УДК 621.6.04

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-2-24-30

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИНЫ КВАЗИКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА
В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ**¹Королев Владимир Николаевич¹Островская Анна Валентиновна¹Амарская Ирина Борисовна²Нагорнов Станислав Александрович²Корнев Алексей Юрьевич¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина»²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт

использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. Причина наличия квазикапиллярного эффекта или его отсутствия в узких трубках связана со структурой зернистого слоя и, как следствие, с величиной его средней порозности. При определении порозности в качестве твердой фазы использовали частицы различной формы и шероховатости: стеклянные, алунда и корунда. Зернистый материал засыпался в стеклянные трубки высотой 215 мм с одинаковой высоты без вибрации. Исследована средняя порозность неподвижного зернистого слоя в трубках, отношение внутреннего диаметра которых к диаметру частиц находится в пределах 1 – 25. Четкой зависимости величины средней порозности слоя частиц от внутреннего размера трубки не обнаружено. Выявлено, что причиной перемещения дисперсной среды (смесь воздуха и твердых частиц) без дополнительной затраты энергии вверх по трубке, опущенной в неподвижный продуваемый зернистый слой, связана с повышенной порозностью слоя на расстоянии одного - полутора диаметров зерен от стенки трубки. Установлено, что, чем большая доля сечения трубки занята слоем с повышенной порозностью, то есть имеет меньшее сопротивление, тем дисперсная среда в трубке поднимается выше. Предложено возможное решение интенсификации процесса сушки зерновых культур путем размещения в плотном продуваемом теплоносителе слое зерен пучка труб с определенным отношением их диаметра к размеру зерна. За счет интенсивного фонтанирования зерен их поверхность из-за хаотического смещения будет активно контактировать с теплоносителем, что приведет к ускорению и более равномерному процессу сушки.

Ключевые слова: узкая трубка; твердые частицы; размер частиц; неподвижный зернистый слой; порозность слоя.

**STUDY OF THE CAUSE OF THE QUASICAPILLARY EFFECT
IN THE STATIONARY BREEDING GRAIN LAYER**¹Korolev Vladimir¹Ostrovskaj Anna¹Amarskaj Irina²Nagornov Stanislav²Kornev Alexey¹FSAEI HE “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”²FSBSI “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”

Abstract. The reason for the presence of the quasicapillary effect or its absence in narrow tubes is associated with the structure of the granular layer and, as a consequence, with the value of its average void volume fraction. Particles of various shapes and roughness: glass, alundum and corundum were used to determine the fraction of the void volume as a solid phase. The granular material was poured into glass tubes with a height of 215 mm from the same height without vibration. The average fraction of the void volume of a fixed granular layer in tubes, the ratio of the inner diameter of which to the diameter of the particles is in the range of 1 - 25 are investigated. No clear dependence of the value of the average fraction of the void volume of the layer of particles on the internal size of the tube was found. It was found that the reason for the dispersed medium (a mixture of air and solid particles) to move without additional

energy consumption up the tube, lowered into a stationary blown granular layer, is associated with an increased fraction of the void volume of the layer at a distance of one to one and a half grain diameters from the tube wall. It was found that the larger the fraction of the tube section is occupied by a layer with an increased fraction of the void volume, that is, has a lower resistance, the higher the dispersed medium in the tube rises. It was found that the larger the fraction of the tube section is occupied by a layer with an increased fraction of the void volume, that is, has a lower resistance, the higher the dispersed medium in the tube rises. A possible solution is proposed for intensifying the drying process of grain crops by placing a bundle of pipes with a certain ratio of their diameter to grain size in a dense layer of grains blown through by a heat carrier. The surface of the grains, due to intensive gushing due to chaotic displacement, will actively contact the coolant, which will lead to an acceleration and a more uniform drying process.

Keywords: narrow tube; solid particles; particle size; fixed granular layer; porosity of the layer.

Введение. Ранее [1] экспериментально исследован необычный эффект, названный нами квазикапиллярным, заключающийся в том, что если полый цилиндр (трубку) определенного внутреннего диаметра опустить в неподвижный продуваемый зернистый слой, то дисперсная среда (смесь воздуха и частиц слоя) без дополнительной затраты энергии движется вверх по каналу сплошным потоком или поршнями, идущими друг за другом. Причем, внутренний диаметр трубки и его соотношение с размером частиц и глубиной погружения трубки в зернистый слой, определяют высоту подъема и характер движения частиц.

Визуально было установлено, что при $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}}$ меньше 4 движения частиц по трубке не происходит. Начиная с $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 4$ наблюдался стабильный подъем потока частиц на высоту, в десятки раз превышающую глубину погружения трубки в слой (рисунок 1а).

Рисунок – 1 Движение дисперсной среды по трубкам: а - $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 4$; б - $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 10$; в - $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 11,5$

При увеличении $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}}$ увеличивалось и количество поднимающихся частиц, но высота их подъема уменьшалась (рисунки 1б и 1в). При $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} \geq 20$ никакого эффекта, связанного с движением частиц по трубке, не наблюдалось.

Было предположено [1], что причина наличия квазикапиллярного эффекта или его отсутствия в узких трубках связана со структурой зернистого слоя и, как следствие, с величиной его средней порозности. Подробные исследования по влиянию ограничивающих слой стенок на величину средней порозности зернистого слоя при малых отношениях диаметра аппарата к размеру частиц засыпки в литературе отсутствуют. В [2] приводятся лишь единичные данные по величине порозности слоя в аппаратах, диаметр которых соизмерим с размером частиц засыпки.

Целью данного исследования являлось экспериментальное определение средней порозности неподвижного зернистого слоя в узких трубках, отношение внутреннего диаметра которых к

диаметру частиц засыпки ($d_{тр} / d_{ч}$) изменялось от 1 до 25; установление причины необычного эффекта перемещения дисперсной среды без дополнительной затраты энергии вверх по трубке, опущенной в неподвижный продуваемый зернистый слой, когда $4 \leq d_{тр} / d_{ч} \leq 20$, а также причины отсутствия этого явления, если $d_{тр} / d_{ч}$ меньше 4 и больше 20.

Материалы и методы. Порозность зернистого слоя определялась опытным путем. Стекланные сферические частицы ($d_{ч} = 0,68$ и 2 мм), а также округлые частицы алунда ($d_{ч} = 2,68$ мм) и частицы корунда произвольной формы ($d_{ч} = 0,63$ мм) применялись в качестве твердой фазы. Выбор частиц определялся тем, что величина порозности зернистого слоя в значительной степени зависит от формы частиц и шероховатости их поверхности, а вот от размера частиц практически не зависит [2]. Кроме того, частицы из стекла ($d_{ч} = 0,68$ мм) и корунда ($d_{ч} = 0,63$ мм) использовались в экспериментах по исследованию квазикапиллярного эффекта – явления самопроизвольного подъема твердых частиц в узких трубках, погруженных в неподвижный продуваемый зернистый слой [1]. При определении порозности засыпки в самых узких трубках $1 \leq d_{тр} / d_{ч} \leq 7$ использовались частицы размером 2 и 2,68 мм, так как загрузить мелкие частицы в узкие трубки (диаметр которых соизмерим с размером самих частиц) было очень затруднительно. Это было связано с тем, что засыпка частиц в узкие трубки осуществлялась практически поштучно.

Трубки, в которые насыпался зернистый материал, были выполнены из стекла и имели высоту 215 мм. Загрузка частиц в трубки осуществлялась с одинаковой высоты без вибрации. Масса насыпаемых в трубку частиц измерялась на электронных весах. По известной массе материала в слое M и измеренному объему засыпки $V_{сл}$ определялась плотность насыпного слоя $\rho_{нс} = M / V_{сл}$. Затем, зная истинную плотность частиц слоя ρ , рассчитывалась величина порозности засыпки $\varepsilon = 1 - (\rho_{нс} / \rho)$. Для каждого отношения $d_{тр} / d_{ч}$ опыт повторялся от трех до пяти раз. Это связано с непредсказуемостью укладки частиц при их засыпке в любой сосуд, а тем более в узкие трубки. Поэтому для достоверности результата приходилось опыт многократно повторять и по полученным в каждом из опытов значениям порозности рассчитывалась ее средняя величина для данного отношения $d_{тр} / d_{ч}$.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования средней порозности неподвижного зернистого слоя в трубках, отношение внутреннего диаметра которых к диаметру частиц засыпки ($d_{тр} / d_{ч}$) изменялось примерно от 1 до 25 представлены в таблице.

Таблица – Значение порозности слоя при различных отношениях диаметра трубки к размеру насыпанных в нее частиц

$d_{тр} / d_{ч}$	Сферические частицы, диаметром $d_{ч}$, мм (поверхность частиц гладкая)		$d_{тр} / d_{ч}$	Частицы округлой и произвольной формы поверхности эквивалентным диаметром $d_{ч}$, мм (поверхность частиц шероховатая)	
	2,0	0,68		2,68	0,63
2,0	0,55		1,1	0,34	
2,5	0,52		1,5	0,61	
3,0	0,51		1,9	0,57	
3,5	0,52		2,0	0,56	
4,0	0,53		2,2	0,57	
4,5	0,50		2,6	0,54	
5,0	0 4,5		3,0	0,52	
7,0	0,47	0,47	6,3		0,52
7,4		0,48	8,0		0,51
9,0		0,50	9,5		0,56
10,4		0,51	11,0		0,56
11,9		0,48	12,7		0,53
13,3		0,43	14,3		0,50
14,8		0,48	15,9		0,53
16,3		0,46	17,4		0,53
19,3		0,48	20,6		0,52
20,7		0,48	22,2		0,52
23,0		0,48	24,8		0,52

Анализ полученных данных показывает, что четкой зависимости величины средней порозности слоя частиц от внутреннего размера трубки, в которую частицы засыпались, не обнаружено. При отношении диаметра трубки к диаметру сферических частиц в интервале $2 \leq d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} \leq 4$ и в слоях частиц округлой и произвольной формы поверхности в интервале $1,5 \leq d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} < 3$ величина порозности слоя несколько выше, чем для слоев при $d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} \geq 5$. Более рыхлую укладку можно объяснить влиянием ограждающих слой стенок. В таких узких трубках за счет стесненности сила трения частиц, контактирующих со стенкой, становится значительной и слой как бы зависает на стенках.

Величина порозности засыпки шероховатых частиц во всем исследованном диапазоне $1 \leq d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} \leq 25$ больше, чем для слоя из гладких сферических частиц. Связано это с тем, что шероховатость поверхности частиц препятствует уплотнению слоя и порозность засыпки получается выше. Как показал эксперимент, в интервале $d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}}$ примерно от 5 до 17 имеют место колебания величины порозности зернистого слоя в зависимости от отношения $d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}}$, причем это фиксируется, как в слоях сферических частиц, так и в слоях частиц произвольной формы поверхности. При $d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} \geq 19$ величина порозности засыпки остается практически неизменной. Следовательно, можно уверенно сделать вывод, что сосуды, поперечный размер которых превышает 20 диаметров частиц, с точки зрения структуры неподвижного слоя можно относить к аппаратам неограниченных размеров.

Ограничивающая зернистый слой стенка трубки нарушает случайную хаотическую структуру пристенного слоя и упорядочивает ее, что приводит к неравномерному сопротивлению зернистого слоя по сечению трубки вследствие чего и происходит самопроизвольный подъем твердых частиц в узкой трубке, погруженной в неподвижный продуваемый зернистый слой. Результаты экспериментального исследования [3] (рис.2) распределения локальной порозности неподвижного зернистого слоя вблизи плоской стенки в аппарате, диаметр которого на несколько порядков превышал размер частиц слоя ($d_{\text{тр}}/d_{\text{ч}} > 20$) показали, что локальная порозность сферических частиц у стенки (рисунок 2а) близка к единице, а на расстоянии половины диаметра частиц ее значение минимальное.

Рисунок 2 – Распределение порозности слоя частиц сферической (а) и произвольной формы поверхности (б) у стенки

В слое частиц произвольной формы поверхности (рис.2,б) минимальное значение порозности наблюдается на расстоянии $x \approx 0,6d_{\text{ч}}$ от стенки, а не при $x = 0,5d_{\text{ч}}$, как в случае сферических частиц. Это объясняется тем, что шероховатые частицы, имеющие микровыступы неодинаковой длины, располагаются относительно поверхности на различных расстояниях. Среднее значение порозности слоя на расстоянии $x = 0,5d_{\text{ч}}$ от плоской стенки, определенное методом графического интегрирования, в 1,25 раза больше, чем вдали от нее. Причем это значение практически одинаково как для зернистых слоев сферических частиц, так и частиц произвольной формы.

Как показали исследования [4], кривизна стенки аппарата не оказывает существенного влияния на структуру зернистого слоя, если только $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} \geq 20$. При $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} < 20$ минимум порозности первого от вогнутой стенки ряда сферических частиц при их плотной укладке находится не на расстоянии равном $0,5 d_{\text{ч}}$, как при соприкосновении с плоской стенкой (рисунок 3а), а чуть дальше, т.к. точка касания сфер между собой с увеличением кривизны стенки смещается в направлении от поверхности (рисунок 3б).

Рисунок 3 – Схема упаковки частиц сферической формы у поверхности стенки в сосудах:
а – неограниченных размеров ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} \geq 20$); б – ограниченных размеров ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} < 20$).

В работе [4] приводится формула для расчета расстояния от вогнутой стенки до точки касания плотно упакованных шаров в зависимости от $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}}$. Согласно этой формулы при $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 4$ расстояние (x) до точки касания шаров составляет $0,67 d_{\text{ч}}$, а при $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 20$ $x = 0,5 d_{\text{ч}}$, т.е. как от плоской стенки. Если учесть это, то для узкой трубки внутренним диаметром 2,7 мм, в которой находится слой сферических частиц диаметром 0,68 мм ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 4$), доля площади сечения трубки с повышенной порозностью а, следовательно, с меньшим гидравлическим сопротивлением и большей скоростью воздуха, составляет 58,9 %. Эта макроскопическая неоднородность слоя и являться своего рода затравкой и причиной интенсивного потока смеси отдельных частиц и воздуха в трубке, погруженной в неподвижный продуваемый зернистый слой.

С увеличением отношения $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}}$ доля площади сечения трубки с повышенной порозностью становится меньше. Так для трубки внутренним диаметром 3,8 мм ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 5,6$) эта доля составляет 38,8 %, для трубки 6,8 мм ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 10$) – 21,1 %. По мере снижения доли площади сечения с повышенной порозностью уменьшается высота, на которую поднимается дисперсная среда изменяется и ее структура. Для трубки внутренним диаметром 13,6 мм ($d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 20$) площадь сечения с повышенной порозностью составляет только 10,1 %, поэтому заметного эффекта, связанного с движением частиц слоя внутри трубки, вообще не наблюдается.

При $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} = 3$ расстояние (x) до точки касания шаров равно $0,77 d_{\text{ч}}$, а доля площади сечения с повышенной порозностью составляет 73,6 %. Казалось бы должен иметь место интенсивный подъем частиц, однако этот эффект отсутствует. Объяснить это можно тем, что при засыпке зернистого материала в вертикальную трубку происходит сжатие и некоторое смещение нижележащих слоев относительно стенок трубки. Если через насыпанный в вертикальную трубку зернистый слой пропускать восходящий поток газа, то давление каждого отдельного зерна на нижележащие зерна слоя будут уменьшаться. В случае узкой трубки, когда отношение ее диаметра к высоте насыпанного слоя много меньше единицы снижение давления зерен уменьшает вертикальные напряжения, но не изменяет образовавшуюся структуру засыпанного слоя, а следовательно, и боковое сжатие зерен стенками трубки. В очень узких трубках $d_{\text{тр}} / d_{\text{ч}} < 4$ при возникновении сдвиговой деформации под действием сил давления со стороны воздуха существенное влияние оказывает эффект расширения слоя (дилатансионный эффект Рейнольдса)

[5], что ведет к увеличению трения между стенками трубки и частицами, соприкасающимися с ней. При расширении слоя совершается работа против сил давления и частицы «закупоривают» канал, по которому дисперсная среда должно перемещаться. Поэтому даже при больших скоростях потока, когда гидравлический напор становится больше силы тяжести слоя, засыпанного в узкую трубку, на общую картину развития процесса оказывают существенное влияние силы трения слоя о внутреннюю поверхность трубки, и эффекта движения частиц в ней не наблюдается.

Закключение. Таким образом, в результате проведенного экспериментального исследования четкой зависимости величины порозности слоя от диаметра трубки, в которую засыпался зернистый материал не обнаружено.

Причиной перемещения дисперсной среды (смесь воздуха и твердых частиц) без дополнительной затраты энергии вверх по трубке, опущенной в неподвижный продуваемый зернистый слой, является повышенная порозность слоя на расстоянии одного - полутора диаметров зерен от стенки. Этот пристенный эффект является своего рода затравкой, которая из-за

Рисунок 4 –
Истечение зернистого
материала из трубки,
опущенной в неподвижный
продуваемый слой

силового воздействия потока воздуха порождает макроскопическую неоднородность слоя вследствие чего дисперсная среда движется вверх по каналу сплошным потоком или поршнями, идущими друг за другом. Причем, чем большая доля сечения трубки занята слоем с повышенной порозностью, то есть имеет меньшее сопротивление, тем дисперсная среда в трубке поднимается выше. При $d_{тр}/d_ч \geq 20$ доля сечения слоя с повышенной порозностью очень мала поэтому никакого перемещения частиц по трубке не происходит.

В очень узких трубках ($d_{тр}/d_ч < 4$) под действием сил давления со стороны воздуха возникающие сдвиговые деформации, приводящие к расширению слоя, существенно увеличивают силы трения частиц о поверхность трубки. Частицы слоя «закупоривают» канал и даже, когда гидравлический напор становится больше силы тяжести слоя частиц, засыпанных в трубку, эффекта движения частиц в ней не наблюдается.

Принимая во внимание причины движения дисперсной среды по трубке, погруженной в неподвижный продуваемый зернистый слой, можно показать путь решения задачи, связанной с интенсификацией процесса сушки зерновых культур. Если в плотном продуваемом теплоносителе слое зерен разместить пучок труб с определенным отношением их диаметра к размеру зерна (например, $d_{тр}/d_ч = 10,5$, как на рисунке 4), а длина этих труб над слоем будет меньше высоты подъема дисперсной среды в них, то за счет интенсивного фонтанирования зерен их поверхность из-за хаотического смещения будет активно контактировать с теплоносителем, что приведет к ускорению процесса сушки. Зерно будет высушиваться более равномерно, чем в неподвижном продуваемом слое.

Список литературы

1. Королев В.Н., Марков В.А., Нагорнов С.А. Квазикапиллярный эффект в неподвижном продуваемом зернистом слое // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т.91, №1. – С. 256 – 259.
2. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдоожижения. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
3. Королев В.Н., Сыромятников Н.И., Толмачев Е.М. Структура неподвижного и псевдоожиженного слоя зернистого материала вблизи погруженной в него поверхности (стенки) // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т.21, – № 5. – С. 973 – 978.
4. Ridgway K., Tarbuck K.J. Voidage fluctuations in randomly-packed beds of spheres adjacent to a containing wall // Chem. Eng. Sci. – 1968. – V.23. – P. 1147 – 1155.
5. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое / Академия наук СССР, Сибирское отделение. Институт теплофизики. – Новосибирск, 1984. – 163 с.

References

1. Korolev V.N., Markov V.A., Nagornov S.A. Kvazikapillyarnyj effekt v nepodvizhnom produvaemom zernistom sloe // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2018. – T.91, №1. – S.256 – 259.
2. Gel'perin N.I., Ajnshtejn V.G., Kvasha V.B. Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya. – M.: Himiya, 1967. – 664 s.
3. Korolev V.N., Syromyatnikov N.I., Tolmachev E.M. Struktura nepodvizhnogo i psevdoozhizhennogo sloya zernistogo materiala vblizi pogruzhennoj v nego poverhnosti (stenki) // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 1971. – T.21, № 5. – S. 973 – 978.
4. Ridgway K., Tarbuck K.J. Voidage fluctuations in randomly-packed beds of spheres adjacent to a containing wall // Chem. Eng. Sci. – 1968. – V.23. – P. 1147 – 1155.
5. Gol'dshtik M.A. Processy perenosa v zernistom sloe / Akademiya nauk SSSR, Sibirskoe otделение. Institut teplofiziki. – Novosibirsk, 1984. – 163 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Королев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург, e-mail: korolev_vn133@mail.ru.

Островская Анна Валентиновна – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург, e-mail: aostrov9@gmail.com.

Амарская Ирина Борисовна – инженер Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург, e-mail: i.b.amarskaia@urfu.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – 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, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Корнев Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Korolev Vladimir – Full Doctor of Technical sciences, Professor of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”, Russia, Ekaterinburg, e-mail: korolev_vn133@mail.ru.

Ostrovskaj Anna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”, Russia, Ekaterinburg, e-mail: aostrov9@gmail.com.

Amarskaj Irina – engineer of of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”, Russia, Ekaterinburg, e-mail: i.b.amarskaia@urfu.ru.

Nagornov Stanislav – 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, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Kornev Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Science of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 10.03.2021   Принята к публикации (Accepted): 15.04.2021