

Основные положения моделирования процесса очеса зерновых культур однобарабанной жаткой

Алексей И. Бурьянов, Михаил А. Бурьянов

ФГБНУ СКНИИМЭСХ - Россия

Россия – 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 14

Аннотация

Представлена обобщенная математическая модель процесса очеса зерновых культур однобарабанной очесывающей жаткой, описанная в виде аналитических зависимостей, описывающих процесс взаимодействия обрабатываемого материала с ее рабочими органами.

Ключевые слова: моделирование, очес, очесывающей жаткой математическая модель, жатка

Basic statements on modeling of cereals stripping with single-drum header

A. I. Burianov, M. A. Burianov

FSSI SKNIIMESKH – Russia

Abstract

Generalized math model of cereals stripping process with one-drum header, described via analytical dependences showed interaction between processing material and implements, is presented.

Keywords: modeling, stripping, mathematical model, cutter header

В последние годы все более широкое применение находит технология уборки зерновых культур очесом, при которой обмолот соцветий (колос, метелка) убираемых растений выполняют на корню, собирая зерно и половистые фракции, а стебли оставляют на поле. При комбайновой уборке зерновых культур очесом в результате резкого снижения затрат энергии, расходуемой на перетирание соломы и снижения нагрузки на соломотряс, на 35-45% снижается расход топлива, в 1,5-2,0 раза увеличивается производительность одной из самых дорогостоящих машин, используемых в полеводстве – комбайна, и, как следствие, потребность в нём. Оставшийся после уборки стеблестой закрывает поверхность почвы от иссушения, позволяя

сохранять и накапливать влагу, образуемую при смене дневных и ночных температур в летнее и осеннее время и за счет снегозадержания зимой. Технология уборки очесом хорошо вписывается в технологию возделывания зерновых культур No-till. Однако, не смотря на ряд преимуществ очеса, его внедрение сдерживается из-за недостаточной адаптации выпускаемых в настоящее время очесывающих жаток, разнообразию характеристик убираемого хлебостоя, и условиям в которых протекает уборочный процесс, вследствие чего имеют место повышенные потери зерна по сравнению с традиционными жатками сплошного среза. Причина такого положения как в несовершенстве конструкций, применяемых на практике очесывающих жа-

ток, так и в недостаточном уровне разработки теории процесса очеса и базирующейся на ней теории их проектирования.

Основные положения теории очеса зерновых культур устройствами, воздействующими на соцветия растений зубьями, закрепленными в виде граблин на вращающихся барабанах, были предложены профессором Шабановым П.А., представленные в работах [13; 14; 15]. Следует отметить существенный вклад в развитие теории очеса и Белорусской школы, например [16] (Шаршунов В.А.), а также работы по разработке и созданию технических средств и совершенствованию технологий уборки очесом, выполненные в УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого.

Однако, занимаясь над выполнением НИОКР по Государственной тематике, предусматривающей разработку технологий и технических средств уборки зерновых культур очесом, мы убедились, что достигнутый уровень теории проектирования очесывающих устройств, недостаточен и требует дальнейшего развития. Из анализа перечисленных выше, а также других, не приведенных здесь работ, следовало, что модели, посвященные полному описанию процесса очеса зерновых культур очесывающей жаткой, начиная с момента взаимодействия растений с ее обтекателем до подачи не только зерна, но и всего очесанного вороха в ложе интегрирующего шнека, не разработаны. Поэтому нами была предпринята попытка разработки математической модели и методов экспериментальных исследований, сочетание которых позволило бы описать весь технологический процесс, учитывающий максимально возможное количество действующих на его протекание факторов. В материалах статьи приведены реализованные нами основные положения моделирования процесса очеса зерновых культур однобарабанной жаткой, базирующиеся на основе синтеза разработанных нами математических и экспериментальных моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСУЖДЕНИЯ

Известно, что физико-механические характеристики растений изменяются в широком диапазоне в пределах сорта, культуры. Характеристики растений зависят также от погодных

условий, соблюдения агротехнических требований при их возделывании. Убираемый хлебостой в пределах одного поля может отличаться густотой стеблестоя, засоренностью, степенью полеглости, ярусности (неравномерности растений в пределах массива по высоте).

В рабочей зоне жатки, после взаимодействия растений с очесывающими зубьями, образуется ворох, включающий зерно, колосковые чешуйки, частично разрушенные колосья, листья и фрагменты стеблей, которые различаются плотностью, парусностью, упругими свойствами. Проведенный анализ известных теоретических исследований процесса очеса и выполненные нами поисковые эксперименты подтвердили необходимость учета в разрабатываемых математических моделях перечисленных выше свойств растений и особенностей убираемого хлебостоя. Поэтому для получения информации о свойствах и особенностях убираемых культур использовали результаты как собственных исследований, например [1; 2; 3; 11], так и полученных другими авторами, в том числе и справочные данные.

Значительный объем научно-исследовательских работ, посвященных изучению процесса очеса и совершенствованию конструкций очесывающих устройств, был выполнен до 2011 года. Теоретические разработки, наиболее полно представленные в работе [4], послужили основой при разработке конструкторской документации на опытные образцы очесывающей жатки, трансформируемой из двухбарабанной в однобарабанную и обратно. Опытные образцы жаток двух типов были изготовлены ОАО «Пензмаш» при участии специалистов института и испытаны в сельхозпредприятиях Пензенской и Ростовской областей. По результатам испытаний завод принял решение о выпуске однобарабанной жатки, как наименее металлоемкой и простой по конструкции. Модернизированный вариант этой жатки Российской разработки предприятие выпускает и в настоящее время. Тщательный анализ результатов испытаний очесывающих жаток в условиях производства показал на необходимость разработки технических устройств, позволяющих осуществлять физическое моделирование процесса очеса в лабораторных условиях. Наличие таких устройств позволяет исключить зависимость проведения

экспериментов от продолжительности уборочного процесса в реальных условиях, многократно снизить затраты на проведение экспериментов, а также обеспечить визуальное наблюдение за ним для получения дополнительной информации, необходимой при разработке обобщенной математической модели процесса очеса. На рис. 1 представлена лабораторная установка, в поперечном сечении, выполненная в масштабе 1:1, с однобарабанной очесывающей жаткой, а ее ширина соответствует захвату одного рядка растений, высеянных обычной узкорядной сеялкой. В комплекте установки имеется сменный обтекатель со встроенным дополнительным барабаном, что позволяет вести исследования процесса очеса двухбарабанными жатками.

Имитация рядка осуществляется с помощью бегущего поля, скорость которого может быть выбрана любой в пределах рабочих скоростей комбайна. Высота расположения корпуса установки обтекателя относительно барабана и число его оборотов изменяются по усмотрению исследователя. Одна боковина установки выполнена из прозрачного оргстекла, что позволило вести не только визуальные наблюдения за процессом, но и видеосъемки, в том числе и высокоскоростной видеокамерой. Тщательное изучение процесса очеса имитируемое на лаборатор-

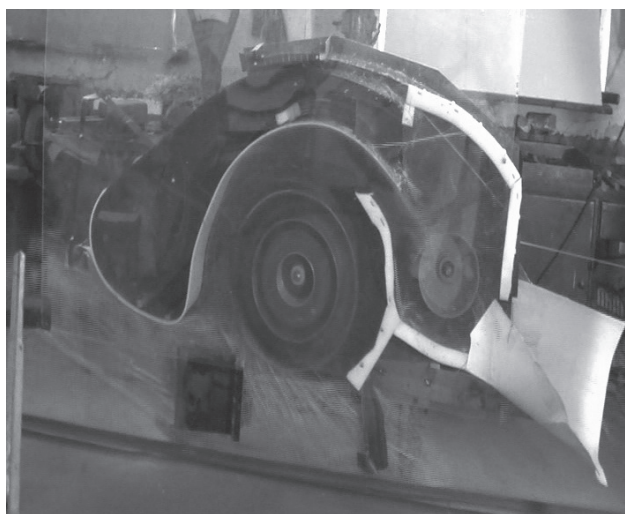


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования процесса очеса зерновых культур (однобарабанный вариант)

Fig. 1. Laboratory installation for carrying out of cereals stripping (single-drum variant)

ной установке позволило более углубленно изучить возможные состояния обрабатываемого материала, начиная с момента взаимодействия убираемых растений с наружной поверхностью обтекателя до подачи очесанного вороха в зону шнека. При разработке математической модели были приняты следующие положения. Процесс очеса убираемых культур жаткой непрерывный. Убираемый продукт (растения, продукты очеса) последовательно взаимодействуют с рабочими органами жатки. Процесс протекает так, что выходные параметры обрабатываемого материала после его взаимодействия с предыдущим рабочим органом, являются входными при взаимодействии с последующим. Качество технологического процесса очесывающей жатки будет обеспечено, если:

- скорость вращения барабана с учетом его поступательного движения с жаткой развивает импульс силы, достаточный для выделения зерна убираемой культуры из колоса;

- траектория движения зерна после схода с зуба пересекается с внутренней поверхностью обтекателя выше его нижней кромки, а вектор скорости зерна, построенный из точки его контакта с этой поверхностью, повернут против часовой стрелки относительно траектории его движения до контакта с обтекателем;

- траектория зерна в момент пересечения ею вертикальной плоскости, проходящей через верхнюю кромку ложа интегрирующего шнека, проходит выше этой кромки.

Также полагали, что при взаимодействии зерна с жестко закрепленным стальным зубом на барабане, к которому подводится внешняя энергия, вследствие того, что его масса и модуль упругости материала зуба многократно больше модуля упругости и массы зерна, учитывается только деформация и изменение скорости по модулю и направлению последнего.

На рис. 2 представлена схема жатки. В процессе ее работы убираемые растения в первую очередь контактируют с наружной поверхностью обтекателя. В зависимости от его формы и высоты растения этот контакт может произойти в виде прямого удара.

Убираемое растение в первую очередь контактирует с наружной поверхностью обтекателя. Наиболее распространенная форма наружной поверхности обтекателя - выпуклая вперед

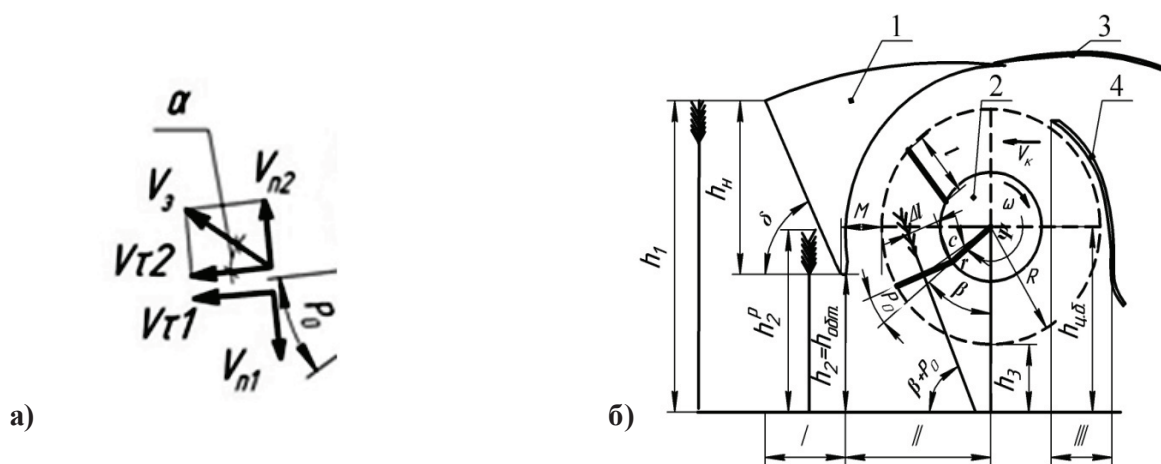


Рис. 2. Схема жатки при очесе хлебостоя: а) составляющие скорости зерна до и после контакта с очесывающим зубом; б) параметры и режимы жатки при взаимодействии с убираемыми растениями 1 – обтекатель; 2 – корпус барабана; 3 – крыша жатки; 4 – ложе шнека
Зоны потерь зерна: I – при контакте с обтекателем; II – при контакте с очесывающими зубьями барабана; III – проходом между зубьями барабана и верхней кромкой ложа интегрирующего шнека

Fig. 2. Scheme of cutter when cereals are stripped: a) compounds of grain velocity before and after contacting with stripping teeth; b) parameters and modes of cutter during contacting with cropping plants 1 – cowling; 2 – drum body; 3 – cutter roof; 4 – auger lodge.
Grain loss zones: I – in contact with cowling; II – in contact with stripping teeth of drum; III – going-through between drum teeth and upside of integrating auger

походу жатки с постоянным, переменным радиусами кривизны, или же состоящая из двух участков различной кривизны, соединенных между собой наклонным либо горизонтальным участком.

Скорость движения агрегата с очесывающей жаткой в 1,5-2,0 раза выше, чем оборудованного жаткой сплошного среза с такой же шириной захвата. При контакте с обтекателями перечисленных выше форм происходит либо прямой удар по колосу, либо его захлестывание, что может вызвать частичный или полный вымолот зерна и приведет к его невозвратным потерям. Очевидно, что существенно снизить потери в этой зоне можно, если наружную поверхность обтекателя выполнить в виде наклонной плоскости, оптимальные длину и угол наклона которой надлежит определить. Рассматривая процесс взаимодействия обтекателя с растениями зерновых колосовых культур, учитывали, что их стебли имеют малую жесткость. Из [13] следует, что в момент удара по колосу растения для зерновых колосовых силой упругости стебля малой жесткости можно пренебречь. При при-

нятом допущении процесс взаимодействия разделяли на следующие этапы:

- удар;
- гашение скорости колоса, полученной после удара;
- движение колоса растения по поверхности обтекателя.

С обтекателем взаимодействует плотный поток движущихся растений. Первое растение взаимодействует колосом с обтекателем. После удара скорость колоса снижается и, в дальнейшем, гасится стоящими за ним растениями, которые наклоняясь вперед по ходу, за счет суммарных упругих сил прижимают его к поверхности обтекателя. Возникает нормальная реакция N , в результате действия которой на перемещающийся по поверхности обтекателя колос воздействует сила трения, способствующая выделению зерна из колоса. Таким образом, отрыв зерна от колоса может произойти в первой фазе, в процессе удара, и во второй, за счет сил трения колоса по поверхности обтекателя.

После удара о плоскость обтекателя растение теряет энергию равную [9]:

$$\Delta T = \frac{m}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2), \quad (1)$$

где $V_1 = V_k$ – скорость движения обтекателя (комбайна); V_2 – скорость колоса после удара о нижнюю плоскость обтекателя, м/с; m – масса колоса, г.

Значения составляющих (1) после удара, как и в [4], находили на основании гипотезы сухого трения Ньютона.

$$(V_{\tau 2} - V_{\tau 1}) = \pm f(V_{n 2} - V_{n 1}), \quad (2)$$

где $V_{n 1}, V_{\tau 1}$ и $V_{n 2}, V_{\tau 2}$ – нормальная и тангенциальная составляющие скорости колоса до и после удара, м/с;

f – коэффициент трения чешуек колоса по плоскости обтекателя, выполненной из определенного материала.

Учитывая, что

$$V_{n 2} = -V_{n 1} \cdot K, \quad (3)$$

где K – коэффициент восстановления; $V_{n 1}, V_{\tau 1}$ – проекции V_1 на плоскость обтекателя, наклоненного под углом δ определили $V_{\tau 2}, V_{n 2}$.

Если потеря энергии, вычисленная в соответствии с (1), будет больше затрат энергии A , определенной например из [12] на вымолот одного зерна из колоса, то оно отделится от него и будет потеряно. Чтобы не произошло отделение зерна от колоса в процессе удара, необходимо чтобы $\Delta T < A$. Тогда максимально допустимая скорость движения комбайна:

$$V_1 \leq \sqrt{\frac{2A \cdot (1 + \kappa)}{m \cdot (1 - \kappa)}} + V_2 \quad (4)$$

После удара колоса о нижнюю плоскость обтекателя его скорость V_2 гасится за счет упругих сил всего растения, так и набегающих на обтекатель других растений. В следующей фазе на чешуйки колоса действует сила трения F_{mp} . Возникающая при этом сила трения будет равна:

$$F_{\tau \rho} = N \cdot f, \quad (5)$$

где N – нормальная составляющая силы прижимающей колос к поверхности обтекателя, Н.

Усилия, действующие на колосья растений, контактирующие в данный момент с плоскос-

тью обтекателя, можно определить лишь опытным путем, замерив нормальную составляющую N датчиками, установленными на плоскости обтекателя и подставляемую в (5). Для экспериментального определения нормальной составляющей может быть использована лабораторная установка [5], созданная в нашем институте (рис. 1).

После схода с наружной поверхности обтекателя растения попадают в зону очеса, где контактируют с очесывающими зубьями барабана. При уборке неравномерного по высоте хлебостоя, высота нижней кромки обтекателя должна находиться на уровне закрепления колосьев на стеблях растений, имеющих минимальную высоту, то есть $h_{\rho \sigma \tau} = h_2$. В соответствии с [9], если минимальная длина стебля очесываемого хлебостоя меньше или равна высоте расположения центра барабана относительно поля, то высота расположения нижней кромки обтекателя относительно поля определится из представленных ниже зависимостей.

То есть если:

$$h_2 \leq h_{\rho \sigma \tau} = r + l \cdot \cos P_0 + h_3, \quad (6)$$

тогда

$$h_{\rho \sigma \tau} = r + l \cdot \cos P_0 + h_3 - (r + l \cdot \cos P_0) \cdot \cos (\beta + P_0) \quad (7)$$

где соответственно:

h_2 – длина стебля минимального по высоте растения, м;

$h_{\rho \sigma \tau}$ – высота положения центра очесывающего барабана относительно поверхности поля, м;

h_3 – высота положения нижней кромки обтекателя, м;

h_3 – зазор между поверхностью поля и концами зубьев барабана, м;

l – длина очесывающего зуба, м;

r – радиус корпуса барабана, м;

P_0 – угол наклона зуба, °;

β – угол начала очеса, °.

Угол начала очеса при этом:

$$\beta = (\arccos \left(\frac{r + l \cdot \cos P_0 + h_3 - h_2}{r + l \cdot \cos P_0} \right)) - P_0 \quad (8)$$

Если: $h_2 > (r + l \cdot \cos P_0 + h_3)$,

тогда:

$$h_{\sigma \sigma \tau} = h_{\alpha \sigma} = h_2, \text{ а угол } \beta = \left(\frac{\pi}{2}\right) - P_0.$$

Выражения (7) и (8) связывают одну из основных характеристик хлебостоя h_2 – длину стебля минимального по высоте растения с конструктивными параметрами жатки: r ; l ; P_0 и расположением ее барабана относительно поверхности поля. Если учесть, что угол $\pi/2 \geq \beta > 0$, а $h_3 > (\approx 0,05 \text{ м})$, то хозяйствам, выращивающим низкорослые культуры с небольшой ярусностью, целесообразно приобретать очесывающие жатки, снабженные барабанами меньшего диаметра. Такой подход реализует фирма Шелборн, изготавливая жатки, различающиеся размерами очесывающих барабанов, включающих семь типоразмеров.

Если в хозяйстве выращивают культуры, существенно различающиеся по высоте хлебостоя – высокорослые, низкорослые и невыровненные по высоте, то для уборки набора таких культур необходимо иметь жатки с диаметром барабана, размер которого исключал бы возможность захлестывания на нем растений с большой длиной стебля, но при этом исключал потери зерна отбрасыванием его вперед по ходу жатки. Решение последней задачи достигается при создании барабана, снабженного устройством, обеспечивающим изменение угла наклона граблей и соответственно угла наклона зубьев P_0 [4].

Если все очесываемые растения и их колосья отклонены от перпендикуляра, проведенного в точке их контакта (рис. 2) с поверхностью очесывающих зубьев на угол меньше или равный углу трения, то при достаточном импульсе силы, полученным колосом после удара по нему зубьями, очесанные зерна будут двигаться вверх по транспортирующему каналу.

Для определения скорости вращения барабана, обеспечивающей импульс силы, способной разрушить колос, можно воспользоваться зависимостью, предложенной в работе [10]:

$$m \cdot V_0^2 = (F \cdot t)^2 / 2m \quad (9)$$

где $F \cdot t$ – искомый импульс силы, может быть определен путем замера силы, разрушающей колос и продолжительности ее действия. Используемое при этом оборудование представлено на рис. 3.

Второй способ определения критической скорости очеса предложен в [15]:

$$V_{кр} \approx 4 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot Y_{cp}}{l \cdot (m_1 + \frac{m_2}{5})}}, \quad (10)$$

где E – модуль упругости стебля;
 Y_{cp} – момент инерции стебля;
 l – длина растения до центра колоса;
 m_1 – масса зерна в колосе;
 m_2 – масса стебля

Составляющие скорости до удара и компонент вороха после удара определяли на основе зависимости (2) с учетом того, что зубья барабана наклонены вперед под углом P_0 , а он перемещается с поступательной скоростью V_x .

До удара:

$$V_{n1} = \omega \cdot c \cdot \cos P_0 + V_x \cos(\beta + P_0), \quad (11)$$

$$V_{\tau 1} = \omega \cdot c \cdot \sin P_0 + V_x \cos(\beta + P_0) . \quad (12)$$



Рис. 3. Лабораторная установка для определения усилий, разрушающих колос, и продолжительности их действий
 1- компьютер; 2 - усилитель сигнала TDA-6; 3 - тензобалка; 4 - пластина с канавкой (5 мм; 6 мм; 7 мм; 8 мм); 5 - наконечник; скоростная кинокамера (не показаны)

Fig. 3. Laboratory installation for defining of spike destruction force and duration of its activity
 1 – computer; 2 – TDA signal amplifier; 3 – tensor-bulk; 4 – plate with groove (5 mm; 6 mm; 7 mm; 8 mm); 5 – cap; rapid camera (not shown)

После удара:

$$V_{n2} = K[\omega \cdot c \cdot \cos P_0 + V_k \cdot \cos(\beta + P_0)] \quad (13)$$

$$V_{\tau 2} = \omega \cdot c \cdot \sin P_0 + V_k \cdot \sin(\beta + P_0) + f(\omega \cdot c \cdot \cos P_0 + V_k \cdot \cos(\beta + P_0)) \cdot (1 - K) \quad (14)$$

Длину отрезка c определяли по теореме косинусов:

$$c = \sqrt{(\Delta l)^2 + r^2 + 2 \cdot \Delta l \cdot r \cdot \cos P_0} \quad (15)$$

Координаты точки отскока находили из выражений:

$$x = c \cdot \sin(\beta + \psi); \quad (16)$$

$$y = c \cdot \cos(\beta + \psi). \quad (17)$$

Угол ψ определяли по теореме косинусов (рис. 2б):

$$\cos \psi = (r^2 + c^2 - \Delta l^2) / 2rc, \quad (18)$$

откуда угол $\psi = \arccos \psi$.

Проекции скорости зерна в момент отскока от зуба:

$$V_x = V_3 \cdot \sin(\beta + P_0 + \alpha), \quad (19)$$

$$V_y = V_3 \cdot \cos(\beta + P_0 + \alpha). \quad (20)$$

Где

$$V_3 = \sqrt{V_{n2}^2 + V_{\tau 2}^2}, \quad (21)$$

угол α (см. рис. 2а):

$$\alpha = \arccos(V_{\tau 2} / V_3). \quad (22)$$

Тогда

$$V_x = (\sqrt{V_{n2}^2 + V_{\tau 2}^2}) \cdot \sin(\beta + P_0 + \alpha); \quad (23)$$

$$V_y = (\sqrt{V_{n2}^2 + V_{\tau 2}^2}) \cdot \cos(\beta + P_0 + \alpha). \quad (24)$$

Если отскоку зерна вверх препятствуют колосья и стебли других растений, контактирующие в данный момент с зубом, то зерно дви-

жется по зубу с последующим с него спадом. Скорость спода с зуба может быть определена из зависимости [4]

$$l'' = \omega^2 l - 2f\omega(l' + V_{\tau 2}) + g \frac{\sin(P_0 + i)}{\cos i} \sin(270 - (\beta + \omega t)) + g \frac{\cos(P_0 + i)}{\cos i} \cos(270 - (\beta + \omega t)) + r \omega^2 \frac{\cos(P_0 + i)}{\cos i}, \quad (25)$$

где g – ускорение свободного падения тела, m/s^2 ;

i – угол трения.

Абсолютную скорость спода компонент вороха в момент спода с зуба определяли путем сложения относительной скорости движения по зубу и их участия во вращательном движении. Для решения уравнения (25) определения абсолютной скорости частицы вороха ее проекций на оси X и Y, координат точки спода, разработали специальную программу, реализованную в пакете программ МВТУ. Полученную информацию о координатах точки контакта или спода и проекциях скорости зерна с зуба на оси X и Y используем для определения параметров его движения в транспортирующем канале.

После отскока или спода с зуба частицы вороха будут двигаться по транспортирующему каналу (рис. 4).

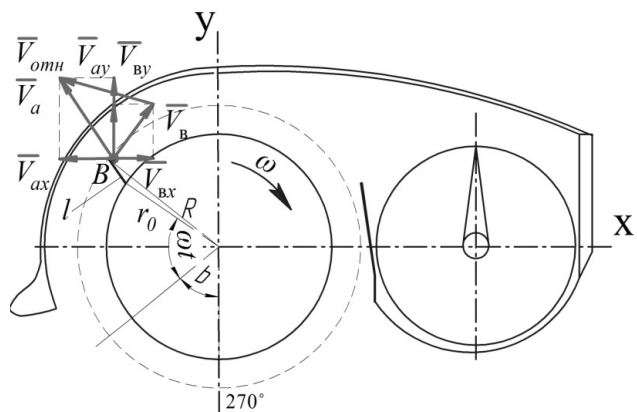


Рис. 4. Схема движения очесанного материала с момента отскока или спода с зуба в канале, образованном обтекателем жатки и концами граблин очесывающего барабана

Fig. 4. Stripped material moving scheme from moment of rebound or going down from teeth in channel that formed by cutter cowlings and ends of reel bars

Выполненные нами исследования на лабораторной установке показали, что скорость воздушного потока образованного вращающимся барабаном на начальном участке от нижней кромки обтекателя и выше, постоянна по ширине канала.

Относительная скорость зерна в воздушном потоке равна

$$\bar{V}_{\text{отн}} = \bar{V}_a - \bar{V}_g \quad (26)$$

где \bar{V}_a – абсолютная скорость зерна в момент его схода с зуба, м/с;

\bar{V}_g – скорость воздушного потока, м/с.

Модуль силы сопротивления воздуха действующей на зерно

$$F = K_n \cdot m \cdot |V_a - V_g|^2, \quad (27)$$

где K_n – коэффициент парусности зерна, м⁻¹.

$$K_n = \frac{g}{V_{\text{внт}}^2}, \quad (28)$$

где $V_{\text{внт}}$ и τ – скорость витания зерна, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Дифференциальное уравнение зерна с учетом силы тяжести:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F} + m \cdot \bar{g}. \quad (29)$$

Полагая, что радиальная составляющая незначительна на этом участке, после преобразования получили зависимости [4]:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2} x(t) = -K_n \cdot \left[\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)^2 - 2 \cdot \frac{d}{dt} x(t) \cdot \omega_g \cdot y(t) + (\omega_g \cdot y(t))^2 \right] \\ \frac{d^2}{dt^2} y(t) = -g - K_n \cdot \left[\left(\frac{d}{dt} y(t) \right)^2 - 2 \cdot \frac{d}{dt} y(t) \cdot \omega_g \cdot x(t) + (\omega_g \cdot x(t))^2 \right] \end{cases} \quad (30)$$

На участке, расположенном в верхней части канала, где в крыше жатки установлена сетка, поток воздуха вращается и расширяется.

Радиальная составляющая скорости воздушного потока

$$V_{gr}(r) = \frac{k_1}{r_0} = \frac{k_1}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (31)$$

где k_1 – приведенный расход воздуха, м²/с.

$$k_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot B}, \quad (32)$$

где Q – расход воздуха, м³/с;

B – ширина воздушного канала, м.

В этом случае движение частиц вороха верхней части транспортирующего канала описывается следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2} x(t) = - \left(\frac{d}{dt} x(t) - \omega_g y - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \cos(-\omega_g t) \right) \cdot K_n \cdot \\ \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{dt} y(t) + \omega_g x - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \sin(-\omega_g t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} x(t) - \omega_g y - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \cos(-\omega_g t) \right)^2} \\ \frac{d^2}{dt^2} y(t) = -g - \left(\frac{d}{dt} y(t) + \omega_g x - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \sin(-\omega_g t) \right) \cdot K_n \cdot \\ \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{dt} y(t) + \omega_g x - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \sin(-\omega_g t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} x(t) - \omega_g y - \frac{k_1}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}} \cdot \cos(-\omega_g t) \right)^2} \end{cases} \quad (33)$$

Уравнения (30) и (33) могут быть разрешены численным методом в специальных системах типа MBTU, Math Cad, Math Lab. В качестве начальных условий при их решении необходимо ввести данные значений проекций скорости на оси X и Y и координаты точки отскока от зуба или схода с него компоненты вороха и ее характеристики, входящие в уравнения. Если, в результате первоначально полученного решения, траектория компоненты на всем протяжении транспортирующего канала, не пересекается с внутренней поверхностью обтекателя, и, в момент перехода ею вертикальной плоскости, проходящей через верхнюю кромку ложа интегрирующего шнека, располагается выше этой кромки, то полученное решение можно считать оптимальным. При контакте компоненты с обтекателем определяют точки контакта, и, как было показано выше, на основе гипотезы сухого трения Ньютона находят проекции скорости компоненты на оси X и Y. Полученные данные подставляют в соответствующее типу канала уравнение (30) или (33) до пересечения траекторией плоскости, проходящей через верхнюю кромку ложа интегрирующего шнека. Для жаток у которых транспортирующий канал состоит из частей постоянного и переменного сечения траекторию движения компонента определяют, последовательно решая уравнения (30) и (33). Более подробно с описанием процесса движения зерна в транспортирующем канале жатки и решением уравнений численными методами можно ознакомиться в [7; 8].

Используя описанные выше модели, определяли параметры и режимы движения каждой из перечисленных выше компонент вороха. При движении продуктов очеса в канале жатки они вследствие существенного различия их характеристик перемещаются в нем с различной скоростью. Обладая упругими свойствами и имея меньшую парусность, зерно, как правило, движется с более высокой скоростью. При взаимодействии с другими компонентами скорость зерна снижается, что создает условия для возникновения его потерь в зонах II и III. Оценку влияния других компонент вороха на параметры движения зерна выполняли, базируясь на основе закона сохранения количества движения [3]. Зерно, получившее после отрыва от колоса более высокую скорость, при взаимодействии с половистыми частицами будет отдавать им часть количества движения. Тогда для очесанного вороха, состоящего из n фракций (компонент) справедлива средневзвешенная скорость:

$$V_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (34)$$

где m_i – масса i -й фракции, кг.

Фракционный состав вороха определяли, моделируя процесс очеса на лабораторной установке, общий вид которой представлен на рис. 1.

Установлено, что при очесе выровненного по высоте хлебостоя безостой озимой пшеницы, влажность растений которой 11-13%, ожидаемое снижение скорости зерна было в пределах 2-3%. При очесе хлебостоя влажность которого выше 14% или ее снижении от 11 до 8-9%, а также при уборке остистых сортов культуры, ожидаемое снижение скорости движения зерна может достигать 7-8%. Чтобы избежать потерь зерна во второй зоне, необходимо обеспечить такой режим работы жатки, при котором значения средней скорости вороха были больше скорости витания зерна. При движении вороха в верхней части транспортирующего канала, для снижения вероятности потерь зерна в зоне III, необходимо построить траекторию движения зерна, скорость которого на этом участке была приравнена к средней скорости движения вороха. Если построенная траектория зерна в момент пересечения ею вертикальной плоскости, проходящей через верхнюю кромку ложа интегрирующего шнека, проходит выше этой

кромки, то потери зерна на этом участке маловероятны.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная обобщенная математическая модель очеса зерновых культур однобарабанной жаткой представлена в виде совокупности математических зависимостей, в соответствии с последовательностью протекания процесса описывающих взаимодействие обрабатываемого материала с рабочими органами, при этом, выходные параметры обрабатываемого материала, после его взаимодействия с предыдущим рабочим органом, являются входными при взаимодействии с последующим.

2. Предложенная математическая модель процесса очеса зерновых культур однобарабанной жаткой, в сочетании с использованной при проведении исследований экспериментальной базой, позволили получить объем знаний, достаточный для разработки новых технических и технологических решений, защищенных патентом из 10 патентов РФ, обоснования параметров и создания опытных образцов очесывающих жаток, первые опытные партии которых выпускаются с 2011 г. ОАО «Пензмаш», а перспективные конструкции машин проходят производственные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурьянов, А.И., М.А. Бурьянов, О.А. Костыленко, 2009. Исследование морфологических и физико-механических свойств растений озимой пшеницы, определяющих параметры и режимы работы уборочных машин. В: *Ресурсосберегающие технологии: возделывание и переработка сельскохозяйственных культур*. Сб. науч. тр., ВНИПТИМЭСХ, Волгоград, с. 209-215 [1]
- Бурьянов, А.И., О.А. Костыленко, М.А. Бурьянов, 2015. Изучение физико-механических характеристик растений озимой пшеницы, выращенных в условиях 2014 года. В: *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения*. Сборник статей 8-й международной научно-практической конференции 3 марта – 6 марта 2015 г., г. Ростов-на-Дону в рамках 18-й международной агропромышленной выставки "Интерагромаш-2015", Ростов-на-Дону, с. 61–64 [2]

- Бурьянов, А.И., М.А. Бурьянов**, 2012. Определение скорости зернополовистого вороха в очесывающей жатке. *Техника в сельском хозяйстве*, № 5, с. 6-8 [3]
- Бурьянов, М.А.**, 2011. Параметры и режимы процесса очеса зерновых культур навесной на комбайн жаткой. Дис. канд. техн. наук, зерноград, 2011. [4]
- Бурьянов, М.А., И.В. Червяков**, 2013. Методы и средства определения величины потерь зерна при уборке зерновых колосовых культур очесывающей жаткой. В: *Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК. Ч. I*, Сб. науч. тр. СКНИИМЭСХ, зерноград, с. 134-140 [5]
- Бурьянов, М.А., А.И. Бурьянов, О.А. Костыленко**, 2015. Методика обоснования параметров обтекателя однобарабанной очесывающей жатки. *Тракторы и сельхозмашины*, № 7, с. 19-23 [6]
- Бурьянов, М.А., А.И. Бурьянов, О.А. Костыленко**, 2015. Методика математического моделирования взаимодействия растений зерновых культур с очесывающим барабаном жатки. *Тракторы и сельхозмашины*, № 9, с. 19-22 [7]
- Бурьянов, М.А., А.И. Бурьянов, И.В. Червяков**, 2015. Методика математического моделирования процесса движения зерна в транспортирующем канале очесывающей жатки. *Тракторы и сельхозмашины*, № 10, с. 27-30 [8]
- Добронравов, В.В., Н.Н. Никитин, А.Л. Дворников**, 1966. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 623 с. [9]
- Иванов, Е.М.**, 2005. Как вычислить работу. *Успехи современного естествознания (физико-математические науки)*, № 11, с. 9-11 [10]
- Бурьянов, А.И., А. И. Дмитренко, М. А. Бурьянов, А. В. Скрипка, Ю. Н. Полевода, Г. Е. Колесников, Е. А. Александров, А. А. Машлякевич, И. В. Червяков**, 2010. Разработка комплекса высокопроизводительных машин нового поколения для уборки и послеуборочной обработки зерновых колосовых культур на семена, продовольственные и другие цели методом очеса в условиях рискованного земледелия. Отчет о НИР (заключительный), 09.01.02.04. ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии, зерноград, 150 с. [11]
- Справочник** конструктора сельскохозяйственных машин: в 2 т. /под ред. А.В. Красниченко/. М.: Машгиз, 1962, т. 1, 655 с. [12]
- Шабанов, П.А.**, 1981. Исследование движения стебля с малой жесткостью в процессе очеса. В: *Совершенствование уборки и послеуборочной обработки зерна*, Науч. тр. ЧИМЭСХ, вып.168, Челябинск, с. 28-36 [13]
- Шабанов, П.А.**, 1978. Определение зависимости некоторых параметров очесывающего устройства от состояния стеблестоя. В: *Комплексная механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства*, Сб. статей, РИСХМ, Ростов-на-Дону, с. 39-47 [14]
- Шабанов, П.А.**, 1984. Исследование движения жесткого стебля под действием очесывающего рабочего органа. В: *Повышение производительности и качества работы зерноуборочных и зерноочистительных машин*, Науч. тр. ЧИМЭСХ, Челябинск, с. 31-36 [15]
- Шаршунов, В.А.**, 1989. Повышение эффективности уборки семян бобовых кормовых путем очеса продуктивной части растений на корню и безотходной переработкой вороха на стационаре. Дис. докт. тех. Наук, Минск [16]