

УДК 664.724

В.С. КУНАКОВ, В.А. ТЫЗЫХЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СИЛАМИ, ДЕЙСТВУЮЩИМИ НА ВЛАЖНЫЙ ЗЕРНОВОЙ МАТЕРИАЛ, НАХОДЯЩИЙСЯ В БУНКЕРЕ

В данной статье найдена взаимосвязь между силами, действующими во влажных зерновых материалах, определена степень влияния каждой из сил на состояние зерна в бункере, и экспериментально подтверждены силы сцепления зёрен между собой и стенками бункера.

Ключевые слова: бункер сельскохозяйственного назначения, влажный зерновой материал, пирамидальная укладка, адгезия, аутогезия.

Введение. При движении влажного зернового материала в бункере на него действуют внешние и внутренние силы. Поступающий в бункерные устройства зерновой материал практически никогда не является абсолютно сухим. Влага, которая содержится в нём, способствует возникновению сил граничного трения и сил сцепления зерен друг с другом (аутогезионные силы) и со стенками емкостей (адгезионные силы). Эти силы, в свою очередь, ухудшают истечение зернового материала, что приводит к простою мобильных машин при выгрузке бункерных устройств и к дополнительным затратам. Для решения такой проблемы необходимы теоретические и экспериментальные исследования влияния выше указанных сил на текучесть зерна с целью изыскания методов ускорения выгрузки накопительных ёмкостей сельскохозяйственного назначения.

Аутогезия частиц – это связь между соприкасающимися частицами, которая препятствует их разъединению. Величина аутогезии обусловлена рядом факторов, к числу которых относят свойства и размеры частиц, уплотняющую нагрузку, влажность материала и др. Аутогезионное взаимодействие реализуется не между отдельными изолированными частицами, а между множеством частиц, составляющих сыпучий материал. В этом случае суммарная сила аутогезии складывается из сил аутогезии, проявляющихся в индивидуальных контактах между частицами.

Термин «адгезия» может быть определён, как взаимодействие частиц сыпучего материала и твёрдой поверхности макроскопических тел.

Аутогезия и адгезия – это природные явления, в основе которых лежат физические законы. Эти силы могут быть различными по своей природе: молекулярными, электрическими или капиллярными. Часто они действуют одновременно, однако в зависимости от свойств и состояния сыпучего материала каждая из них может преобладать над другими. В работе [1] было показано существенное преобладание капиллярных сил адгезии во влажном зерновом материале по сравнению с молекулярными силами и силами электрической природы.

Для решения поставленной проблемы необходимо определить, какой вклад вносит в движение влажного зернового материала каждая из сил, действующих на него в бункере.

Постановка задачи. Основным объектом исследования в данной статье является дискретный элемент зернового материала в бункере, состоящий

из трёх слоёв: ведущего, ведомого и промежуточного. В работе предполагается провести анализ и определить взаимосвязь всех сил, действующих на материал.

Теоретическое обоснование. Решение задачи о силах проведём на модели пирамидальной укладки зернового материала. Чтобы представить себе пирамидальную укладку, предположим, что в системе шаров (зёрен) каждый шар ведущего слоя будет стремиться занять наиболее устойчивое наинизшее положение по отношению к промежуточному слою, соскальзывая под действием вертикальных сжимающих сил в углубление между шарами. При равномерном распределении шаров промежуточного слоя по площади поперечного сечения бункера каждый вышележащий шар будет опираться на три равноудалённых друг от друга смежных шара промежуточного слоя (рис.1). Такую пространственную укладку шаров называют пирамидальной, поскольку плоскости, проходящие через центры рассматриваемых шаров, образуют пирамиду, в основании которой лежит правильный треугольник.

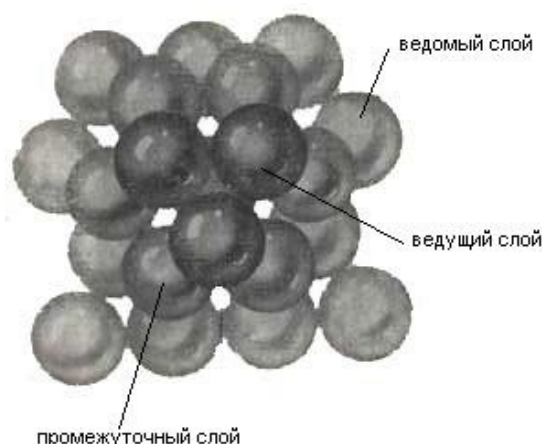


Рис.1. Пирамидальная укладка шаров

Впервые такая укладка была предложена профессором Л.В. Гячевым для определения сил и давлений в глубоких сельскохозяйственных емкостях.

При пирамидальной укладке каждый шар будет иметь двенадцать ближайших соседей – шесть в той плоскости, где он находится, три в плоскости над этим шаром и три в плоскости под ним.

Рассмотрим элемент зернового материала (рис.2, вид сверху), состоящий из 12 невесомых зёрен, 3 из которых А, В, С – зёрна ведущего слоя, зёрна 1, 2, 3, 4, 5, 6 – промежуточного слоя и шаров D, F, E – ведомого слоя. Шар D расположен под шаром А, шар F расположен под шаром С и шар Е расположен под шаром В (на рис. 2 шары D, F и Е не показаны). Силы P_i и Q_i направлены перпендикулярно плоскости чертежа, силы P_i приложены к шарам А, В и С, а силы Q_i приложены к шарам D, F и Е.

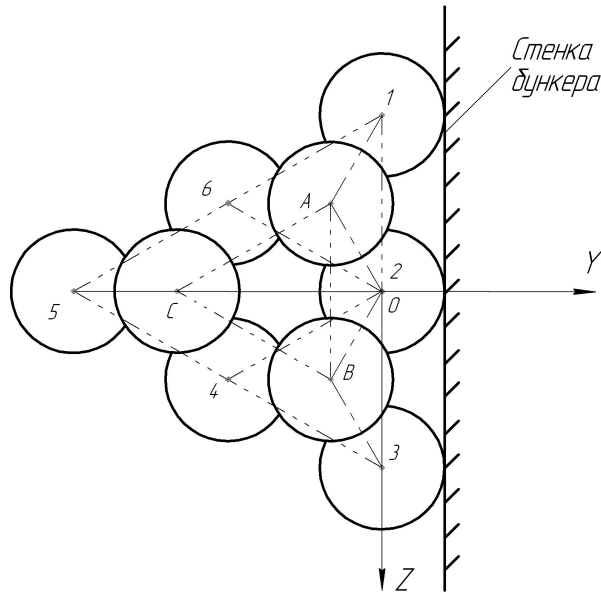


Рис.2. Схема пирамидальной укладки зёрен, находящихся в бункере

У ведущего слоя направление вектора перемещения элемента совпадает с направлением действия внешней силы $\bar{P}_i = \sum \bar{P}_i$; у ведомого внешняя сила $\bar{Q}_i = \sum \bar{Q}_i$ противоположна скорости перемещения. Зёрна 1, 2 и 3 (промежуточного слоя) прилегают к стенке бункера.

Из рис. 2 видно, что усилие, действующее на шар 2 промежуточного слоя со стороны шара А ведущего слоя, направлено по прямой А2, соединяющей центры этих шаров, а усилие со стороны шара D, расположенного под шаром А (на рис.1 не показано), направлено по прямой D2. Прямая А2 составляет угол β с вертикальной осью ОХ, а её проекция на плоскость ОYZ – угол 60° с плоскостью ОХУ (осью ОУ); прямая D2 также составляет угол β с вертикальной осью ОХ, а её проекция на плоскость ОYZ – угол 60° с осью ОУ.

На рис.3 показаны силы, действующие на шар 2 (промежуточного слоя) со стороны шара А (ведущего слоя), шара D (ведомого слоя) и стенки бункера.

Основываясь на рис.3, составим уравнение проекции на вертикальную ось ОХ всех сил, действующих на промежуточный слой:

$$\begin{aligned} \text{е } X = R_1 * \cos\beta - R_2 * \cos\beta - R * \sin\alpha - T_1 * \sin\beta + T_2 * \sin\beta - \\ - T_s * \cos\alpha - F_1 * \cos\beta + F_2 * \cos\beta + F_s * \sin\alpha = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угол между образующей бункера и осью ОХ; β – угол укладки зёрен.

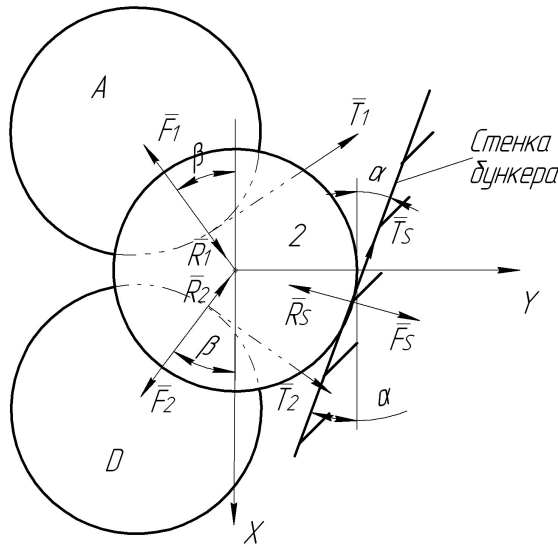


Рис.3. Силы, действующие на шар 2 со стороны шара А, шара D и стенки бункера (вид вдоль оси Z см. рис. 2)

Найдем чему равны силы, входящие в уравнение (1).

Полное усилие R_1 , действующее со стороны ведущего слоя, будет равно:

$$\bar{R}_1 = \bar{e} \frac{\bar{P}_i}{\cos \beta} = \frac{\bar{P}}{\cos \beta}, \quad (2)$$

где $\bar{P} = \sum \bar{P}_i$ – внешняя осевая сила, а $\bar{P}_i$ – сила, действующая на каждый шар ведущего слоя.

Полное усилие R_2 , действующее со стороны ведомого слоя, будет равно:

$$\bar{R}_2 = \sum \frac{\bar{Q}_i}{\cos \beta} = \frac{\bar{Q}}{\cos \beta}, \quad (3)$$

где $\bar{Q} = \sum \bar{Q}_i$ – внешняя осевая сила, а $\bar{Q}_i$ – сила, действующая на каждый шар ведомого слоя.

Сила жидкостного трения T_1 зёрен промежуточного слоя с зёрнами ведущего слоя может быть определена:

$$\bar{T}_1 = N_1 \chi_{c_1} \chi_{v_1}, \quad (4)$$

где N_1 – число контактов зёрен ведущего и промежуточного слоёв;
 c_1 – коэффициент, характеризующий свойства жидкостной плёнки;
 v_1 – относительная скорость зёрен между ведущим и промежуточным слоями.

Аналогично найдём силу жидкостного трения T_2 между зёрнами промежуточного и ведомого слоёв:

$$\bar{T}_2 = N_2 \psi_{c_2} \bar{\psi}_{v_2}, \quad (5)$$

где N_2 – число контактов зёрен ведомого и промежуточного слоёв;
 c_2 – коэффициент, характеризующий свойства жидкостной плёнки;
 v_2 – относительная скорость зёрен между промежуточным и ведомым слоями.

Коэффициенты, характеризующие свойства жидкостной плёнки, будут соответственно равны:

$$c_1 = \frac{\eta_0 \psi_{S_1}}{d_0}; \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{\eta_0 \psi_{S_2}}{d_0}, \quad (7)$$

где η_0 – коэффициент вязкости жидкости; S_1, S_2 – площади контактных поверхностей зёрен; d_0 – толщина жидкостной плёнки.

Площади контактных поверхностей зёрен промежуточного слоя с зёрнами ведущего и ведомого слоёв в первом приближении будем считать одинаковыми величинами $S_1 = S_2$ и тогда получим, что $c_1 = c_2$.

Силу жидкостного трения T_s зёрен промежуточного слоя о стенку бункера определим по формуле:

$$\bar{T}_s = n \psi_{c_0} \bar{\psi}_{v_s}, \quad (8)$$

где n – число контактов зёрен промежуточного слоя со стенками бункера;
 v_s – скорость движения зёрен, прилегающих к стенке бункера; c_0 – коэффициент, характеризующий свойства жидкостной плёнки между зерном и стенкой бункера, который будет равен:

$$c_0 = \frac{\eta_0 \psi_{S_s}}{d_0}, \quad (9)$$

где S_s – площадь контактной поверхности зерен и стенки бункера.

Суммарные силы аутогезионного взаимодействия промежуточного слоя с ведущим и ведомым слоями будут равны:

$$\bar{F}_1 = N_1 \psi_{\bar{F}_{aym}}; \quad (10)$$

$$\bar{F}_2 = N_2 \psi_{\bar{F}_{aym}}, \quad (11)$$

где $\bar{F}_{aym}$ – сила аутогезионного взаимодействия между зёрнами.

Суммарная сила адгезионного взаимодействия между зерном и стенкой бункера может быть определена по формуле:

$$\bar{F}_{sa\bar{\psi}} = n \psi_{\bar{F}_{a\bar{\psi}}}, \quad (12)$$

где $\bar{F}_{a\bar{\psi}}$ – сила взаимодействия между одним зерном и стенкой бункера.

Суммарная реакция R_s стенок бункера на промежуточный слой, направленная по нормали к стенке, была определена Л.В. Гячевым для по-слойной укладки [2]:

$$\bar{R}_s = \frac{\bar{R}_{yz}}{\cos \alpha} = (\bar{P} + \bar{Q}) \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \alpha},$$

где $\bar{R}_{yz} = (\bar{P} + \bar{Q}) \operatorname{tg} \beta$ – суммарная горизонтальная сила, действующая на стенку бункера.

Однако при пирамидальной укладке (см.рис.2) усилия, действующие со стороны ведущего и ведомого слоёв в проекциях на плоскость OYZ, составляют угол 60° с осью OY, тогда суммарная горизонтальная сила в проекции на плоскость OYZ будет равна:

$$\bar{R}_{yz} = (\bar{P} + \bar{Q}) \operatorname{tg} \beta \cos 60^\circ,$$

и формула (13) примет вид:

$$\bar{R}_s = \frac{\bar{R}_{yz}}{\cos \alpha} = (\bar{P} + \bar{Q}) * \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \alpha} * \cos 60^\circ. \quad (13)$$

С учётом формул (2) – (12) и (13) выражение (1) будет иметь вид:

$$P - Q - (P + Q) \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ = 0. \quad (14)$$

Зная, что $Q = P - \Delta R_x$, где ΔR_x – приращение осевого усилия при переходе от сечения, соответствующего расположению ведущего слоя, с абсциссой x к сечению, соответствующему расположению ведомого слоя, с абсциссой $x + \Delta x$. Подставим значение Q в формулу (14):

$$\Delta R_x = \frac{2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (P \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ)}{2 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ} + \frac{2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ)}{2 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ}. \quad (15)$$

При граничном трении действуют силы сухого и жидкостного трения [3]. При вклинивании силы взаимодействия между зёрнами отклоняются от общих нормалей к зёрнам на угол внутреннего трения ψ в сторону возрастания угла укладки β , а силы реакции стенок бункера отклоняются от нормалей к стенке на угол внешнего трения φ в сторону возрастания угла наклона α стенок бункера к нормали. В таком случае выражение (15) примет вид:

$$\Delta R_x = \frac{2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (P \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ)}{2 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ} + \frac{2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + N_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - N_2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ - n \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ)}{2 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ}. \quad (16)$$

Будем считать, что $c_1 = c_2$ и $v_1 = v_2$, тогда выражение (16) примет вид:

$$\Delta R_x = \frac{2 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (P \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ + c_1 \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ (N_1 - N_2))}{2 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha \cos 60^\circ} +$$

$$+ \frac{2 \psi (n \psi c_0 \psi v_{\text{св}} \psi \cos \alpha + F \psi \cos \beta \psi (N_1 - N_2) - n \psi F \psi \sin \alpha)}{2 + \operatorname{tg}(\beta + \psi) \psi \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}. \quad (17)$$

Используя данные таблицы и физико-механические свойства пшеницы из работ [1] и [4], проведём анализ значения ΔR_x по формуле (17) для бункера с углом наклона стенки $\alpha = 34.6^\circ$ и радиусом выпускного отверстия, равным 15 см:

$$\Delta R_x = \frac{2 \psi (P \psi 1.03 + 6.26 + 2.3 + 0.038 - 0.00047)}{3.03}. \quad (18)$$

Сравнивая выражения (17) и (18), видим, что наибольший вклад вносит сила жидкостного трения между зёрнами, а наименьший – сила адгезии.

Из формулы (18) получим:

$$\Delta R_x = (0.68 \cdot P + 5.67) H. \quad (19)$$

Из полученного выражения (19) сделаем следующие выводы:

1. Если $\Delta R_x < G$, где G – сила тяжести элемента, то при таком соотношении сил зерновой материал обладает текучестью и перемещается в бункере без формирования застоя.

2. Если $\Delta R_x = G$, то это условие равновесия элемента.

3. Если $\Delta R_x > G$, получаем условие самоторможения выделенного элемента.

Методы испытаний. Для экспериментального определения сил аутогезии авторами был разработан метод (рис.4), который заключался в следующем: к свободно подвешенной совокупности зёрен, которые были закреплены на лёгкой металлической подложке 1 с помощью пластилина, подносились подвешенная пластина 2, на которой тоже имелась закреплённая совокупность зёрен. Сближение пластин 1 и 2 производилось до момента возникновения контакта закреплённых на них зёрен. Затем пластину 2 перемещали в направлении, перпендикулярном плоскости контакта.

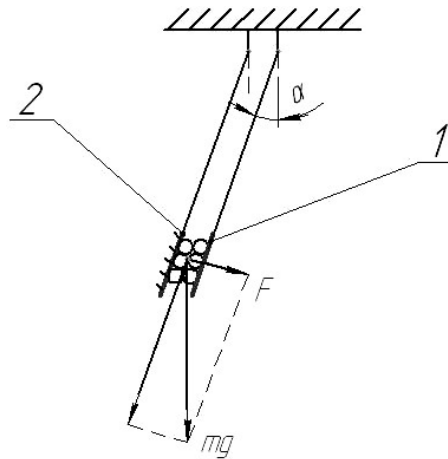


Рис.4. Принципиальная схема метода определения силы аутогезии

Для определения угла α отклонения подложки с зёрнами необходимо измерить расстояние максимального отклонения x подложки с зерном и длину нити L , на которой она подвешена. Отклонение даёт возможность определить суммарную силу аутогезии по формуле:

$$F = m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (20)$$

где m – масса подвешенных зёрен; g – ускорение свободного падения.

В формуле (20) не учитывается масса подложки, поскольку она выполнена из тонкого пластика, и её масса значительно меньше массы подвешенных на ней зёрен.

Чтобы определить силу аутогезии, приходящуюся на одно зерно $F_{\text{аут.ед.}}$, необходимо найти отношение силы, полученной по формуле (20), к количеству контактировавших зёрен N :

$$F_{\text{аут.ед.}} = F/N.$$

При определении силы адгезии необходимо убрать зёрна с площадки 2, а все расчёты по определению силы адгезии выполняются аналогично расчётам при определении аутогезии.

Результаты экспериментов и их обсуждение. При проведении практических экспериментов число повторностей определения каждой из сил при различной влажности равнялось 7. Среднестатистические результаты, полученные после проведения опытов по определению сил адгезии и аутогезии, приходящиеся на одну зерновку, представлены в таблице.

Результаты экспериментов

Данные полученные при определение сил аутогезии							
Вид зерна	Влажность, %	Масса 10^{-4} кг	$\sin \alpha$	$F_{\text{аут.}}$ 10^{-4} Н	Количество зёрен	$F_{\text{аут.ед.}}$ 10^{-4} Н	ε , %
пшеница	15	2.1	0.021	0.43	4	0.1	6.9
пшеница	20	2.3	0.029	0.65	4	0.16	6.6
пшеница	25	2.5	0.037	0.9	4	0.23	6.5
пшеница	30	2.8	0.048	1.3	4	0.33	6.2
подсолнечник	15	3.2	0.026	0.82	4	0.21	5.6
подсолнечник	20	3.8	0.039	1.5	4	0.38	5.4
подсолнечник	25	4.2	0.047	1.9	4	0.48	5.3
подсолнечник	30	4.7	0.058	2.7	4	0.68	5.0
Данные полученные при определение сил адгезии							
				$F_{\text{адг.}}$ 10^{-4} Н		$F_{\text{адг.ед.}}$ 10^{-4} Н	
пшеница	15	1	0.003	0.03	2	0.015	10.8
пшеница	20	1.1	0.005	0.054	2	0.027	10.5
пшеница	25	1.3	0.01	0.13	2	0.065	10.3
пшеница	30	1.5	0.016	0.24	2	0.12	10.1
подсолнечник	15	1.6	0.005	0.082	2	0.04	9.7
подсолнечник	20	1.8	0.01	0.18	2	0.09	9.6
подсолнечник	25	1.9	0.013	0.24	2	0.12	9.5
подсолнечник	30	2.1	0.018	0.37	2	0.19	9.1

Проанализировав данные таблицы, можно сделать вывод о том, что с увеличением влажности зернового материала происходит увеличение сил аутогезии и адгезии, но для различных зерновых материалов эти силы различны. Силы адгезии и аутогезии, действующие на одно зерно в бункере, заполненном подсолнечником, превышают силы адгезии и

аутогезии, приходящиеся на одно зерно, действующие в бункере, заполненном пшеницей. Отношение силы адгезии к силе аутогезии на одно зерно для пшеницы 15%-ной влажности составляет 0.15, а для пшеницы 30%-ной влажности оно равно 0.36, для подсолнечника 15%-ной это соотношение сил равно 0.19, для подсолнечника 30%-ной влажности отношение сил адгезии к аутогезии равно 0.28. Основываясь на этих данных, можно сделать вывод, что более значительное влияние на влажный зерновой материал при движении его в бункере оказывает сила сцепления зёрен друг с другом (сила аутогезии).

Выводы. В результате экспериментов удалось определить, какой вклад вносит каждая из сил, действующих на выделенный элемент влажного зернового материала, и установлено, что наибольшее влияние на зерновой материал оказывает сила жидкостного трения между зёрнами, а наименьшее – сила адгезии. Были определены также условия движения, равновесия и самоторможения элемента зернового материала.

Библиографический список

1. Кунаков В.С. Интенсификация процессов выгрузки сводообразующих зерновых материалов: дис.... докт. техн. наук. / В.С. Кунаков. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 407 с.
2. Гячев Л.В. Основы теории бункеров. / Л.В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета. – 1992. – 311 с.
3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1968. – 473 с.
4. Гордеева А.Б. Слѣживаемость зерновых материалов и разгрузка глубоких сельскохозяйственных ёмкостей: дис.... канд. техн. наук. / А.Б. Гордеева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007 – 196 с.

Материал поступил в редакцию 2.03.09.

V. S. KUNAKOV, V. A. TYZYKHAN

DEFINITION OF INTERRELATION BETWEEN THE FORCES WORKING ON THE DAMP GRAIN MATERIAL THE BUNKER

The interrelation between forces acting in damp grain materials is defined. Also the rate of each force influence on grain condition in the bunker is calculated and the grain and grain-bunker coupling forces are determined experimentally.

КУНАКОВ Виктор Стефанович (р.1946), заведующий кафедрой «Физика» ДГТУ, доктор технических наук, профессор. Окончил РГПИ (1965).

Научные интересы: механика сыпучих материалов.

Имеет более 100 научных публикаций.

ТЫЗЫХАН Владимир Асватурович (р.1986), аспирант ДГТУ. Окончил ДГТУ (2008).

Научные интересы: механика сыпучих материалов.

Имеет 2 публикации в области механики сыпучих материалов.

aspirant1986@rambler.ru