

УДК 658.012.011.56

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ САМОХОДНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

**И. А. БАРАН**

*Научно-технический центр комбайностроения  
ОАО «Гомсельмаш», Республика Беларусь*

**В. Б. ПОПОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлен анализ системы очистки самоходного зерноуборочного комбайна. Рассмотрено влияние технологического тракта и его конструктивных особенностей на формирование технологического потока. На основе экспериментальных данных и численного моделирования аэродинамики технологического тракта выполнен подбор оптимальных параметров системы очистки. Все это позволило создать в самоходном зерноуборочном комбайне технологический тракт с улучшенными показателями производительности и энергоемкости.*

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

## ON THE ISSUE OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE CLEANING SYSTEM OF A SELF-PROPELLED COMBINE HARVESTER

**I. A. BARAN**

*Scientific and Technical Center of Combine Construction  
OJSC “Gomselmash”, the Republic of Belarus*

**V. B. POPOV**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The article presents an analysis of the cleaning system of the self-propelled combine harvester. It considers the impact of the process path and its design features on the formation of the process stream. On the basis of experimental data and numerical modeling of aerodynamics of the process path, selection of optimal parameters of the cleaning system is performed. All this made it possible to create a technological path in a self-propelled combine harvester with improved performance and energy intensity.*

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

### **Введение**

В настоящее время одной из важнейших задач, стоящих перед ОАО «Гомсельмаш», является реализация его продукции на зарубежном рынке. В отличие от внутреннего рынка, где ощутимыми конкурентными преимуществами является ценовой фактор и сервисное обслуживание, на зарубежном рынке производители сельскохо-

зайственной техники находятся в более жестких условиях. Современные промышленные предприятия, активно конкурирующие не только на отечественном, но и на зарубежных рынках, вынужденно находятся в состоянии перманентной модернизации серийной и проектирования новой техники. Оптимальной является работа на опережение, поскольку если предприятие будет проектировать продукцию на основе существующего спроса, то до стадии промышленного производства дойдет морально устаревший продукт. В условиях жестких ограничений по срокам и затратам на разработку нового изделия, сопровождающихся высокими требованиями к надежности и глубине проработки выпускаемой техники, традиционные методы проектирования не могут обеспечить конкурентные преимущества в его скорости и экономичности. Поэтому использование современных компьютерных технологий сегодня является для предприятия не только способом получения конкурентного преимущества, но и фактически условием конкурентоспособности.

Конкурентоспособность мобильной уборочной техники, разрабатываемой в режиме автоматизированного проектирования, сегодня обеспечивают наукоемкие САЕ-технологии инженерного анализа сложных технических объектов [1].

До недавнего времени в научно-техническом центре комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» не были задействованы САЕ-технологии исследования газодинамических процессов в рабочих органах уборочных машин. Это исследования термодинамики и аэродинамики в подкапотном пространстве самоходных уборочных машин, исследование системы очистки зерноуборочных комбайнов (СОЗК), исследование процесса транспортировки технологической массы в кормоуборочных комбайнах.

Основная проблема по определению параметров СОЗК состоит в повышении ее производительности. Повышение пропускной способности технологического тракта зерноуборочного комбайна связано в том числе и с аэродинамическим анализом процесса отделения легковесных частиц из поступающего в СОЗК зернового вороха (ЗВ) [2–4].

Зерноуборочный комбайн предназначен для прямой и раздельной уборки зерновых колосовых культур, а с применением специальных приспособлений – для уборки зерновой части подсолнечника, зернобобовых, крупяных культур и семенников трав. Комбайн производит срез, обмолот, сепарацию, очистку зерна, накопление зерна в зерновом бункере с последующей выгрузкой, а также обеспечивает уборку незерновой части урожая по следующим технологическим схемам: укладка соломы в валок, измельчение и разбрасывание соломы по полю.

Комбайн состоит из двух основных частей: жатвенной и молотильной, не считая ходовой части и средств для уборки соломы и половы.

В жатвенную часть комбайна входят мотовило, режущий аппарат и транспортирующие органы (рис. 1). При раздельном комбайнировании мотовило и режущий аппарат не используются, так как заменяются подборщиком.

Основными органами молотильной части являются молотильное устройство, соломотряс, очистка, шнеки и элеваторы.

Одной из отличительных особенностей работы зерноуборочных комбайнов является наличие движущегося ЗВ в воздушном потоке, проходящем через сложное геометрическое пространство технологического тракта. Решение задачи движения воздуха и ЗВ в технологическом тракте комбайна позволяет определить рациональные геометрические формы корпусных элементов и кинематические параметры рабочих органов с точки зрения эффективности технологического процесса и его энергоемкости.

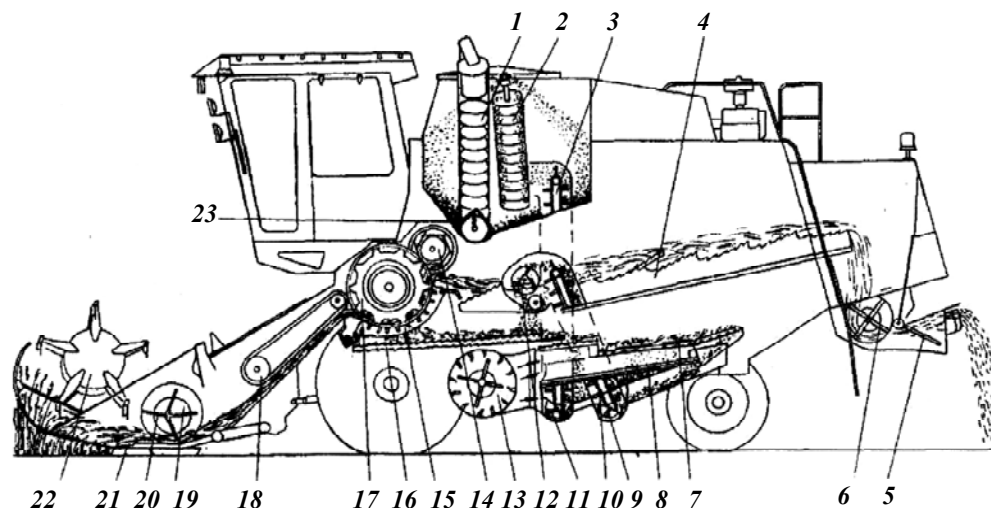


Рис. 1. Схема технологического процесса работы зерноуборочного комбайна:  
 1 – шнек поворотный выгрузной; 2 – шнек загрузной зерновой; 3 – элеватор зерновой;  
 4 – соломотряс; 5 – дефлектор; 6 – соломоизмельчитель; 7 – верхний решетный стан;  
 8 – нижний решетный стан; 9 – шнек колосовой; 10 – элеватор колосовой;  
 11 – шнек зерновой; 12 – домолачивающее устройство; 13 – вентилятор;  
 14 – отбойный битер; 15 – подбарабанье; 16 – стрясная доска; 17 – аппарат  
 молотильный; 18 – транспортер наклонной камеры; 19 – шнек;  
 20 – пальчиковый механизм; 21 – режущий аппарат; 22 – мотовило

Основные исследования взаимодействия воздушных потоков с растительной массой в технологическом тракте комбайна ранее были направлены на экспериментальное изучение характера распределения полей скоростей и давлений воздушного потока и кинематики движения инерционно движущихся частиц. Эти исследования требовали достаточно больших материальных и временных ресурсов. Оптимизация же процессов с целью достижения требуемых параметров по пропускной способности и качеству выполнения технологического процесса была весьма сложна и на практике трудно достижима.

С другой стороны, взаимодействие воздушного потока с частицами ЗВ никогда подробно не исследовалось. Отсутствие углубленных исследований в данной области связано, в первую очередь, со сложностью аэродинамических процессов в технологическом тракте, что вызвано существенной изменчивостью среды и условий, в которых работают технологические органы комбайна, неоднородностью и широким диапазоном значений физико-механических параметров ЗВ, что практически исключает определение аналитических связей.

Основные аэродинамические процессы в технологическом тракте зерноуборочного комбайна происходят в СОЗК. Очистка предназначена для выделения зерна из вороха, поступающего из-под молотильного устройства и соломотряса. Основными узлами СОЗК являются: колеблющиеся на подвесках решетные станы, вентилятор, зерновой и колосовой шнеки и приводной механизм (рис. 2).

Зерновой ворох подается в СОЗК стрясной доской, 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 ЗВ представляет в большинстве случаев смесь, состоящую из семян основной культуры, семян посторонних растений и из примеси разнородного сора минерального и органического происхождения [5].

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

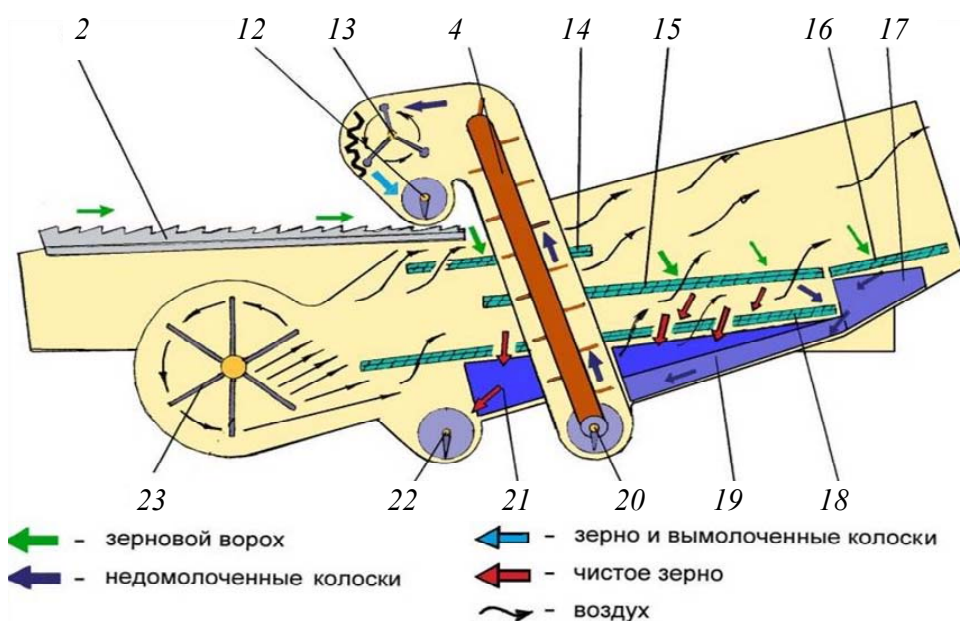


Рис. 2. Схема работы системы очистки зерноуборочного комбайна:

- 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

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 ЗВ 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 [6].

Усовершенствования в данной области можно разделить на несколько групп: использование нетрадиционных схем очистки; изменение конструкций решетных 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 ЗВ 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.

Однако в связи с большим количеством влияющих параметров данный путь сопряжен с большим объемом экспериментальных работ. Экспериментальные работы требуют значительных материальных и временных затрат, и в случае определения оптимального сочетания множества равновлияющих факторов проведение данных работ по увеличению производительности становится экономически неэффективным [7].

Выходом в данной ситуации является проведение компьютерного моделирования процессов, происходящих в системе очистки на основании реальных физических процессов с помощью численного моделирования аэродинамики технологического тракта.

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

### Методика расчетов

Одной из важнейших составляющих алгоритма решения является модель турбулентности. В *ANSYS* реализованы множество моделей турбулентности для расчета механики таких сплошных сред, как Спаларта-Аллмараса,  $k$ - $\varepsilon$ ,  $k$ - $\omega$  и других, а также различные их вариации.

В  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности записываются два дополнительных уравнения для расчета кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации кинетической энергии  $\varepsilon$ . Буферный слой не моделируется, для расчета скорости у стенки используются пристеночные функции. Благодаря быстрой сходимости и относительно низким требованиям к объему памяти  $k$ - $\varepsilon$ -модель очень популярна при решении промышленных задач. Она не очень точна при моделировании течений с положительным градиентом давления, струйных течений и течений в области с сильно искривленной геометрией. Модель хорошо подходит для решения задач внешнего обтекания тел сложной геометрической формы. Например,  $k$ - $\varepsilon$ -модель можно использовать для моделирования потока вблизи плохо обтекаемого тела. Модель  $k$ - $\varepsilon$  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  $\mu_t$ .

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

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

и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности:

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

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

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

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

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

– правая:

1) первый член описывает генерацию турбулентности;

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

3) 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:

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

где  $\nu_t$  – кинематический коэффициент турбулентной вязкости,  $\sigma_k$  – 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 
$$P_k = -T_n \text{grad} \cdot \vec{v}'. \quad (6)$$

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

$$T_n = \frac{T_t}{p} = \frac{2\mu_t D - \frac{2}{3} p k I}{p} = \left[ \nu_t = \frac{\mu_t}{p} \right] = 2\nu_t D - \frac{2}{3} k I.$$

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

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

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

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

где  $C_\mu$  – безразмерная эмпирическая константа.

Уравнения для скорости вязкой диссипации энергии турбулентности  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  и предположить, что генерация и диссипация  $\varepsilon$  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  $C_2$ :

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

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  $k$ - $\varepsilon$ -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  $k$ - $\varepsilon$ -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 –  $f_k$ ,  $f_2$ ,  $f_\varepsilon$  и  $f_\mu$ , зависящие от  $k$  и  $\varepsilon$ .

В популярной низкорейнольдсовой функции задаются в форме:

$$f_\mu = e^{-\frac{3,4}{(1+0,02 Re_t)^2}}. \quad (14)$$

$$f_2 = 1 - 0,3e^{-Re_i^2}. \tag{15}$$

Отметим, что локальное турбулентное число Рейнольдса также можно определить через величины  $k$  и  $\varepsilon$ :

$$Re_t = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}. \tag{16}$$

К достоинствам  $k$ - $\varepsilon$ -моделей относится высокая точность при расчете свободных сдвиговых течений. Они достаточно универсальны и не требуют 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.

Модели турбулентности, перечисленные ниже, отличаются более высокой степенью нелинейности по сравнению со стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -моделью, и поэтому зачастую в расчетах на основе этих моделей бывает трудно добиться сходимости, если только не воспользоваться хорошим начальным приближением. Результаты расчета, полученные с помощью стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -модели, могут послужить таким начальным приближением (рис. 3).

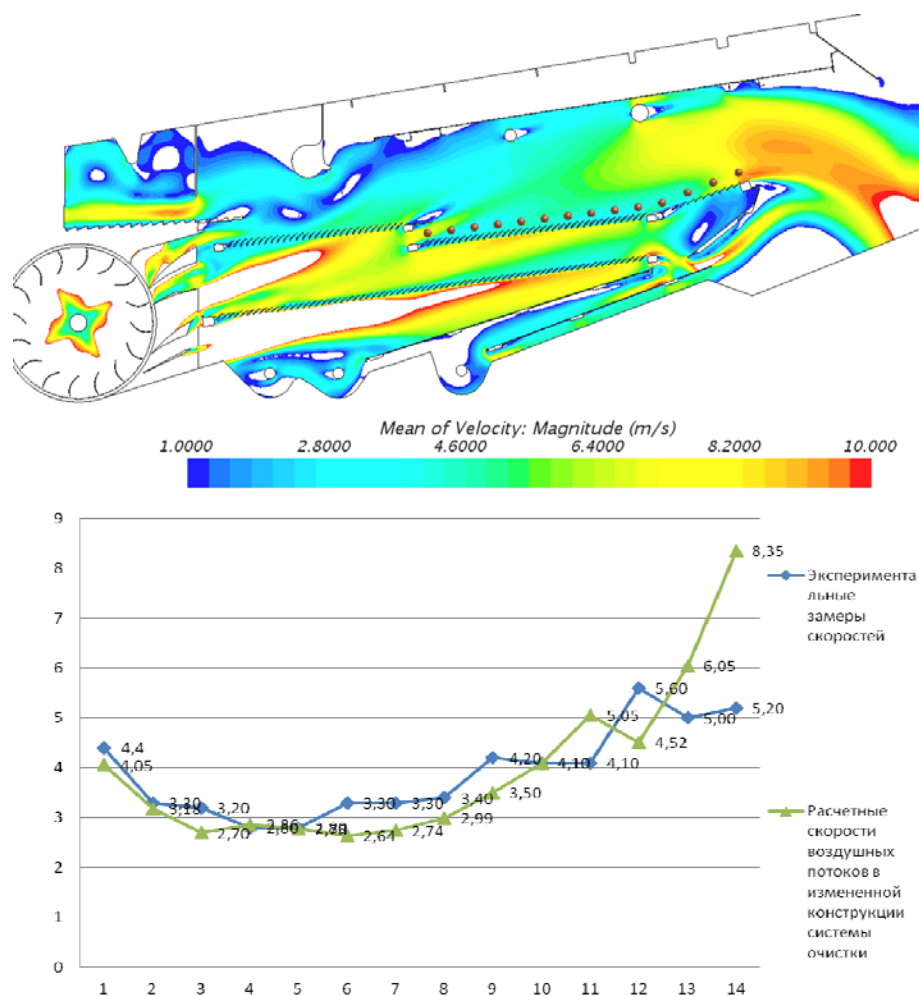


Рис. 3. Поля и графики скоростей аэродинамических потоков системы очистки зерноуборочного комбайна в модернизированной конструкции  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности



### Модель $k-\omega$ турбулентности

Модель  $k-\omega$  похожа на  $k-\varepsilon$ , только здесь решается уравнение для удельной скорости диссипации кинетической энергии  $\omega$ . Эта модель относится к низкорейнольдсовым, но она также может быть использована совместно с пристеночными функциями. Она отличается более высокой степенью нелинейности, а потому хуже сходится, чем стандартная  $k-\varepsilon$ -модель, кроме того, она достаточно чувствительна к начальному приближению. Использование  $k-\omega$ -модели дает хорошие результаты в тех задачах, где  $k-\varepsilon$ -модель недостаточно точна, например, при моделировании внутренних течений, течений по сильно искривленным каналам, отрывных и струйных течений.

Модель  $k-\omega$  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  $\mu_t$ .

С целью принятия корректных конструктивных решений по изменению проточной части системы очистки с целью оптимизации воздушных потоков важным этапом является верификация результатов компьютерного моделирования аэродинамики СОЗК. Для этого на первом этапе выполняются экспериментальные исследования воздушных потоков с определением необходимых параметров. После этого компьютерная модель настраивается по параметрам (настройки параметров конечно-элементной сетки; настройки моделей и параметров турбулентности; настройки параметров входа, выхода и интерфейсов; настройки расчетных методов и параметров; настройки времени и шагов расчета и т. д.) с целью максимального приближения к результатам эксперимента [8].

Использование возможностей программного комплекса *ANSYS Fluent* при моделировании аэродинамических потоков позволило получить реальное представление о физических процессах, происходящих внутри исследуемой области, что в свою очередь дало возможность улучшить конструкции проточных частей СОЗК (см. рис. 2).

### Заключение

Разработанная компьютерная модель аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна является основой для проведения расчетных исследований различных конструктивных вариаций СОЗК для повышения ее производительности (см. рис. 3).

Предлагаемая компьютерная модель позволяет принимать обоснованные решения для достижения заданных параметров воздушного потока и может использоваться в качестве базовой для идентичных по структуре СОЗК других самоходных зерноуборочных комбайнов.

### Литература

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 : сб. тез. докл. II Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 6–9 дек. 2005 г. / Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П. И. Баранова. – М., 2005. – Т. 1. – С. 3.
2. Бойко, Л. И. Динамическое взаимодействие колеблющегося органа машины с источником энергии ограниченной мощности / Л. И. Бойко // Весці Нац. акад. навук Рэсп. Беларусь. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 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 // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2 (73). – 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. тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4–5 окт. 2018 г. / науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – 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 : 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 // Вестн. аграр. науки Дона. – 2019. – № 1 (45). – С. 29–38.
7. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / редкол.: К. В. Фролов (гл. ред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1994–2015. – Т. IV–16 : Сельскохозяйственные машины и оборудование / И. П. Ксенович [и др.] ; под. ред. И. П. Ксеновича. – 2002. – С. 228–233.
8. Крот, А. М. Компьютерное моделирование пароводяных потоков внутри рабочей камеры микротурбины и оценивание коэффициента полезного действия для усовершенствования конструкции турбоагрегата / А. М. Крот, П. П. Ткачева, И. Н. Спагар // Информатика. – 2017. – № 2 (54). – 24–36.

### References

1. Krot A. M., Minervina E. B., Tkacheva P. P., Baldin V. A. Numerical simulation based on the STAR-CD aerodynamic flow software package to detect shock waves in the turbocharger. *Aviadvigateli XXI veka: sb. tez. dokl. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Moscow, 6–9 dek. 2005 g.* [Aircraft engines of the XXI century: Sat. tez. doc. II Internar. scientific-technical conf., Moscow, December 6–9, 2005]. Moscow, 2005, vol. 1, p. 3 (in Russian).
2. Boiko L. I. Dynamic interaction of the oscillating member of the machine with the power source of limited power. *Seriya fizika-tekhnicheskikh navuk = Proceedings of the national academy of sciences of belarus chemical series*, 1998, no. 3, pp. 28–36 (in Russian).
3. Popov V. B., Golopiatin A. V., Novikov A. A. Algorithm for parametric analysis of the mechanism for double-mill cleaning of a combine harvester. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2018, no. 2 (73), pp. 27–33 (in Russian).
4. Popov V. B. On the question of parametric optimization of the mechanism for cleaning the combine harvester. *K Innovatcionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnia i zavtra: sb. tez. dokl. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gomel, 4–5 okt. 2018 g. / nauchn.-tekhn. tcentr kombainostroeniia AOA «Gomselmash»* [Innovative technologies in the agro-industrial complex – today and tomorrow: Sat. tez. doc. II Internar. scientific-practical. conf., Gomel, Oct. 4–5, 2018]. Gomel, 2018, pp. 50–52 (in Russian).

5. Baran I. A., Vyrskii A. N., Trukhanovich S. V. The use of computer simulation of aerodynamic flows in the design of cleaning systems for combine harvesters. *Molodezh v nauke – 2014: materialy Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh, Minsk, 18–21 noiab. 2014 g.: v 5 ch.* [Youth in Science – 2014: Materials International. scientific. conf. young scientists, Minsk, November 18–21, 2014: at 5 o'clock]. Minsk, 2015, pt. 3, pp. 56–61 (in Russian).
6. Baran I. A., Trukhanovich S. V. Study of air flow distribution in the cleaning system of the combine harvester KZS-1319 depending on the geometric parameters of the flow regions. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*, 2019, no. 1 (45), pp. 29–38 (in Russian).
7. Ksenevich I. P. (ed.). *Mechanical engineering. Vol. IV–16. Selskokhoziaistvennyye mashiny i oborudovanie.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. pp. 228–233 (in Russian).
8. Krot A. M., Tkacheva P. P., Spagar I. N. Computer modeling of steam-water flows inside the working chamber of the microturbine and estimating the efficiency for improving the design of the turbine unit. *Informatika*, 2017, no. 2 (54), pp. 24–36 (in Russian).

Поступила 16.11.2022 г.