

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАВИХРИТЕЛЯ ПОТОКА К ТЕРМОВСТРУДЕРУ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КОМБИКОРМОВ

**В.А. ШАРШУНОВ**, член-корреспондент ААН РБ, д.т.н.;  
**А. В. ЧЕРВЯКОВ**, к.т.н; **С. В. КУРЗЕНКОВ**; **А.А. РАДЧЕНКО** (БГСХА)

Термическая обработка материалов, находящихся во взвешенном состоянии, широко применяется в различных отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Значительная интенсивность тепло- и массообмена, обусловленная гидродинамическими особенностями обтекания твердых частиц и развитой поверхностью теплообмена, а также условия, при которых стало возможным совмещение процесса тепловой обработки материала с транспортированием его, делают этот способ обработки весьма эффективным [1].

Данная технология может быть отнесена к "взрыву" зерна в кипящем потоке теплоносителя. Технология включает подготовку зерна по нескольким вариантам: с предварительным увлажнением и подогревом зерна; без подогрева и увлажнения; с предварительным шелушением и без него. Вслед за подготовкой зерна следует основной процесс термической декстринизации зерна и обеззараживания злаковых и бобовых в режиме высокоинтенсивных встречных паровых струй газозвеси [1].

Основные характеристики процесса [2,4]: время термовструдирования зерна 8-15 с, температура теплоносителя 350-600°C, степень взорванности зерна 1,5-2,2, степень декстринизации 35-70%, степень снижения ингибиторов трипсина в бобовых и ржи до 85-100 %. Затраты электроэнергии на 1 т обработанной продукции 70-90 кВт/ч. Установка термовструдирования зерна производительностью 2 тонны была внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию на АО "Экомол" (г. Орша). Здесь же эта технология прошла широкую производственную проверку и продукция с успехом использована при кормлении всех видов животных и птицы, что подтвердило ее эффективность.

В состав установки входит устройство ввода материала, воздуходувка, нагревательное устройство, ряд последовательно установленных пар разгонных и отводных труб, устройство вывода материала. Ра-

ботает установка следующим образом: зерно питателем подается в поток теплоносителя, который затем разветвляется на две разгонные трубы, направленные навстречу друг другу; после соударения струй газозвесь отводится по двум отводным трубам, расположенным под углом 90° к разгонным трубам; далее газозвесь последовательно проходит через ряд аналогичных пар разгонных и отводных труб и поступает в устройство для отделения материала от газа.

Проведенные производственные испытания позволили выявить основные недостатки данной конструкции, к которым можно отнести: неравномерность обработки материала, высокое гидравлическое сопротивление при встрече струй противоположных направлений и большого количества поворотов потока, что влечет повышенные энергетические затраты, невозможность регулировки времени и экспозиции термообработки материала, а также большие габариты установки, требующие выделения для нее значительных производственных площадей.

Для устранения вышеназванных недостатков сотрудниками БГСХА и ООО "Беламаплюс" предложены следующие изменения в конструкции установки:

1. Дополнительно к питателю установлено устройство в виде аэрожелоба, позволяющее устранить неравномерность подачи и равномерно распределить материал по всему сечению трубопровода;

2. Встречноструйная организация потока заменена на прямоточную;

3. Регулирование временем обработки материала в потоке теплоносителя осуществляется с помощью тормозных устройств - завихрителей потока.

На рис. 1 и рис. 2 изображены технологическая и компоновочная схемы описываемой установки.

Установка содержит воздуходувку 1, калорифер 2, питающее устройство 3 дисперсного материала, включающее (рис. 3) бункер 9, шлюзовый питатель

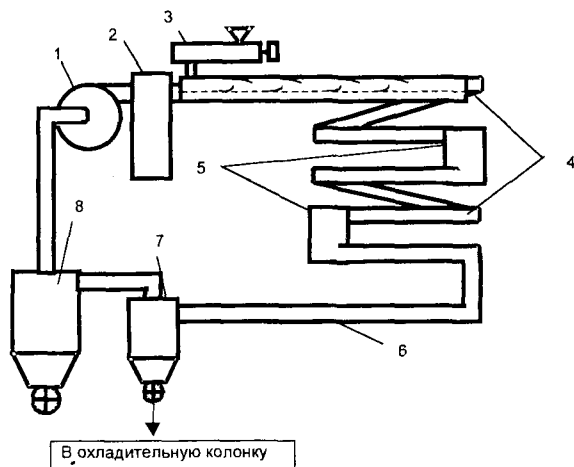


Рис. 1. Технологическая схема установки.

10, скатывающую заслонку 11, воздухоподводящий канал 12, воздухораспределительную перегородку 13, транспортирующий канал 14 с направляющими потока 15, расположенными в шахматном порядке сверху и снизу канала 5, Питающее устройство 3 соединяется с кольцевыми разгонными трубами 4. Между секциями устанавливаются тормозные устройства - завихрители потока 5, состоящие (рис. 4) из корпуса 16, выполненного в виде части цилиндра (усеченного конуса) и двух патрубков входного 17 и выходного 18, расположенных по касательной у основания корпуса. Кольцевые секции, образующие спираль, соединяются с выводной трубой 6. Выводная труба 6 заканчивается циклонами 7 и 8, предназначенными для отделения обрабатываемого дисперсного материала от газа теплоносителя и очистки теплоносителя от пыли.

Работа осуществляется следующим образом. Поток газа теплоносителя с помощью воздуходувки 1 через калорифер 2 направляют в воздухоподводящий канал питающего устройства 3, а затем через воздухораспределительную перегородку в транспортирующий канал. Туда же подают шлюзовым питателем 3 дисперсный материал, подлежащий термообработке. Здесь материал с помощью направлятелей распределяется как по длине канала, так и по площади сечения и, активно перемешиваясь, пода-

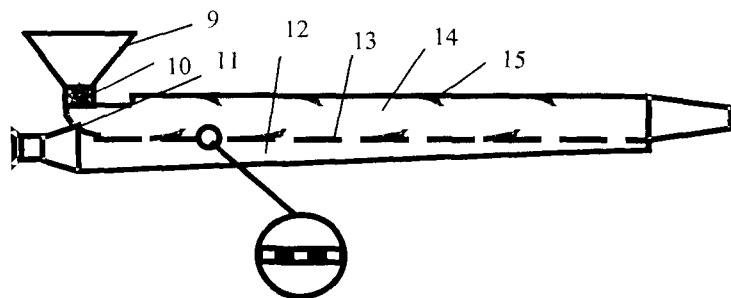


Рис. 3. Питающее устройство.

ется в кольцевые разгонные секции 4. Разогнанный материал направляют в тормозное устройство - завихритель потока 5, где он, двигаясь по образующей корпуса устройства, тормозится. Вынос материала из тормозного устройства в следующую кольцевую секцию осуществляется за счет вытеснения материала из внутренней зоны тормозного устройства - завихрителя через выпускной патрубок 18 (рис. 4) за счет поступления новых порций материала.

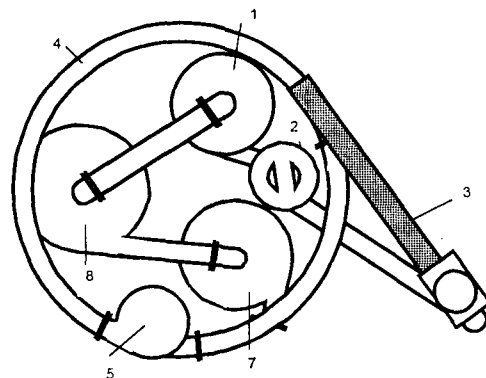


Рис. 2. Компонентная схема установки.

После завершения термообработки материал по выводной трубе 6, направляется в циклон 7, где осуществляется сепарация материала от газа, и затем поступает в охлаждающую колонку (рис. 1), а теплоноситель направляется в циклон 8, где очищается от пыли и затем вновь подается в установку.

Эффективность описанной конструкции установки для обработки дисперсных материалов определяется уменьшением габаритов и производственных площадей, занимаемых установкой, в 2,5-3 раза, упрощением конструкции установки при существенном снижении ее гидравлического сопротивления, уменьшением на 60% потерь тепла в окружающую среду; увеличением времени пребывания и возможностью его регулировки, а также равномерности обработки материала.

Однако данный способ обработки имеет свою специфику. Анализ литературных данных и проведенные исследования показали, что интенсивность

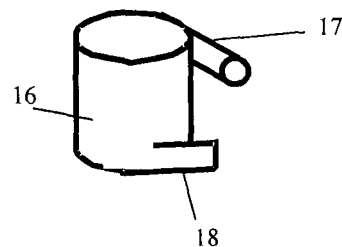


Рис. 4. Тормозное устройство - завихритель потока, общий вид.

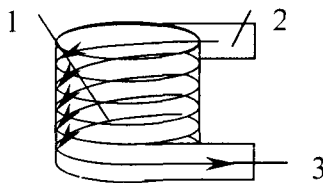


Рис. 5. Схема движения материала в тормозном устройстве.

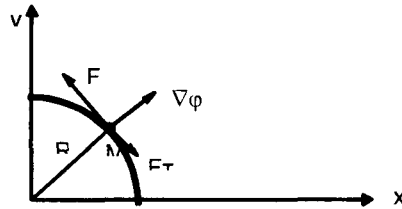


Рис. 6. Схема к расчету проекции траектории движения частицы.

теплообмена при такой организации процесса термообработки в направлении движения газовой смеси неодинакова. Наиболее эффективно работает начальный, сравнительно небольшой, участок аппарата, а затем происходит лишь поддержание температурных и скоростных режимов. Объясняется это тем, что в начальный момент времени наивысшая относительная скорость газов и материала и температурный напор. В дальнейшем наступает стабилизация тепловых и скоростных показателей, характеризующаяся незначительными изменениями температуры и скорости обрабатываемого материала. Таким образом, наиболее эффективно работает только начальный участок аппарата, сравнительно небольшой по своей протяженности, а остальную длину трубопровода зачастую приходится определять, исходя из необходимого времени пребывания материала для достижения нужного его качества. Поэтому значительная часть рабочей зоны при ее внушительных габаритах работает неэффективно.

Вследствие этого в последнее время наметилась тенденция к созданию аппаратов, в которых различным образом сочетаются так называемые участки "разгона" [3] и тормозные устройства - завихрители потока.

Нами предлагается конструкция такого устройства. Тормозное устройство - завихритель потока представляет собой часть цилиндра (перевернутого, усеченного конуса) с двумя патрубками входным и выходным, введенными по касательной к его образующей (рис. 5.).

Работа устройства осуществляется следующим образом. Разогнанный материал через патрубок 2 (рис. 5.) направляют в тормозное устройство-завихритель потока 1, где он, двигаясь по образующей корпуса устройства, интенсивно нагревается за счет соприкосновения со стенками корпуса, и, перемещаясь, тормозится. Вынос материала из тормозного устройства осуществляется за счет вытеснения материала из внутренней зоны тормозного устройства - завихрителя через выпускной патрубок 3 за счет поступления новых порций материала. При такой организации движения материала можно увеличить скорость и интенсивность нагрева материала,

а также получить нужную выдержку, при значительном снижении габаритов сушильного аппарата.

Так как основополагающими параметрами данного устройства являются время обработки и интенсивность теплообмена, зависящие от динамики движения материала,

то ниже мы приводим методику определения закона движения выделенной из всего потока частицы в предложенном тормозном устройстве-завихрителе.

Выделим из потока движущегося материала частицу, обозначив ее через  $M$ , и представив ее как материальную точку. Пусть  $M$  материальная точка траектории движения отдельной частицы материала с радиус-вектором  $r$ , имеющим координаты  $(x, y, z)$ . Тогда общее уравнение точки  $M$  будет иметь вид:

$$m r'' + \lambda r' + \chi \nabla \varphi = F + G, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  - параметр трения,  $\chi$  - модуль реакции опоры, создаваемой центробежной силой,  $F$  - сила действия потока,  $G$  - сила тяжести,  $\Delta \varphi$  - градиент к траектории.

Материальная точка  $M$  имеет сложное движение, которое можно представить как:

- 1) движение вокруг неподвижной оси  $z$ ;
- 2) поступательного движения вдоль оси  $z$ .

Рассмотрим первое движение.

Для этого спроектируем все силы на плоскость  $xOy$  (рис. 6). При этом предполагаем, что проекция траектории движения точки повторяет конфигурацию цилиндра.

$$\varphi(r) = x^2 + y^2 = R^2, \quad \nabla \varphi = (2x, 2y, 0) \quad (2)$$

$$\text{Т.к. } \nabla \varphi \perp \text{пр}_{xOy} \dot{r}, \text{ то } \nabla \varphi \cdot \text{пр}_{xOy} \dot{r} = 0. \quad (3)$$

Найдем координаты вектора  $F$  из условия, что

$$|F| = a, \quad F \perp r \Rightarrow$$

$$F = (-y, x, 0) \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} |F| = \frac{|F|}{R} (-y, x, 0) = \frac{a}{R} (-y, x, 0), \quad (4)$$

Найдем координаты вектора  $G$ , т.к. сила  $G$  направлена вдоль оси  $z$ , то  $G = (0, 0, -mg)$ .

Умножим (1) на  $(\dot{x}, \dot{y}, 0)$

$$m(\ddot{x}\dot{x} + \ddot{y}\dot{y}) + \lambda(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{a}{R}(-\dot{x}y + x\dot{y}), \quad (5)$$

$$\frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)' + \lambda(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{a}{R}(-\dot{x}y + x\dot{y}), \quad (6)$$

Обозначим:

$$u = -\dot{x}y + x\dot{y} - \text{секторная скорость} \quad (7)$$

$$W = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 - \text{проекция кинетической энергии}$$

$$\text{без } \frac{m}{2} \text{ на } xOy. \quad (8)$$

Получаем уравнение

$$\frac{m}{2} \dot{W} + \lambda W = \frac{a}{R} u \quad (9)$$

Умножаем (1) на  $(-y, x, 0)$ :

$$m(-\ddot{x}y + \ddot{y}x) + \lambda(-y\dot{x} + \dot{y}x) = \frac{a}{R}(y^2 + x^2),$$

$$\text{т.к. } -\ddot{x}y + x\ddot{y} = \dot{u}, \text{ получаем } m\dot{u} + \lambda u = aR. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) с учетом (7), (8) дают траекторию движения точки в плоскости  $xOy$ .

Для получения траектории поступательного движения точки  $M$  вдоль оси  $z$  умножим (1) на вектор  $e_3(0,0,1)$ .

$$\text{Получим: } m\ddot{z} + \lambda \dot{z} = -mg, \quad (11)$$

Тогда система диф. уравнений траектории движения точки с учетом преобразований (7), (8) будет выглядеть:

$$\begin{cases} (m/2) \dot{W} + \lambda W = (a/R) u \\ m\dot{u} + \lambda u = aR \\ m\ddot{z} + \lambda \dot{z} = -mg \end{cases}, \quad (12)$$

Решим систему (12) с учетом начальных условий:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_0 &= 0 \\ z_0 &= h \\ u_0 &= V_0 R \\ W_0 &= V_0^2 \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где  $V_0$  - начальная горизонтальная скорость,  $h$  - высота цилиндра.

Получим:

$$\begin{cases} W = \frac{a^2}{\lambda^2} + 2\frac{a}{\lambda}(V_0 - \frac{a}{\lambda})e^{-\frac{\lambda}{m}t} + (V_0 - \frac{a}{\lambda})^2 e^{-\frac{2\lambda}{m}t} \\ U = \frac{a}{\lambda}R + R(V_0 - \frac{a}{\lambda})e^{-\frac{\lambda}{m}t} \\ z = h + \frac{m}{\lambda}(z_0 + \frac{mg}{\lambda})(1 - e^{-\frac{\lambda}{m}t}) - \frac{mg}{\lambda}t \end{cases}, \quad (14)$$

Для нахождения траекторий движения точки  $M$  по осям  $x$  и  $y$  продelaем обратные преобразования к (7) и (8) с учетом начальных условий:

$$\begin{cases} x_0 = R \\ y_0 = 0 \\ \dot{x}_0 = 0 \\ \dot{y}_0 = R \end{cases} \quad (15)$$

$$x = R \cos\left(\frac{1}{R^2} \int_0^t u dt\right), \quad y = R \sin\left(\frac{1}{R^2} \int_0^t u dt\right), \quad (16)$$

Приняв во внимание

$$\frac{1}{R^2} \int_0^t u dt = \frac{1}{R} \left[ \frac{a}{\lambda} t + \frac{m}{\lambda} (V_0 - \frac{a}{\lambda}) (1 - e^{-\frac{\lambda}{m}t}) \right], \quad (17)$$

получим систему уравнений, составляющих траекторию движения отдельной частицы в предложенном тормозном устройстве - завихрителе потока:

$$\begin{cases} x = R \cos \left\{ \frac{1}{R} \left[ \frac{a}{\lambda} t + \frac{m}{\lambda} \left( V_0 - \frac{a}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\lambda}{m}t} \right) \right] \right\} \\ y = R \sin \left\{ \frac{1}{R} \left[ \frac{a}{\lambda} t + \frac{m}{\lambda} \left( V_0 - \frac{a}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\lambda}{m}t} \right) \right] \right\} \\ z = h - \frac{mg}{\lambda} t + \frac{m}{\lambda} \left( z_0 + \frac{mg}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\lambda}{m}t} \right) \end{cases} \quad (18)$$

Данная система уравнений позволяет, исходя из заданных технологических режимов обработки материала (нужной выдержки), определить конструктивные параметры (высоту и радиус) предлагаемого тормозного устройства - завихрителя потока, имеющего форму цилиндра.

Однако на практике возможны варианты использования тормозных устройств, имеющих форму отличную от цилиндра.

Использование предлагаемой математической модели рассмотрим на примере тормозного устройства - завихрителя потока в форме усеченного, перевернутого конуса (рис. 7).

Для этого устройство представляется в виде совокупности  $n$  элементов, имеющих базисную форму с высотами  $h_i$  и радиусами оснований  $R_i$  ( $i=1..n$ ). Выбор радиусов  $R_1$  и  $R_n$  определяется характером движения материала в соответствующих элементах устройства и определяется по формуле:

$$R = kd_p^{1/2}, \quad (19)$$

где  $d$  - диаметр трубопровода;  $k$  - коэффициент, учитывающий характер движения материала ( $k=3,65..6,5$ ). За высоту элементов принимаем

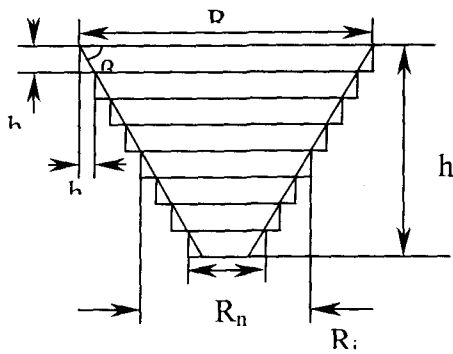


Рис. 7. Схема к расчету завихрителя потока.

$h_r = h_r \cdot \text{tg}(\beta)$ , где  $h_r \ll R$  - шаг изменения радиусов элементов,  $\beta$  - угол при большем основании устройства. Радиусы остальных элементов находятся по формуле:  $R_{i+1} = R_i - i h_r$  ( $i=1..n-2$ ).

Тогда поэлементное движение частицы примет вид:

$$\begin{cases} x_i = R_i \cdot \cos \left\{ \frac{1}{R_i} \cdot \left[ \frac{a}{\lambda} \cdot t_i + \frac{m}{\lambda} \cdot \left( V_i - \frac{a}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{a}{m} t_i} \right) \right] \right\} \\ y_i = R_i \cdot \sin \left\{ \frac{1}{R_i} \cdot \left[ \frac{a}{\lambda} \cdot t_i + \frac{m}{\lambda} \cdot \left( V_i - \frac{a}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{a}{m} t_i} \right) \right] \right\} \\ z_i = h_i - \frac{m \cdot g}{\lambda} \cdot t + \frac{m}{\lambda} \cdot \left( \dot{z}_0 + \frac{m \cdot g}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{a}{m} t_i} \right) \end{cases}, \quad (20)$$

где:  $i=1..n$ .

Время движения частицы материала в элементе устройства  $t_i$  определяется из третьего уравнения системы, принимая во внимание  $z_i=0$ :

$$h_i - \frac{m \cdot g}{\lambda} \cdot t + \frac{m}{\lambda} \cdot \left( \dot{z}_0 + \frac{m \cdot g}{\lambda} \right) \left( 1 - e^{-\frac{a}{m} t_i} \right) = 0 \quad (21)$$

С помощью системы (2) определяются конечные скорости движения частицы вокруг и вдоль неподвижной оси Z, которые в свою очередь будут начальными для следующего элемента:

$$V_i = \left( \frac{a}{\lambda} + \left( V_{i-1} - \frac{a}{\lambda} \right) \cdot e^{-\frac{\lambda}{m} t_i} \right)^2 \text{ при условии, что } V_i > V_{\text{кр}}; \quad (22)$$

$$\dot{z} = -\frac{m \cdot g}{\lambda} + \left( \dot{z}_i + \frac{m \cdot g}{\lambda} \right) \cdot e^{-\frac{\lambda}{m} t_i} \quad (23)$$

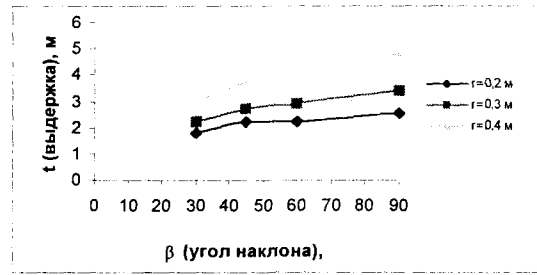
Тогда выдержка в данном устройстве будет определяться как:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (24)$$

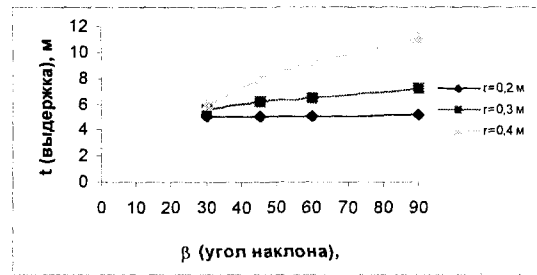
Реализуя данную методику, можно получить следующие графические зависимости (рис.8 а, б, в)

Приведенный пример показывает, что динамика движения материала существенно зависит от формы активизирующего устройства. Поэтому наша

а).



б).



в).

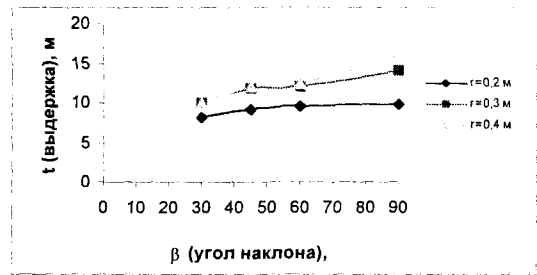


Рис. 8. Изменение выдержки  $t$  от угла наклона устройства при фиксированных начальных диаметрах устройства и начальной скорости (10, 15, 20 м/с)

дальнейшая работа направлена на отыскание оптимальной формы тормозного устройства - завихрителя потока.

## Литература

1. Шаршунов В.А. и др. Направление совершенствования технологии обработки зерна при производстве комбикормов.- В кн. " Материалы Общего собрания Академии аграрных наук Республики Беларусь." Минск, 1999, с. 51-60.
2. Шаршунов В.А. и др. Термовструирование зерна - новая эффективная технология при производстве комбикормов. Международный аграрный журнал, № 4. 1999.
3. Шейман В.А. Тепло- и массообмен в двухкомпонентном (газ - твердые частицы) потоке при переменном коэффициенте теплообмена.// Вопросы интенсификации переноса тепла и массы в сушильных и термических процессах. -Мн. 1967. - 255 с.
4. Мельцер В.А. Основы теории и техники процессов тепло - и массо переноса в аппаратах со встречными струями газозвеси. Автореферат. Минск 1994.