

**Теоретическое определение закономерностей распределения
давления на лопасть лопастных мешалок в ёмкостном
оборудовании**

Николаев Б.Л., Арет В.А., Николаев Л.К.
lev.nikolaew@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

В статье приводятся формулы для расчёта: распределения давления по длине лопасти, определение точки максимального давления, вычисления результирующей силы сопротивления среды и точки приложения результирующей силы.

Ключевые слова: давление, лопасть, мешалка, ёмкость, неньютоновские жидкости, результирующая сила, степенной закон, эффективная вязкость.

**Theoretical determination of distribution normality's of blade
pressure of melting blades in volume tanks**

Nikolaev B.L., Aret V.A., Nikolaev L.K.

lev.nikolaew@yandex.ru

The article describes formulas for the procedure: pressure distribution on at full length impeller blade, determination bearing maximum pressure, computing resulting resistance force surroundings and point of resulting force application

Key words: pressure, blade, mixer, capacity, non-Newtonian dripping, resulting force, power law, effective viscosity

В различных отраслях пищевой промышленности находят широкое применение процессы перемешивания в ёмкостях с лопастными мешалками сред, обладающих неньютоновскими свойствами [1].

В данной работе рассмотрена задача по определению расходуемой энергии при перемешивании вязких сред в ёмкостном оборудовании с лопастными мешалками шибера типа. Задача решается для малого угла наклона лопасти при ламинарном режиме течения. Такие условия являются преобладающими при перемешивании вязких жидкостей.

Для расчёта мощности, затрачиваемой на перемешивание вязких сред в ёмкостях с лопастными мешалками шибера типа и для прочностных расчётов этих мешалок необходимо знать распределение давления по длине

лопасти и точку приложения результирующей силы. В известных работах [2÷4] по определению расходуемой энергии с использованием лопастных мешалок, но не шибераго типа, не уделялось должного внимания теоретическому нахождению точки приложения результирующей силы сопротивления обрабатываемой среды и распределению давления по длине лопасти для неньютоновских сред. Это создавало определённый пробел в теории данного вопроса. В данной работе предпринята попытка решить данную задачу теоретически.

Примем следующие допущения. Угол наклона лопасти к стенке ёмкости будем считать малым, то есть не превышающим 15° . Примем также, что диаметр ёмкости много больше, чем длина лопасти, поэтому стенку ёмкости на участке, равном длине лопасти, приближённо можно считать плоскостью.

На рис 1. схематически изображена стенка ёмкости с лопастью и приведены необходимые обозначения. Здесь: 1 – лопасть; 2 – стенка ёмкости; Ox – ось абсцисс, проведённая по биссектрисе угла между стенкой ёмкости и лопастью; Oy – ось ординат, перпендикулярная оси абсцисс; D – произвольно выбранная точка между лопастью и стенкой; x – координата точки D по оси абсцисс, м; y – координата точки D по оси ординат, м; y_d – расстояние от стенки ёмкости до точки D , м; h – расстояние от стенки ёмкости до лопасти на уровне точки D , м; h_0 – расстояние между началом лопасти и стенкой, м; h_1 – расстояние между концом лопасти и стенкой, м; a – проекция длины лопасти на стенку ёмкости, м; x_m – координата точки с максимальным давлением по оси абсцисс, м; h_m – расстояние между стенкой ёмкости и лопастью на уровне точки с максимальным давлением, м.

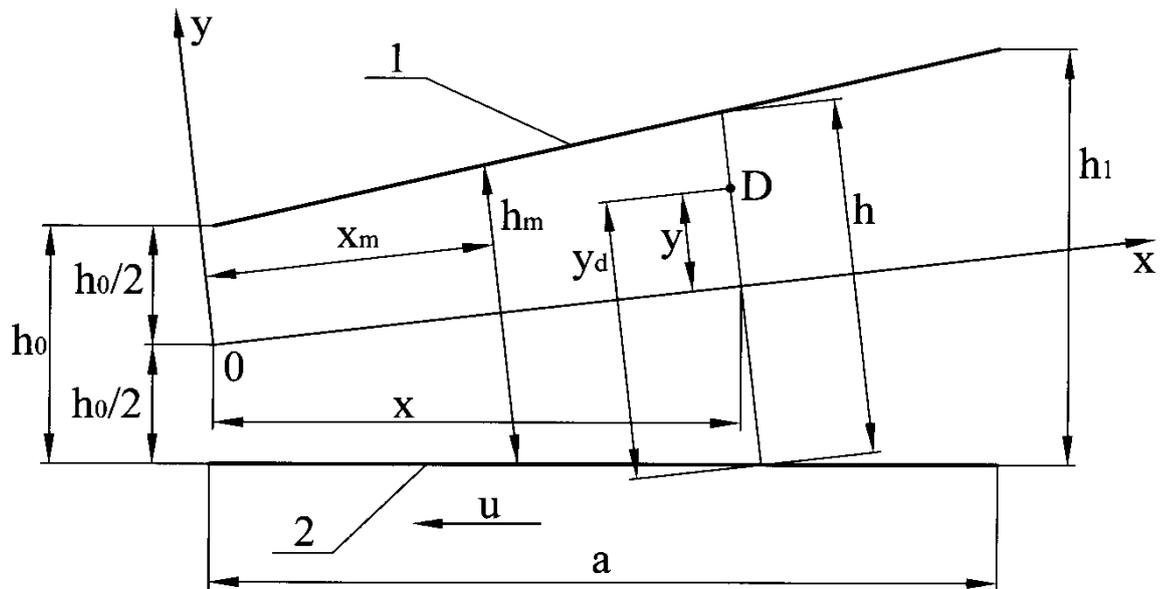


Рис. 1. Схематическое изображение шиберной лопасти и участка стенки ёмкости.

Из рис. 1 видно, что: $y_d = y + \frac{h}{2}$. (1)

Введём коэффициент наклона лопасти k_n : $k_n = \frac{h_1 - h_0}{h_0}$, (2)

где k_n – коэффициент наклона лопасти.

Важно понимать, что коэффициент наклона, как это видно из уравнения (2), не есть тангенс угла наклона лопасти к стенке ёмкости.

Из (2) следует, что: $h = h_0 \cdot \left(1 + k_n \cdot \frac{x}{a}\right)$. (3)

Скорость движения лопасти относительно стенки ёмкости u можно вычислить по общеизвестной формуле:

$$u = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot d, \quad (4)$$

где u – скорость движения лопасти, м/с; n – частота вращения вала мешалки, с⁻¹; d – расстояние от оси вращения мешалки до середины лопасти, м.

Будем считать, что жидкость подчиняется степенному закону течения:

$$\mu_{эф} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость, Па·с; k – коэффициент Оствальда, Па·с;

$\dot{\gamma}$ – градиент скорости, с^{-1} ; m – показатель неньютоновского поведения.

Для ламинарного режима течения в общем виде проекция уравнения движения на ось OX имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; t – время, с; v_x, v_y, v_z – проекции скорости частицы жидкости на, соответственно, оси O x, Oy, Oz ; p – избыточное давление, Па; $\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ – касательные напряжения на площадках, перпендикулярных первому индексу в направлении второго индекса;

g_x – проекция ускорения свободного падения на ось O x .

Так как ось O x близка к горизонтали, $g_x=0$. Будем считать поток

стационарным, тогда $\frac{\partial v_x}{\partial t}=0$. Из-за малого наклона верхней пластины и

ламинарности потока $\frac{\partial v_x}{\partial x}=0$. Полагаем, что компоненты скорости по осям

O y и O z отсутствуют ($v_y=v_z=0$). Полагаем также, что напряжения сдвига не

меняются в направлениях O x и O z $\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \right)$. Тогда напряжение

сдвига τ_{yx} будет функцией координаты y . Опуская индексы при напряжениях, получим из (6) уравнение движения равновесия:

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

Приняв $\tau(y)=\tau_1(y)+\tau_2(y)$, получим:

$$\frac{d\tau_1}{dy} + \frac{d\tau_2}{dy} = \frac{dp}{dx}; \quad \frac{d\tau_1}{dy} = \frac{dp}{dx}; \quad \frac{d\tau_2}{dy} = 0, \quad (8)$$

где τ_1 – касательное напряжение под действием перепада давлений, Па;

τ_2 – касательное напряжение под действием движения пластины, Па.

Физически это означает разбиение данной задачи на две задачи: течение между неподвижными пластинами под действием перепада давлений и течение под действием движения нижней пластины при отсутствии перепада давлений. То есть во второй части задачи условно будем считать, что стенка ёмкости движется относительно лопасти со скоростью u . Именно это условное направление движения нижней пластины (то есть стенки ёмкости) показано на рис. 1, как u .

Интегрируя уравнение (8) для τ_1 , получим:

$$\tau_1 = \frac{dp}{dx} \cdot y + C_1 \quad (9)$$

где C_1 – константа.

В силу симметрии потока при $y=0$, $\tau_1=0$ и $C_1=0$ реологическое уравнение можно записать в виде:

$$\tau_1 = \mu_{эф} \cdot \frac{dv_{x1}}{dy} = \mu_{эф} \cdot \dot{\gamma}, \quad (10)$$

где v_{x1} – скорость движения жидкости между неподвижными пластинами под действием перепада давлений, м/с.

Тогда из (5) получим:

$$\tau_1 = k \cdot \left(\frac{dv_{x1}}{dy} \right)^m \quad (11)$$

Из выражений (11) и (9) получим:

$$dv_{x1} = \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot y^{\frac{1}{m}} dy, \quad (12)$$

и

$$v_{x1} = \frac{m}{m+1} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot y^{m+1} + C_2, \quad (13)$$

где C_2 – константа.

По условию прилипаемости жидкости к стенкам канала запишем:

$$y = \pm \frac{h}{2}; \quad v_{x1} = 0. \quad (14)$$

Определив по условиям (14) константу интегрирования C_2 , запишем:

$$v_{x1} = \frac{m}{m+1} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(|y|^{m+1} - \left(\frac{h}{2} \right)^{m+1} \right). \quad (15)$$

С учётом (1) уравнение (15) можно представить в виде:

$$v_{x1} = \frac{m}{m+1} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\left| y_d - \frac{h}{2} \right|^{m+1} - \left(\frac{h}{2} \right)^{m+1} \right). \quad (16)$$

Проведём преобразование и интегрирование для движения потока под действием движения нижней пластины:

$$\frac{d\tau_2}{dy} = 0; \quad \frac{d}{dy} \left(k \cdot \frac{dv_{x2}}{dy} \right) = 0;$$

$$p = \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} dx;$$

$$k \cdot \left(\frac{dv_{x2}}{dy} \right)^m = C_3; \quad \frac{dv_{x2}}{dy} = \left(\frac{C_3}{k} \right)^{\frac{1}{m}} = C_4; \quad v_{x2} = C_4 \cdot y + C_5, \quad (17)$$

где v_{x2} – скорость движения жидкости под действием движения нижней пластины при отсутствии перепада давлений, м/с; C_3, C_4, C_5 – константы.

Запишем краевые условия и определим константы интегрирования:

$$v_{x2} = -u; \quad v_{x2} \cdot \left(\frac{h}{2} \right) = 0; \quad -u = C_4 \cdot \frac{h}{2} + C_5;$$

$$0 = C_4 \cdot \frac{h}{2} + C_5; \quad C_5 = -\frac{u}{2}; \quad C_4 = \frac{u}{h}. \quad (18)$$

$$\text{Тогда, при } y = y_d - \frac{h}{2}: \quad v_x = -\frac{u}{h} \cdot \left(y_d - \frac{h}{2} \right), \quad (19)$$

где v_x – результирующая скорость движения жидкости, м/с.

И по принципу адитивности решений получим:

$$v_x = v_{x1} + v_{x2} = \frac{m}{m+1} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{1/m} \cdot \left(\left| y_d - \frac{h}{2} \right|^{m+1} - \left(\frac{h}{2} \right)^{m+1} \right) - \frac{u}{h} \cdot \left(y_d - \frac{h}{2} \right). \quad (20)$$

Полагая расход через любое поперечное сечение между лопастью и стенкой ёмкости постоянным, можно записать:

$$\int_0^h v_x dy_d = Q, \quad (21)$$

где Q – расход жидкости, м³/с.

В результате интегрирования (21) получим:

$$\frac{m \cdot 2^{-\frac{1}{m}}}{2 \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}}} \cdot h^{\frac{2-m+1}{m}} + \frac{1}{2} \cdot u \cdot h = Q. \quad (22)$$

На участке $x = 0 \div a$ в точке с максимальным давлением x_m выполняется условие $\frac{dp}{dx} = 0$. Тогда из уравнения (22) следует:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot u \cdot h_m. \quad (23)$$

Подставив (23) в (22), запишем:

$$\frac{m \cdot 2^{-\frac{1}{m}}}{2 \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{m}}} \cdot h^{\frac{2-m+1}{m}} +$$

$$+\frac{1}{2} \cdot u \cdot h = \frac{1}{2} \cdot u \cdot h_m. \quad (24)$$

Из (3) следует:

$$dx = dh \cdot \frac{a}{h_0 \cdot k_n}. \quad (25)$$

Решим уравнение (24) относительно dp и в полученное решение подставим dx из (25). Получим:

$$dp = \exp\left(m \left(\ln\left(u|h_m - h|\frac{2m+1}{m}\right) - 2 \ln \left(\frac{h}{h_0}\right) \right)\right) \cdot \frac{\text{signum} \left(\frac{h_m - h}{h}\right) \cdot 2 \cdot \frac{a \cdot k}{h_0 \cdot k_n} dh, \quad (26)$$

где $\text{signum} \left(\frac{h_m - h}{h}\right)$ – функция MathCAD, представляющая собой знак выражения: если $\frac{h_m - h}{h} \leq 0$, то $\text{signum} = -1$; если $\frac{h_m - h}{h} > 0$, то $\text{signum} = +1$.

Проинтегрировать выражение (26) по dh в явном виде не представляется возможным. Поэтому произведём следующие преобразования.

Полагая, что избыточное давление p , создаваемое движением жидкости между лопастью и стенкой ёмкости, на концах лопасти равно 0, запишем условия:

$$p = 0 \text{ при } h \leq h_0 \text{ и} \\ p = 0 \text{ при } h \geq h_1 = h_0 \cdot \left(1 + k_n\right). \quad (27)$$

Исходя из данных условий, составим систему из двух уравнений. При помощи компьютера решим её численными методами, поскольку явное аналитическое решение отсутствует. Опуская промежуточные преобразования, запишем конечный результат:

$$h_m = 2 \cdot h_0 \cdot \frac{1 + k_n}{2 + A1 \cdot k^{B1}}, \quad (28)$$

где $A1$ и $B1$ – коэффициенты.

Компьютерная обработка позволила получить следующие формулы для расчёта коэффициентов $A1$ и $B1$:

$$A1 = \frac{1,68146 + 1,30487 \cdot m^{1,00506}}{1,98621 + m^{1,00506}}, \quad B1 = \frac{1,36332 + 1,11563 \cdot m^{1,0305}}{1,47902 + m^{1,0305}} \quad (29)$$

Графически зависимость (28) для трёх различных значений m показана на рис. 2. Верхняя кривая построена для $m=0,2$, средняя – для $m=0,5$, нижняя – для $m=1$.

Максимальная погрешность расчёта h_m по формулам (28) и (29) не превышает 0,25%. Столь высокая точность объясняется тем, что при составлении компьютерной программы для расчёта коэффициентов авторы

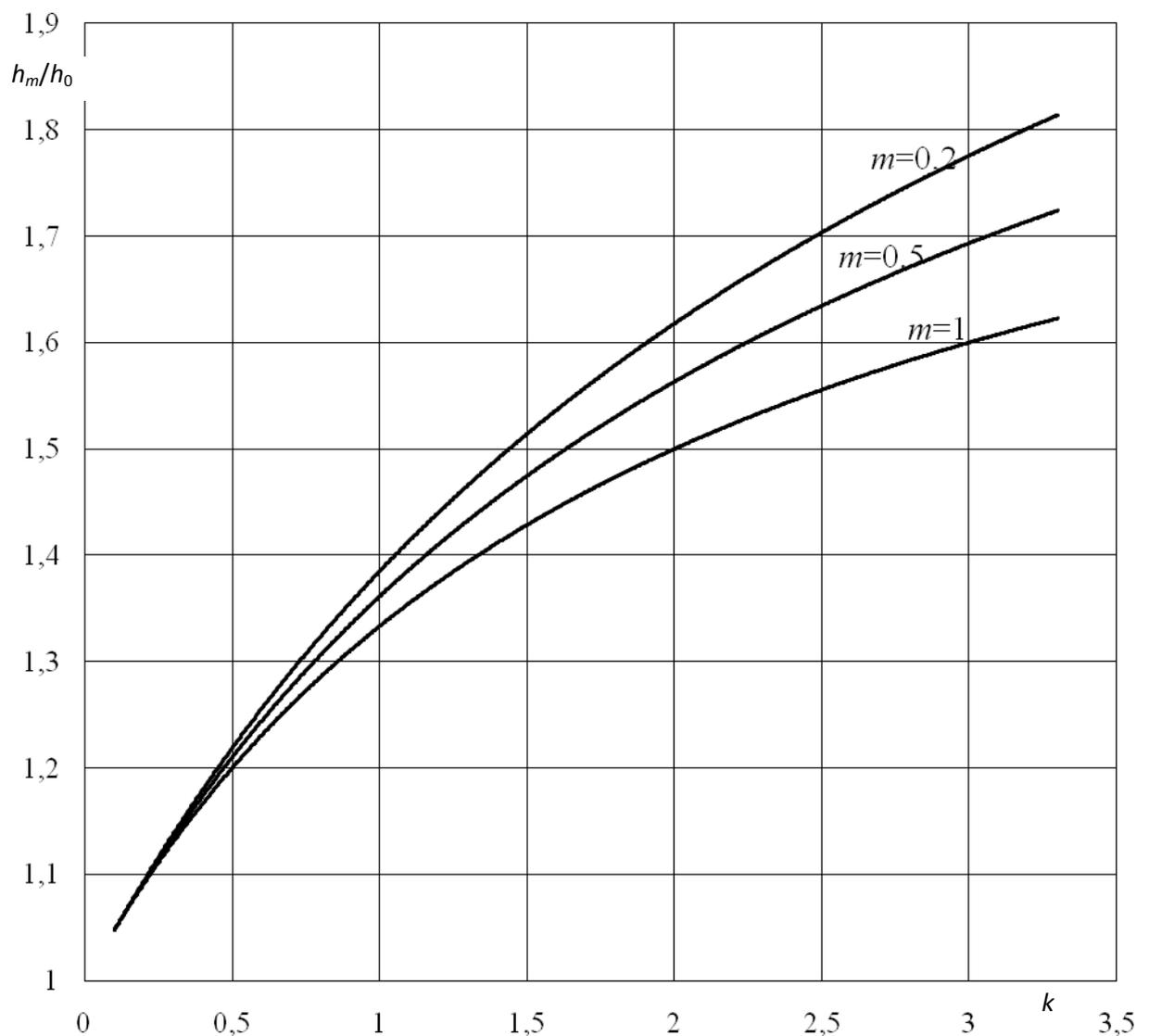


Рис. 4.4.3.2. Зависимость отношения h_m/h_0 для различных значений m .

использовали не стандартный метод наименьших квадратов, минимизирующий абсолютную величину среднеквадратичного отклонения, а метод, при котором минимизируется среднеквадратичное процентное отклонение.

Теперь, зная h_m , можно рассчитать избыточное давление в любой точке лопасти по формуле:

$$p = \int_{h_0}^h \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot |h_m - h| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(\frac{h_m - h}{h} \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(\frac{h_m - h}{h} \right)} \cdot \frac{a \cdot k}{h_0 \cdot k_h} dh. \quad (30)$$

В расчётах обычно фигурирует не расстояние между лопастью и стенкой h , а расстояние x от начала лопасти до данной точки. Поэтому, взяв h из (3), а dh из (25), получим:

$$p = \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot k dx. \quad (31)$$

При современном уровне развития вычислительной техники выражение (31) легко просчитать на компьютере с использованием MathCAD для любого значения x , поэтому приводить какую-либо приближённую формулу и тем самым увеличивать погрешность вычислений авторы считают нецелесообразным.

Как следует из (27), интеграл в уравнении (31) равен 0 при верхнем пределе интегрирования, равном a . Поэтому при компьютерных расчётах можно для вычисления h_m , входящего в (31), вместо приближённой формулы (28) пользоваться следующей зависимостью: $h_m = \text{root}$ ■

$$\int_0^a \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_h \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx, h_m \quad (32)$$

где, root – функция MathCAD, возвращающая значение переменной, стоящей в скобках после запятой, то есть h_m , при котором значение функции, стоящей в скобках до запятой, равно нулю.

Разумеется, в программе расчёта формулу (32) нужно записывать перед формулой (31).

Зная h_m , с учётом (3) можно рассчитать координату точки с максимальным давлением по оси Ox следующим образом:

$$x_m = \frac{h_m - h_0}{h_0 \cdot k_H} \cdot a, \quad (33)$$

где x_m – координата x точки с максимальным давлением, м.

Теперь, исходя из формулы (31), можно вычислить суммарную силу давления на лопасть:

$$F = b \cdot k \cdot \int_0^a \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \quad (34)$$

где F – суммарная сила давления потока, Н; b – высота лопасти, м.

Координату x_c точки приложениия результирующей силы давления вычислим, исходя из уравнения моментов. С учётом формулы (31) имеем:

$$x_c = \frac{b \cdot k}{F} \cdot \int_0^a x \cdot \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \quad (35)$$

где x_c – координата точки приложениия результирующей силы давления по оси Ox , м.

Расчёты показывают, что значение x_c всегда несколько больше значения x_m . То есть при таком взаимном расположении лопасти и стенки, которое показано на рис. 1, точка приложениия результирующей силы давления будет всегда правее точки с максимальным давлением.

На рис. 3 в качестве примера представлен график распределения давления по длине лопасти.

Для вычисления плеча силы F значение x_c , рассчитанное по формуле (35), подставляем в (3), и полученное значение отнимаем от половины диаметра ёмкости. Таким образом, момент силы F будет равен:

$$\begin{aligned}
 M &= F \cdot \left(\frac{D}{2} - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x_c}{a} \right) \right) = \\
 &= b \cdot k \cdot \cdot \int_0^a \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \cdot \left(\frac{D}{2} - h_0 \cdot \left(1 + \frac{k_H}{a} \cdot \frac{b \cdot k}{F} \cdot \int_0^a x \cdot \right. \right. \\
 &\left. \left. \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \right) \quad (36)
 \end{aligned}$$

Мощность, затрачиваемая всеми шиберными лопастями на перемешивание, будет равна:

$$\begin{aligned}
 N &= 6,28 \cdot M \cdot n \cdot z = \\
 &= 6,28 \cdot n \cdot z \cdot b \cdot k \cdot \cdot \int_0^a \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \cdot \left(\frac{D}{2} - h_0 \cdot \left(1 + \frac{k_H}{a} \cdot \frac{b \cdot k}{F} \cdot \int_0^a x \cdot \right. \right. \\
 &\left. \left. \int_0^x \frac{2 \exp \left(m \cdot \left(\ln \left(u \cdot \left| h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right| \cdot \frac{2m+1}{m} \right) - 2 \ln \left(h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \right) \right)}{\text{signum} \left(h_m - h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right) \right) \cdot h_0 \cdot \left(1 + k_H \cdot \frac{x}{a} \right)} \cdot dx dx \right) \quad (37)
 \end{aligned}$$

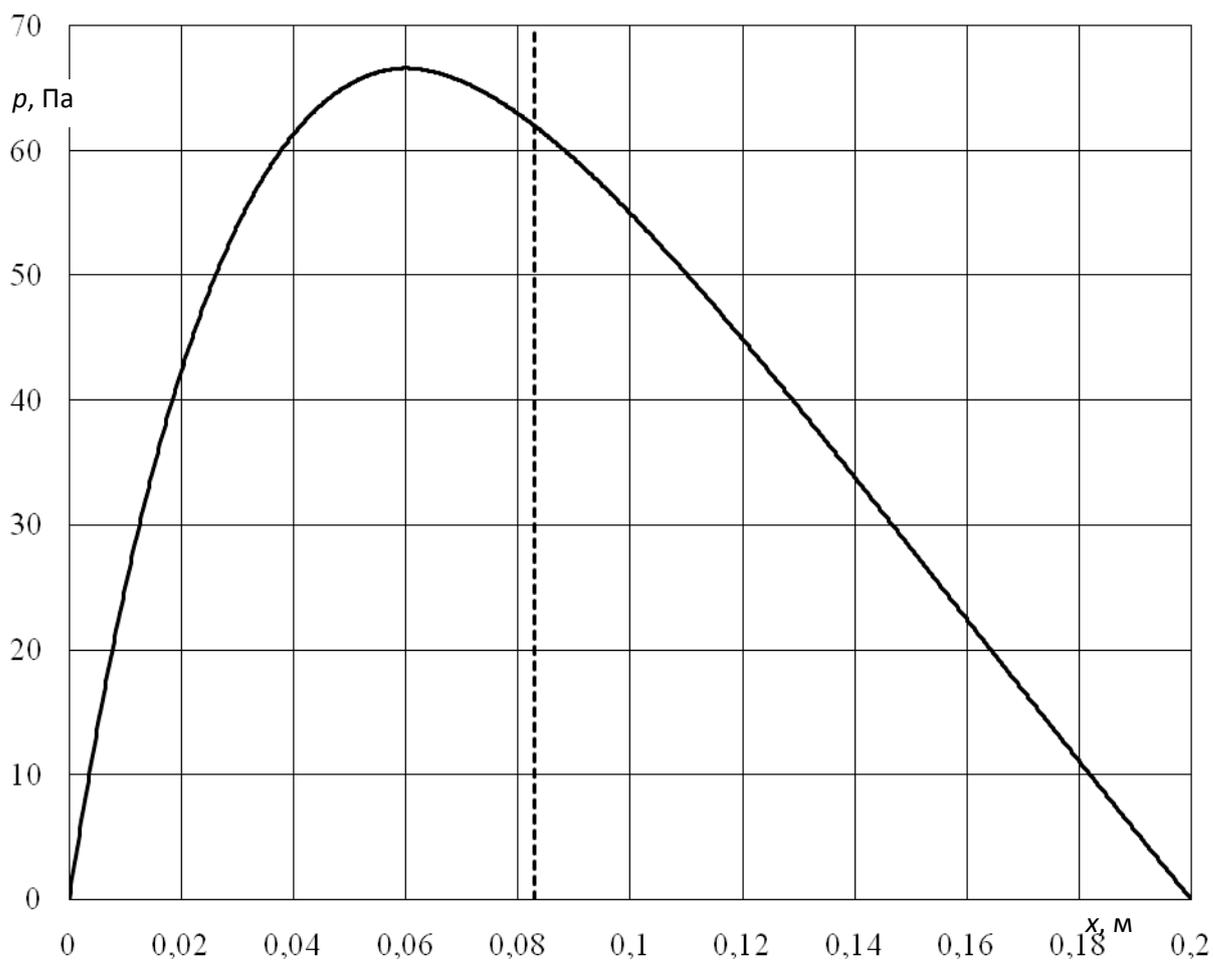


Рис. 3. График распределения давления по длине шиберной лопасти (вертикальной штриховой линией показана координата приложения результирующей силы давления x_c).

где z – число шиберных лопастей.

Формула (37), полученная теоретическим путём исключительно в результате математических преобразований, позволяет рассчитывать мощность, расходуемую перемешивающим устройством при угле установки лопастей менее 15° .

Список литературы:

- 1 Антипов С.Т., Кретов И.Т., Остриков А.Н., Панфилов В.А., Ураков О.А. Машины и аппараты пищевых производств. В 3 кн.- 2^е изд., - М.: Колос, 2009. – 610 с, 847 с, 551 с.
2. Бегачев В.И., Гурвич А.Р., Брагинский Л.Н. Обобщённый метод расчёта мощности при перемешивании высоковязких ньютоновских и неньютоновских сред // Теоретические основы химической технологии. – 1980. – Т. 14. – № 1. вып.1. – С. 109.

- 3 Регер Э.О., Лацер И. О расходе энергии, теплообмене и времени пребывания в реакторах со скребковыми мешалками в области ламинарного течения // Теоретические основы химической технологии. – 1981. – Т. 15. вып.1.– С. 129.
- 4 Фройштетер Г.Б., Скурчинский В.А., Кравченко В.Р., Мамченко С.Д. Исследование закономерностей ламинарного течения и затрат мощности в скребковых аппаратах // Журнал прикладной химии. – 1978. – Том 51, вып. 1. – С. 107.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.