

МЕХАНІЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АПК

УДК 631.362.23

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСЕПАРАЦИОННОМ КАНАЛЕ

Дидур В.А., акад. МААО, д.т.н., проф.

Ткаченко А.В., к.т.н.

Ткаченко В.А., к.т.н., доц.

Таврический государственный агротехнологический университет

г. Мелитополь, Украина

Тел. +380619440274

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

Аннотация. Приведены осреднённые уравнения главного момента внешних объёмных и поверхностных сил для твёрдой и воздушной фаз в воздушной смеси применительно к вертикальному пневмосепарационному каналу с параллельными жёсткими стенками. Уравнения учитывают вихревое движение воздушного потока, тензор эффективных напряжений твёрдой фазы и мгновенные силы ударов между твёрдыми частицами и жёсткой границей потока.

Ключевые слова: турбулентное течение, двухфазный поток, статистическая гидромеханика, метод вероятностного осреднения, обобщённые функции.

Постановка проблемы. Нами, совместно со специалистами института масличных культур УААН, разработаны контейнерная технология уборки и экспериментальное оборудование для послеуборочной обработки гибридов семян подсолнечника родительских форм и первой репродукции [1, 2, 3, 4].

Наименее изученными процессами в технологии послеуборочной обработки являются сепарирование и подготовка поверхности семян обеспыливанием в турбулентном воздушном потоке перед протравливанием и инкрустацией. Основной характеристикой турбулентного течения является беспорядочный, хаотический характер турбулентных пульсаций. Последовательное и полное решение проблемы турбулентности возможно путем применения методов статистической механики.

Анализ последних исследований. При исследовании процесса сепарации зернового вороха в вертикальном воздушном потоке обычно на основании второго закона Ньютона составляются дифференциальные уравнения, где учитываются только сила тяжести семян и сила сопротивления воздушного потока [4,5]. При исследовании процесса пневмотранспортирования на зерноперерабатывающих предприятиях [6] рассматривают двухкомпонентный дисперсионный поток. Авторы обращают внимание о возникновении дополнительных трудностях, связанных с необходимостью рассмотрения двухфазного потока как сплошной среды. Большой интерес представляет монография [7], где вместо широко применяемых пространственного и временного методов осреднения случайных полей гидродинамических величин используется метод вероятностного осреднения. Сочетание этого метода с элементами теории обобщённых функций позволяет построить систему осреднённых по вероятности динамических уравнений для континуумов, моделирующих жидкую и твёрдую фазы. Однако в работе рас-

смаатриваются процессы, происходящие только при горизонтальном транспортировании взвесенесущих потоков в цилиндрической трубе, а в вертикальном канале, да еще с параллельными стенками этот процесс будет иметь свою специфику.

Цель исследования. Целью данной работы является определение статистической зависимости между параметрами двухфазного турбулентного вертикального воздушно-го потока с беспорядочной хаотической пульсацией и движением обрабатываемых семян при их взаимодействии между собой с воздушными потоками и жесткой границей канала.

Основная часть. В пневмосепарационном канале воздушная смесь является турбулентным двухфазным потоком. Смесь включает воздушную рабочую фазу, реализующую технологический процесс, и твердую обрабатываемую фазу. Вследствие прилипания воздуха к поверхностям погруженных в него твердых частиц воздушную смесь, заполняющую ту или иную область пространства, можно рассматривать как неоднородную сплошную среду. Основное её отличие от однородной заключается в том, что область, занятая неоднородной средой, содержит границу раздела фаз как сингулярную (разрывную) поверхность относительно физических характеристик состояния среды, например плотности. Тогда как область, занятая однородной сплошной средой, не имеет таких поверхностей. Если же рассматривать воздушную или твердую фазы в отдельности, то они не заполняют полностью весь объём, занятый воздушной смесью и по отношению к нему не является сплошной средой. В этом случае граница раздела фаз становится сингулярной не только относительно физических характеристик состояния, но и гидродинамических – скорости и напряжений. Следовательно, гидродинамические характеристики фаз – разрывные функции координат и времени, поэтому не дифференцируемые в рамках классического математического анализа. Для построения континуальной модели движения той или иной фазы достаточно перейти от разрывных функций физических и аэродинамических характеристик этой фазы к непрерывным функциям характеристик во всей области, занятой воздушной смесью, и дифференцируемым в пространстве и времени. Воздухонесущие потоки турбулентны и любой метод осреднения позволяет перейти от исходных разрывных характеристик движения фаз к осреднённым непрерывным. Поэтому уравнения для потоков рассматриваемого класса целесообразно составить методом вероятностного осреднения, нашедшим широкое применение в современной теории турбулентности [7, 8]. При составлении осреднённых уравнений воздухонесущего потока методом вероятностного осреднения возникают определенные математические трудности. Однако эти трудности преодолеваются в рамках теории обобщённых функций, обладающих рядом ценных свойств и расширяющих возможности классического математического анализа [9, 10].

Для описания процесса пневмосепарации и обеспыливания семян в вертикальном сепарационном канале применим метод вероятностного осреднения для двухфазных потоков [7].

Применение закона изменения момента количества движения к произвольному конечному объёму гидросмеси V , ограниченному поверхностью S , приводит к следующим интегральным уравнениям в проекциях на оси координат Ox_i :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho u_l dV = - \frac{d}{dt} \iiint_V K_i^0 dV + \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho X_l dV - \\ - \iint_S \varepsilon_{ipl} r_p \rho u_l u_\alpha n_\alpha dS + \iint_S \varepsilon_{ipl} r_p \sigma_{\alpha l} n_\alpha dS; \quad i, p, l = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (1)$$

где ε_{ipl} – кососимметричный символ Кронекера; r_p – компоненты радиуса-вектора, характеризующего положение отдельных точек выделенного объёма V относительно начала координат; ρ и u_α, u_i – плотность и компоненты вектора скорости воздушной смеси; K_i^0 – компоненты вектора плотности внутренних моментов количества движения воздухомеси, обусловленных ориентированием моментов инерции несимметричных семян при вращении; X_i – компоненты вектора массовых сил, действующих на жидкую и твёрдую фракции; $\sigma_{\alpha l}$ – компоненты тензора мгновенных напряжений воздухомеси; n_α – проекция внешней нормали к элементу поверхности dS на ось Ox_α ; суммирование производится по повторяющемуся индексу α , ($\alpha = 1, 2, 3$). Входящие в (1), величины $K_i^0, \rho, u_i, u_\alpha, X_i, \sigma_{\alpha l}$ заданы в области G , занимаемой пневмосмесью в пространстве и времени, и являются функциями, позволяющими использовать связь между характеристиками фаз и одноименной с ними характеристикой смеси. Эти функции можно представить следующим образом [7]:

$$\varphi(x, t) = \sum_k \tilde{\varphi}_k(x, t), \quad (x, t) \in G \quad (2)$$

где $\tilde{\varphi}_k = \theta_k \varphi$, θ_k – индикатор фаз; индекс $k = 1$ относится к воздушной, а $k = 2$ к твёрдой фазе. Функция $\tilde{\varphi}_k$ как срезка характеристики φ по области G_k определена во всей области G , равна φ_k при $(x, t) \in G_k$ и нулю при $(x, t) \in CG_k$, где CG_k – дополнение G_k к G .

Выполняя преобразование [11] интеграла левой части уравнения (1), получим:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho u_l dV = \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho \frac{du_l}{dt} dV. \quad (3)$$

Для преобразования поверхностного интеграла в правой части (1) в объёмный интеграл учитывая (2) получим компоненты тензора напряжений воздухомеси $\sigma_{\alpha i}(x, t)$ в виде:

$$\sigma_{l\alpha}(x, t) = \sum_k \tilde{\sigma}_{k, l\alpha}(x, t) = \sum_k \theta_k \sigma_{k, l\alpha}(x, t), \quad (x, t) \in G \quad (4)$$

Дивергенция тензора напряжений $\sigma_{\alpha i}$ запишется:

$$\frac{\partial \sigma_{l\alpha}}{\partial x_\alpha} = \sum_k \frac{\partial \tilde{\sigma}_{k, l\alpha}}{\partial x_\alpha} = \sum_k \theta_k \left\{ \frac{\partial \sigma_{l\alpha}}{\partial x_\alpha} \right\}. \quad (5)$$

Учитывая (4) и (5) поверхностный интеграл в правой части (1) преобразуем к виду:

$$\iint_S \varepsilon_{ipl} r_p \sigma_{\alpha l} n_\alpha dS = \iiint_V \sum_k \varepsilon_{ipl} \left(r_p \frac{\partial \tilde{\sigma}_{k,\alpha l}}{\partial x_\alpha} + \tilde{\sigma}_{k,\alpha l} \frac{\partial r_p}{\partial x_\alpha} \right) dV \quad (6)$$

Подставляя выражения (3) и (6) в уравнение (1), учитывая (2) и выполняя преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho \frac{du_l}{dt} dV &= \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \left(\rho X_l + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{k,\alpha l}}{\partial x_\alpha} \right) dV + \\ &+ \iiint_V \left(\varepsilon_{ipl} \sum_k \tilde{\sigma}_{k,\alpha l} \frac{\partial r_p}{\partial x_\alpha} - \frac{dK_i^0}{dt} \right) dV - \iint_S \varepsilon_{ipl} r_p \rho u_l u_\alpha n_\alpha dS. \end{aligned} \quad (7)$$

Осредняя по вероятности обе части уравнения (2) для статистического среднего значения любой гидродинамической характеристики взвесенесущего потока получаем [7]:

$$\overline{\varphi(x,t)} = \sum_k \overline{\theta_k(x,t)} \langle \varphi_k(x,t) \rangle. \quad (8)$$

где $\overline{\varphi(x,t)}$ – статистическое безусловное среднее значение любой гидродинамической характеристики; $\langle \varphi_k(x,t) \rangle$ – статистическое условное среднее значение этой характеристики; $\overline{\theta_k(x,t)}$ – математическое ожидание индикатора, равное вероятности появления k -й фазы в заданной точке потока в фиксированный момент времени.

Осредняя по вероятности подынтегральные выражения в (7) с учётом равенства (8) и $\langle \sigma_{1,\alpha l} \rangle \partial r_p / \partial x_\alpha = \langle \sigma_{1,pl} \rangle$, получим:

$$\begin{aligned} \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \sum_k \rho_k \bar{\theta}_k \frac{d \langle u_{k,l} \rangle}{dt} dV &= \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \sum_k \left(\rho_k \bar{\theta}_k X_l + \frac{\partial \langle \sigma_{1,\alpha l} \rangle}{\partial x_\alpha} \right) dV + \\ &+ \iiint_V \left(\varepsilon_{ipl} \langle \sigma_{1,pl} \rangle - \frac{d \bar{\theta}_k \langle K_i^0 \rangle}{dt} \right) dV - \iint_S \varepsilon_{ipl} r_p \sum_k \rho_k \bar{\theta}_k \langle u_{k,l} u_{k,\alpha} \rangle n_\alpha dS. \end{aligned} \quad (9)$$

К массовым силам X_i в нашем случае отнесем силы тяжести действующие на обе фазы равные ускорению свободного падения g_i и удельные на единицу массы частиц силы мгновенных ударов между частицами и о жесткую поверхность канала. Найдём плотность распределения рассматриваемых сил удара в пространстве с учётом того, что они дискретные и носят случайный характер.

Пусть G_2' – область пространства – времени, занимаемая соударяющимися твёрдыми частицами. В качестве индикатора этой области введём функцию $f_*(x,t)$, которая определена в G , равна единице, если $(x,t) \in G_2'$, и нулю, если $(x,t) \in CG_2'$,

где CG_2' – дополнение G_2' к G . Поскольку процесс взаимных соударений твёрдых частиц во взвешенном потоке носит случайный характер, $f_*(x, t)$ – случайная функция. Её вероятное среднее значение f_* в любой заданной точке $(x, t) \in G$ равно вероятности того, что эта точка будет принадлежать области G_2' . Предположим, что заданная в трёхмерной области взвешенного потока произвольная точка x в данный момент времени t находится внутри какой-нибудь твёрдой частицы, столкнувшейся с одной или несколькими окружающими её соседними частицами или с границей потока. Удельная, на единицу массы частицы, сила удара:

$$\Pi_{2,i} = \frac{1}{m_s} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau R_{2,i}' dt, \quad (10)$$

где m_s – масса твёрдой частицы; $R_{2,i}'$ – компонента главного вектор сил реакции, приложенных к данной частице со стороны контактирующих с ней твёрдых частиц или границы потока за время удара τ . Случайная величина $\Pi_{2,i}$ задана во всей области G , принимает значения, определяемые формулой (10), в области G_2' и равняется нулю в CG_2' . Обозначив через $\langle \Pi_{2,i} \rangle$ вероятное условное среднее значение величины $\Pi_{2,i}$ при $(x, t) \in G_2'$, аналогично (8) получим:

$$\langle \Pi_{2,i} \rangle = \frac{1}{\theta_2} \bar{\Pi}_{2,i} = \frac{1}{\theta_2} \bar{f}_* \langle \langle \Pi_{2,i} \rangle \rangle, \quad (11)$$

где $\bar{\Pi}_{2,i}$ и $\langle \langle \Pi_{2,i} \rangle \rangle$ – вероятное безусловное и условное среднее значение величины $\Pi_{2,i}$ при $(x, t) \in G_2'$.

Обозначим компоненты локальных главных векторов в фазах

$$R_{1,i} = \partial \langle \sigma_{1,\alpha l} \rangle / \partial x_\alpha - \bar{f}_i, \quad R_{2,i} = \bar{f}_i, \quad (12)$$

где \bar{f}_i – компонента вектора среднестатистической силы, действующей со стороны воздуха на твердые частицы в единице объёма воздухосмеси. Полную силу \bar{f}_i можно разложить на две составляющие:

$$\bar{f}_i = \bar{\theta}_2 \partial \langle \sigma_{1,i\alpha} \rangle / \partial x_\alpha + \bar{f}_i^0, \quad (13)$$

где \bar{f}_i^0 – сила гидродинамического межфазного взаимодействия, обусловленная обтеканием твёрдых частиц воздухом и отнесенная к единице объёма воздухосмеси,

включающая в себя силу сопротивления воздуха движению твёрдых частиц, силы Бассэ и Магнуса.

Выразив $\bar{\Pi}_{2,i}$ через дивергенцию тензора эффективных среднестатистических напряжений твёрдой фазы $\bar{\sigma}_{i\alpha}^*$, обусловленных контактным силовым взаимодействием твёрдых частиц между собой и с границами потока, зависимость (11) запишем в виде:

$$\langle \Pi_{2,i} \rangle = \frac{1}{\bar{\theta}_2} \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \bar{\sigma}_{i\alpha}^*}{\partial x_\alpha}. \quad (14)$$

Таким образом, на частицы воздушной фазы действует массовая сила g_i , тогда как на частицы твёрдой фазы действуют массовые силы g_i и $\langle \Pi_{2,i} \rangle$. Поэтому входящая в (9) массовая сила с учётом (14) равна:

$$\langle X_{k,i} \rangle = g_i + \frac{1}{\bar{\theta}_2} \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \bar{\sigma}_{i\alpha}^*}{\partial x_\alpha} \delta_{k2}. \quad (15)$$

где δ_{k2} – символ Кронекера: $\delta_{k2} = 1$, если $k = 2$, и $\delta_{k2} = 0$, если $k \neq 2$.

В уравнение (9) входит величина $\langle u_{k,i} u_{k,\alpha} \rangle$, которую можно записать в виде:

$$\langle u_{k,i} u_{k,\alpha} \rangle = \langle u_{k,i} \rangle \langle u_{k,\alpha} \rangle + \langle u'_{k,i} u'_{k,\alpha} \rangle, \quad (16)$$

где $u'_{k,i}, u'_{k,\alpha}$ – пульсационные составляющие мгновенных скоростей $u_{k,i}$ и $u_{k,\alpha}$, $u'_{k,i} = u_{k,i} - \langle u_{k,i} \rangle$, $u'_{k,\alpha} = u_{k,\alpha} - \langle u_{k,\alpha} \rangle$.

Подставляя вместо $\langle X_{k,i} \rangle$ и $\langle u_{k,i} u_{k,\alpha} \rangle$ их выражения (15) и (16) в уравнение (9), учитывая (10), (12), (13) и применяя к поверхностному интегралу формулу Остроградского, получим интегральные уравнения момента количества движения аэросмеси в проекциях на оси координат:

$$\begin{aligned} & \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \sum_k \rho_k \bar{\theta}_k \frac{d \langle u_{k,l} \rangle}{dt} dV = - \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho_k \sum_k \frac{\partial \bar{\theta}_k \langle u_{k,i} \rangle \langle u_{k,\alpha} \rangle}{\partial x_\alpha} dV - \\ & - \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \rho_k \sum_k \frac{\partial \bar{\theta}_k \langle u'_{k,i} u'_{k,\alpha} \rangle}{\partial x_\alpha} dV + \iiint_V \left(\varepsilon_{ipl} \langle \sigma_{1,pl} \rangle - \frac{d \bar{\theta}_k \langle K_i^0 \rangle}{dt} \right) dV + \\ & + \iiint_V \varepsilon_{ipl} r_p \left(\rho_k \bar{\theta}_k g_i + \frac{\partial \bar{\sigma}_{i\alpha}^*}{\partial x_\alpha} \delta_{k2} + \frac{\partial \langle \sigma_{1,\alpha l} \rangle}{\partial x_\alpha} \delta_{k1} + (-1)^k \bar{f}_i \right) dV. \end{aligned} \quad (17)$$

Приравняв к нулю из-за произвольности объёма V подынтегральное выражение, получим осреднённые дифференциальные уравнения момента количества движения воздушной смеси. Вертикальный пневмосепарационный канал выполнен из парал-

лельных жестких стенок, т.е. прямоугольного сечения. Из кинематики известно, что прямолинейное течение жидкости между неподвижными плоскими параллельными стенками вихревое, причём вектор $\bar{\omega}$ угловой скорости во всех точках нормален линиям тока. Поэтому дифференциальные уравнения моментов количества движения разделим по фазам, с получением уравнения воздушной фазы, описывающей вихревое движение смешенного потока. Для удобства индексы фаз $k=1$ и $k=2$ заменим на соответствующие индексы w и s .

$$M_s = -\varepsilon_{ipl} r_p \rho_s \frac{\partial \bar{\theta}_s \langle u_i \rangle_s \langle u_\alpha \rangle_s}{\partial x_\alpha} + \varepsilon_{ipl} r_p \frac{\partial \bar{T}_{s,i\alpha}}{\partial x_\alpha} - \frac{d\bar{\theta}_k \langle K_i^0 \rangle}{dt} + \varepsilon_{ipl} r_p \rho_s g_i + \varepsilon_{ipl} r_p \frac{\partial \bar{\sigma}_{i\alpha}^*}{\partial x_\alpha} + \varepsilon_{ipl} \bar{f}_i; \quad (18)$$

$$M_w = -\varepsilon_{ipl} r_w \rho_w \frac{\partial (1 - \bar{\theta}_s) \langle u_i \rangle_w \langle u_\alpha \rangle_w}{\partial x_\alpha} + \varepsilon_{ipl} r_w \frac{\partial \bar{T}_{w,i\alpha}}{\partial x_\alpha} + \varepsilon_{ipl} \frac{\partial \langle \sigma_{i\alpha} \rangle_w}{\partial x_\alpha} + \varepsilon_{ipl} \langle \sigma_{1,pl} \rangle - \bar{f}. \quad (19)$$

где M_s и M_w — соответственно моменты количества движения твёрдой и воздушной фаз; r_w — радиус вихря воздушного потока в вертикальном пневмосепарационном канале. Входящие в (18) и (19) тензоры представляют собой добавочные напряжения, возникшие в турбулентном воздуходнесущем потоке вследствие беспорядочных движений фаз.

$$\bar{T}_{k,i\alpha} = -\rho_k \bar{\theta}_k \langle u_{k,i}' u_{r,\alpha}' \rangle \quad (20)$$

Полученные уравнения (18) и (19) описывают турбулентное движение соответствующей фазы как некоего континуума в статистическом смысле. Уравнения (18) учитывает тензор эффективных напряжений твёрдой фазы $\bar{\sigma}_{i\alpha}^*$ и мгновенные силы ударов между твёрдыми частицами и о жесткую границу потока. Дифференциальные уравнения моментов количества движения воздушной фазы (19) описывают вихревое движение воздушного потока с радиусом вихря r_w . Для полного описания статистической модели двухфазного потока в пневмосепарационном канале следует использовать уравнения неразрывности фаз и уравнения количества движения фаз, полученные С.И. Крилем [7]

Выводы.

1. Применение методов статистической механики в сочетании с элементами теории обобщенных функций, позволило получить закономерности в форме дифференциальных уравнений моментов количества движения отдельно твёрдой и воздушной фаз с входящими тензорами добавочных напряжений, возникших в турбулентном потоке вследствие беспорядочных пульсационных движений воздушной фазы. Состояние твёрдой фазы учитывает мгновенные силы ударов между твёрдыми частицами о жесткую границу канала. Движение воздушной фазы описывает вихревое движение воз-

душного потока. Если к этим закономерностям добавить уравнение неразрывности фаз и уравнение количества движения фаз, то получим полную статистическую модель двухфазного потока в пневмосепарационном канале.

2. Технологическим назначением полученной модели является определение частоты вращения тензора, возникших напряжений, обрабатываемых в турбулентном вертикальном потоке семян и их взаимодействие между собой, жесткой границей канала и воздушной фазой в зависимости от физических свойств семян и технологических режимов процессов обеспыливания и сепарации.

3. Дальнейшее использование разработанной статистической модели для двухфазного потока будет использовано для численных исследований различных вариантов технологических режимов процесса и различных видов семян.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дидур В.А. Контейнерная технология послеуборочной обработки семян подсолнечника высших репродукций /В.А. Дидур, А.В. Ткаченко //Восточно-европейский журнал передовых технологий. Математика и кибернетика – фундаментальные и прикладные аспекты. – 2007. – № 3/6 (27) – С. 62 – 72.

2. Дидур В.А. Технология послеуборочной обработки репродуктивных семян /В.А. Дидур, А.В. Ткаченко, В.А. Ткаченко //Збірник наукових праць ІМТ НААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві» – Випуск 1. – Запоріжжя: ІМТ НААН, 2012. – С. 122 – 138.

3. Ткаченко А. Оборудование и технология сушки семян подсолнечника высших репродукций /А. Ткаченко, В. Дидур. – Lap Lambert Academic Publishing. – 2014. – 160 с.

4. Дідур В.А. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів пневмосепаратора з пиловловлювальним пристроєм / В.А. Дідур, А.Б. Чебанов // Техніка і технології АПК. - № 11(50).- 2013. - ДП «УкрЦВТ».- С.6-9

5. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях /В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин //2-е изд., перер. и доп. – М.: Колос, 1980. – 304 с.

6. Дзядзио А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А.М. Дзядзио, А.С. Кеммер– М.: Колос, 1967. – 295 с.

7. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки /Криль С.И.; Отв. ред. Олейник А.Я.; АН УССР. Ин-т гидромеханики. – К.: Наук. думка, 1990 – 160 с.

8. Бай ши-и. Турбулентное течение жидкостей и газов /Бай ши-и. – М.: Изд-во иностр. лит, 1962. – 344 с.

9. Владимиров В.С. Обобщённые функции в математической физике / В.С. Владимиров //2-е изд. испр. и доп. – М.: Наука, 1979. – 320 с. (Серия: «Современные физико-технические проблемы»).

10. Шилов Г.Е. Математический анализ: Второй спец. курс /Шилов Г.Е. – М.; Наука, 1965. – 327 с.

11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд. исп. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с. – (Классика отечественной науки).

BIBLIOGRAPHY

1. Didur V.A. Container technology of postharvest processing of sunflower seeds of higher reproductions /V.A. Didur, A.V. Tkachenko // East European Journal of advanced technologies. Mathematics and Cybernetics - fundamental and applied aspects. – 2007. – № 3/6 (27) – S. 62 – 72.

2. Didur V.A. Post-harvest technology of reproductive seeds /V.A. Didur, A.V. Tkachenko, V.A. Tkachenko // Collection of scientific works IMT NAAN "Mechanization,

ecologization and conversion in livestock biosyrovyny"– Vypusk 1. – Zaporizhzhya: IMT NAAN, 2012. – S. 122 – 138.

3. Tkachenko A. Equipment and technology of drying sunflower seeds of higher reproductions /A. Tkachenko, V. Didur. – Lap Lambert Academic Publishing. – 2014. – 160 s.

4. Didur V.A. Substantiation structurally-technological parameters of air separator mill with dust separator / V.A. Didur, A.B. Chebanov // Engineering and Technology APC.- № 11(50).- 2013. - DP «UkrCVT»- S.6-9

5. Hortynskij V.V. Processes for separation of grain processing enterprises /V.V. Hortynskij, A.B. Demskyj, M.A. Boryskyn //2-e yzd., perer. y dop. – M.: Kolos, 1980. – 304 s.

6. Dziadzio A.M. Air transport at the grain processing enterprises / A.M.Dziadzio, A.S. Kemmer.– M.: Kolos, 1967. – 295 s.

7. Kryl' S.Y. Pressure suspended matter flows / S.Y.Kryl'; Otv. red.. A.Ya.Oleinik.; AN USSR. In-t hydromekhaniki. – K.: Nauk. dumka, 1990 – 160 s.

8. Bai shi-i. Turbulent flow of liquids and gases / Shi-i Bai. – M.: Izd- vo inostr. lit, 1962. – 344 s.

9. Vladimirov V.S. Generalized functions in mathematical physics / V.S. Vladimirov //2-e izd. ispr. i dop. – M.: Nauka, 1979. – 320 s. (Series: "Modern physics and technics problems").

10. Shilov G.Ye. Mathematical analysis: Vtoroi spec. kurs / G.Ye Shilov. – M.: Nauka, 1965. – 327 s.

11. Loitsianskii L.G. Fluid and gas mechanics: Ucheb. dlia vuzov/ L.G. Loitsianskii – 7-e izd. isp. – M.: Drofa, 2003. – 840 s. – (Domestic science classics).

STATISTIC MODEL OF TWO-PHASE AIR FLOW IN PNEUMOSEPARATION CHANNEL

Didur V.A., Tkachenko A.V., Tkachenko V.A.

Summary

Averaged equations of basic moment of external volumetric and surface forces for solid and air-phase in the air mixture concerning vertical pneumo-separation channel with parallel rigid walls have been given. The whirling movement of air flow, tensor of solid phase effective stress and instant forces ratcheting between solid particles and rigid flow line have been factored into equation.

Key words: turbulent flow, two-phase flow, statistic hydromechanics, average out probability method, generalized functions.

УДК 361.31

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ҐРУНТУ ПІД ДІЄЮ РОТАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ОРґАНУ

Пастухов В. І., акад. МААО, д.т.н., проф.

Беловол С. А., асп.

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка

м. Харків, Україна

Тел. +380506340160, +380638309060

e-mail: pastukhov@listl.ru, belovol_sa@mail.ru