УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2019-5-49-60

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОЙКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ СТРУЯМИ

[1]Кирилин Александр Васильевич
[1]Шемякин Александр Владимирович
[1]Терентьев Вячеслав Викторович
[1]Андреев Константин Петрович
[2]Зазуля Александр Николаевич

[1]ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Мойка сельскохозяйственной техники является подготовительным этапом перед проведением технического обслуживания и ремонта машин, а также перед постановкой техники на длительное хранение в межсезонный период. Определяли возможности повышения качественных характеристик процесса мойки за счет применения вращающейся гидравлической струи заданного напора и степени закрутки. Теоретические исследования выполнены на основе положений, законов и методов теоретической механики. Для формирования вращающейся струи предложена конструкция устройства, позволяющего осуществлять регулировку угла распыления воды. Установлено, что оптимальный угол распыления составляет 18^0. На основании проведенных теоретических исследований получено выражение, связывающее напряжение разрушающее загрязнения и потенциальную энергию (работу) по разрушению загрязнения. В результате расчета получено значение потенциальной энергии разрушения средне связанных загрязнений, которая составляет 3 КДж на площади 1м^2. Установлены зависимости для расчета энергии разрушения частиц загрязнений, что позволило рассчитать начальную кинетическую энергию капель жидкости, которая при среднем размере капли около 0.2 мм составляет около 7.95 на 10^{-5} Дж. Исследование кинетической энергии струи распадающейся на капли позволило установить, что начальная скорость струи должна составлять около 21 м/с. Применение вращающихся струй обеспечивает комплексное гидродинамическое воздействия на частицы загрязнения. Благодаря вращению направленной струй воздействие осуществляется под определенным углом с многократным повторением, что улучшает разрушения частиц загрязнения и способствует отводу загрязненных частиц из зоны мойки.*

Ключевые слова: *мойка, гидравлическая струя, загрязнения, сельскохозяйственная техника.*

THEORETICAL RESEARCH OF TECHNOLOGY OF WASHING OF AGRICULTURAL MACHINERY BY ROTATING JETS

[1]Kirilin Alexander
[1]Shemyakin Alexander
[1]Terentyev Vyacheslav
[1]Andreev Konstantin
[2]Zazulya Alexander

[1]FSBEI HE "Ryazan state agrotechnological University by P.A.Kostychev"
[2]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *The washing of agricultural machinery is a preparatory stage before carrying out maintenance and repair of machines, as well as before setting up the equipment for long-term storage during the off-season period. The possibilities of improving the qualitative characteristics of the washing process through the use of a rotating hydraulic jet of a given pressure and degree of twist were determined. Theoretical studies are based on the provisions, laws and methods of theoretical mechanics. The design of the device that allows you to adjust the angle of spraying water, proposed to form a*

rotating jet. It was found that the optimal spray angle is 180.The expression connecting the stress that destroys pollution and the potential energy (work) to destroy pollution was obtained on the basis of theoretical studies. The value of the potential energy of destruction of medium-related pollution, which is 3 KJ per square meter, was obtained as a result of calculation. Dependencies for calculating the energy of destruction of pollution particles were established, which allowed us to calculate the initial kinetic energy of liquid droplets, which with an average droplet size of about 0.2 mm is about 7.95 per 10-5 J. A study of the kinetic energy of the jet decaying into droplets made it possible to establish that the initial velocity of the jet should be about 21 m / s. The use of rotating jets provides a comprehensive hydrodynamic effect on pollution particles. The impact is carried out at a certain angle with repeated repetition due to the rotation of the directed jets, which improves the destruction of the pollution particles and promotes the removal of contaminated particles from the washing zone.

***Keywords**: washing, hydraulic jet, pollution, agricultural machinery.*

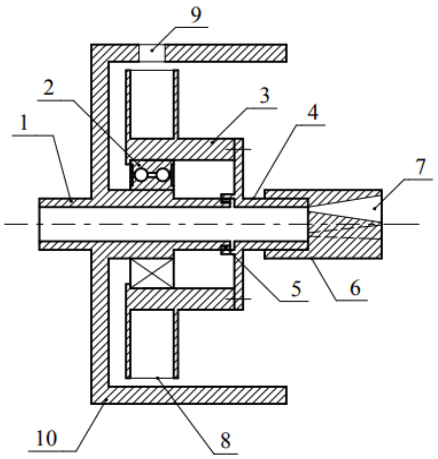
Введение. Современное сельскохозяйственной производство практически невозможно без использования высокопроизводительной техники. Политика нашего государства направлена на повышение экономической эффективности производства сельскохозяйственной продукции. В последние 5-7 лет в агропромышленные предприятия поступает большое количество сельскохозяйственных машин различного функционального назначения, применение которых позволяет в значительной степени повысить производительность труда и снизить эксплуатационные издержки при производстве продукции. Как показывает практика, приобретение высокопроизводительной техники - это только одна сторона медали. С другой ее стороны находятся вопросы, связанные с поддержанием данной техники в технически исправном состоянии. Производители сельскохозяйственной продукции в процессе эксплуатации машин нередко сталкиваются с проблемами, которые на первый взгляд кажутся незначительными, но в конечном итоге могут привести к выходу техники из строя. Одним из важных технологических процессов, качественное выполнения которого влияет на эксплуатационные характеристики машин, является мойка. Мойка техники является подготовительным этапом перед проведением технического обслуживания и ремонта машин, а также перед постановкой техники на длительное хранение в межсезонный период [1]. Качественная мойка загрязненных поверхностей машин позволяет обеспечить высокий эксплуатационный ресурс техники за счет снижения вероятности возникновения скопления влаги в местах загрязнения и, как следствие, исключения коррозионного процесса на металлических поверхностях машин.

В настоящее время на рынке представлен широкий спектр разнообразного моечного оборудования отечественного и зарубежного производства, позволяющего удалять загрязнения путем их смывания струями воды высокого давления. Это оборудование положительно себя зарекомендовало для удаления слабо- и среднесвязанных загрязнений (растительных остатков, маслянисто-грязевых отложений и т.п.). К сожалению, при удалении сильносвязанных загрязнений (продукты коррозии, старое лакокрасочное покрытие) эффективность применения установок подобного типа снижается и в тех местах, где грязь не удалена разрушающие процессы еще сильнее активизируются.

В данной работе мы рассмотрим возможность повышения качества мойки загрязненных поверхностей сельскохозяйственных машин за счет придания струе воды заданного напора эффекта вращения с определенной степенью закрутки и приведем теоретическое подтверждение нашего предположения.

Цель исследования – повышение эффективности применения моечных установок струйного типа для очистки сельскохозяйственной техники от загрязнений путем формирования вращающейся гидравлической струи заданного напора и степени закрутки.

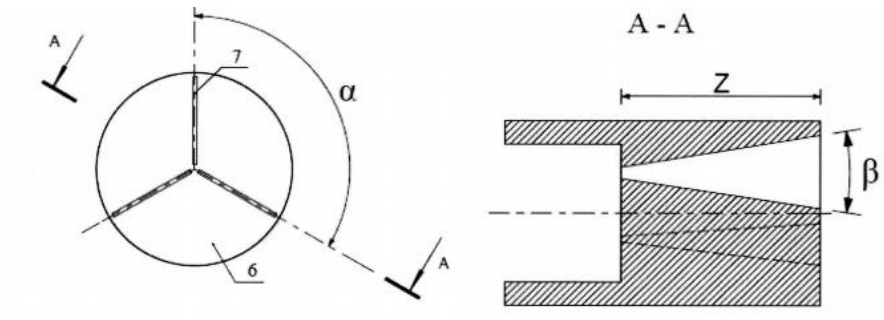
Материалы и методы. Для получения вращающихся гидравлических струй было разработана конструкция устройства (рисунок 1) [2], состоящего из прямоточной неподвижной трубы 1 для соединения с источником подачи воды под давлением, на которую посредством поворотной опоры 2 устанавливают ведомое колесо с крыльчаткой 3. Ведомое колесо с крыльчаткой 3 соединено с корпусом цилиндрического патрубка 4, соединенного с неподвижной трубой 1 через манжетное уплотнение 5 и оканчивающегося цилиндрическим струеобразующим насадком 6.



1 – неподвижная труба, 2 – поворотная опора, 3 – ведомое колесо с крыльчаткой,
4 – цилиндрический патрубок, 5 – манжетное уплотнение, 6 – струеобразующий веерный насадок,
7 – сквозные отверстия веерообразующего насадка, 8 – воздушная камера,
9 – канал подачи воздуха, 10 – корпус воздушной камеры.

Рисунок 1 – Устройство для создания вращающейся гидравлической струи

В центральной части торцевой поверхности струеобразующего насадка 6 выполнены сквозные отверстия 7, расположенные под углом 120º друг к другу. При этом каждое отверстие имеет конусообразную форму с конусностью 18º, ограниченную двумя плоскими параллельными продольными поверхностями (рисунок 2 а).



а) б)

а – вид с торца, б – продольное сечение

Рисунок 2 – Струеобразующий веерный насадок

Устройство для создания вращающейся гидравлической струи работает следующим образом. Неподвижная труба 1, соединенная с источником воды, подает воду под давлением через манжетное уплотнение 5 в цилиндрический патрубок 4.

Поток воздуха, подаваемого через канал подачи воздуха 9, поступает в корпус воздушной камеры 10 и приводит во вращение крыльчатку ведомого колеса 3, установленную внутри воздушной камеры 8. Вращение крыльчатки ведомого колеса 3 передается на соосно присоединенный к нему патрубок 4, оканчивающийся соосно присоединенным струеобразующим насадком 6.

При вращении корпуса 3, патрубка 4 и струеобразующего насадка 6 относительно общей продольной оси вращение передается потоку жидкости, а на выходе из насадка 6 формируется

вращающаяся вокруг своей оси гидравлическая струя, подаваемая на очищаемую поверхность сельскохозяйственных машин.

При этом струеобразующий насадок работает следующим образом. Вода под давлением попадает в сквозные отверстия 7 веерообразующего насадка 6, где между плоскими параллельными поверхностями формируется плоская струя на участке Z (рисунок 2 б). В канале сквозного отверстия 7 происходит формирование веерообразной плоской струи. Плоская струя формируется на всем участке отверстия 7. При придании вращения веерообразующему насадку 6 в сквозном отверстии 7 на выходе из насадка 6 формируется вращающаяся вокруг своей оси гидравлическая струя. Угол β распыления составляет 18^0. Три сквозных отверстия 7 расположены под углом φ 120^0 друг к другу [3, 4].

При использовании вращающейся веерной струи изменяется структура жидкости, поступающей на очищаемую поверхность. Вращающаяся капля воды крупнее и весит больше, чем капли без использования вращения. Мелкие капли жидкости теряют свою силу, воздействуют с ослабевающим эффектом из-за сопротивления воздуха, а крупные ударяют по очищаемой поверхности с большой скоростью, что приводит к возникновению мощного ударного импульса. Таким образом, предлагаемая конструкция устройства для создания вращающейся гидравлической струи может успешно использоваться для очистки от загрязнений сельскохозяйственной техники.

Результаты и их обсуждение. ***Теоретическое исследование движения капель вращающихся струй.***

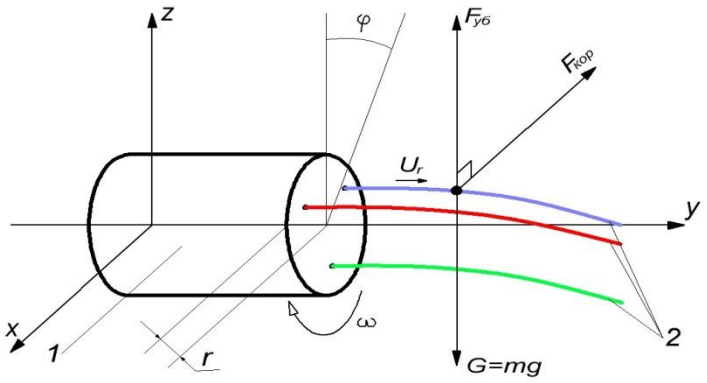
Так как большинство поверхностей сельскохозяйственной технике представляют криволинейную преграду, рассмотрим процесс мойки как разрушения загрязнения жидкостью вращающейся струи, то есть способностью воздействия на неподвижную преграду [5 – 13].

Рассмотрим гидравлическое давление вращающейся гидравлической струи на поверхность твердой неподвижной криволинейной преграды, принимая поверхность загрязнения близкой по форме к цилиндрической.

1. Очищающая струя истекает из насадки в неограниченную воздушную среду при установившемся движении.

2. Задано: средне расходная скорость истечения струи v_1, угловая скорость вращения насадки ω_0, диаметр выходного отверстия d_0, площадью.

Рассмотрим движение капли, вылетевшей из сопла. На каплю будет действовать силы тяжести, силы инерции, центробежная и сила Кориолиса.



1 – сопло; 2 – жидкость

Рисунок 3 – Расчетная схема к определению траектории движения капель

$$m_к \bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_{кор} + \bar{F}_{цб} \quad (1)$$

$m_к$ – масса капли, кг;

G – сила тяжести, Н;

$F_{кор}$ – сила Кориолиса, Н;

$F_{уб}$ – центробежная сила, Н.

Раскроем уравнение определителем третьего порядка по верхней строке:

$$2\left(\vec{i}\begin{vmatrix}\omega\sin\varphi & 0\\ \dot{y} & \dot{z}\end{vmatrix}-\vec{j}\begin{vmatrix}\omega\cos\varphi & 0\\ \dot{x} & \dot{z}\end{vmatrix}+\vec{k}\begin{vmatrix}\omega\cos\varphi & \omega\sin\varphi\\ \dot{x} & \dot{y}\end{vmatrix}\right) \quad (2)$$

Определитель второго порядка будет соответственно скорости

$$\ddot{x}=2\begin{vmatrix}\omega\sin\varphi & 0\\ \dot{y} & \dot{z}\end{vmatrix}=2\dot{z}\omega\sin\varphi \quad (3)$$

$$\ddot{y}=-2\begin{vmatrix}\omega\cos\varphi & 0\\ \dot{x} & \dot{z}\end{vmatrix}=-2\dot{z}\omega\cos\varphi \quad (4)$$

$$\ddot{z}=2\begin{vmatrix}\omega\cos\varphi & \omega\sin\varphi\\ \dot{x} & \dot{y}\end{vmatrix}=2\left(\dot{y}\omega\cos\varphi-\dot{x}\omega\sin\varphi\right) \quad (5)$$

Центробежная сила будет действовать в плоскости *z 0 y*

$$F_{уб}^{x}=m_к\omega^2R\cos\varphi \quad (6)$$

$$F_{уб}^{y}=m_к\omega^2R\sin\varphi \quad (7)$$

Так как направление центробежной силы и силы Кориолиса будет меняться при вращении головки, запишем выражение для проецирования ускорения Кориолиса на оси координат:

$$F_{кор}=m_к\,2\left(\overline{\omega}*\overline{v}_r\right) \quad (8)$$

$$2\left(\overline{\omega}*\overline{v}_r\right)=2\begin{vmatrix}\bar{i} & \bar{j} & \bar{k}\\ \omega\cos\varphi & \omega\sin\varphi & 0\\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z}\end{vmatrix} \quad (9)$$

Спроецируем уравнение на оси координат с учетом выражений.

$$\begin{cases} m\ddot{x}=-m2\dot{z}\omega\sin\varphi-m\omega^2R\cos\varphi\\ m\ddot{y}=m2\dot{z}\omega\cos\varphi\\ m\ddot{z}=-m2\left(\dot{y}\omega\cos\varphi-\dot{x}\omega\sin\varphi\right)-m\omega^2R\sin\varphi\end{cases} \quad (10)$$

Сократив в уравнении значение m, получим.

$$\begin{cases} \ddot{x}=-2\dot{z}\omega\sin\varphi-\omega^2R\cos\varphi\\ \ddot{y}=2\dot{z}\omega\cos\varphi\\ \ddot{z}=-2\left(\dot{y}\omega\cos\varphi-\dot{x}\omega\sin\varphi\right)-\omega^2R\sin\varphi\end{cases} \quad (11)$$

Теоретическое исследование ударного воздействия капель струи. При падении капли на загрязненную поверхность происходит удар капли о частицу загрязнения. В результате удара капля теряет форму и происходит разрушение и смещение частицы загрязнения. Таким образом, потеря кинетической энергии частицы капли и частицы загрязнений при ударе запишем в следующем виде:

$$T_0=m_кv_1^2+m_{чз}u_1^2 \quad (12)$$

T_0 – начальная кинетическая энергия системы (капля + частица загрязнения);

$m_к$ – масса капли, кг;

$m_{чз}$ – масса частиц загрязнений, кг;

v_1 – скорость капли, м/с;

u_1 – начальная скорость частицы загрязнений (u_1=0).

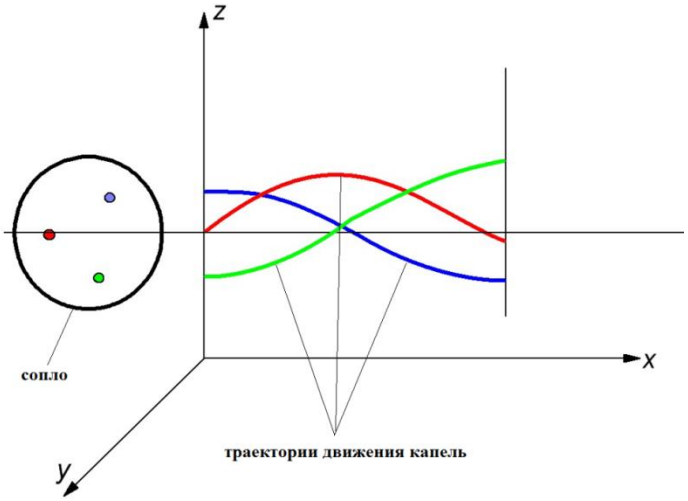


Рисунок 4 – Схема траектории движения капель при вращении сопла

Конечная кинетическая энергия будет

$$T = m_к v_2^2 + m_{чз} u_2^2 \quad (13)$$

T – конечная кинетическая энергия системы (капля + частица загрязнения);

v_2 – скорость капли после соударения, м/с;

u_2 – скорость частицы загрязнений после удара ($v_2 \approx u_2$).

Потеря кинетической энергии при ударе капли запишем в виде

$$T_0 - T = m_к (v_1^2 - v_2^2) - m_{чз} (u_1^2 - u_2^2). \quad (14)$$

При центральном ударе капли и частицы загрязнения, зная их массы, скорости центров этих тел в начале удара и коэффициент восстановления, определим, скорости капли и частицы загрязнения в конце удара и ударный импульс. Применяем теорему об изменении количества движения системы, причем действующие силы являются внутренними. Так как сумма внешних ударных импульсов равна нулю то количество движения системы в начале удара и в конце удара одинаково.

$$m_к v_1 + m_{чз} u_1 = m_к v_2 + m_{чз} u_2 \quad (15)$$

В этом уравнении два неизвестных v_2 и u_2. Следовательно, что бы определить эти неизвестные, надо найти второе уравнение, которое получим, если задать дополнительный коэффициент восстановления k. Так как после удара частица загрязнения получает перевес в скорости над каплей ($v_2 \le u_2$), то коэффициент восстановления при прямом ударе двух тел будет определяться как частное от деления модулей относительных скоростей тел в конце и в начале удара, т.е.

$$k = \frac{|v_2 - u_2|}{|v_1 - u_1|} = -\frac{v_2 - u_2}{v_1 - u_1} \quad (16)$$

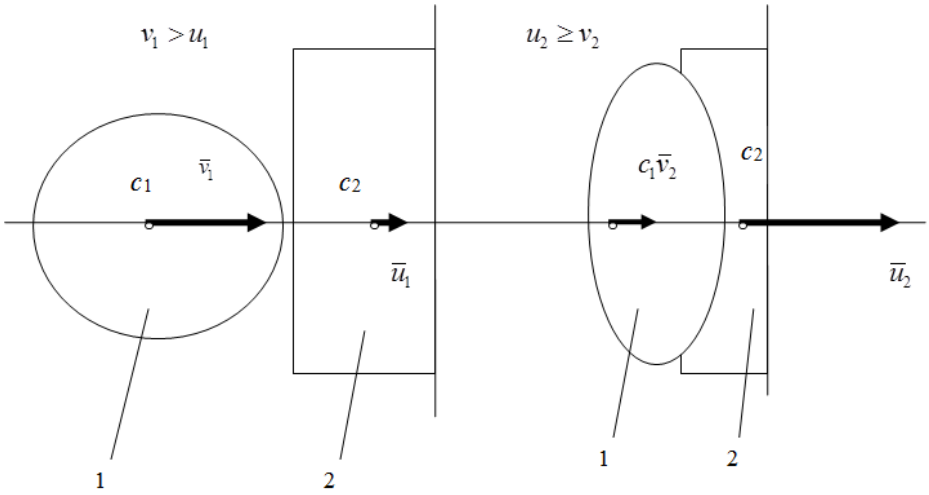
где $v_1 > u_1$.

Отсюда находим:

$$u_2 - v_2 = k(v_1 - u_1) \quad (17)$$

Решая систему двух уравнений (15) и (17), получаем:

$$\begin{cases} v_2 = v_1 - (1+k)\dfrac{m_к}{m_к + m_{чз}}(v_1 - u_1) \\ u_2 = u_1 + (1+k)\dfrac{m_к}{m_к + m_{чз}}(v_1 - u_1) \end{cases} \quad (18)$$



1 – капля; 2 – загрязнение

Рисунок 5 – Обозначение скорости центров масс капли и частицы загрязнения в начале (а) и в конце удара (б)

Из равенства (17) следует, что

$$k = \frac{u_2 - v_2}{v_1 - u_1} \quad (19)$$

при этом, очевидно, имеет место равенство

$$\frac{1-k}{1+k} = \frac{(v_1 - u_1) - (u_{2x} - v_2)}{(v_1 - u_1) + (u_2 - v_2)} \quad (20)$$

из которого находим

$$(v_1 + v_2) - (u_1 + u_2) = \frac{1-k}{1+k}\left[(v_1 - v_2) - (u_1 - u_2)\right] \quad (21)$$

Из уравнения (19) видно, что

$$m_к(v_1 - v_2) = -m_{чз}(u_1 - u_2) \quad (22)$$

Подставляя это значение в равенство (14), получаем

$$T_0 - T = m_к(v_1 - u_1)\left[(v_1 + u_1) - (v_2 + u_2)\right] \quad (23)$$

Далее, принимая во внимание равенство (22), мы формулу (23) можем представить в виде:

$$T_0 - T = \frac{1-k}{1+k}\left[m_к(v_1 - v_2)^2 + m_{чз}(u_1 - u_2)^2\right]. \quad (24)$$

где разности $(v_1 - v_2)$ и $(u_1 - u_2)$ показывают, насколько уменьшилась при ударе скорость каждого из соударяющихся тел, а поэтому их называют потерянными при ударе скоростями.

Таким образом, из равенства (24) следует что, кинетическая энергия, потерянная системой при прямом центральном и не вполне упругом ударе двух тел, равна $\dfrac{1-k}{1+k}$ той доле той кинетической энергии, которую имела бы система, если бы ее тела двигались с потерянными скоростями.

Равенству (24) можно придать несколько другой вид. В самом деле, из формул (18) имеем

$$(1+k)^2 \frac{m_{цз}^2}{(m_к + m_{цз})^2}(v_1 - u_1)^2 = (v_2 - v_1)^2 \quad (25)$$

или

$$(1+k)^2 \frac{m_к^2}{(m_к + m_{цз})^2}(v_1 - u_1)^2 = (u_2 - u_1)^2 \quad (26)$$

Отсюда легко найдем

$$\frac{m_к(v_2 - v_1)^2}{2} + \frac{m_{цз}(u_2 - u_1)^2}{2} = \frac{(1+k)^2}{2}\frac{m_к m_{цз}}{m_к + m_{цз}}(v_1 - u_1)^2 \quad (27)$$

или

$$\frac{1+k}{2}\frac{m_к m_{цз}}{m_к + m_{цз}}(v_1 - u_1)^2 = \frac{1}{1+k}\left[\frac{m_к(v_2 - v_1)^2}{2} + \frac{m_{цз}(u_2 - u_1)^2}{2}\right] \quad (28)$$

и, следовательно, будем иметь

$$\frac{1-k}{1+k}\left[m_к(v_2 - v_1)^2 + m_{цз}(u_2 - u_1)^2\right] = \frac{1-k^2}{2}\frac{m_к m_{цз}}{m_к + m_{цз}}(v_1 - u_1)^2 \quad (29)$$

Отсюда, обращаясь к формуле (24), получаем

$$T_0 - T = \frac{m_к m_{цз}}{2(m_к + m_{цз})}(1-k^2)(v_1 - u_1)^2 \quad (30)$$

В частном случае, когда частица загрязнения до удара неподвижно ($u_1 = 0$), будем иметь

$$\begin{cases} T_0 - T = \dfrac{m_к m_{цз}}{2(m_к + m_{цз})}(1-k^2)v_1^2 \\ T_0 = m_к v_1^2 \\ T = \dfrac{m_к + k^2 m_{цз}}{m_к + m_{цз}} T_0 \end{cases} \quad (31)$$

Из равенства (24) следует, что наибольшая потеря кинетической энергии будет при абсолютно неупругом ударе (k = 0), когда тела в конце удара не восстанавливаются.

В этом случае $v_2 = u_2 = u$, поэтому равенство, выражающее теорему Карно, примет вид:

$$T_0 - T = m_к(v_1 - u\ )^2 + m_{цз}(u_1 - u\ )^2 \quad (32)$$

т.е. кинетическая энергия, потерянная системой при прямом центральном и абсолютно неупругом ударе, равна той кинетической энергии, которую имела бы система, если бы ее тела двигались с потерянными скоростями.

Полагая k = 0, из равенства (30) получим выражение для потерянной кинетической энергии при абсолютно неупругом ударе в ином виде, а именно:

$$T_0 - T = \frac{m_к m_{цз}}{2(m_к + m_{цз})}(v_1 - u_1)^2 \quad (33)$$

Рассмотрим случай абсолютно неупругого удара, когда одно из соударяющихся тел до удара было неподвижным. Пусть этим телом будет второе тело, тогда его скорость до удара $u_1 = 0$.

Тогда кинетическая энергия системы в начале и в конце удара будет соответственно равна:

$$T_0 = m_к v_1^2 \quad (34)$$

$$T = (m_к + m_{цз})v_2^2 \quad (35)$$

Так как при абсолютно неупругом ударе $v_2 = u_2$. При этом будет иметь место формула (34, 35), т.е.

$$v_1 = \frac{m_к + m_{чз}}{m_к} v_2 \tag{36}$$

Подставляя это значение v_1 в формуле (33) и учитывая вторую из формул (34, 35), получаем:

$$T = \frac{1}{1 + \frac{m_{чз}}{m_к}} T_0 \tag{37}$$

Исследование разрушения загрязнений при воздействии вращающихся струй. Известна скорость струи из исследований, а также известен расход жидкости. Рассмотрим действие всесторонней деформации, когда скорость деформации не равна нулю, что вызывает увеличение прочности. Рассмотрим это утверждение на количественном языке.

Объемное реологическое уравнение для однородного материала, запишем:

$$-\sigma = k_y e_v + \xi_s \dot{e}_v \tag{38}$$

ξ_s – коэффициент объемной вязкости твердого тела.

e_v - объемная деформация загрязнения, м^3,

$\dot{e}_v$ - скорость объемной деформации м^3/с,

k_y - коэффициент упругости материала загрязнений, Н/м^3

Эта объемная вязкость задерживает появление упругой деформации и (или) вызывает вязкое затухание, но течение при этом отсутствует. Это и есть вязкость твердого тела.

Работа деформации на единицу объема, запишем

$$A = \int_0^{e_v} k_y e_v de_v + \int_0^t \xi_s \dot{e}_v^2 dt \tag{39}$$

Первая часть в правой стороне, являясь упругой потенциальной энергией, обратима, тогда как вторая часть переходит в тепло и диссипируется. Поэтому разрушение имеет место, когда первая часть достигает и превышает предельную упругую потенциальную энергию материала при равномерном всестороннем напряженном состоянии, измеряемую E_v Условие разрушения, следовательно, будет

$$A - \int_0^t \xi_s \dot{e}_v^2 dt = \int_0^{c_v} k e_v de_v \geq П \tag{40}$$

Если k постоянно, интеграл в правой части может быть вычислен, и он равен $k_y = \frac{e_v^2}{2}$

Поэтому объемное расширение, при котором происходит разрушение, равно

$$e_{vr} = \pm\sqrt{\frac{2П}{k}} \tag{41}$$

Тогда уравнение (38) дает для растягивающего напряжения, при котором имеет место разрушение, следующее значение:

$$-\sigma = k_y e_{vr} + \xi_s \dot{e}_v = \sqrt{2Пk} + \xi_s \dot{e}_v \tag{42}$$

Пусть разрушающее напряжение в статическом состоянии, при котором $\dot{e}_v = 0$, есть σ_{rs}

$$\sigma_{rs} = \pm\sqrt{2Пk}_y \tag{43}$$

тогда

$$\sigma = \sigma_{rs} + \xi_s \dot{e}_v \tag{44}$$

Следовательно: напряжение, при котором материал разрушается при всестороннем равномерном растяжении, возрастает при увеличении скорости расширения. Если ξ_s постоянна, возрастание линейно; в противном случае оно следует некоторому упругому закону, определяемому зависимостью $\xi_s = f(\dot{e}_v)$.

Следует отметить, что этот результат не зависит от постоянства k_y. Из уравнения (39) непосредственно следует, что работа деформации, A, приводящая к разрушению, для любой скорости расширения $\dot{e}_v$ всегда больше, чем работа деформации A_{rs}, затрачиваемая при бесконечно медленном расширении (для которого $\dot{e}_v = 0$)

Следовательно, в то время как при отсутствии вязкого сопротивления для объемного расширения материала существует определенное напряжение, при котором происходит разрушение, в случае, когда вязкость существует, расширение e_{vr} является фиксированным, а напряжение σ - нет.

Таблица – Распределение загрязнений по степени активности

Степень активности загрязнений	Вид загрязнений поверхности	Плотность, кг/ м^3	Толщина, мм	Предел прочности на сжатие, МПа	Условный коэффициент адгезионной прочности
Слабо связанные	Растительные остатки	40-100	30	3-20	0,2
Средне связанные	Маслянисто-грязевые	200-900	5-10	1-5	0,15-0,3
	Технологические загрязнения	790-1200	5-10	1-5	0,15-0,5
Сильно связанные	Старые лакокрасочные покрытия	1000-1400	1	30	3
	Продукты коррозии	1500-2500	-	40	4
	Смолистые отложения	950-1050	5	3-8	0,9

На основании проведенных теоретических исследований получено выражение, связывающее напряжение разрушающее загрязнения и потенциальную энергию (работу) по разрушению загрязнения. В результате расчета получена потенциальная энергия разрушения сильносвязанных загрязнений, которая составляет, согласно формуле (44), около 3 КДж на площади 1м^2.

Также установлены зависимости для расчета энергии разрушения частиц загрязнений, что позволило рассчитать начальную кинетическую энергию капель жидкости, которую можно определить по формуле (37), при среднем размере капли около 0,2 мм ее энергия составляет около 7,95 на 10^{-5} Дж. Дальнейшее исследование кинетической энергии струи распадающейся на капли позволило установить, что начальная скорость струи должна составлять 21 м/с.

Выводы.

1. Применение вращающихся струй обеспечивает комплексное гидродинамическое воздействия на частицы загрязнения. Благодаря вращению направленной струй воздействие осуществляется под определенным углом с многократным повторением, что улучшает разрушения частиц загрязнения и способствует отводу загрязненных частиц из зоны мойки.

2. Теоретические исследования реологических свойств загрязнений позволило установить потенциальную энергию разрушения загрязнения, которая составляет около 3 КДж/м^2. Анализ воздействия струй и капель моющей жидкости позволил установить, что для удаления загрязнений скорость струи воды на выходе из сопла должна составлять около 21 м/с.

Список литературы.

1. Князева Л.Г., Сазонов С.Н. О некоторых проблемах хранения сельскохозяйственной техники//АПК России. 2016. Т. 23. № 2. С. 392-399.

2. Патент 183001 Российская Федерация, МПК B05B 3/02 (2006.01), B05B 3/12 (2006.01). Устройство для создания вращающейся гидравлической струи // А.В. Шемякин, Терентьев В.В., М.Б. Латышенок, С.А. Кожин, А.В. Кирилин А.В. - № 2018119651 Заявлено 28.05.18; Опубл. 07.09.18, Бюлл. № 25.

3. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Морозова Н.М., Кожин С.А., Кирилин А.В. Устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием энергии вращающейся жидкостной струи // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2016. – № 3 (31). – С. 77-80.

4. Шемякин А.В., Латышенок М.Б., Тараканова Н.М. Теоретические основы повышения эффективности струйной мойки сельскохозяйственных машин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 11. – С. 2.

5. Аравин В. И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде // М.: Гостехтеориздат, 1953.

6. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике // М. : Наука, 1973. – 870 с.

7. Кирилин А.В., Терентьев В.В., Шемякин А.В., Ваулина О.А. Влияние гидравлического давления вращающейся струи на загрязненную поверхность // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2017. – № 2 (5) – С. 138-144.

8. Космачев О. П. Теоретические и экспериментальные исследования скоростного режима истечения жидкости через различные насадки : автореф. дис. … канд. техн. наук // Грозный, 1975.

9. Петров Н.П. Гидравлика // М.: Машиностроение, 1988.

10. Сивухин Д.В. Общий курс физики // М.: ФИЗМАТЛИТ/МФТИ, 2002.

11. Сигачёв Е.А. Устройство с циклическим использованием энергии воздуха // Труды ГОСНИТИ, 1987. – т. 80

12. Сиов Б.Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодавлением // М. : Машиностроение, 1968.

13. Толинский В.П. Динамика жидкостей и газов // Минск,1989

References

1. Knyazeva L.G., Sazonov S.N. O nekotoryh problemah hraneniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki//APK Rossii. 2016. T. 23. № 2. S. 392-399.

2. Patent 183001 Rossijskaya Federaciya, MPK V05V 3/02 (2006.01), V05V 3/12 (2006.01). Ustrojstvo dlya sozdaniya vrashchayushchejsya gidravlicheskoj strui // A.V. SHemyakin, Terent'ev V.V., M.B. Latyshenok, S.A. Kozhin, A.V. Kirilin A.V. - № 2018119651 Zayavleno 28.05.18; Opubl. 07.09.18, Byull. № 25.

3. SHemyakin A.V., Terent'ev V.V., Morozova N.M., Kozhin S.A., Kirilin A.V. Ustrojstvo dlya ochistki sel'skohozyajstvennyh mashin s ispol'zovaniem energii vrashchayushchejsya zhidkostnoj strui // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2016. – № 3 (31). – S. 77-80.

4. SHemyakin A.V., Latyshenok M.B., Tarakanova N.M. Teoreticheskie osnovy povysheniya effektivnosti strujnoj mojki sel'skohozyajstvennyh mashin // Remont, vosstanovlenie, modernizaciya. – 2010. – № 11. – S. 2.

5. Aravin V. I., Numerov S.N. Teoriya dvizheniya zhidkostej i gazov v nedeformiruemoj poristoj srede // M.: Gostekhteorizdat, 1953.

6. Vygodskij M. YA. Spravochnik po vysshej matematike // M. : Nauka, 1973. – 870 s.

7. Kirilin A.V., Terent'ev V.V., SHemyakin A.V., Vaulina O.A. Vliyanie gidravlicheskogo davleniya vrashchayushchejsya strui na zagryaznennuyu poverhnost' // Vestnik Soveta molodyh uchenyh Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2017. – № 2 (5) – S. 138-144.

8. Kosmachev O. P. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya skorostnogo rezhima istecheniya zhidkosti cherez razlichnye nasadki : avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk // Groznyj, 1975.

9. Petrov N.P. Gidravlika // M.: Mashinostroenie, 1988.

10. Sivuhin D.V. Obshchij kurs fiziki // M.: FIZMATLIT/MFTI, 2002.

11. Sigachyov E.A. Ustrojstvo s ciklicheskim ispol'zovaniem energii vozduha // Trudy GOSNITI, 1987. – t. 80

12. Siov B.N. Istechenie zhidkosti cherez nasadki v sredy s protivodavleniem // M. : Mashinostroenie, 1968.

13. Tolinskij V.P. Dinamika zhidkostej i gazov // Minsk, 1989.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Кирилин Александр Васильевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: kirilin1982@mail.ru.

Шемякин Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: shem.alex62@yandex.ru.

Терентьев Вячеслав Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: vvt62@ryazanyandex.ru.

Андреев Константин Петрович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: kosta066@yandex.ru.

Зазуля Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов.

Author credentials

Affiliations

Kirilin Alexander – graduate student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Ryazan state agrotechnological University by P.A.Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: kirilin1982@mail.ru.

Shemyakin Alexander – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Ryazan state agrotechnological University by P.A.Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: shem.alex62@yandex.ru.

Terentyev Vyacheslav – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Ryazan state agrotechnological University by P.A.Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: vvt62@ryazanyandex.ru.

Andreev Konstantin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Ryazan state agrotechnological University by P.A.Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: kosta066@yandex.ru.

Zazulya Alexander – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov.

Поступила в редакцию (Received): 12.09.2019 Принята к публикации (Accepted): 18.10.2019