УДК 637.1:661.185.7
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-20-26

ПЛОЩАДЬ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ФОРСУНКИ И ДАВЛЕНИЯ СТРУИ ПРИ МОЙКЕ МОЛОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]Завражнов Анатолий Иванович
[1]Дьячков Сергей Владимирович
[1]Ланцев Владимир Юрьевич
[1]Матушкин Петр Алексеевич
[1]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Реферат. *Создание новых видов молочных продуктов с использованием различных растительных белков и жиров, стабилизаторов, ароматизаторов и красителей приводит к образованию на поверхности технологического оборудования специфических загрязнений, что требует новых знаний о физико-химических принципах адгезии и адсорбции молочных ингредиентов нового поколения. Рассматривали комплексный подход к изучению процесса отделения загрязнений с объяснением факторов, влияющих на эффективность очистки оборудования в процессе пенной мойки. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования площади сечения факела распыла форсунки при мойке молочного оборудования показали, что в значительной степени она зависят от расстояния до поверхности обработки. Выявлено, что струя должна быть такого размера, чтобы охватывать как можно большую часть поверхности при сохранении необходимого давления, но в то же время исключить риск обсеменения соседних поверхностей, что достигается изменением расстояния между форсункой и обмываемой деталью. Установлено, что качество мойки и расход моющей жидкости зависит от угла распыла, давления обмыва, характера воздействия струи на моющую поверхность.Теоретические исследования гидродинамического давления струи моющей жидкости на поверхности обмыва показали, что оно зависит от давления напора и расстояния до сопла форсунки по степенной зависимости. Установка в наконечнике пистолета-распылителя насадки в виде винта приводит к уменьшению времени обмыва и уменьшению количества затраченной жидкости при сохранении качества обмыва.*

Ключевые слова: *молочное оборудование, пенная мойка, форсунка, площадь распыла, гидродинамическое давление струи.*

SPRAY AREA OF THE NOZZLE AND JET PRESSURE WHEN WASHING DAIRY EQUIPMENT

[1]Zavrazhnov Anatoly
[1]Dyachkov Sergey
[1]Lantsev Vladimir
[1]Matushkin Petr
[1]Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education Michurinsk State Agrarian University

Abstract. *The creation of new types of dairy products using various vegetable proteins and fats, stabilizers, flavors and dyes leads to the formation of specific contaminants on the surface of technological equipment, which requires new knowledge about the physicochemical principles of adhesion and adsorption of new generation dairy ingredients. An integrated approach to the study of the process of separating contaminants was considered with an explanation of the factors affecting the efficiency of equipment cleaning in the foam washing process. Conducted theoretical and experimental studies of the cross-sectional area of the nozzle spray jet when washing dairy equipment showed that it largely depends on the distance to the treatment surface. It was found that the jet should be of such a size as to cover as much of the surface as possible while maintaining the required pressure, but at the same time to eliminate the risk of contamination of adjacent surfaces, which is achieved by changing the distance between the nozzle and the part to be washed. It was established that the quality of washing and the consumption of washing liquid depend on the spray angle, washing pressure, and the nature of the jet impact on the washing sur-*

face. Theoretical studies of the hydrodynamic pressure of the jet of washing liquid on the washing surface showed that it depends on the head pressure and the distance to the nozzle according to a power law. Installing a nozzle in the form of a screw in the tip of the spray gun leads to a decrease in washing time and a decrease in the amount of liquid spent while maintaining the quality of washing.

Keywords: *dairy equipment, foam washing, nozzle, spray area, hydrodynamic pressure of the jet.*

Введение. Производство молочной продукции высокого качества с длительным сроком хранения является одной из важнейших проблем производства молока в условиях рыночной экономики.

Высокий уровень развития молочной отрасли отражается сопровождается внедрением высокотехнологичного оборудования для переработки сырого молока, значительное увеличение номенклатуры новых асептических машин и др.. Наряду с совершенствованием технологического оборудования, создаются новые виды молочных продуктов (йогурты, пасты, пудинги, желе, масла, спреды, сгущенное молоко и др.) с использованием различных растительных белков - жиров, стабилизаторов, ароматизаторов - красителей.

Все это приводит к появлению особых загрязнений, требующих нового понимания физико-химических принципов, в основе которых лежит адгезия молочных компонентов нового поколения и абсорбция на поверхностях технологического оборудования.

В целом организовать эффективную пенную мойку оборудования в пищевой промышленности непросто. Ее решение требует комплексного подхода к изучению процесса удаления загрязнений с учетом факторов, влияющих на эффективность промывки.

Однако известные теоретические и экспериментальные исследования не учитывают возможности и перспективы технологии пенной мойки, особенно ее применения на молочных заводах и предприятиях, производящих различные продукты с использованием различных растительных белков, жиров, стабилизаторов, пигментов [1, 2, 3, 4, 5]:

Целью проведенных исследований является повышение эффективности пенной мойки на молокоперерабатывающих предприятиях малой и средней мощности за счет оптимизации технологических режимов мойки.

Условия, материалы и методы. Теоретические зависимости, характеризующие качество мойки, были сформулированы на основе известных законов физики и теоретической механики.

При проведении экспериментальных исследований применялись общеизвестные методики и разработанные на их базе – частные. Экспериментальные исследования проводились с использованием электронных и механических установок и приборов. Обработка экспериментальных данных проводилась методом математической статистики.

Результаты и обсуждение. Объёмная схема теоретического факела распыла форсунки при мойке молочного оборудования представлена на рисунке 1.

Ширину струи по мере удаления от форсунки определим согласно расчетной схеме (рисунок 2).

$$\frac{B/2-B_0/2}{l} = tg\frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

Откуда:

$$B = B_0 + 2ltg\frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

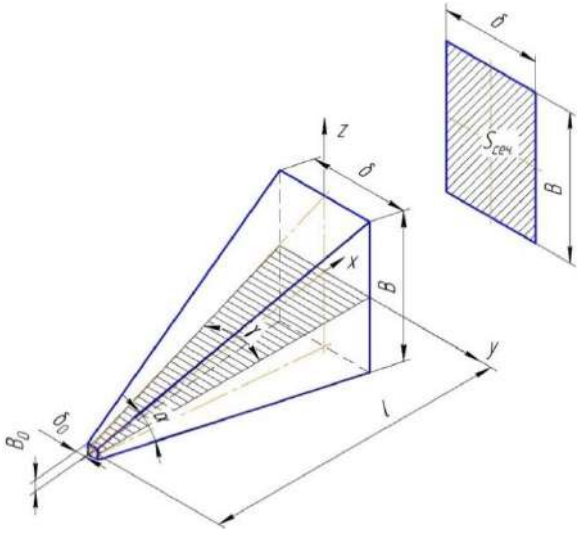
Толщину струи определим согласно расчетной схемы (рисунок 3)

$$\delta = \delta_0 + 2ltg\frac{\gamma}{2} \quad (3)$$

$$S_{\text{сеч}} = \delta \cdot B$$

Тогда, с учетом выражений 2 и 3:

$$S_{\text{сеч}} = \left(B_0 + 2ltg\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (\delta_0 + 2ltg\frac{\gamma}{2}) = B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2} \quad (4)$$



α – угол распыла, рад; *l* – расстояние от сопла форсунки до преграды, м; *B* – теоретическая ширина струи, м; *δ* – теоретическая толщина струи (ширина сопла форсунки), м, B_0– ширина щели форсунки, м

Рисунок 1– Объёмная схема теоретического факела распыла форсунки высокого давления

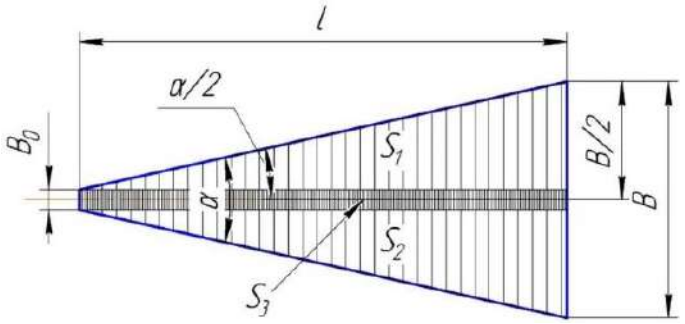


Рисунок 2 – К определению ширины струи *B* (плоскость *xz*)

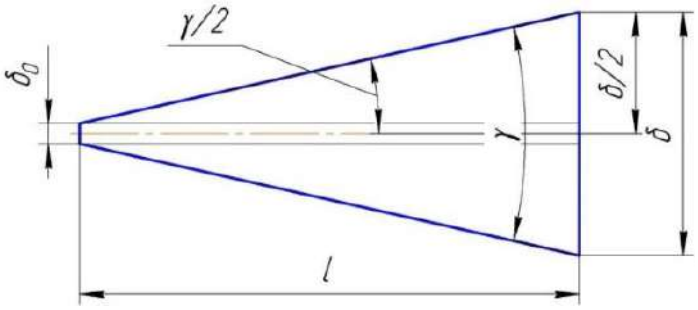
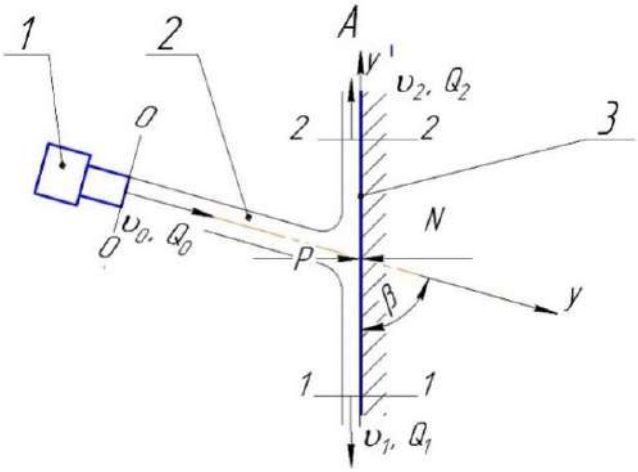


Рисунок 3 - К определению толщины струи δ в плоскости *xy*

При воздействии струи моющей жидкости на поверхность сила давления определится произведением гидродинамического давления на площадь пятна контакта. Для определения силы воспользуемся теоремой количества движения - изменение количества движения *Δmυ* равно импульсу внешних сил *ΔF*, приложенных в выделенному участку потока:

$$\Delta F = \Delta m\vartheta \quad (5)$$

Рассмотрим действие потока моющей жидкости на загрязненную поверхность при угле поворота β форсунки в плоскости *xy* (рисунок 4):



1 – форсунка, 2 – струя моющей жидкости, 3 – загрязненная поверхность
Рисунок 4 – Схема воздействия струи моющей жидкости объект

Струи моющей жидкости во фронтальной плоскости *zx* из щелевой форсунки высокого давления направляются на балку под углом α, называемом факелом распыла.

Жидкость вытекает из форсунки с расходом Q_0 и скоростью υ_0. Со стороны поверхности возникает противодействующая сила *N*, равная силе давления жидкости *P* и направленная в противоположную сторону [6, 7].

Изменение количества движения $\Delta m\vartheta$ за время *dt* в проекции на ось *y* определится по следующей зависимости:

$$\Delta m\vartheta = (m_1\vartheta_1 cos\beta - m_2\vartheta_2 cos\beta) - m_0\vartheta_0 \quad (6)$$

где $m_0\vartheta_0$,$m_1\vartheta_1$и $m_2\vartheta_2$, – проекции количества движения жидкости на ось *y* в сечениях 0 – 0, 1 – 1 и 2 – 2 соответственно.

Импульс внешних сил за время *dt* будет равен:

$$\Delta F = -Nsin\beta dt \quad (7)$$

Тогда:

$$-Nsin\beta dt = m_1\vartheta_1 cos\beta - m_2\vartheta_2 cos\beta - m_0\vartheta_0 \quad (8)$$

Учитывая, что$\frac{m}{dt} = \frac{\rho V}{dt} = \rho Q$, где ρ – плотность жидкости, кг/м^3, *V* – объем жидкости, м^{3}получим

$$Nsin\beta = \rho(Q_0\vartheta_0 - Q_1\vartheta_1 cos\beta + Q_2\vartheta_2 cos\beta) \quad (9)$$

Из условия неразрывности потока расход моющей жидкости в сечении 0 – 0 за время *dt* будет равен сумме расходов в сечениях 1 – 1 и 2 – 2:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

Для определения расходов жидкости в сечениях 1 – 1 и 2 – 2 составим уравнение количества движения относительно оси $y^{\prime}$ (см. рис. 4).

Так как силы *P* и *N*перпендикулярны выбранной оси, то проекции этих сил будут равны нулю. Тогда:

$$0 = \rho(Q_0\vartheta_0 cos\beta - Q_1\vartheta_1 + Q_2\vartheta_2) \quad (11)$$

Отсюда

$$Q_0 cos\beta = Q_1 - Q_2 \quad (12)$$

$$Q_0 = \frac{Q_1 - Q_2}{cos\beta} \quad (13)$$

С учетом (10) определим значения Q_1и Q_2:

$$Q_1 = \frac{Q_0(1+cos\beta)}{2} \quad (14)$$

$$Q_2 = \frac{Q_0(1-cos\beta)}{2} \quad (15)$$

Подставив полученные значения в уравнение 9, и учитывая, что из условия неразрывности потока скорости в сечениях 0 – 0, 1 – 1 и 2 – 2 равны, получим:

$$Nsin\beta = \rho(Q_0\vartheta_0 - \frac{Q_0(1+cos\beta)}{2}\vartheta_0 cos\beta + \frac{Q_0(1-cos\beta)}{2}\vartheta_0 cos\beta) \quad (16)$$

Преобразовав, получим

$$Nsin\beta = \rho Q_0 \vartheta_0 sin^2\beta$$

Так как $Q_0 = \vartheta_0 S_0$, сила давления жидкости выходящей из сопла форсунки будет равна:

$$N = \rho\frac{Q_0^2}{S_0}sin\beta \quad (17)$$

Или $$N = \rho S_0 \vartheta_0^2 sin\beta$$

Гидродинамическое давление струи P_y (Н/м^2), определяется выражением:

$$P_y = \rho_l \vartheta^2 sin\beta \quad (18)$$

где ϑ – скорость потока в момент соударения с преградой, м/с;

ρ_l – средняя плотность жидкости на расстоянии l от форсунки

Средняя плотность жидкости на расстоянии l от форсунки определим через коэффициент аэрации k:

$$\rho_l = \frac{\rho_ф}{k} \quad (19)$$

$\rho_ф$ – плотность моющей жидкости на выходе из форсунки, кг/м^3 ($\rho_ф = 1000$ кг/м^3)

$$k = \frac{S_{сеч}}{S_0} = \frac{B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})}{B_0\delta_0} = 1 + \frac{2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})}{B_0\delta_0} \quad (20)$$

Тогда гидродинамическое давление струи на объект примет вид:

$$P_y = \frac{\rho_ф \vartheta^2 B_0\delta_0}{B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})} sin\beta \quad (21)$$

Среднюю скорость потока в струе на расстоянии l можно приближенно считать равной начальной скорости потока ϑ_0, м/с:

$$\vartheta = \vartheta_0 = \varphi\sqrt{2gH}$$

На рисунке 5 отражена теоретическая зависимость давления жидкости на объект мойки в зависимости от расстояния до загрязненной поверхности. Видно, что чем ближе расположена форсунка к поверхности тем выше давление струи.

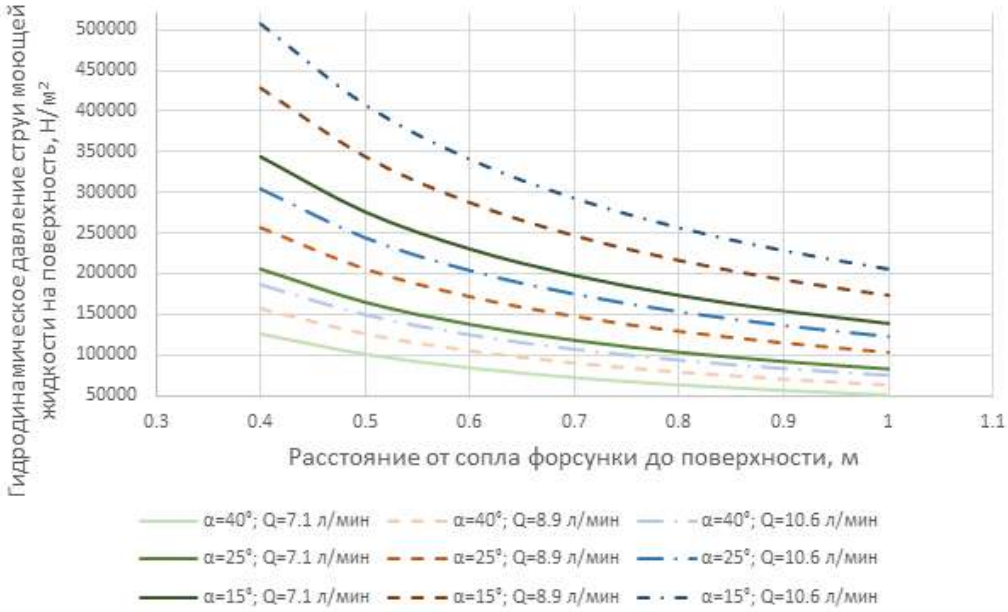


Рисунок 5 - Зависимость гидродинамического давления от расстояния l при различных углах факела распыла α=40°, α=25°, α=15°

Качество мойки и расход моющей жидкости зависит не только от угла распыла и давления обмыва, но и от характера воздействия струи на моющую поверхность.

В процессе экспериментов вместо плоскофакельной форсунки на пистолет-распылитель была поставлена насадка, в которой установлена завяхряющая винтовая вставка, имеющего один оборот спирали. В результате этого на выходе струя моющей жидкости имела вращательное движение и попадала на поверхность по касательной. Эффект такого воздействия был положительный: время мойки и расход жидкости снижались при качестве мойки, отвечающим техническим требованиям (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты эксперимента действия разных форсунок при обмыве поверхности.

Тип форсунки	Объект исследований	Температура жидкости, ^{0}С	Давление ополаскивания, кг/см^2	Время ополаскивания, мин.	Кол-во потраченной воды, л	Показания КМАФАнМ, КОЕ/см^2 до начала ополаскивания	Показания КМАФАнМ, КОЕ/см^2 после окончания ополаскивания
Плоскофакельная (стандарт)	Бактофага Альфа-Лаваль	38	3,0	3	10	Сплошной рост	1110
Со шнековой вставкой (тестовый образец)	Бактофага Альфа-Лаваль	38	3,0	2,5	8	Сплошной рост	660

Выводы. На основании исследований установлено, что:

1. размеры площади сечения факела распыла в значительной степени зависят от расстояния до поверхности обработки. Струя должна быть такого размера, чтобы охватывать как можно большую часть поверхности при сохранении необходимого давления, но в то же время исключить риск обсеменения соседних поверхностей, что достигается изменением расстояния между форсункой и обмываемой деталью;
2. гидродинамическое давление струи моющей жидкости на поверхности обмыва зависит от давления напора и расстояния до сопла форсунки по степенной зависимости;
3. установка в наконечнике пистолета-распылителя насадки в виде винта приводит к уменьшению времени обмыва и уменьшению количества затраченной жидкости при сохранении качества обмыва.

Список литературы

1. Белозеров Д.А. Мойка и дезинфекция - факторы, определяющие качество готового продукта. Молочная промышленность, 2003 - 63 с.

2. Меры санитарной обработки молочных линий/ Матвеев В.Ю.// Вестник НГИЭИ, 2017. - №3 (70). - С. 32-40.

3. Обоснование внедрения автоматической системы управления качеством очистки молочного оборудования/ Бигбашев М.Ю.// В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия». Ижевск, 2021. - С. 1191-1194.

4. Силовые взаимодействия частиц загрязнений с поверхностью молокопровода/ Керученко Л.С., Троценко В.В., Кулаева А.Г., Союнов А.С., Троценко И.В.// Вестник Омского государственного аграрного университета, 2019. - №3 (35). - С. 94-101.

5. Способы мытья молочных танков/ Емельянов Д.В.// В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. сборник статей: электронный ресурс. ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. Ижевск, 2018. - С. 431-434.

6. Теоретические предпосылки к исследованию устройства гидродинамической мойки элементов дорожных ограждений/ Дьячков С.В., Соловьев С.В., Ланцев В.Ю., Бахарев А.А., Абросимов А.Г.// Научная жизнь, 2019. - Т. 14. - №5 (93). - С. 666-674.

7. Guardrail hydrodynamic washing machine/ Dyachkov S.V., Solovyov S.V., Lantsev V.Y., Bakharev A.A., Abrosimov A.G.// International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. - Т.9. - №1. - С. 4520-4526.

References

1. Belozerov D.A. Mojka i dezinfekciya - faktory, opredelyayushchie kachestvo gotovogo produkta. Molochnaya promyshlennost', 2003 - 63 s.
2. Mery sanitarnoj obrabotki molochnyh linij/ Matveev V.YU. // Vestnik NGIEI, 2017. - №3 (70). - S. 32-40.
3. Obosnovanie vnedreniya avtomaticheskoj sistemy upravleniya kachestvom ochistki molochnogo oborudovaniya/ Bigbashev M.YU. // V sbornike: Nauchnye trudy studentov Izhevskoj GSKHA. FGBOU VO «Izhevskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». Izhevsk, 2021. - S. 1191-1194.
4. Silovye vzaimodejstviya chastic zagryaznenij s poverhnost'yu molokoprovoda/ Keruchenko L.S., Trocenko V.V., Kulaeva A.G., Soyunov A.S., Trocenko I.V.// Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2019. - №3 (35). - S. 94-101.
5. Sposoby myt'ya molochnyh tankov/ Emel'yanov D.V.// V sbornike: Nauchnye trudy studentov Izhevskoj GSKHA. sbornik statej: elektronnyj resurs. FGBOU VO Izhevskaya GSKHA. Izhevsk, 2018. - S. 431-434.
6. Teoreticheskie predposylki k issledovaniyu ustrojstva gidrodinamicheskoj mojki elementov dorozhnyh ograzhdenij/ D'yachkov S.V., Solov'ev S.V., Lancev V.YU., Baharev A.A., Abrosimov A.G.// Nauchnaya zhizn', 2019. - T. 14. - №5 (93). - S. 666-674.
7. Guardrail hydrodynamic washing machine/ Dyachkov S.V., Solovyov S.V., Lantsev V.Y., Bakharev A.A., Abrosimov A.G.// International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. - T.9. - №1. - S. 4520-4526.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Завражнов Анатолий Иванович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: aiz@mgau.ru.

Дьячков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и основ конструирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск.

Ланцев Владимир Юрьевич - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и основ конструирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: lan-vladimir@yandex.ru.

Матушкин Петр Алексеевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск.

Author credentials

Affiliations

Zavrazhnov Anatoly Ivanovich - Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsk State Agrarian University", Russia, Michurinsk, e-mail: aiz@mgau.ru.

Dyachkov Sergey Vladimirovich – Ph.D., Department of Transport and Technological Machines and Design Fundamentals of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsk State Agrarian University", Russia, Michurinsk.

Lantsev Vladimir Yurievich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Transport and Technological Machines and Design Fundamentals of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsk State Agrarian University", Russia, Michurinsk, e-mail: lan-vladimir@yandex.ru.

Matushkin Petr Alekseevich – post-graduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk.

Поступила в редакцию (Received): 16.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022