інтенсивне перемішування рідини. В обсязі апарату виділяються дві зони - зону мішалки, в якій відбувається інтенсивне перемішування, і зону циркуляції, в якій перемішування відбувається з меншими швидкостями. Для проведення аналізу гідродинамічних проблем, пов'язаних з рухом мяткі в Чанної жаровні через межлопасть простору ротора мішалки, використовувалася теорія вихрових насосів.

**Ключові слова:** турбінна мішалка, гідродинаміка перемішування, колова (периферійна) циркуляція, радіально-осьова циркуляція, багаточанна жаровня, моделювання

## **MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN MULTI-PURPOSE BRAZIER WHEN FIRING BUTTERFLY**

***V. A. Didur, V. A. Tkachenko, A. V. Tkachenko, V. V. Didur,  
A. A. Awseew***

**Abstract.** The mathematical model of hydrodynamics of movement of particles crushed seeds in brazier tub as uniform process of moving of streams crushed seeds on horizontal concentric circles and vertical (meridian), crossing tub axis is developed. A model basis is differential equation of movement of particle on shovels, rotating round an axis on

*the warmed bottom of tub of brazier. The equation considers design features of a mixer, frequency of rotation of blades, their length and the physical characteristic crushed seeds the friction expressed through factors. The equation decision allows to define speed of movement of a particle in a direction of a shovel and district speed, movement time on the blade. It is initial data for axial movement crushed seeds. Passage time crushed seeds on the mixer blade allows to prove modes conductive warmly – moisture exchange. Passage time on a tub axis allows to prove modes convective warmly – moisture exchange.*

*However movement of particles on free shovel differs from movement of particles in turbulent mixer vats braziers. In space described by rotating mixer, the strongest consolidation of lines of current is observed, therefore it is possible to assume, that in this zone there will be the most intensive hashing of a liquid. In device volume two zones – mixer zone in which there is intensive hashing, and circulation zone in which hashing occurs to smaller speeds are allocated. For carrying out of analysis of hydrodynamic problems connected with movement crushed seeds in vats to brazier through volume between shovels of space of rotor of mixer, it was used by theory of vortical pumps.*

**Key words: turbine mixer, hashing hydrodynamics, district (peripheral) circulation, radially-axial circulation, multival brazier, modelling**

УДК 621.87

## **ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНА З УРАХУВАННЯМ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА**

***В. С. Ловейкін, доктор технічних наук***

***В. В. Крушельницький, здобувач\****

***e-mail: lovvs@ukr.net***

**Анотація.** У роботі проведений динамічний аналіз руху мостового крана для перехідного процесу пуску механізму переміщення мостової балки, руху на усталеній швидкості, процесу гальмування та залишкових коливань. Для отримання графічних залежностей, що характеризують досліджувані режими,

**\*Науковий керівник – доктор технічних наук В. С. Ловейкін**

© В. С. Ловейкін, В. В. Крушельницький, 2017