

УДК 631.352.99

## ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ПРИ ВЛИЯНИИ НА НЕГО ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ

Д. И. Фролов, А. А. Курочкин

В работе представлено статическое исследование прочностных показателей рабочих органов ботвоудаляющей машины. Построена компьютерная модель рабочего органа ботвоудаляющей машины при влиянии на него центробежной силы при разных скоростях вращения. Анализ данных моделирования показал влияние центробежной силы на ножи рабочего органа ботвоудаляющей машины, причем максимальные деформации и напряжения возникают преимущественно в области крепления ножей к валу ротора. Выявлено влияние угловой скорости вращения на прочностные характеристики рабочего органа.

*Ключевые слова:* ботвоудаляющая машина, рабочий орган, статический анализ.

### Введение

Качественная работа теребильных машин обеспечивается лишь при надлежащей подготовке поля перед уборкой. Как показали исследования на период уборки засоренность полей достигает 60...70%, высота сорных растений при этом доходит до 50 см. Это объясняется тем, что время между последней обработкой посевов гербицидами и уборкой проходит две-три недели, что способствует росту сорных растений [1, 2].

При уборке машинами теребильного типа, если поле предварительно не было подготовлено, происходит забивание вращающихся элементов теребильного аппарата, что приводит к снижению производительности машины, поломке, и увеличению количества остановок для очистки [3, 4]. Для нормальной работы уборочных машин при механизированной уборке картофеля применяется предварительное удаление ботвы.

Наиболее производительными являются роторные рабочие органы. Простота конструкции и высокое качество среза обуславливают широкое применение таких аппаратов для различных сельскохозяйственных культур. Поэтому при создании ботвоудаляющей машины [5] был использован роторный режущий аппарат. При этом срезанная ботва укладывается на поле или собирается для последующего использования на корм скоту [6–8].

Для получения оптимальных конструктивных и режимных параметров ботвоудаляющего рабочего органа и оптимизации воздушного потока внутри кожуха были проведены исследования, которые нашли отражения в следующих работах [9–14].

Однако для безопорного среза ботвы для большинства сельскохозяйственных культур требуются значительные критические скорости среза, то актуальной задачей является статическое исследование прочностных показателей рабочих органов.

Целью данной работы являлся прочностной анализ компьютерной модели рабочего органа

ботвоудаляющей машины при влиянии на него центробежной силы при разных скоростях вращения.

### Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования был взят ботвоудаляющий рабочий орган (рис. 1) со следующими геометрическими размерами: ширина ножа – 118 мм; длина ножа – 150 мм; толщина ножа – 4 мм; диаметр ротора 40 мм.

Компьютерная модель ботвоудаляющего рабочего органа была реализована на основе метода конечных элементов. Конечноэлементный анализ широко применяется при решении задач механики деформируемого тела, теплообмена, гидро и газо-

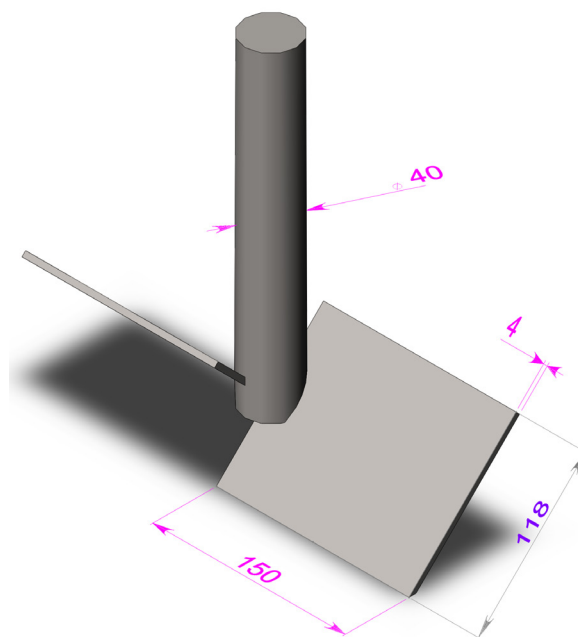


Рис. 1. Общий вид 3D модели ботвоудаляющего рабочего органа и его геометрические размеры

Таблица 1 – Свойства используемой стали

Имя:	Легированная сталь
Тип модели:	Линейный Упругий Изотропный
Предел текучести:	6.20422E+008 Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при растяжении:	7.23826E+008 Н/м <sup>2</sup>
Модуль упругости:	2.1E +011 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона:	0,28
Массовая плотность:	7700 кг/м <sup>3</sup>
Модуль сдвига:	7.9E +010 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения:	1.3E -005 /Kelvin

Таблица 2 – Свойства исследования и параметры конечноэлементной сетки

Тип решающей программы	FFEPlus
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Сетка на основе кривизны
Точки Якобиана	4 Точки
Всего узлов	14372
Всего элементов	7891
Максимальное соотношение сторон	7,945
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99,2

динамики, электро и магнитостатики. В качестве САЕ системы применялась SolidWorks Simulation.

При моделировании учитывались факторы только воздушного потока, без учета срезаемой листостебельной массы.

В качестве материала ротора и ножей была принята легированная сталь с параметрами представленными в таблице 1. Объемные свойства ботвоудаляющего рабочего органа: масса – 3.4554 кг; объем – 0.0004 м<sup>3</sup>; плотность – 7700 кг/м<sup>3</sup>.

С помощью решающей программы была построена конечноэлементная сетка с параметрами, представленными в таблице 2.

В качестве креплений для верхнего и нижнего торца ротора был использован ролик-ползун, а для цилиндрической поверхности ротора – зафиксированный шарнир.

Для рассмотрения влияния центробежной силы на прочностные характеристики ножей ботвоудаляющего рабочего органа была применена центробежная нагрузка при угловых скоростях вращения 125, 178, 230 рад/с (1200, 1700, 2200 об/мин).

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенного конечноэлементного анализа в Solidworks Simulation были получены результаты действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа напряжений, деформаций и перемещений.

Анализируя напряжения, действующие на модель ботвоудаляющего рабочего органа при ско-

рости вращения 178 рад/с (рис. 2) видно, что минимальное напряжение составляет 954.672 Н/м<sup>2</sup>, а максимальное напряжение 4.13255E+007 Н/м<sup>2</sup>. Допускаемое значение критерия прочности Мизеса (Von Mises равно 6.25E+008 Н/м<sup>2</sup>) больше его максимального расчетного значения (4.13255E+007 Н/м<sup>2</sup>, см. табл. 3), а значит, условие прочности модели выполняется. Максимальные напряжения локализуются вблизи соединения ножей с валом ротора, это место, наиболее вероятное место поломки ножей.

На рисунке 3 показаны результаты расчетов суммарных статических перемещений URES, действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа при скорости вращения 178 рад/с. Минимальное перемещение составляет 1.73474E-006 мм, максимальное перемещение – 0.186192 мм. Максимальные перемещения сосредоточены на периферии ножей.

Статический анализ деформаций, действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа при скорости вращения 178 рад/с показывает такую же локализацию деформаций как и на эпюре напряжений, что еще раз подтверждает необходимость усиления узла крепления ножей к валу ротора. Минимальная эквивалентная деформация 1.42237E-008, а максимальная равна 0.000115242.

Анализ напряжений, перемещений и эквивалентных деформаций был проведен и для скоростей вращения 125 рад/с (1200 об/мин) и 230 рад/с (2200 об/мин). Результаты полученных анализов приведены в таблице 3.

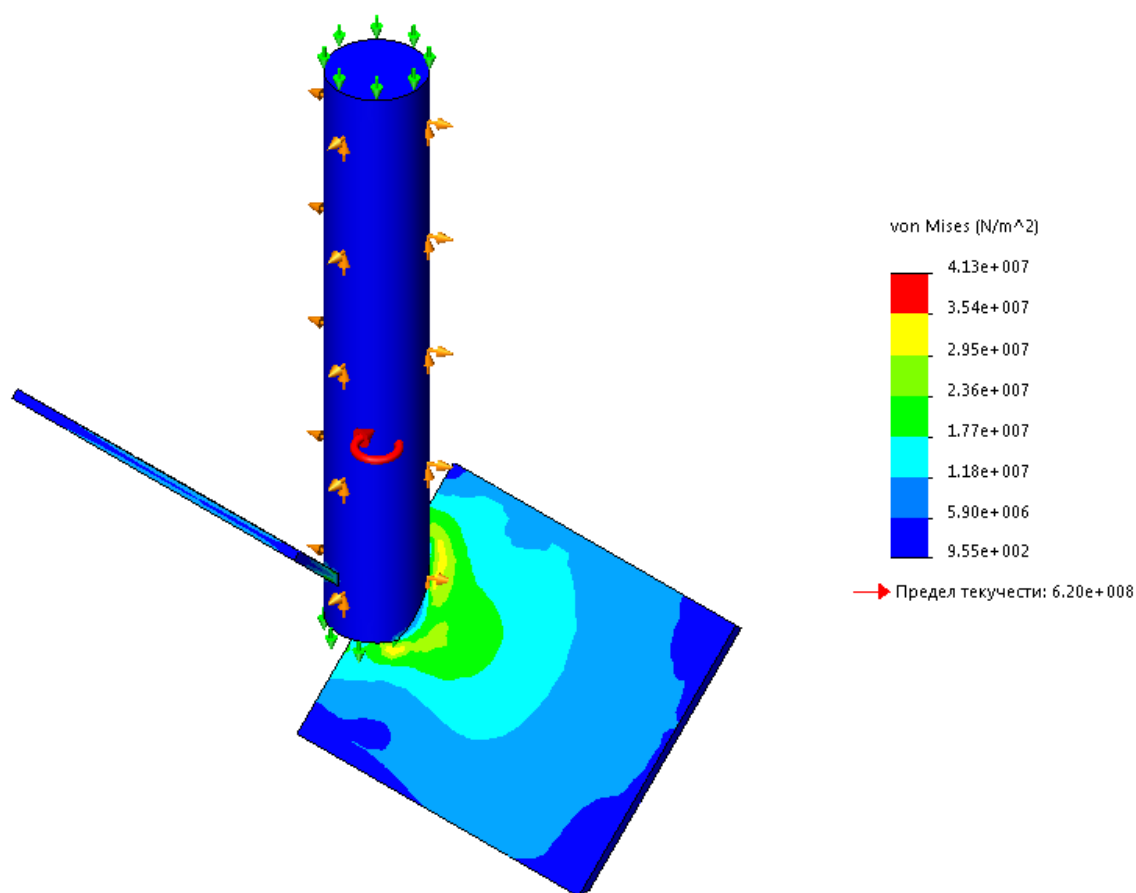


Рис. 2. Статический анализ напряжений, действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа при скорости вращения 178 рад/с (1700 об/мин)

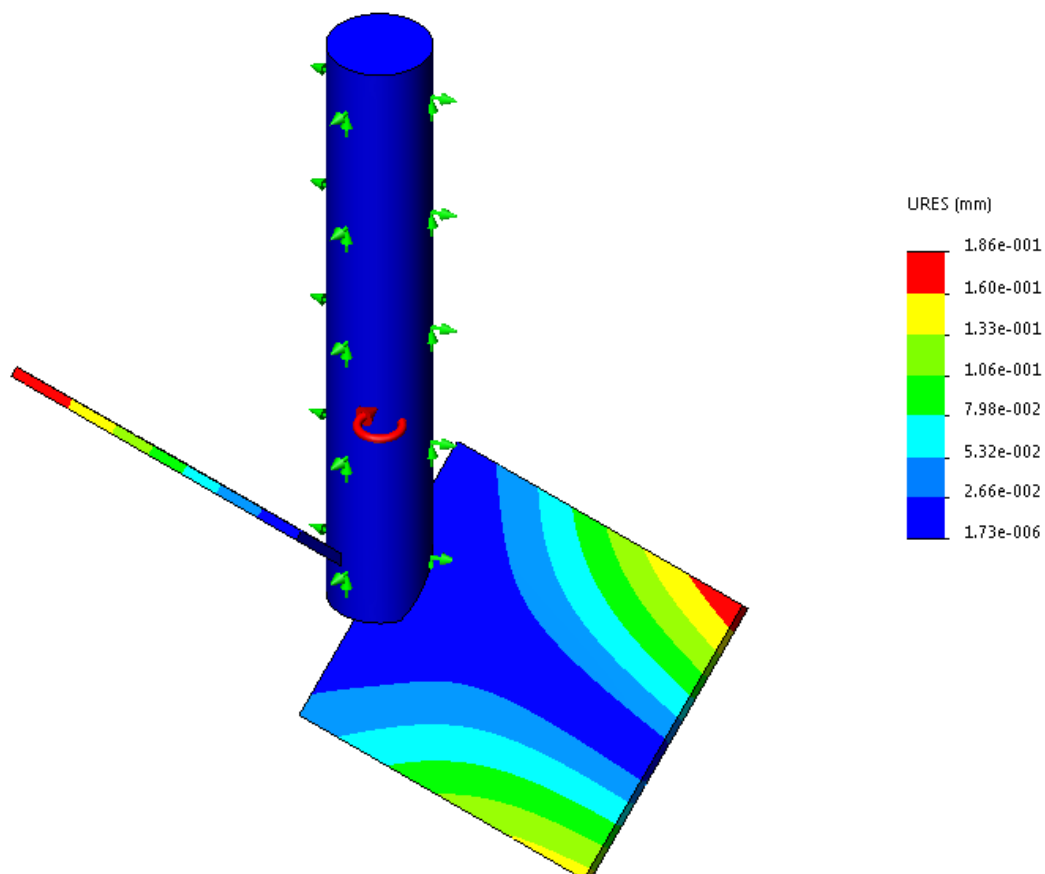


Рис. 3. Статический анализ перемещений, действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа при скорости вращения 178 рад/с (1700 об/мин)

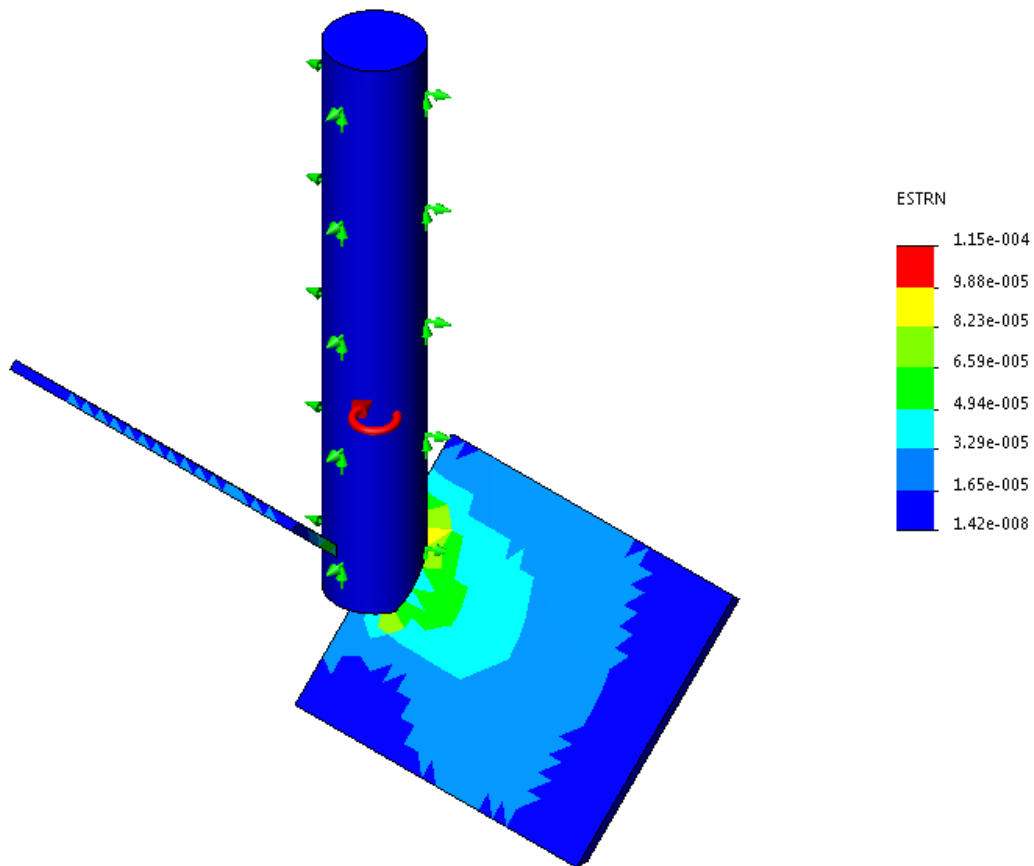


Рис. 4. Статический анализ деформаций, действующих на модель ботвоудаляющего рабочего органа при скорости вращения 178 рад/с (1700 об/мин)

Таблица 3 – Сводные результаты статического исследования

Наименование характеристики	Частота вращений вала, рад/с (об/мин)	Минимальное	Максимальное
VON: Напряжение Мизеса (Von Mises), Н/м <sup>2</sup>	125 (1200)	484.52	2.041E+007
	178 (1700)	954.67	4.133E +007
	230 (2200)	1551.11	6.883E+007
URES: Результирующее перемещение, мм	125 (1200)	8.532E-007	0.092115
	178 (1700)	1.735E-006	0.186192
	230 (2200)	2.905E-006	0.309287
ESTRN: Эквивалентная деформация	125 (1200)	6.945E-009	5.687E-005
	178 (1700)	1.422E -008	1.152E-004
	230 (2200)	2.129E-008	1.922E-004

### Выводы

Полученные результаты статических исследований модели рабочего органа ботвоудаляющей машины удовлетворяют допустимым значениям по критерию прочности Мизеса ( $\text{von Mises } 6.25\text{E}+008 \text{ Н/м}^2$ ) и имеют незначительные результирующие перемещения. Наибольшие значения критерия напряжений Мизеса и суммарных результирующих перемещений URES выявлены при скорости 230 рад/с (2200 об/мин).

Анализ полученных данных показал влияние центробежной силы на ножи рабочего органа

ботвоудаляющей машины, причем максимальные деформации и напряжения возникают преимущественно в области крепления ножей к валу ротора. Выявлено влияние угловой скорости вращения на прочностные характеристики рабочего органа.

Для более равномерного распределения напряжений в детали рабочего органа и увеличения прочностных характеристик в рассматриваемую модель необходимо внести конструктивные решения позволяющие увеличить жесткость крепления ножей к валу ротора.

### Список литературы

1. Ларюшин, Н.П. Оптимальные параметры ботвоудаляющего рабочего органа обрезчика листостебельной массы/Н. П. Ларюшин, А. М. Ларюшин, Д. И. Фролов//Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 2. – С. 15–17.
2. Фролов, Д.И. Разработка обрезчика ботвы лука и сорных растений с обоснованием конструктивных и режимных параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/Фролов Дмитрий Иванович. – Пенза, 2008. – 153 с.
3. Фролов, Д.И. Разработка обрезчика ботвы лука и сорных растений с обоснованием конструктивных и режимных параметров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/Фролов Дмитрий Иванович. – Пенза, 2008. – 18 с.
4. Ларюшин, Н.П. Уборка без задержек/Н. П. Ларюшин, А. М. Ларюшин, Д. И. Фролов//Сельский механизатор. – 2007. – № 7. – С. 48–49.
5. Пат. 2339208 Российская Федерация, МПК А 01 D 23/02. Ботвоудаляющая машина / Н.П. Ларюшин, С. А. Суцёв, Д.И. Фролов, А. М. Ларюшин. – № 2007109990/12; заявл. 19.03.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33. – 8 с.: ил.
6. Фролов, Д.И. Повышение питательности экструдированных кормов для животных / Д.И. Фролов, В. А. Никишин // Научные труды Sworld. 2014. Т. 7. № 4. С. 98–101.
7. Фролов, Д.И. Применение модернизированной ботвоудаляющей машины для скашивания люцерны/Д. И. Фролов//Инновационная техника и технология. – 2015. – № 1 (2). С. 45–49.
8. Ларюшин, А.М. Совершенствование технологии уборки лука / А.М. Ларюшин, Н.П. Ларюшин, Д.И. Фролов // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2007. – С. 17–18.
9. Фролов, Д.И. Обоснование рациональных параметров ботвоудаляющей машины на посевах лука/Д. И. Фролов, С.В. Чекайкин//XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С.158–161.
10. Фролов, Д.И. Обоснование оптимальной частоты вращения рабочего органа ботвоудаляющей машины / Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3. – С. 18–23.
11. Ларюшин, Н.П. Обоснование конструктивно-режимных параметров ботвоудаляющего устройства при лабораторных исследованиях/Н. П. Ларюшин, А. М. Ларюшин, Д. И. Фролов//Нива Поволжья. – 2008. – № 2. – С. 46–51.
12. Фролов, Д.И. Моделирование процесса удаления ботвы лука рабочим органом ботвоудаляющей машины/Д. И. Фролов, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова// Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 29–33.
13. Фролов Д.И. Определение оптимальных параметров ботвоудаляющей машины на посевах лука /Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова//Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 1 (29). – С. 120–126.
14. Фролов, Д.И. Анализ работы ботвоудаляющего рабочего органа с оптимизацией воздушного потока внутри кожуха/Д. И. Фролов//Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4 (1). С. 30–35.

## STRENGTH ANALYSIS MODEL OF THE WORKING BODY WHEN THE INFLUENCE OF THE CENTRIFUGAL FORCE

*D. I. Frolov, A. A. Kurochkin*

---

The paper presents a static study of strength parameters of the working bodies haulm removal machine. Built a computer model of the working body haulm removal machine when the influence of centrifugal force at different speeds of rotation. Analysis of the simulation data showed the influence of the centrifugal force on the blades of the working body haulm removal machine, and the maximum deformation and stresses occur mainly in the area of attachment of the blades to the shaft of the rotor. The effect of angular speed on the strength characteristics of the working body.

*Keywords: haulm removal machine, working body, static analysis.*

---

---

**References**

1. Laryushin, N. P. the Optimal parameters botopasie working body of the cutter leaf mass/N. P. Laryushin, A. M. Laryushin, D. I. Frolov//Tractors and farm machinery.– 2010.– No. 2.– Pp. 15–17.
2. Frolov, D. I. Development of the cutter of onions and tops of weeds with justification of the design and operating parameters: dis. ... candidate. tech. Sciences: 05.20.01/Frolov Dmitry Ivanovich.– Penza, 2008.– 153 p.
3. Frolov, D. I. The development of the cutter of onions and tops of weeds with justification of the design and operating parameters: author. dis. ... candidate. tech. Sciences: 05.20.01/Frolov Dmitry Ivanovich.– Penza, 2008.– 18 p.
4. Laryushin, N. P. Maid without delay/N. P. Laryushin, A. M. Laryushin, D. I. Frolov//Rural mechanic.– 2007.– No. 7.– Pp. 48–49.
5. Pat. 2339208 Russian Federation, IPC A 01 D 23/02. Batouala machine / N. P. Laryushin, S. A. Sudev, D. I. Frolov, A. M. Laryushin.– No. 2007109990/12; Appl. 19.03.2007; publ. 27.11.2008, bull. No. 33.– 8 p.: ill.
6. Frolov, D. I. Improving the nutritional value of the extruded animal feed / D. I. Frolov, V. A. Nikishin // Scientific works Sworld. 2014. T. 7. No. 4. P. 98–101.
7. Frolov, D. I. the Use of the upgraded botopasie machines for the cutting alfalfa/D. I. Frolov//Innovative mashinery and technology.– 2015.– № 1 (2). P. 45–49.
8. Laryushin, A. M. improving the technology of harvesting onion / A. M. Laryushin, N. P. Laryushin, D. I. Frolov // Proceedings of the International Forum on problems of science, technology and education.– M.: Academy of Earth Sciences, 2007.– Pp. 17–18.
9. Frolov, D. I. Substantiation of rational parameters botopasie machine on crops Luke/D. I. Frolov, S. V. Chebykin//XXI century: the past and challenges of present plus. 2014. No. 6 (22). P. 158–161.
10. Frolov, D. I. Substantiation of the optimum frequency of rotation of the working body botopasie machine / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova // proceedings of the Samara state agricultural Academy.– 2013.– No. 3.– Pp. 18–23.
11. Laryushin, N. P. Justification of constructive and regime parameters of botopasie devices in laboratory studies/N. P. Laryushin, A. M. Laryushin, D. I. Frolov//Niva Povolzhya.– 2008.– No. 2.– S. 46–51.
12. Frolov, D. I. modeling of the process of removal of foliage Luke working body botopasie machine/D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova// proceedings of the Samara state agricultural Academy.– 2014.– No. 3.– P. 29–33.
13. Frolov, D. I. determination of the optimal parameters botopasie machine on crops Luke /D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova//Bulletin of the Ulyanovsk state agricultural Academy.–2015.–№ 1 (29) .– P. 120–126.
14. Frolov, D. I. Analysis of botopasie of the working body with the optimization of the air flow inside the bonnet/D. I. Frolov//Innovative mashinery and technology.– 2014.– № 4 (1). S. 30–35.