



## DRYING CRUSHED PLANT RAW IN THE AERODYNAMICAL DRYER

**Ion HEBESHESKU, Yuri MOLOTKOV**

Institute of Agricultural Technics "Mecagro"

**Abstract** – Presented the metod for calculating the velocity of vertical and horizontal flows in aerodynamic dryers. Describe the properties of the using eddy flows during drying the crushed of the raw material. A comparative analysis of direct-flow and vortex aerodynamic dryers. It describe the model of the conical vortex dryer, and the results of its tests. Formulates conclusions, summarizing the results of the work performed.

**Keywords** - Whirlpool dryer, a drying agent, temperature, flow

## USCAREA MATERIEI PRIME VEGETALE ÎN USCĂTORIILE AERODINAMICE

**Ion HĂBĂȘESCU, Iuri MOLOTCOV**

Institutul de tehnică agricolă „Mecagro”

**Rezumat:** Este prezentată metoda de calcul a vitezelor torentelor verticale și orizontale din uscătoriile aerodinamice. Sunt descrise particularitățile de utilizare torentelor turbionare la uscarea materiei prime mărunțite. Este efectuată analiza comparativă a uscătoriilor aerodinamice turbionare și rectilinie. Este descrisă mostra uscătoriei turbionare conice și rezultatele testării acesteia. Sunt formulate concluzii, care generalizează rezultatele lucrării efectuate.

**Cuvinte cheie:** uscătorie turbionară, agent de uscare, temperatura, flux.

## СУШКА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СУШИЛКАХ

**И.Ф.Хэбэшеску, Ю.А.Молотков**

Институт сельскохозяйственной техники «Мекагро»

**Реферат** – Представлена методика расчета скоростей вертикальных и горизонтальных потоков в аэродинамических сушилках. Описаны особенности использования вихревых потоков при сушке измельченного сырья. Проведен сравнительный анализ прямоточных и вихревых аэродинамических сушилок. Описан макет конической вихревой сушилки и результаты его испытаний. Сформулированы выводы, обобщающие результаты выполненной работы.

**Ключевые слова** – Вихревая сушилка, сушильный агент, температура, поток

Обязательным этапом изготовления топливных брикетов или пеллет из отходов сельскохозяйственного производства является кондиционирование исходного сырья по влажности\*. В подавляющем большинстве случаев этот этап представляет собой сушку – доведение относительной влажности сырья до 8-12%, что является оптимальным показателем для дальнейшей обработки [1,2]. К сожалению, влажность исходного сырья может значительно превосходить желаемый уровень. Так, например, ветки садовых деревьев после обрезки обладают влажностью 50% и более. Сушить такое сырье при помощи искусственной тепловой обработки крайне неэкономично. Поэтому большую часть влаги из такого материала удаляют в естественных условиях (солнечная сушка), снижая его влаж-

ность в течение длительного времени (недели, месяцы) до 15-20%, а иногда, в особенно жаркую и засушливую погоду – до оптимальных 10-12%. Конечный результат солнечной сушки во многом определяет влажность атмосферного воздуха. Пористый материал способен как отдавать, так и поглощать влагу из окружающего воздуха, приобретая так называемую равновесную влажность. Взаимосвязь этих параметров для древесины иллюстрирует рис.1 [3]. В частности, при температуре окружающего воздуха  $t_a=25^\circ\text{C}$  (см.рис.1) и его влажности  $\phi_a=85\%$  (реальные показатели для климата Молдовы) древесина не может высохнуть в естественных условиях до влажности ниже 18% (точка А на рис.1). Поэтому чаще всего для получения кондиционного сырья, его необходимо досушивать с использованием искусственных источников тепла. Из всего

\* Здесь и далее речь идет об относительной влажности

многообразия существующих способов и устройств искусственной сушки [4], на наш взгляд, наиболее перспективной является аэродинамическая конвективная сушка, при которой сушильный агент помимо своего основного назначения выступает и как транспортирующая субстанция, что существенно упрощает аппаратное обеспечение процесса, а использование в качестве теплоносителя топочных газов теплогенератора повышает его КПД.

измельченного растительного сырья (сельскохозяйственных отходов) с использованием в качестве сушильного агента топочных газов. Здесь топочные газы вырабатывает теплогенератор 1, в котором в качестве топлива могут использоваться дрова, уголь, пеллеты и пр. Для снижения их температуры с 500-700°C до 150-300°C их разбавляют атмосферным воздухом [3-5] при помощи регулятора температуры 2. Полученный таким образом сушильный агент объединяют с потоком влажного (исходного) сырья в смесителе 3 и подают в аэродинамическую (пневматическую) сушилку 4, где за счет конвективного теплообмена удаляется влага из высушиваемого материала. Сырье с заданной конечной влажностью (8...12%), смешанное с насыщенным влагой сушильным агентом, проходя через циклон 5, отделяется от последнего и передается на последующую переработку. Влажный и остывший сушильный агент дымососным вентилятором 6 выбрасывается в атмосферу. При этом, дымососный вентилятор 6 помимо транспортирования сырья, обеспечивает необходимую тягу для сгорания топлива в теплогенераторе 1.

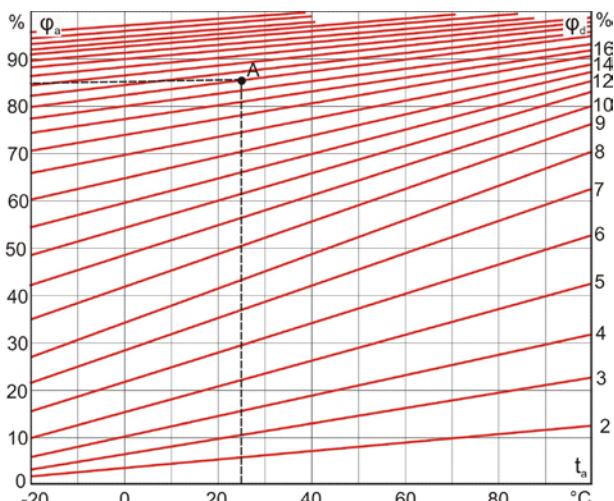


Рис.1. Зависимость равновесной влажности древесины  $\phi_d$  от температуры  $t_a$  и влажности  $\phi_a$  атмосферного воздуха [3]

На рис.2 приведена схема типового технологического процесса аэродинамической сушки

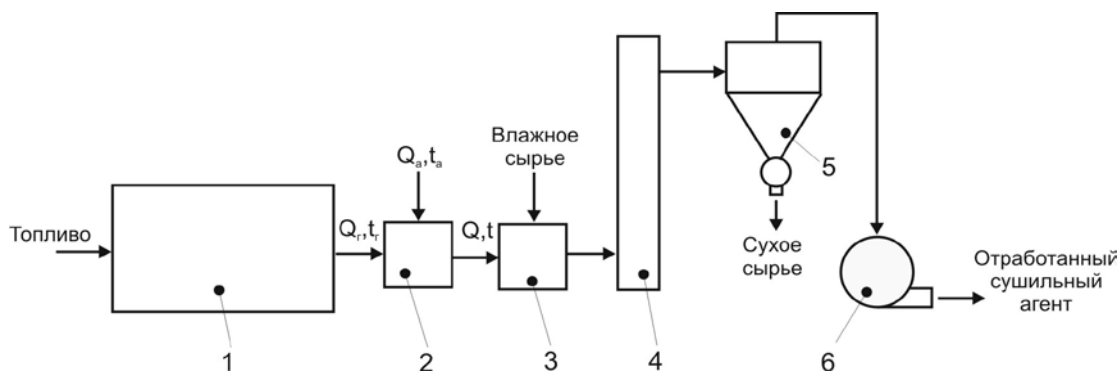


Рис.2. Схема технологического процесса аэродинамической сушки измельченного растительного сырья с использованием в качестве сушильного агента топочных газов

1 – теплогенератор (топка); 2 – регулятор температуры топочных газов; 3 – смеситель; 4 – аэродинамическая сушилка; 5 – циклон; 6 – дымососный вентилятор

В некоторых вариантах компоновки данного технологического участка, дымососный вентилятор 6 устанавливают между сушилкой 4 и циклоном 5 (см.рис.3). Такое размещение вентилятора приводит к повышенному абразивному износу лопаток рабочего колеса, хотя имеет и положительный эффект, создавая избыточное давление в циклоне, предотвращающее

вредный подсос атмосферного воздуха через разгрузочный шлюзовой затвор.

Очевидно, что для того, чтобы сушильный агент увлекал за собой частицы влажного материала, его скорость должна превосходить скорость витания этих частиц при данной температуре.

Для вертикального продуктопровода, к которому можно отнести и прямоточную аэродинамическую

сушилку, скорость витания можно рассчитать по формуле [6]:

$$v_b = Re \frac{\nu}{d}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где:  $\nu$  - кинематическая вязкость воздуха при наибольшей температуре процесса, м<sup>2</sup>/с;  
 $d$  - эквивалентный диаметр частиц\*, м;  
 $Re$  - критерий Рейнольдса.

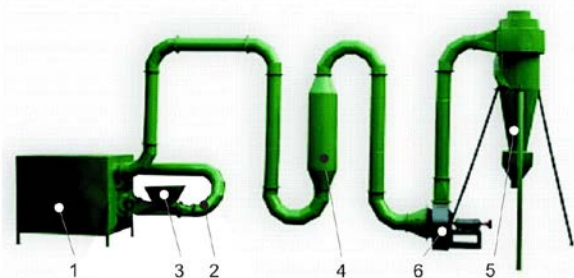


Рис.3. Внешний вид аэродинамической сушилки типа ST-300 (Китай) [7]

1 – теплогенератор (топка); 2 – контур регулирования температуры топочных газов; 3 – смеситель; 4 – аэродинамическая сушилка; 5 – циклон; 6 – дымососный вентилятор

Здесь критерий Рейнольдса указывает ни на характер движения потока в продуктопроводе, а характеризует движение высушиваемых частиц относительно сушильного агента:

$$Re = \frac{Ar(1-\beta)^{4,75}}{18+0,61\sqrt{Ar(1-\beta)^{4,75}}}, \quad (2)$$

где:  $\beta$  - объёмная доля твёрдой фазы:

$$\beta = \frac{I}{1 + \frac{\rho_T}{\mu\rho_a}}, \quad (3)$$

где:  $\rho_T$  - плотность материала транспортируемых частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_a$  - плотность воздуха при наибольшей температуре процесса, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - весовая концентрация частиц в воздушном потоке, кг/кг;

$Ar$  - Критерий (число) Архимеда\*\*

$$Ar = \frac{d^3 g (\rho_T - \rho_a)}{\rho_a \nu^2} \quad (4)$$

Считается, что надёжно транспортирующая скорость воздуха для вертикального продуктопровода должна быть вдвое большей, найденной по (1) [6]:

\* За эквивалентный диаметр  $d$  частицы принимают диаметр шара, вычисленный по формуле:

$$d = 1,24 \sqrt{\frac{M}{\rho_T}}, \text{ где } M - \text{ вес частицы, кг; } \rho_T - \text{ плотность материала}$$

частицы, кг/м<sup>3</sup> [8].

\*\* Число Архимеда представляет собой критерий подобия, характеризующий соотношение между архимедовой силой, обусловленной различием плотностей в отдельных областях рассматриваемой системы, и вязкими силами в основном потоке. Применяется при расчётах, связанных с движением тел во внешней среде (жидкость или газ), возникающим вследствие неоднородности плотности в системе «тело — внешняя среда» [13].

$$v = 2v_b, \text{ м/с}, \quad (5)$$

а для горизонтального:

$$v_g = 2v = 4v_b \text{ м/с}. \quad (6)$$

Легко показать, что при соблюдении условий (5) и (6) диаметр аэродинамической сушилки (сушильной колонны) может быть в 1,4 раза большим диаметров горизонтальных продуктопроводов. Это обстоятельство реализуется на практике (см., например, рис.4) для увеличения продолжительности сушки.

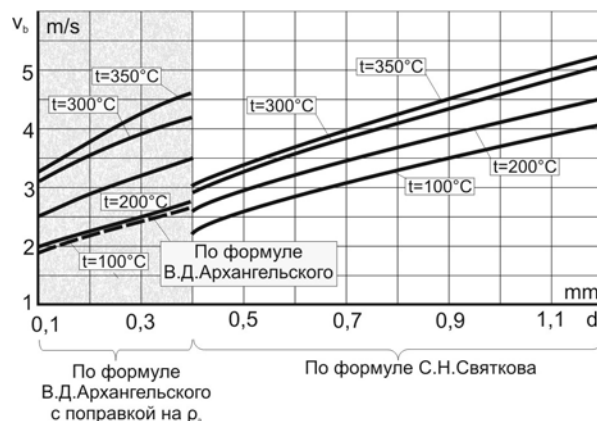


Рис.4. Скорости витания частиц  $v_b$  измельченной древесины, рассчитанные по эмпирическим формулам при различных температурах сушильного агента  $t$

При упрощенных расчетах, для частиц с характерным размером от  $d=0,4$  мм и более, близкие результаты можно получить, используя эмпирическую формулу С.Н. Святкова [9,10]:

$$v_b = 0,14 \sqrt{\frac{\rho_d}{\left(0,02 + \frac{\varepsilon}{d}\right) \rho_a}}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где:  $\rho_T$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  - коэффициент, учитывающий форму частиц (для частиц с квадратным или округлым поперечным сечением  $\varepsilon=1,1$ ; для частиц с прямоугольным поперечным сечением или близким к нему  $\varepsilon=0,9$ );

$\rho_a$  - плотность воздуха при наибольшей температуре процесса, кг/м<sup>3</sup>.

Если  $d < 0,4$  мм, то рекомендуется пользоваться более точной для этого случая эмпирической формулой В.Д. Архангельского [9]:

$$v_b = 0,135 \rho_d^{0,5} \cdot d^{0,25}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

однако, на наш взгляд, в нее целесообразно ввести плотность воздуха  $\rho_a=f(t)$ , которая вносит существенную коррекцию в значение  $v_b$  при высоких температурах:

$$v_b = \frac{0,135}{\rho_a} \rho_T^{0,5} \cdot d^{0,25}, \text{ м/с}. \quad (9)$$

Такая корректировка дает завышенные результаты по сравнению с исходной формулой при высоких температурах сушки ( $t > 150^\circ\text{C}$ ), что можно считать полезным фактом с точки зрения повышения надежности транспортирования измельченных частиц

нагретым воздухом. Расчетные значения скоростей витания частиц  $v_b$  измельченной древесины ( $\rho_T = 600 \text{ кг/м}^3$ ) по (7)-(9) показаны на рис.4. Следует отметить, что скорость витания  $v_b$ , рассчитанная по более строгим формулам (1)- (4) при  $d_{эвк.}=1,5 \text{ мм}$ ,  $t=350^\circ\text{C}^*$  и  $\beta = 0,4 \text{ кг/кг}$ , дает результат  $5,07 \text{ м/с}$ .

Известно, что скорость частицы  $v_T$ , движущейся в воздушном потоке, меньше скорости последнего на скорость витания  $v_b$  [11,12]:

$$v_T = v - v_b, \quad (10)$$

где:  $v$  – скорость сушильного агента на данном участке, м/с.

Таким образом, при известных габаритах сушильного оборудования оказывается возможным оценить продолжительность контакта высушиваемых частиц с сушильным агентом  $\tau$ , то есть – продолжительность сушки:

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{L_i}{v_{Ti}}, \quad (11)$$

где:  $L_i$  – длина  $i$ -того участка сушильной установки, м;

$v_{Ti}$  – скорость перемещения частиц на  $i$ -том участке, м/с.

Так, например, для сушилки, показанной на рис.3, при диаметре горизонтальных продуктопроводов 200 мм продолжительность сушки  $\tau$  составит приблизительно 2...3 с. Даже при начальной температуре сушильного агента  $t=300\text{-}350^\circ\text{C}$  этого времени может оказаться недостаточно для получения готового продукта заданной влажности. Следует учитывать, что скорость сушильного агента на любом участке сушильной установки не может быть ниже надежной скорости витания частиц ( $2...4$ ) $v_b$ , что существенно лимитирует мероприятия по увеличению продолжительности сушки  $\tau$ . Чтобы увеличить  $\tau$  обычно используют каскадное соединение сушильных колонн (см.рис.5) или иные приемы, увеличивающие длину сушильного потока. Все эти мероприятия ведут как к увеличению металлоемкости оборудования, так и к увеличению необходимой мощности дымососного вентилятора, что, в конечном итоге, снижает экономические показатели процесса сушки.

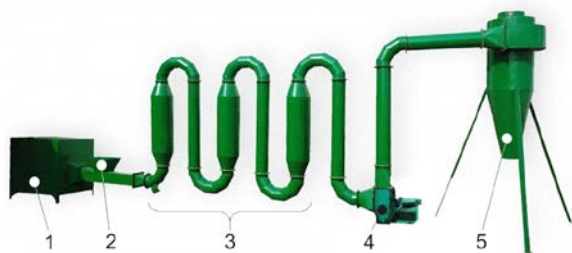


Рис.5. Общий вид аэродинамической сушилки типа GST-G (Китай) с каскадным соединением сушильных колонн [7]

\* Экспериментально установлено, что при исходной влажности измельченной древесины  $\varphi=18\text{-}20\%$  температура сушильного агента может составлять  $t=290\text{-}300^\circ\text{C}$ , а при  $\varphi>25\%$  -  $t$  может доходить до  $350^\circ\text{C}$  и более.

1 – теплогенератор (топка); 2 – смеситель; 3 – каскад сушильных колонн; 4 – дымососный вентилятор; 5 – циклон.

Рассмотрим сушильную колонну, в которую смесь сушильного агента и измельченного материала подается тангенциально (см.рис.6b). В этом случае во внутреннем пространстве сушилки при определенных соотношениях ее геометрических параметров образуется вихрь (рис.6d). При этом длина пробега частицы высушиваемого материала от входа в сушильную колонну до ее выхода существенно увеличивается, а следовательно увеличивается продолжительность контакта влажного материала с сушильным агентом. Проведенное нами компьютерное моделирование движения потока в вихревой сушилке показало, что длина пробега частиц материала на участке сушильной колонны длиной  $L$  примерно в 2...4 раза больше пробега на аналогичном участке прямоточной сушилки. Однако в компьютерной модели не учтено вращение потока вокруг оси вихря (рис.6d), что связано с отсутствием достоверной теоретической базы, которую можно было бы использовать в вычислительном алгоритме, хотя наличие сложного движения в вихре достаточно убедительно доказано [14,15].

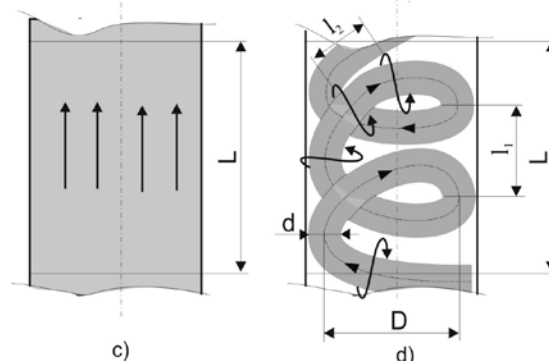
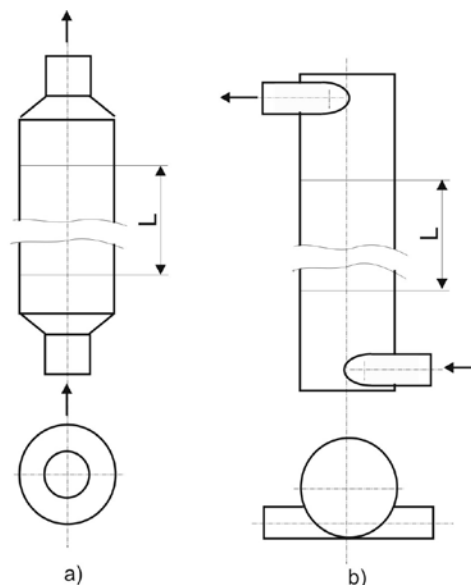


Рис.6 – Конфигурация потока смеси сушильного агента с высушиваемым материалом в прямоточной (a,c) и вихревой (b,d) сушилках

Если учесть обе траектории движения частиц в вихре, то суммарный пробег  $L_v$  частиц в на участке  $L$  вихревой сушилки будет равен:

$$L_v = n_1 \sqrt{(\pi D)^2 + l_1^2} + n_2 \sqrt{(\pi d)^2 + l_2^2}, \text{ м} \quad (12)$$

где:  $D$  – диаметр вихря, м;

$l_1$  – шаг винтовой траектории вихря, м;

$n_1$  – количество витков вихря на участке сушильной колонны длиной  $L$ ;

$d$  – диаметр вихревого шнура, м;

$n_2$  – количество витков внешних слоев вихря вокруг оси его шнура на участке сушильной колонны длиной  $L$ ;

$l_2$  – шаг винтовой траектории внешних слоев вихря, м.

В разрозненных данных, полученных в результате информационного поиска, встречаются предположения, что при вихревом движении фактическая длина пробега частиц при равной высоте сушильной колонны (сушилки) примерно в 40 (сорок!) раз превосходит аналогичный показатель прямоточной сушилки. Конечно, такие предположения требуют экспериментальной проверки. Забегая вперед, отметим, что проведенные нами испытания макета конической вихревой сушилки высотой 3,3 м, показали, что продолжительность прохождения измельченного сырья от места загрузки (смеситель - поз.3 на рис.2) до участка выгрузки (циклон - поз.5 на рис.2) при диаметрах продуктопроводов 200 мм и дебите дымососного вентилятора около 1500 м<sup>3</sup>/ч составила 30-35 с. Это в 10-15 раз больше, чем продолжительность сушки в прямоточной аэродинамической сушилке, показанной на рис.3 при близких габаритах технологического оборудования.

Несомненные достоинства вихревых сушилок способствуют все большему их распространению в различных областях промышленности и сельского хозяйства [16-19], но некоторым полезным, на наш взгляд, свойствам вихрей оказывается крайне мало внимание. Это, прежде всего, вихревой эффект Ранка-Хилша\* (англ.: Ranque-Hilsch Effect) [20,21]. К сожалению, на тех скоростях газовых потоков, которые используются при сушке, тепловые явления эффекта практически не проявляются, однако конфигурация газовых потоков сохраняется и при сравнительно малых скоростях, что крайне важно для наших последующих рассуждений.

На рис.7 показана конфигурация газовых потоков в различных вихревых трубах, к которым можно отнести и вертикальные аэродинамические сушильные колонны. Первый из них (рис.7а [20]) иллюстрирует классическое противоточное распределение потоков в трубе Ранка. Периферийный

вихревой поток формируется тангенциальным или улиточным завихрителем 2 и направляется в нижнюю часть трубы, имеющей донную диафрагму 7. В верхней части трубы расположен дроссельный вентиль 3, образующий с цилиндрическим корпусом 1 круговую щель.

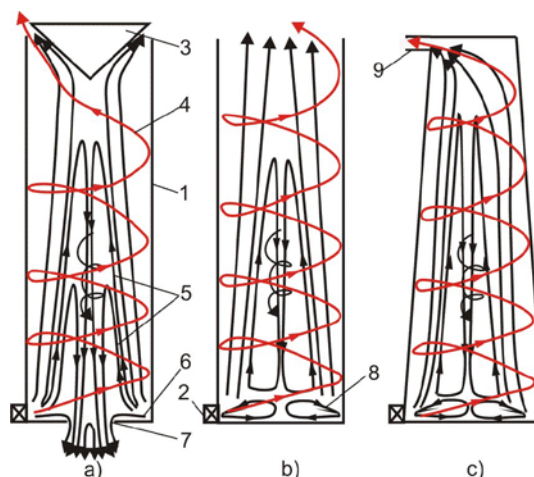


Рис.7. Конфигурация газовых потоков в вихревых трубах:

- а) цилиндрическая труба с дроссельным вентилем и донной диафрагмой [20]; б) цилиндрическая труба со свободным выходом потока и сплошным дном [20];
- в) коническая труба со сплошным дном и тангенциальным выходным каналом

1 – корпус вихревой трубы; 2 – тангенциальный или улиточный завихритель; 3 – дроссельный вентиль; 4 – периферийный вихревой поток; 5 – центральная зона обратных вихревых течений; 6 – радиальное течение пограничного слоя донной диафрагмы; 7 – донная диафрагма; 8 – торцевое циркуляционное течение; 9 – тангенциальный выходной канал.

При вертикальном движении периферийного вихревого потока от завихрителя к верхней круговой щели в его центре формируется встречный вихревой поток, выходящий через донную диафрагму. Одно из объяснений причин возникновения встречного потока приводится в работе А.Ф.Гуцола [20]: «по мере движения интенсивно вращающегося газа вдоль трубы его окружная (тангенциальная) скорость падает за счет торможения о стенки и, соответственно, уменьшается радиальный перепад давления. Если скорость поступательного движения вращающегося газа вдоль трубы относительно невелика, то есть темп продольного падения давления на периферии трубы незначителен, то быстрое уменьшение радиального перепада давления вдоль трубы приводит к появлению на оси трубы отрицательного градиента давления, который и порождает обратное течение». Объяснений данного эффекта множество, как и математических выкладок, количественно описывающих явления, возникающие в вихревых потоках, однако убедительной и достоверной теории, объясняющей все нюансы динамики вихрей пока нет. Тем не менее, для практического использования явления совсем не обязательно знать досконально его природу –

\* Вихревой эффект Ранка-Хилша состоит в разделении газа или жидкости при закручивании в цилиндрической или конической камере на две фракции. На периферии образуется закрученный поток с большей температурой, а в центре — закрученный охлажденный поток, причем вращение в центре происходит в обратную сторону, чем на периферии [20].

достаточно найти применения уже известным свойствам, в частности свойствам газовых потоков в вихревых трубах.

На рис.7b [20] показана конфигурация вихревых потоков при отсутствии в вихревой трубе донной диафрагмы и дроссельного вентиля. Здесь появляется новая вихревая зона – торцевое циркуляционное течение 8, образованное взаимодействием восходящего периферийного и обратного центрального вихрей. При этом, как и в случае, показанном на рис.7а, область встречного вихря приобретает форму конуса. Вероятно, это связано с тем, что по мере перемещения периферийного вихревого потока от входа к выходу из трубы скорость его падает из-за трения о стенки, а следовательно увеличивается диаметр вихревого шнура, который все больше «сдавливает» центральную область, заставляя сжиматься образовавшийся обратный вихревой поток. Скорость периферийного потока можно в некоторых пределах стабилизировать, уменьшая диаметр вихря пропорционально его энергетическим потерям из-за трения о стенки трубы, то есть выполнить трубу конической. Стабильность вихря можно дополнительно повысить, изготовив тангенциальный выходной канал. В вихревой трубе на рис.7с реализованы предлагаемые мероприятия. За счет их введения коническая область обратного потока оказывается более вытянутой по вертикали по сравнению с двумя предыдущими случаями.

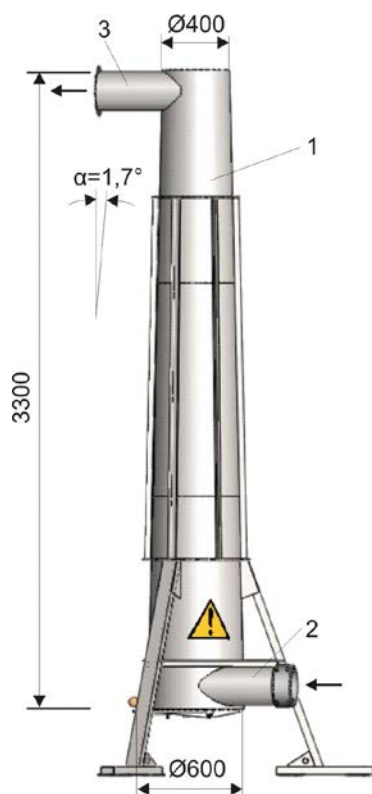


Рис.8. Общий вид макета вихревой сушилки

1 – конический корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок.

Исходя из принципов и предположений, представленных при описании конфигураций вихревых потоков в гладких трубах, нами был спроектирован, изготовлен и испытан макет вихревой сушилки для термообработки (сушки) измельченного растительного сырья (рис.8). Макет представляет собой гладкую коническую трубу 1 (корпус) с тангенциальными входным 2 и выходным 3 патрубками. Для экономии материальных средств на исследования, теплоизоляция корпуса сушилки не предусматривалась.

Испытания макета сушилки проводились на специально смонтированном экспериментальном технологическом участке (рис.9). Состав и назначение оборудования данного участка уже рассмотрен нами в начале статьи.



Рис.9. Экспериментальный технологический участок сушики измельченного растительного сырья с использованием макета вихревой сушилки

1 – теплогенератор; 2 – регулятор температуры топочных (дымовых) газов; 3 – бункер исходного сырья; 4 – смеситель; 5 – макет вихревой сушилки; 6 – батарейный циклон; 7 – разгрузочный шлюзовой затвор; 8 – дымососный вентилятор

Сырьем при проведении испытаний являлись измельченные солома и ветки плодовых деревьев со следующим усредненным фракционным составом (по весу):

частицы с размером более 5 мм	- 3%;
3...5 мм	- 33,0%;
2...3 мм	- 30,2%;
1...2 мм	- 19,3%;
Менее 1 мм	- 14,5%.

Влажность исходного сырья доводили до 25...30%, что является максимальным показателем, встречающимся в практике, увлажняя его методом смешивания с распыленной водой и последующей выдержкой в замкнутом объеме в течении не менее 24 часов.

В ходе испытаний участниками экспериментов было выявлено интересное явление, связанное с вихревым движением высушиваемого материала в сушильном пространстве. Суть его состоит в саморегулировании параметров вихря при изменениях его насыщенности материалом. Такое саморегулирование автоматически создает оптимальные условия сушки при изменении скорости подачи высушиваемого материала или его влажности. А проявляется оно следующим образом.

Когда сушилка пуста, а дымососный вентилятор включен, внутри сушильной колонны образуется устойчивый вихрь (см.рис10а). При этом температура сушильного агента на входе в сушилку практически равна температуре, поддерживаемой на выходе

регулятора температуры, например 300°C, скорость потока максимальна, дебит дымососного вентилятора составляет около 2500 м<sup>3</sup>/ч при температуре сушильного агента на его выходе 55-60°C. Конфигурация образовавшегося вихря такова, что вдоль оси сушилки формируется область скоростей, стремящихся к нулю.

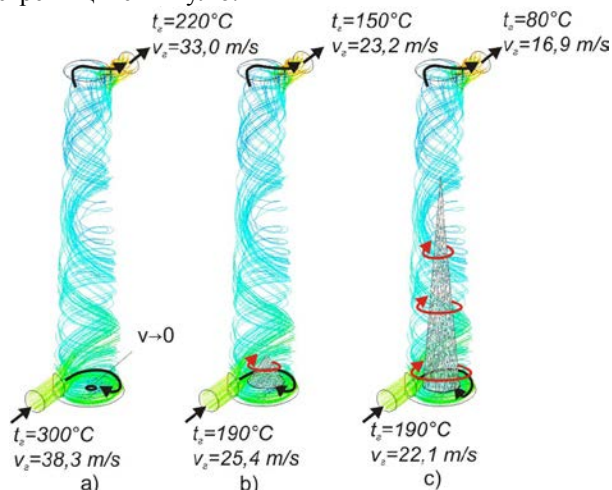


Рис.10. Этапы возникновения конуса из высушиваемого материала внутри вихревой сушилки

Следует отметить, что при отсутствии теплоизоляции, потери тепла в окружающую среду оказываются очень высокими: температура воздуха после прохождения всех агрегатов участка падает от 300 до 60°C (!). Вместе с этим, возникший вихрь резко увеличивает аэродинамическое сопротивление воздушному потоку: дебит вентилятора снижается с 3500 (холостой ход) до 2300 -2500 м<sup>3</sup>/ч.

При непрерывном добавлении в поток сушильного агента «сырого» материала с влажностью 18-20% и дебитом 350-400 кг/ч температура на входе в сушилку резко падает, а скорость потока в продуктопроводе снижается (рис.10б). Снижается и интенсивность вихря внутри сушилки, увеличивается диаметр вихревого шнура\*. Скорость потока на оси вихря остается высокой, а вот на его периферийных слоях способность удерживать влажные частицы высушиваемого материала падает. Это обстоятельство, в совокупности с практически нулевой скоростью в центре вихря, способствует формированию на дне сушилки некоторой массы высушиваемых частиц, приобретающей форму конуса, вращающегося в направлении вращения вихря, но с меньшей угловой скоростью. По мере подачи исходного сырья, конус внутри сушилки растет по высоте (рис.10с). Рост конуса прекращается, когда зазор между стенками сушилки и поверхностью конуса оптимизирует параметры потока смеси «сушильный агент – сырье» применительно к конкретным аэродинамическим свойствам высушиваемого материала и фактической температуре

\* Диаметр вихревого шнура – это диаметр периферийных слоев вихря, измеренные по нормали к его винтовой оси. При высоких скоростях потока диаметр вихревого шнура близок к диаметру входного патрубка сушилки.

сушильного агента. Стабилизируется и скорость потока во входном продуктопроводе. Дебит дымососного вентилятора при этом составляет около 1500 м<sup>3</sup>/ч при температуре на выходе 45-50°C. В процессе сушки частицы, образующие поверхностные слои конуса, постепенно уносятся вихрем, а их место занимают вновь поступившие. При повышении исходной влажности сырья диаметр основания конуса увеличивается, при понижении – уменьшается. В первом случае скорость потока возрастает и «подъемная сила» вихря увеличивается, а во втором – уменьшается. Процесс саморегулируется.

За счет конической формы сушилки удается компенсировать потери скорости вихря из-за трения о стенки сушилки и тем самым стабилизировать диаметр вихревого шнура, образовавшегося в зазоре между стенкой и конусом. Однако в верхней части сушилки, где диаметр корпуса близок к удвоенному диаметру вихревого шнура, вихревые витки начинают касаться сами себя. Образуются сложные завихрения, ограничивающие рост высоты конуса, и смесь «сушильный агент – сырье» через выходной патрубок покидает сушилку и направляется в циклон. Конус из высушиваемого сырья по существу повторяет форму сушилки в уменьшенном масштабе, причем величина этого масштаба автоматически меняется в зависимости от текущих параметров сырья и сушильного агента.

Хронометрирование, проведенное в ходе испытаний, показало, что продолжительность контакта высушиваемого материала с сушильным агентом составило 30-35 с. За этот отрезок времени порция сырья проходит от смесителя (поз.4 на рис.9) до разгрузочного шлюзового затвора (поз.7 на рис.9).

После прекращения подачи исходного сырья интенсивность вихря увеличивается и начинается унос частиц конуса, который продолжается 5-10 минут (зависит от исходной влажности сырья). По истечении этого времени внутреннее пространство сушилки опорожняется и процесс сушки завершается.

## ВЫВОДЫ

- Для сушки измельченного растительного сырья, используемого для производства пеллет или топливных брикетов (евродров), наиболее перспективной, на наш взгляд, является аэродинамическая конвективная сушка, при которой сушильный агент помимо своего основного назначения выступает и как транспортирующая субстанция, что существенно упрощает аппаратное обеспечение процесса, а использование в качестве теплоносителя топочных газов - повышает его КПД.
- Эксперименты показали, что при использовании вихревой сушилки продолжительность контакта высушиваемого материала с сушильным агентом увеличивается в 10-15 раз по сравнению с односекционной прямооточной аэродинамической сушилкой при

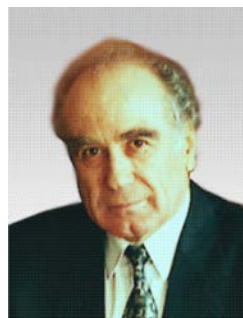
близких габаритах технологического оборудования и одинаковых параметрах сушильного агента.

• Конфигурация потоков в вихревой сушилке во многом схожа с потоками, обнаруженными французским инженером Жозефом Ранком при изучении вихрей, возникающих в циклонах. При этом в ходе испытаний макета сушилки не обнаружено наличие обратного вихревого движения вдоль оси сушилки, хотя существование вытянутой в конус области разрежения и практически нулевых скоростей экспериментально доказано.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Бунецкий В. О., *Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пелет або брикетів*, Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області, Вип. 10– 2011.
- [2] Овсянко А.Д., *Топливная гранула: Россия, Беларусь, Украина*, Справочник, Биотопливный портал WOOD-PELLETS.COM, 2007.
- [3] Иванов В.Ф., *Деревянные конструкции*, Л.-М., Гос. Из-во Литературы по строительству и архитектуре, 1956, с.22,35.
- [4] *Большая Энциклопедия Нефти и Газа. Температура – воспламенение*, <http://www.ngpedia.ru/id504751p1.html>.
- [5] Кузнецов В.С., Денисов С.В., *Пневмотранспорт деревообрабатывающих предприятий. Внешние пневмотранспортные установки*, Учебное пособие, Братск, Братский Госуниверситет, 2007, с.42.
- [6] Бойко В.И., *Расчёт установок пневмотранспорта*, Учебно-методические указания, Томский политехнический университет, Томск, 2008, с.10-11
- [7] *Аэродинамическая сушилка опилок ST-300*, <http://eurasia-group.ru/catalog/oborudovanie/>.
- [8] Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А., *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии*, Л., 1987, с.94
- [9] *Парусность частиц сыпучих отходов и скорость витания*, Первый лесопромышленный портал. -<http://www.wood.ru/othod06.html>.
- [10] Молчанов Б. С. *Проектирование промышленной вентиляции*, Ленинград, Стройиздат. Ленинградское отделение, 1970, 228 с.
- [11] *Определение скорости частиц материала пневмосмесителя сухих строительных смесей*, Научный журнал *Фундаментальные исследования*, 2013, № 4 (часть 3), с. 592-596.
- [12] Орехова Т.Н., Загороднюк Л.Х., Шкарин А.В., *Пневматические смесители для приготовления сухих строительных смесей*, *Материалы и технологии XXI века: сборник статей X Международной научно-технической конференции*, Пенза: Приволжский дом знаний, 2012, с. 102–105.
- [13] *Число Архимеда*, Справочник химика. Раздел III. Гидродинамика зернистых материалов, Том 5, 2-е изд., М. - Л., Химия, 1968, с. 426-467.
- [14] Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И., Свистунов А.В. , *Возможный механизм течения вихревых закрученных потоков*, Уфимский государственный авиационный технический университет, ТРУДЫ МФТИ, Том 6, № 2, *Аэрогидромеханика*, 2014, с.99-105.

- [15] Аникин А. Ю., Бояринцева Т. Е., Сидняев Н. И., *Математическая модель осесимметричного вихревого движения*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Электронное научно-техническое издание Наука и Образование, 2 февраля 2012.
- [16] Коновалов В.И., Орлов А.Ю., Гатапова Н.Ц., *Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубой Ранка-Хиллиа: Возможности и экспериментальная техника*, Вестник ТГТУ, Т.16, №4, 2002, с.803-825.
- [17] Патент RU 2290578, *Способ сушки сыпучих материалов и вихревой аппарат для его осуществления*.
- [18] Патент RU 2480693, *Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя*.
- [19] Патент RU 2397416, *Вихревая камера для переработки отходов птицекомбинатов*.
- [20] Гуцол А.Ф., *Эффект Ранка. Методические заметки*, Успехи физических наук, Том 167, №6, Июнь 1997 г., с.666-667.
- [21] Колядин Е. А., Виноградов С. В., *Эффект температурного разделения газов (эффект Ранка)*, Вестник Астраханского государственного технического университета, Выпуск № 1, 2004.



*Хэбшеску Ион* родился в с.София Дрокиевского р-на в 1938 году где закончил среднюю школу. В 1961 г. закончил факультет Механизации Кишиневского Сельскохозяйственного института. Работал инженером в колхозе, преподавателем спецдисциплин в техникуме, начальником управления учебных заведений Министерства Сельского Хозяйства, генеральном директором НПО

„Молдсельхозре-монт”, директором Института Сельскохозяйственной Техники “Mesaagro”. В 1990 году защитил диссертацию на звание Доктора Хабилитат технических наук. В 1995 избран членом-корреспондентом Академии Наук РМ



*Молотков Юрий* родился в г. Дербент в 1952 году. В 1969 году закончил среднюю школу в г. Краснодаре. В 1974 году закончил обучение на энергетическом факультете Краснодарского политехнического института. Работал инженером-физиком, младшим научным сотрудником во Всесоюзном институте табака (г.Краснодар), где в 1978 году окончил очную аспирантуру.

В 1981 году был приглашен на работу в Молдавский институт табака. В 1985 году защитил диссертацию на степень кандидата технических наук. С 2006 года работаю в Институте Сельскохозяйственной Техники “Mesaagro” в должности зав.сектором возобновляемых источников энергии.