

УДК 658.012.011.56

В.Б. Попов¹, И.А. Баран²

¹УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь

²Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Беларусь

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ САМОХОДНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Аннотация. В статье рассматривается влияние различных параметров на формирование технологического потока в системе очистки. Предлагается выполнять подбор оптимальных параметров системы очистки путем компьютерного моделирования процесса очистки на основе экспериментальных данных и численного моделирования аэродинамики технологического тракта. Представлена методика создания расчетных конечно-элементных сеток и компьютерного моделирования аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна. Сформировано формализованное описание k - ε -модели турбулентности, используемой в расчете сплошной среды. Все это позволило создать зерноуборочный комбайн с принципиально новой компоновкой технологического тракта, имеющего лучшие показатели производительности и энергоемкости.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, воздушный поток, аэродинамика, кинетическая энергия, двухфазный поток, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

V.B. Popov¹, I.A. Baran²

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

²Scientific and Technical Center for Combine Harvesting of OJSC "Gomselmash", Gomel, Belarus

COMPUTER SIMULATION OF THE AERODYNAMIC PROCESS IN THE CLEANING SYSTEM OF A SELF-PROPELLED GRAIN HARVESTER

Abstract. The article examines the influence of various parameters on the formation of a process flow in the cleaning system. It is proposed to select the optimal parameters of the cleaning system by computer modeling of the cleaning process based on experimental data and numerical modeling of the aerodynamics of the technological path. The technique of creating computational FE grids and computer modeling of aerodynamic flows in the cleaning system of a combine harvester is presented. A formalized description of the k - ε -model of turbulence used in the calculation of a continuous medium has been formed. All this made it possible to create a combine harvester with a fundamentally new layout of the technological path, which has the best performance and energy intensity.

Keywords: combine harvester, cleaning system, air flow, aerodynamics, kinetic energy, two-phase flow, computer simulation, finite element method.

Введение. Конкуренетоспособность мобильной сельскохозяйственной техники (рисунок 1), разрабатываемой в режиме автоматизированного проектирования, сегодня обеспечивают наукоемкие САЕ-технологии инженерного анализа сложных технических объектов [1].

Объектом исследования, описываемым в данной статье, является система очистки зерноуборочного комбайна (СОЗК). В научной литературе достаточно публикаций,

посвященных функциональному моделированию и проектированию ее основного компонента – механизма очистки (МО) [2-4].



Рисунок 1. – Самоходный зерноуборочный комбайн КЗС-3219

Главная задача при назначении параметров МО состоит в повышении его уравновешенности, что практически не влияет на рост производительности СОЗК. Повышение пропускной способности технологического тракта зерноуборочного комбайна связано, в том числе, с аэродинамическим анализом процесса отделения легковесных частиц из поступающего в СОЗК зернового вороха.

Цель работы – обоснование и выбор формализованного описания аэродинамики в СОЗК, обеспечивающего лучшие показатели производительности и энергоемкости технологического тракта.

1. Определение влияния различных параметров на формирование технологического потока.

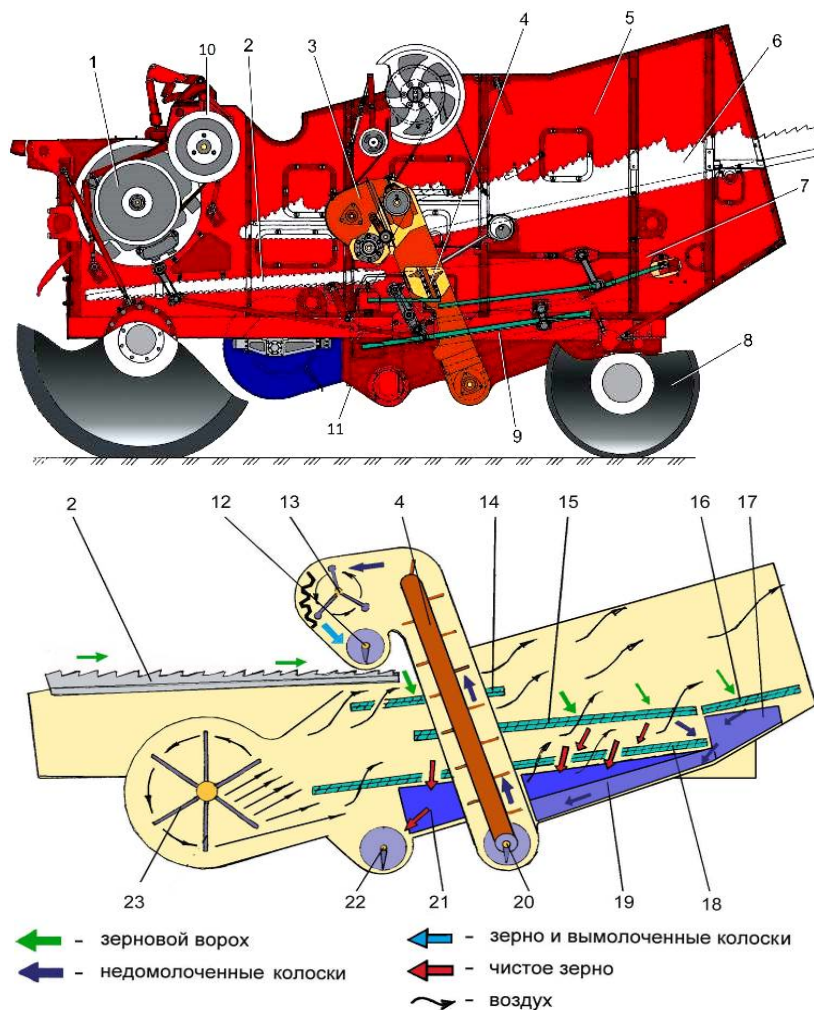
Основные аэродинамические процессы в технологическом тракте зерноуборочного комбайна происходят в СОЗК. Очистка предназначена для выделения зерна из вороха, поступающего из-под молотильного устройства 1 и соломотряса 6. Основными узлами СОЗК являются: колеблющиеся на подвесках решетчатые станы 7 и 9, вентилятор 23, зерновой 22 и колосовой 20 шнеки (рисунок 2).

Качество выделения зерна из вороха, при прочих равных условиях, зависит от воздушного потока вентилятора, размеров отверстий решет 14, 15, 18 и их кинематики.

Разделение вороха в СОЗК на зерно и незерновые примеси производится в основном по весу и парусности частиц. В зерноуборочных комбайнах применяют регулируемые жалюзийные решета для настраивания размеров отверстий. Зерновой ворох, прошедший через отверстия удлинителя 16 верхнего решета, и сходы с решета поступают в колосовой шнек 20, откуда в зависимости от содержания недомолоченного колоса направляются в молотильный аппарат 1 или на соломотряс 6.

Зерновой ворох подается в СОЗК стрясной доской 2, снабженной пальцевой решеткой, которая располагается над передней частью верхнего решета. Она предназначена для отвода крупных солоmistых примесей к середине решета, чем создаются благоприятные условия для просеивания основной части зерна.

Зерновой материал после выделения его из вороха представляет в большинстве случаев смесь, состоящую из семян основной культуры, семян посторонних растений и из примеси разнородного сора минерального и органического происхождения [5].



- 1 – молотильный аппарат; 2 – доска стрясная; 3 – устройство домолачивающее;
 4 – элеватор колосовой; 5 – боковина левая; 6 – соломотряс; 7 – стан решетный верхний;
 8 – шасси; 9 – стан решетный нижний; 10 – контрпривод вариатора; 11 – боковина правая;
 12 – шнек распределительный; 13 – ротор домолачивающего устройства;
 14 – решето дополнительное; 15 – решето верхнее; 16 – удлинитель; 17 – поддон удлинителя;
 18 – решето нижнее; 19 – поддон колосовой; 20 – шнек колосовой;
 21 – поддон зерновой; 22 – шнек зерновой; 23 – вентилятор

Рисунок 2. – Схема работы системы очистки зерноуборочного комбайна

Как отмечают многие отечественные и зарубежные исследователи в области комбайностроения, на сегодняшний день основным агрегатом зерноуборочного комбайна, лимитирующего рост производительности комбайна, является СОЗК.

Одним из способов повышения производительности очистки является увеличение площади решет. Этот способ достаточно широко применяется в мировом комбайностроении, однако, несмотря на кажущуюся простоту решения, он имеет и свои негативные стороны. Увеличение площади сепарации приводит к увеличению габаритов и металлоемкости комбайна, затрудняется равномерное распределение обрабатываемого вороха по ширине решет, а установка дополнительных очисток неизбежно приводит к излишнему усложнению и, следовательно, к снижению надежности. Учитывая отмеченные нежелательные последствия увеличения площади решет, были также проведены исследования, направленные на повышение производительности и качества работы СОЗК, путем интенсификации технологического процесса их работы.

Усовершенствования в данной области можно разделить на несколько групп: использование нетрадиционных схем очистки, изменение конструкций решетчатых станков, применение различных конструкций вентиляторов, рационально формирующих воздушный поток.

Многочисленные исследования показали, что при изменении схемы традиционной СОЗК и при ее стабильной работе во всем диапазоне агротехнических показателей зернового вороха для разных культур прирост производительности был незначительным.

Таким образом, основной путь увеличения производительности зерноуборочного комбайна – подбор оптимальных параметров СОЗК путем компьютерного моделирования процесса очистки на основе экспериментальных данных и численного моделирования аэродинамики технологического тракта.

2. Методика создания расчетных конечно-элементных сеток и компьютерного моделирования аэродинамических потоков в СОЗК.

Целью исследования двухфазного потока «воздух – зерновая масса» в СОЗК является выбор конструктивных параметров кожуха вентилятора, дефлекторов, разделяющих и перенаправляющих воздушный поток, решет и степени их закрытия. Конструктивные параметры СОЗК выбирают таким образом, чтобы ее производительность была максимальной, а очистка была оптимальной при минимальных энергетических затратах и минимальных потерях зерна.

Для расчета использовалась система вычислительной аэрогидродинамики с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для численного решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение текучей среды. Геометрическая модель и конечно-элементная (КЭ) 2D-сетка проточных областей СОЗК представлены на рисунке 3.

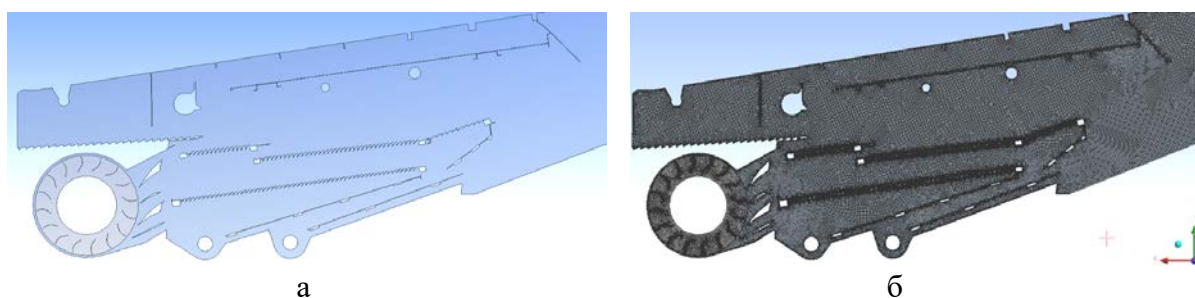


Рисунок 3. – Геометрическая модель (а) и конечно-элементная 2D-сетка (б) проточной области системы очистки зерноуборочного комбайна

В качестве исходных данных для проведения численного моделирования в проточной части вентилятора задавалась скорость вращения вентилятора очистки. На границе выхода из СОЗК было задано относительное давление $p = 0$ Па. В качестве модели турбулентности была принята стандартная для таких случаев k - ϵ -модель [6].

3. k - ϵ -модель турбулентности, используемая в расчете сплошной среды.

k - ϵ -модель относится к классу дифференциальных моделей турбулентности с двумя уравнениями. В ней строятся два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости μ_t .

Для определения турбулентной вязкости в этой модели рассматриваются два скалярных параметра: удельная кинетическая энергия турбулентности k :

$$k = \frac{1}{2} \overline{v' \cdot v'}, \quad (1)$$

и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности ε :

$$\varepsilon = 2\nu tr \left(\overline{\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T} \right), \quad (2)$$

где ν – пульсация скорости, черта сверху обозначает осреднение Рейнольдса;

t – время динамической релаксации с учетом отклонения от закона обтекания Стокса;

r – расстояние между точками в периоде осреднения;

T – период осреднения.

Уравнение для кинетической энергии турбулентности можно найти с помощью некоторых преобразований, с учетом (1) получим:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'} \cdot \text{grad} \overline{\vec{v}'} + \text{div} \left(\nu \cdot \text{grad} k - \overline{\vec{v}' \left(\frac{p'}{p} + \frac{1}{2} \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'} \right)} \right) - 2\nu tr \left(\overline{\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T} \right), \quad (3)$$

где div (дивергенция) – это линейный дифференциальный оператор на векторном поле, характеризующий поток данного поля через поверхность достаточно малой (в условиях конкретной задачи) окрестности каждой внутренней точки области определения поля.

По форме это уравнение является стандартным уравнением переноса. Рассмотрим физический смысл слагаемых, входящих в уравнение (3):

- левая часть описывает конвективный перенос вещества (здесь это энергия турбулентности);

- в правой части первый член описывает генерацию турбулентности;

- второй член – диффузионный перенос кинетической энергии турбулентности двух видов: молекулярный (первое слагаемое в скобках), турбулентный (второе слагаемое);

- третий член описывает диссипацию кинетической энергии турбулентности.

Первый из членов в правой части (3) содержит тензор турбулентных напряжений, который, по гипотезе Буссинеска, выражается через осредненные характеристики потока. Последний член представляет собой не что иное, как скорость вязкой диссипации энергии турбулентности (2).

Таким образом, неопределенным остается только член, отвечающий за турбулентную диффузию, и для замыкания уравнения (3) необходимо записать его через осредненные характеристики. Для этого используется гипотеза градиентной диффузии, согласно которой турбулентный диффузионный перенос кинетической энергии турбулентности выражается по аналогии с молекулярным переносом через ее градиент:

$$\overline{\vec{v}' \left(\frac{p'}{p} + \frac{1}{2} \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'} \right)} = \frac{1}{\sigma_k} \nu_t \text{grad} k, \quad (4)$$

где ν_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости,

σ_k – безразмерная эмпирическая константа.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = P_k + \text{div} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right) - \varepsilon, \quad (5)$$

где P_k – кинематическая плотность турбулентных напряжений:

$$P_k = -T_n \overline{\text{grad} \vec{v}'}. \quad (6)$$

При этом $T_n = T_t / \rho$ нормированный на плотность тензор турбулентных напряжений, также равный $T_n = \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'}$, что видно из (3) и (5). Тогда:

$$T_n = \frac{T_t}{\rho} = \frac{2\mu_t D - \frac{2}{3} \rho k I}{\rho} = 2\nu_t D - \frac{2}{3} k I, \quad \text{с учетом } \nu_t = \frac{\mu_t}{\rho},$$

где I – пространственный масштаб турбулентности (также называемый интегральным масштабом) характеризует крупные (энергонесущие) вихри;

D – тензор турбулентной диффузии частиц.

С учетом $D = \frac{1}{2} (\text{grad} \vec{v} + (\text{grad} \vec{v})^T)$:

$$T_{tr} = T_n = \nu_t (\text{grad} \vec{v}' + (\text{grad} \vec{v}')^T) - \frac{2}{3} k I. \quad (7)$$

Для связи кинематического коэффициента турбулентной вязкости с осредненными параметрами модели используется соотношение, выражающее гипотезу Колмогорова-Прандтля:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где C_μ – безразмерная эмпирическая константа.

Уравнения для скорости вязкой диссипации энергии турбулентности ε можно получить двумя способами:

1) вывести при помощи процедуры осреднения по Рейнольдсу аналогично тому, как описано выше для удельной кинетической энергии турбулентности k . Это уравнение будет содержать различные корреляции, которые невозможно определить через осредненные параметры потока. Естественно, в этом случае потребуются некоторые дополнительные предположения для моделирования членов полученного уравнения;

2) записать стандартную форму уравнения переноса для ε и предположить, что генерация и диссипация ε пропорциональны аналогичным величинам для k (входящим в уравнение (3)) с эмпирическими коэффициентами пропорциональности.

Так или иначе, оба пути приводят к уравнению, вид которого подобен виду аналогичного уравнения для k (5) с двумя эмпирическими константами C_1 и C_2 :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad} \varepsilon \cdot \vec{v}' = C_1 \frac{\varepsilon}{k} + \text{div} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad} \varepsilon \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (9)$$

где σ_ε – стандартная константа k - ε -модели турбулентности.

Уравнения (5)-(9), которые надо решать совместно с осредненным по Рейнольдсу уравнением Навье-Стокса, составляют так называемую стандартную (высокорейнольдсовую) модель турбулентности Сполдинга-Лаундера. На основе калибровки констант для этой модели, выполненной по экспериментальным данным для струйных течений, приняты следующие их значения:

$$\sigma_k = 1; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3; \quad C_1 = 1,44; \quad C_2 = 1,92. \quad (10)$$

Стандартная модель (как и другие высокорейнольдсовые модели) дает хорошие результаты для струйных и других свободных течений, однако плохо работает вблизи стенок, поскольку здесь локальное турбулентное число Рейнольдса Re_t мало.

Для расчета пристенных течений используются либо низкорейнольдсовые модели, либо версии k - ε -моделей, в которые введены пристенные функции, т.е. в этих моделях в уравнения вводятся дополнительные функции, отвечающие за влияние стенок на турбулентность. В общем случае большинство низкорейнольдсовых k - ε -моделей могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad}k \cdot \vec{v}' = P_k + \text{div} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}k \right) - \varepsilon - f_k; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad}\varepsilon \cdot \vec{v}' = C_1 \frac{\varepsilon}{k} + \text{div} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad}\varepsilon \right) - C_2 f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} - f_\varepsilon; \quad (12)$$

$$v_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Здесь введены четыре пристенные функции $-f_k$, f_2 , f_ε и f_μ , зависящие от k и ε . В популярной низкорейнольдсовой модели функции задаются в форме:

$$f_\mu = e^{-\frac{3,4}{(1+0,02\text{Re}_t)^2}}; \quad (14)$$

$$f_2 = 1 - 0,3e^{-\text{Re}_t^2}. \quad (15)$$

Отметим, что локальное турбулентное число Рейнольдса также можно определить через величины k и ε :

$$\text{Re}_t = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}. \quad (16)$$

К достоинствам k - ε -моделей относится высокая точность при расчете свободных сдвиговых течений. Они достаточно универсальны и не требуют задания каких-либо дополнительных параметров. Тем не менее, трудности, связанные с их применением в пристенных областях, заставляют исследователей изобретать все новые и новые модели. Однако до настоящего времени никаких предпочтений среди моделей, базирующихся на концепции осреднения по Рейнольдсу, по существу, не наблюдается, поскольку не существует «универсальной» модели турбулентности.

Заключение. Использование возможностей программного комплекса ANSYS Fluent при моделировании аэродинамических потоков позволяет получить реальное представление о физических процессах, происходящих внутри исследуемой области, что в свою очередь дает возможность улучшить конструкции проточных частей СОЗК (рисунок 4).

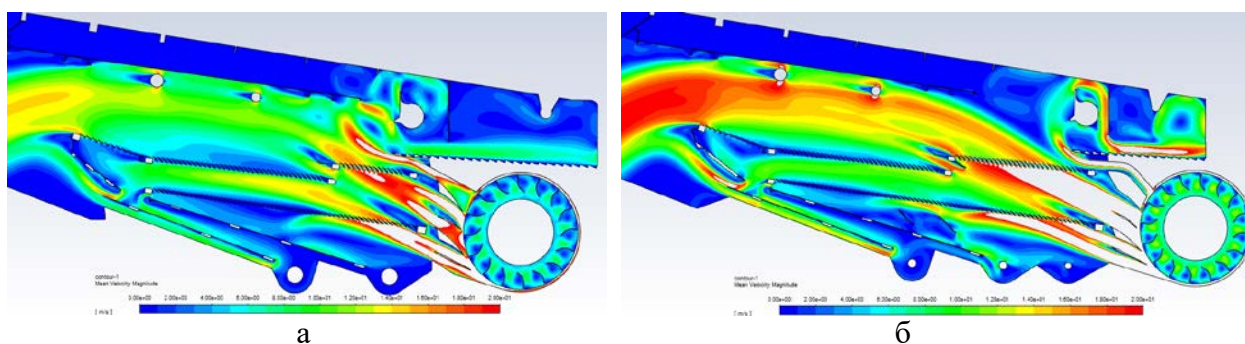


Рисунок 4. – Поля скоростей аэродинамических потоков системы очистки зерноуборочного комбайна в базовой (а) и модернизированной (б) конструкции

Внедрение в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» методики компьютерного моделирования и нелинейного анализа взаимодействия воздушных потоков с зерновым ворохом в СОЗК позволило создать зерноуборочный комбайн с принципиально новой компоновкой технологического тракта, имеющего лучшие показатели производительности и

энергоемкости (на 20-30 %) по сравнению с аналогичными показателями комбайнов с классической компоновкой технологического тракта [3].

Список использованных источников

1. Численное моделирование на основе программного пакета STAR-CD аэродинамических потоков с целью выявления ударных волн в турбокомпрессоре / А.М. Крот [и др.] // Авиадвигатели XXI века: II междунар. науч.-техн. конф., Москва, 6-9 дек. 2005 г. / ЦИАМ. – Москва, 2005. – Т. 1. – С. 3.
2. Бойко, Л.И. Динамическое взаимодействие колеблющегося органа машины с источником энергии ограниченной мощности / Л.И. Бойко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 1998. – № 3. – С. 28-36.
3. Попов, В.Б. Алгоритм параметрического анализа механизма двухстанной очистки зерноуборочного комбайна / В.Б. Попов, А.В. Голопятин, А.А. Новиков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 27-33.
4. Попов, В.Б. К вопросу о параметрической оптимизации механизма очистки зерноуборочного комбайна / В.Б. Попов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сб. тезисов докл. 2-ой междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4-5 окт. 2018 г. – Гомель, 2018. – С. 50-52.
5. Баран, И.А. Использование компьютерного моделирования аэродинамических потоков при проектировании систем очистки зерноуборочных комбайнов / И.А. Баран, А.Н. Вырский, С.В. Труханович // Молодежь в науке – 2014: приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»: материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 18-21 нояб. 2014 г.: в 5 ч. – Минск, 2015. – Ч. 3. – С. 56-61.
6. Баран, И.А. Исследование распределения воздушных потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна КЗС-1319 в зависимости от геометрических параметров проточных областей / И.А. Баран, С.В. Труханович // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 1 (45). – С. 29-38.

Информация об авторах

Виктор Борисович Попов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: popow@gstu.by.

Игорь Анатольевич Баран – магистр технических наук, ведущий инженер, руководитель сектора конструкторско-исследовательского отдела «Динамики, прочности и аналитической надежности», НТЦК ОАО «Гомсельмаш» (ул. Ефремова, 61, 246031, г. Гомель, Беларусь), e-mail: igo.baran@yandex.ru.

Information about the authors

Viktor Borisovich Popov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: popow@gstu.by.

Igor Anatolievich Baran – Master of Technical Sciences, Leading Engineer, Head of the Sector of the Design and Research Department “Dynamics, Strength and Analytical Reliability”, OJSC “Gomselmash” (61, Efremova Str, 246031, Gomel, Belarus), e-mail: igo.baran@yandex.ru.

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.