

УДК 665.937.6 : 66.084

**В.И. Погонец, А.В. Лазанович**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ  
ГИДРОБИОНТОВ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ**

*Выявлены особенности процесса сушки измельченных гидробионтов во взвешенном состоянии. Они определяют гидродинамические параметры потока теплоносителя, используемого в качестве рабочей среды. Получены дифференциальные уравнения, описывающие гидродинамику процесса, использование которых приемлемо при разработке рабочих моделей сушилок.*

**Ключевые слова:** исследования, процесс, сушка, гидробионты, взвешенное состояние, параметры, гидродинамика.

**V.I. Pogonets, A.V. Lazanovich****MODELLING OF PROCESS OF DRYING SHREDDED  
HYDROBIONT IN SUSPENSION**

*The peculiarities of the process of shredded sea products desiccation in suspension are revealed. They determine hydrodynamic parameters of the blast of the heat carrier used as a working medium. The differential equations describing hydrodynamics of the process are received. The use of the differential equations is acceptable while elaborating the working models of desiccation.*

**Key words:** study, process, drying, seafood, suspension are revealed, parameters, hydrodynamic.

Сушка измельченного биосырья (кальмара, ламинарии, фукусов, рыбной крупки и др.) имеет свои особенности, которые заключаются в том, что на частицах этих морепродуктов существует слой биополимеров, выделяющийся изнутри и способствующий слипаемости и комкованию последних. Это обстоятельство требует использования новых технологий и технических решений, которые позволили бы изменить гидродинамическую обстановку в сушильных камерах, интенсифицировать процесс сушки и предотвратить это нежелательное явление. Таким решением является разработка и применение новых газораспределительных решеток в сушилках, которые создают взвешенно-закрученные потоки теплоносителя. Изучая гидродинамику этого процесса, нам удалось построить математическую модель, которая позволила в дальнейшем сконструировать новые промышленные аппараты. Рассмотрим этот процесс более детально.

Поведение частицы в потоке отличается, в первую очередь, тем, что ориентация ее относительно последнего является зависимой, а не наперед заданной, кроме того, ориентация достигается на каком-то временном (конечном) промежутке. Свое ориентированное состояние частица приобретает в зависимости от параметров внешнего (по отношению к ней) потока; осуществляя колебания того или иного рода относительно своего квазистационарного положения, в конечном счете она занимает такое положение в пространстве, которое соответствует характеру взаимодействия ее поверхности с потоком.

При этом естественно предположить, что уже на достаточно коротком начальном этапе такого взаимодействия рабочая среда влияет на разворот частицы (ее гидродинамическое сопротивление встречному движению потока минимально). Иначе говоря, из всех возможных положений в пространстве (относительно набегающего потока) частица займет такое, при котором будет обеспечен этот минимум.

Различного рода возмущения потока, вызываемые теми или иными причинами (в том числе влиянием острых кромок частиц в области реза), могут отклонять частицу от такого

рода ориентации, однако в целом на достаточно большом временном интервале, соответствующем конкретному этапу процесса высушивания объекта обработки, она сохраняется, при этом частица осциллирует около своего равновесного положения в пространстве.

Для построения картины исследуемого процесса, анализа поведения объекта обработки и выработки оптимальных режимов высушивания необходимо выбрать систему координат, причем требуется учесть влияние кривизны поверхности частиц – во-первых, и наличие соседствующих частиц – во-вторых. Другими словами, обрабатываемая отдельная частица обтекается внешним потоком не индивидуально – поток все время перемещается между двумя соседними частицами.

Используем для разрешения поставленной задачи ортогональные криволинейные координаты  $q_1, q_2, q_3$ :

$$H_i = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial q_i}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $H_i$  – коэффициенты Ляме.

Здесь и далее ось  $x$  – продольная координата вдоль потока;  $z$  – нормальная координата;  $y$  – поперечная координата.

Для решения поставленных задач в части определения соответствующих тепловых и массовых потоков существенно поведение рабочей среды непосредственно вблизи поверхности частиц – здесь формируются гидродинамический, тепловой и диффузионный пограничные слои, характер течения в которых в значительной степени зависит от режимов движения сплошной среды (воздуха) во внешнем по отношению к этим слоям потоке. Последний формируется под влиянием многих факторов, в том числе геометрических параметров самих частиц.

Основные уравнения, описывающие течение рабочей среды, а также зависимые от них и сопутствующие вторичные явления, на основе которых в дальнейшем рассматриваются тепло- и массообменные процессы, применительно к рассматриваемым задачам на настоящем этапе исследования лучше взять в интегральной форме:

$$\iiint_V \frac{\partial(\rho \cdot \vartheta)}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vartheta \vartheta_n dS = \iiint_V \rho F dV - \iint_S P n dS + \iint_S \tau_n \cdot dS, \quad (2)$$

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vartheta_n dS = 0, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( U^2 + \frac{\vartheta^2}{2} \right) \right] dV + \iint_S \rho \left( U^2 + \frac{\vartheta^2}{2} \right) \vartheta_n dS = \iiint_V \rho F \vartheta dV + \\ + \iint_S \tau_n \vartheta dS - \iint_S P \vartheta_n dS + \iint_S q_n dS + \iiint_V \rho \varepsilon dV. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих уравнениях  $q_n$  – составляющая вектора теплового потока, приходящего внутрь объема в единицу времени через единицу рассматриваемой поверхности по направлению внешней нормали  $n$  к элементу поверхности  $dS$ ;  $\tau_n$  – вектор силы трения, действующей

на единичную площадку;  $S$  – поверхность, ограничивающая выбранный объем  $V$ , занимаемый массой теплоносителя;  $F$  – массовая сила;  $U$  – внутренняя энергия этой массы.

Выбор направления координатных линий на поверхности объекта обработки обусловлен его ориентацией в пространстве при взаимодействии последней с обтекающим потоком воздуха, отсюда следует, что существуют различные варианты подбора соответствующих коэффициентов Ляме.

С учетом изложенного ранее относительно преимущественной ориентации частиц в потоке положим, что частицы разворачиваются в потоке таким образом, что местный радиус кривизны их поверхности изменяется вдоль потока, при такой ориентации плоскости реза частиц располагаются преимущественно параллельно направлению вектора скоростей внешнего течения.

В качестве координатных линий на поверхности обрабатываемой частицы могут быть выбраны как линии тока внешнего по отношению к ней потока, так и линии кривизны самой поверхности обрабатываемого объекта. Особенности такого рода выбора связаны с наличием (или отсутствием) трансверсальной компоненты скорости либо соотношением между их величинами.

Присутствию таких составляющих течения сопутствует появление трансверсальных градиентов давления, что, применительно к рассматриваемой задаче, приведет к различного рода вторичным явлениям (в том числе течениям) и переориентации в пространстве обрабатываемой частицы. Так, при наличии поперечного (по отношению к направлению основного потока) течения между двумя близко расположенными частицами и изменении давления вдоль оси  $y$  вызовет изменение положения одной из них (либо обеих) вплоть до тенденции по выравниванию и изменению градиента давления вплоть до состояния  $\partial P / \partial y = 0$ .

Основную и единственную причину этого можно видеть в наличии инерционных членов в уравнениях движения, если расстояние между двумя соседствующими обрабатываемыми биочастицами является достаточно большим.

При уменьшении этого расстояния гидродинамические пограничные слои, толщины которых, как известно, являются одними из определяющих факторов по отношению к развитию тепло- и массообменных процессов, могут в сумме (от двух соседних частиц) оказаться большими, чем само это расстояние. В этом случае область потенциального течения рабочей среды исчезает, а течение становится вязким, при этом силы трения преобладают, и вопрос о трансверсальной составляющей течения (точнее, о ее присутствии) необходимо рассматривать отдельно.

Тем не менее ожидать существенного развития течения вдоль оси  $y$  (или  $q_2$  – в ортогональных криволинейных координатах) вряд ли возможно, так как таковое течение вызовет появление трансверсального градиента давления и как следствие перемещения обрабатываемой частицы в потоке в направлении оси  $z$  (или соответственно  $q_3$ ). Последнее тем самым ликвидирует такой градиент давлений и поперечное течение. Иначе говоря, даже при своего рода критической ситуации (удаление требуемой фазы), т.е. при значительном уменьшении соответствующих чисел Рейнольдса в рассматриваемой области за счет уменьшения локальной толщины разделяющего их слоя  $h(x, y, t)$ , появление трансверсального градиента давления вызовет такое изменение переменных от точки к точке локальных расстояний между обрабатываемыми частицами, которое будет исключать течение вдоль оси  $y$  ( $q_2$  – в ортогональных координатах). В итоге следует ожидать, что развернутая в потоке частица поведет себя подобно плоскому крылу и будет в нем располагаться подобно части плоского крыла, кривизна которого изменяется вдоль потока.

Наличие близко расположенных соседних частиц существенно осложняет поставленную задачу, в то же время присутствие (и преобладающее влияние на определенных эта-

пах) инерционных сил при движении рабочей среды в пространстве между двумя соседними частицами будет влиять и на течение в пограничных слоях на самих поверхностях соседних частиц.

Резюмируя сказанное, можно сделать предварительный вывод, что в качестве координатных линий следует выбрать линии кривизны поверхности обрабатываемых частиц. Положим, что после пространственной ориентации частицы в потоке резкие изломы ее поверхности соответствуют поперечной координате  $i$ , таким образом, имеют лишь косвенное влияние на течение исследуемых процессов.

Выпишем основные уравнения движения, характеризующие рассматриваемые процессы. При этом будем исходить из обычных представлений классической гидромеханики [1, 2, 3] с учетом особенностей рассматриваемых практических задач. К числу специфики таковых следует отнести в первую очередь следующие факторы и явления.

Обрабатываемое биосырье – частицы – разделены на сравнительно мелкие части объекта обработки, характеризуются постоянным поступлением жидкой фазы изнутри частиц на их поверхность и образованием на последней слоя биополимеров той или иной толщины. Другая биологическая особенность такого процесса сводится к многообразию формы поверхности (части ее, особенно применительно к изменениям величин местных радиусов кривизны) обрабатываемых частиц.

Если вторая особенность определяет гидродинамические параметры потока рабочей среды, то первая – граничные и начальные условия на поверхности объекта обработки. Сочетание этих факторов и доминирует при подборе соответствующих моделей, посредством использования которых возможно разрешить поставленную задачу.

Ортогональные криволинейные координаты расположим так, чтобы поверхность обтекаемой потоком частицы определялась следующим условием:  $q_3 = 0$  ( $q_3$  – нормальная координата, здесь обозначает расстояние точки от этой поверхности по нормали).

Таким образом, мы выбираем ортогональную сетку координатных линий  $q_1$  и  $q_2$  непосредственно на самой поверхности частиц. В принятой системе координат элемент длины выражается соотношением

$$dS^2 = H_1^2 dq_1^2 + H_2^2 dq_2^2 + H_3^2 dq_3^2, \quad (5)$$

где  $H_1, H_2, H_3$  – коэффициенты Ляме, соответствующие криволинейным ортогональным координатам  $q_1, q_2, q_3$ , связанным с декартовыми координатами следующими зависимостями:

$$q_1 = q_1(x, y, z), \quad q_2 = q_2(x, y, z), \quad q_3 = q_3(x, y, z). \quad (6)$$

Уравнения движения, энергии и неразрывности потока также в интегральной форме в соответствии с теми же классическими гидродинамическими представлениями могут быть записаны в следующем компактном виде:

$$\iiint_V \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dV = \iiint_V B \cdot dV + \iint_S C \cdot dS. \quad (7)$$

Здесь параметры  $A, B$  и  $C$  для уравнений движения определяются формулами

$$A = \rho \cdot v, \quad B = \rho \cdot F, \quad C = -P \cdot n - \rho v v_n + \tau_n;$$

для уравнения неразрывности потока:

$$A = \rho, \quad B = 0, \quad C = -\rho \cdot v_n$$

и для уравнения энергии:

$$A = \rho \left( U^2 + \frac{g^2}{2} \right),$$

$$B = \rho \cdot F \cdot g, \quad C = \rho \cdot g_n \cdot \left( U^2 + \frac{g^2}{2} \right) + q_n - P \cdot g_n + \tau_n \cdot g. \quad (8)$$

Следуя далее, основные уравнения, описывающие движение жидкости (газа) и энергии, применительно к разрешению поставленных задач в дифференциальной форме можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial g_i}{\partial t} + \frac{g_1}{H_1} \frac{\partial g_i}{\partial q_1} + \frac{g_2}{H_2} \frac{\partial g_i}{\partial q_2} + \frac{g_3}{H_3} \frac{\partial g_i}{\partial q_3} - \frac{g_1^2}{H_i H_1} - \frac{g_2^2}{H_i H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_i} + \\ & + \frac{g_1}{H_1} \frac{g_i}{H_i} \frac{\partial H_i}{\partial q_1} + \frac{g_3 g_i}{H_i} \frac{\partial H_i}{\partial q_3} + \frac{g_2 g_i}{H_2 H_i} \frac{\partial H_i}{\partial q_2} = F_i - \frac{1}{\rho H_i} \frac{\partial P}{\partial q_i} + \\ & + \frac{1}{\rho H_1 H_2 H_3} \frac{\partial}{\partial q_3} (H_1 H_2 H_i \tau_{i3}), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $i = 1, 2$ .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{H_1 H_2} \left[ \frac{\partial}{\partial q_1} (\rho g_1 H_2) + \frac{\partial}{\partial q_2} (\rho g_2 H_1) + \frac{\partial}{\partial q_3} (\rho g_3 H_1 H_2) \right] = 0, \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial q_3} - F_2 = \frac{g_1^2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial q_1} + \frac{g_2^2}{H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_2}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} + \frac{g_1}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} + \frac{g_2}{H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} + \frac{g_3}{\partial q_3} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} + \\ & + \frac{1}{\rho H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_3} \left\{ q_3^T + (\tau_{31} g_1 + \tau_{32} g_2) \right\} H_1 H_2 + \rho (g_1 F_1 + g_2 F_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Приведенные уравнения получены в следующих предположениях: кривизна поверхности частиц вдоль соответствующей координаты изменяется незначительно, толщина слоя рассматриваемой области теплоносителя по порядку величины значительно меньше, чем радиусы кривизны поверхности объекта обработки.

Такой вид уравнений движения отражает соотношение между отдельными членами, их составляющими, а также оценку порядка величин членов, входящих в них: здесь сохранены только члены, имеющие старший порядок. Кроме того, учитывалось, что  $H_1$  и  $H_2$

являются функциями  $q_1$  и  $q_2$ , а так как координата  $q_3$  соответствует расстоянию точки от поверхности частицы, то можно положить  $H_3 = 1$ .

Взяв, таким образом, за линии кривизны  $q_1 = const$  и  $q_2 = const$ , примем, что уравнение поверхности частицы  $q_3 = 0$  задано в виде  $r = r(q_1, q_2)$ . При этом координатные линии  $q_3$  будут представлять собой кривые, ортогональные к поверхности частицы.

Следуя и далее указанным ранее работам [1, 2, 3], запишем следующую систему уравнений, описывающую движение рабочей среды и энергии вблизи поверхности частицы, с учетом кривизны поверхности последней и других рассмотренных ранее особенностей, присущих исследуемому процессу. При этом отметим дополнительно, что привести данные уравнения к настоящему виду позволило утверждение, что толщины соответствующих слоев теплоносителя много меньше радиусов кривизны самой поверхности обрабатываемой частицы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial t} + \frac{\mathcal{G}_1}{H_1} \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial q_1} + \frac{\mathcal{G}_2}{H_2} \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial q_2} + \mathcal{G}_3 \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial q_3} - \frac{\mathcal{G}_2^2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} + \frac{\mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} = \\ = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{1}{H_1} \frac{\partial P}{\partial q_1} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial q_3} \left( \mu \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial q_3} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial t} + \frac{\mathcal{G}_1}{H_1} \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial q_1} + \frac{\mathcal{G}_2}{H_2} \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial q_2} + \mathcal{G}_3 \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial q_3} - \frac{\mathcal{G}_1^2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} + \frac{\mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} = \\ = F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{1}{H_2} \frac{\partial P}{\partial q_2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial q_3} \left( \mu \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial q_3} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{H_1 H_2} \left[ \frac{\partial}{\partial q_1} (\rho \cdot \mathcal{G}_1 \cdot H_2) + \frac{\partial}{\partial q_2} (\rho \cdot \mathcal{G}_2 \cdot H_1) \right] + \frac{\partial}{\partial q_3} (\rho \cdot \mathcal{G}_3) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial q_3} = 0, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathcal{G}_1}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} + \frac{\mathcal{G}_2}{H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial q_3} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial q_3} \right) + \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial q_3} \left[ \mu \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_3}{\partial q_1} \mathcal{G}_1 + \mu \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_3}{\partial q_2} \mathcal{G}_2 \right] + \mathcal{G}_1 F_1 + \mathcal{G}_2 F_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Как уже отмечалось, влияние внешнего (по отношению к формирующимся на поверхности частиц пограничным слоям) течения в первую очередь зависит от расстояния между двумя соседними частицами, обтекаемыми потоком. Характерный нормальный размер (разделяющего их слоя воздуха) может изменяться на протяжении всего времени высушивания, т.е. прохождения частицами всех этапов этого процесса, в достаточно широких пределах. Находящийся между двух соседних поверхностей частиц воздушный поток может иметь толщину от нуля (слипание частиц на основе адгезионных связей) до конечных, достаточно больших, по сравнению с толщинами пограничных слоев, величин.

В целом, область взаимодействия двух соседних, находящихся в произвольном положении в пространстве и относительно друг друга частиц представляет собой зону с

полностью или частично перекрывающимися поверхностями. Иначе говоря, образующая эту область часть поверхностей соседних частиц не является общей в смысле образования области течения рабочей среды. Таким образом, в наиболее общем случае течение этой среды соответствует перемещению воздуха между двумя участками криволинейных поверхностей той или иной формы.

Выполним предварительную (приближенную) оценку связи между расходом рабочей среды, протекающей в рассматриваемой области и другими параметрами, характеризующими исследуемые процессы. Следуя тем же исходным предпосылкам, изложенным в указанных ранее работах [1, 3, 4, 6, 7], используем с целью упрощения пока прямоугольные координаты.

Рассмотрим поверхности двух соседних частиц, разделенные рабочим потоком – в силу кривизны их поверхностей и произвольной ориентации в пространстве расстояние, как отмечалось выше, между поверхностями переменное от точки к точке; положим, что система координат связана с одной из поверхностей, а ось  $z$  направлена по нормали к одной из поверхностей, при этом существенно соотношение между размерами слоя рабочей среды, находящегося между этими поверхностями и кривизной этих поверхностей, точнее, с местными радиусами кривизны таких поверхностей. Если величины двух последних параметров можно принять значительно большими в сравнении с толщиной разделяющего обрабатываемые поверхности слоя, то задача в значительной степени упрощается. Предварительный анализ такого рода соотношений для различных вариантов его разделения и вариаций изменения других параметрических характеристик показывает, что такое соотношение имеет место.

В этом случае можно считать, что оси  $Ox$  и  $Oy$  полностью расположены на выбранной нами (рис. 1) нижней поверхности.

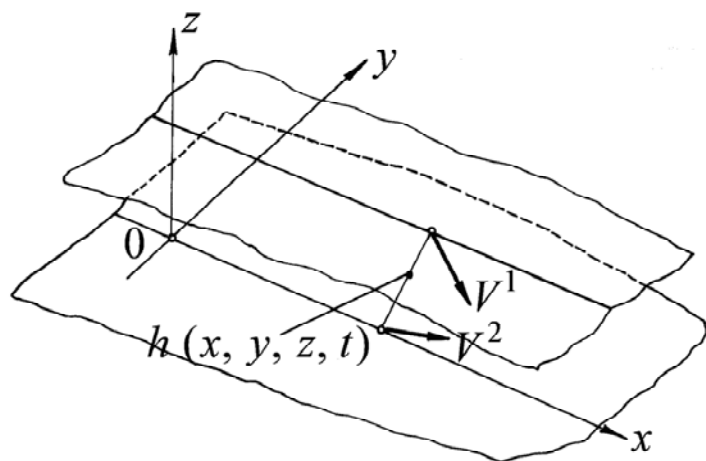


Рис. 1. Схема расположения двух соседних частиц продукта, разделенных рабочим потоком  
 Fig. 1. Location scheme of two neighboring particles of the product, separated by a workflow

В наиболее общем случае, как это видно из рис. 1, векторы относительных скоростей поверхностей обрабатываемых частиц расположены произвольным образом в пространстве, можно задать их компоненты вдоль соответствующих координатных осей, например,  $V_X^1, V_Y^1, V_Z^1$  и  $V_X^2, V_Y^2, V_Z^2$ , а толщина слоя, их разделяющего, зависит от  $x, y$  и  $t$ , т.е.  $h = h(x, y, t)$ . Будем при этом полагать, что  $h(x, y, t)$  является непрерывной функцией и дифференцируемой во всей области  $(x, y)$ , за исключением краев частиц, т.е. резких переходов и областей изменения формы частиц.

В наиболее общем случае скорости частиц относительно выбранной системы координат являются функциями этих координат и времени:

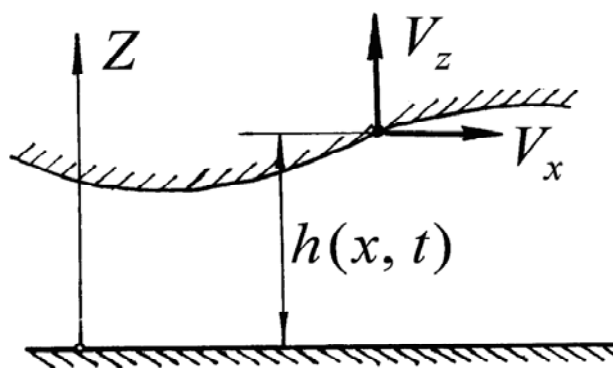
$$V^1 = V^1(x, y, z, t), \quad V^2 = V^2(x, y, z, t),$$

где  $V^1$  и  $V^2$  – скорости поверхностей рядом расположенных (соседних) частиц (см. рис.1).

Как отмечалось, указанное расположение координатных осей отвечает (в плане поставленной в настоящей работе задачи) ортогональным криволинейным координатам, где  $q_1$  и  $q_2$  расположены непосредственно на поверхности одной из частиц и, как и ранее, соответствуют осям  $x$  и  $y$ , а  $q_3$  – нормальной координате  $Z$ . В дальнейшем при таком рассмотрении более удобно использовать относительную скорость поверхности одной частицы, перемещающейся относительно другой.

В используемой системе координат (рис. 2) примем, что нижняя поверхность неподвижна, а верхняя движется с какой-либо скоростью; в данном случае этот параметр представляет собой относительную скорость.

Рис. 2. Схема расположения поверхностей двух соседних частиц и принятые направления координатных осей  
Fig. 2. Location scheme of two neighboring surfaces of the particles and the direction taken by the coordinate axes



Взаимное влияние размера расстояния между обрабатываемыми частицами биосырья на гидродинамические параметры исследуемых процессов и результаты воздействия гидромеханических характеристик в виде относительного смещения и разворотов частиц в потоке требуют фиксации (условной) какого-либо из соседних объектов. Рассматривая минимальное их количество (два), мы условно приняли в дальнейшем, что один из них является неподвижным. Вызывало определенные затруднения и наличие кривизны поверхностей одновременно у обоих соседствующих объектов обработки. В отдельных случаях впоследствии мы будем допускать значительное различие местных радиусов кривизны таких поверхностей. На практике часто поверхность одной из рядом расположенных частиц значительно более плоская, чем другая. Это позволяет, как можно видеть, на настоящем этапе анализа несколько упростить задачу.

Направление оси  $x$  ( $q_1$  – в криволинейной системе координат) выбрано таким образом, чтобы вдоль нее движение рабочей среды (воздуха) между соседними частицами являлось преимущественным, т.е. трансверсальная составляющая скорости течения была значительно меньше продольной компоненты.

Возвращаясь к влиянию расстояния между обрабатываемыми частицами, отметим, что последнее, изменяясь в определенных пределах (от нуля до конечных значений), тем самым зависит от режимов обработки сырья. Так, близкие нулю значения этих расстояний соответствуют значительному «насыщению» рабочего объема той или иной установки высушиваемым биосырьем: максимальное (в единице объема) присутствие частиц соответствует минимальным средним расстояниям между ними.

Увеличение такого расстояния будет соответствовать снижению концентрации частиц в рабочем объеме сушильной камеры. Анализ поведения их в процессе высушивания с точки зрения расхода воздуха, баланса тепла и изменения концентраций удаляемой фазы лучше проводить, опираясь на крайние, предельные случаи.

Используя изложенные рассуждения и опираясь на общепринятые в гидромеханике выкладки, запишем уравнения движения рабочего потока между достаточно близко расположенными (анализ границ применимости используемых здесь предположений связан



с внешними по отношению к рассматриваемым частицам условиями) поверхностями частиц следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \varpi}{\partial z} = 0, \quad (18)$$

где  $P = P(x, t)$ .

При этом пока принято, что расстояние между частицами и соответствующие скорости удовлетворяют таким значениям критериальных чисел, что инерционными членами в уравнениях движения можно пренебречь, а коэффициенты вязкости среды на достаточном удалении от поверхностей частиц (т.е. вне пограничных слоев) мало изменяются от точки к точке и, таким образом, вне размеров соответствующих гидродинамических и диффузионных пограничных слоев независимы от координат. Кроме того, одна из двух соседних поверхностей обрабатываемых частиц, имеющая меньший радиус кривизны, условно принята на достаточно коротком участке плоской. Вдоль нее и проведена ось  $x$ , координата  $z$ , как и ранее, направлена по нормали к ней.

Количество рабочей среды (воздуха), проходящей через произвольно выбранное поперечное сечение в единицу времени, можно определить так:

$$Q(x, t) = \int_0^h u \cdot dz, \quad (19)$$

где  $h(x, t)$  – расстояние между поверхностями частиц по нормали к выбранной поверхности.

Начальные и граничные условия зададим в следующем виде:

$$\begin{aligned} u(x, z, 0) = w(x, z, 0) &= (x, 0) = (x, 0); \\ P(x, 0) &= 0 \text{ при } t = 0; \\ u(x, 0, t) = w(x, 0, t) &= 0 \text{ при } z = 0; \\ u(x, h, t) = V_X(x, t); \quad w(x, h, t) &= V_Y(x, t) \text{ при } z = h(x, t). \end{aligned} \quad (20)$$

Проинтегрировав последнее из уравнений (18) в пределах от нуля до  $h$ , получим

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dz + V_Y = 0. \quad (21)$$

С учетом следующего выражения

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u \cdot dz - V_X \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial x} - V_X \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (22)$$

относительно  $Q$  имеем следующее уравнение:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = V_X \frac{\partial h}{\partial x} - V_Y. \quad (23)$$

Обозначим далее через  $Q(c, t)$  количество рабочей среды, протекающей через фиксированное в области  $X = C$  сечение и, интегрируя последнее уравнение в пределах от  $C$  до  $X$ , определим  $Q$ :

$$Q(x, t) = \int_c^x \left( V_X \frac{\partial h}{\partial x} - V_Y \right) dx + Q(c, t). \quad (24)$$

Из этого выражения следует, что, если задана функция  $Q(c, t)$ , т.е. расход в фиксированном при  $X = C$  сечении, и определен закон относительного движения поверхностей (частиц), нетрудно определить  $Q(x, t)$ . И наоборот, в случае задания этой функции можно определить закономерности, характеризующие перемещение частиц.

Функции  $Q(x, t)$  и  $Q(c, t)$  связаны через  $h(x, t)$ ,  $V_X$  и  $V_Y$  – они в целом определяют режимы течения газа (воздуха) между поверхностями соседних частиц.

Перейдем опять к более обобщенному анализу режимов, характера и особенностей течения рабочей среды между двумя поверхностями произвольной кривизны. При этом будем (также предварительно) рассматривать двухмерное течение.

Проанализируем поведение рабочей среды в плоскости, соответствующей сечению области плоскостью, находящейся между поверхностями  $xz$ , в данном случае направление потока среды находится в этой плоскости. Уравнения движения возьмем, следуя тем же классическим работам [1, 3], все также с учетом характерных особенностей, присущих биологическим объектам обработки. Приведенные далее уравнения учитывают влияние местного радиуса кривизны на характер течения основных рассматриваемых и сопутствующих процессов.

Особенности рассматриваемых способов обработки биочастиц позволяют допустить, что на сравнительно небольшой длине (по отношению к целому, не шинкованному сырью – биологическому объекту, подлежащему обработке) вдоль поверхности частицы изменение местных радиусов кривизны этой поверхности не является слишком резким:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{r}{r+z} u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uw}{r+z} = -\frac{1}{\rho} \frac{r}{r+z} \frac{\partial P}{\partial x} + v \cdot \left\{ \frac{r^2}{(r+z)^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{r+z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{(r+z)^2} + \frac{2r}{(r+z)^2} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{r}{(r+z)^3} \cdot \frac{dr}{dx} w + \frac{rz}{(r+z)^3} \cdot \frac{dr}{dx} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right\}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{r}{r+z} u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2}{r+z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \cdot \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{2r}{(r+z)^2} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r+z} \frac{\partial w}{\partial z} + \right. \\ \left. + \frac{r^2}{(r+z)^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{w}{(r+z)^2} + \frac{r}{(r+z)^3} \frac{dr}{dx} u + \frac{rz}{(r+z)^3} \frac{dr}{dx} \frac{\partial w}{\partial x} \right\}. \end{aligned} \quad (26)$$

Полагая отсюда  $dr/dx = 0$ , будем иметь систему следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{r}{r \pm z} u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{(r \pm z)} uw = -\frac{1}{\rho} \frac{r}{r \pm z} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \left( \frac{r}{r \pm z} \right)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{2r}{(r \pm z)^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{(r \pm z)} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{(r \pm z)^2} \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{r}{(r \pm z)} u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2}{(r \pm z)} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \left( \frac{r}{r \pm z} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{2r}{(r \pm z)^2} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{(r \pm z)} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{w}{(r \pm z)^2} \right]. \quad (28)$$

В приведенных уравнениях знак плюс относится к выпуклой поверхности, минус – к вогнутой.

Рассмотренное течение рабочей среды между высушиваемыми частицами по мере увеличения расстояния, разделяющего их, превращается в потенциальное, если достигает размеров, превышающих суммы гидродинамических пограничных слоев на поверхностях. В этом случае тепло- и массообменные процессы определяются не только режимами и характером течения в этой потенциальной области, но и движением сплошной среды в самих пограничных слоях, причем влияние последних может оказаться решающим.

Рассмотрим течение среды с учетом этих замечаний, выполнив в соответствующих уравнениях гидродинамики переход к координатам  $x, y, z$  и обозначениям  $u, v, w$  для отвечающих этим координатам компонентам скоростей течения рабочей среды.

На рис. 3 изображен участок поверхности, на которой расположены оси  $q_1$  и  $q_2$  ( $x$  и  $y$ ), ось  $q_3$  ( $z$ ) корригирует с нормалью.

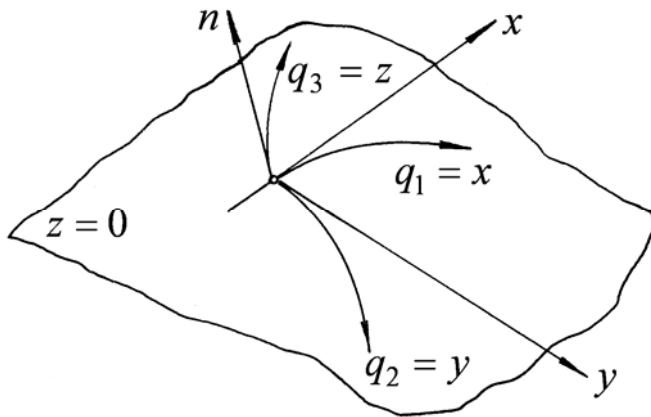


Рис. 3. Схема расположения осей криволинейных координат на поверхности частицы  
Fig. 3. Location scheme of curvilinear coordinates axes on the surface of the particle

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{H_1} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{g}{H_2} \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{H_1 H_2} \left( u g \frac{\partial H_1}{\partial y} - g^2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) = \\ = F_1 - \frac{1}{\rho H_1} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial t} + \frac{u}{H_1} \frac{\partial g}{\partial x} + \frac{g}{H_2} \frac{\partial g}{\partial y} + w \frac{\partial g}{\partial z} + \frac{1}{H_1 H_2} \left( u g \frac{\partial H_2}{\partial x} - u^2 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) = \\ = F_2 - \frac{1}{\rho H_2} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial g}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{H_1 H_2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u H_2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho g H_1) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (\rho g) = 0. \quad (31)$$

Приведенные уравнения описывают в целом все многообразие процессов, протекающих непосредственно вблизи поверхностей биочастиц, тем самым отражая достаточно тонкие явления, сопутствующие им. Одновременно просматривается чрезвычайная чувствительность этих процессов к внешним (по отношению к области взаимодействия частиц с потоком) воздействиям. Именно это позволяет управлять исследуемыми процессами, изменяя в достаточно широких пределах параметры сушки биосырья.

Использование изменений гидродинамических, а также тепло- и массообменных характеристик в качестве управляющих параметров по отношению к процессам, протекающим вблизи поверхностей обрабатываемого сырья, не только связано с вариациями тех или иных параметров в рассматриваемых областях, но и обусловлено последними.

Не вызывает сомнений (и подтверждается экспериментально), что поведение обрабатываемой частицы в потоке связано не столько с внешними (по отношению к ней) параметрами потока, сколько с биологическими, химическими и даже геометрическими показателями объекта обработки.

Основным возмущающим фактором здесь выступает острая кромка среза, и если размер частицы вдоль потока окажется достаточно велик, то есть основания ожидать развития возмущения вдоль оси  $x$ .

Таким образом, полученные уравнения описывают все многообразие гидродинамических режимов, возникающих в сушильных камерах при сушке измельченных гидробионтов. На их основе можно выполнить расчеты основных параметров и узлов сушилок, в которых используются взвешенно-закрученные потоки (ВЗП) теплоносителя.

На базе проведенных исследований нами создано более десятка новых типов сушилок с ВЗП производительностью от 5 до 40 т перерабатываемого сырья в сутки, которые эксплуатируются в (стационарном, автономном и судовом вариантах исполнения) на 15 рыбозаводах и рыбокомбинатах России.

### Список литературы

1. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 196 с.
2. Сыромятников Н.И., Васанова Л.К., Шиманский Ю.М. Тепло- и массообмен в кипящем слое. – М.: Химия, 1967. – 176 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Погонец В.И. Гидродинамические характеристики и диапазон существования кипящего закрученного слоя дисперсных частиц агара при сушке // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2012. – Т. 25. – С. 111-115.
5. Погонец В.И., Пешков И.Х. Технология сушки пряно-сладкой ламинарии при производстве цукатов // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Ч. II. – Владивосток, 2012. – С. 110-113.
6. Погонец В.И., Пешков И.Х. Особенности сушки частиц агара во взвешенно-закрученных потоках // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2012. – Т. 26. – С. 126-132.
7. Погонец В.И. Установка для сушки растворов полисахаридов во взвешенно-закрученных потоках теплоносителя // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – Т. 23. – С. 195-197.

**Сведения об авторах:** Погонец Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, e-mail: pogonetsvi@mail.ru;  
Лазанович Анна Владимировна, аспирант.