

УДК 658.012.011.56

*В. Б. ПОПОВ, кандидат технических наук, доцент, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого; И. А. БАРАН, Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ САМОХОДНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается анализ системы очистки зерноуборочного комбайна, влияние технологического тракта и конструктивных особенностей на формирование технологического потока в системе очистки. Сформировано формализованное описание k-ε-модели турбулентности, используемой в расчете сплошной среды. Получены необходимые параметры для проведения компьютерного моделирования, расчета, анализа и разработки системы очистки зерноуборочного комбайна с технологическим трактом, имеющего лучшие показатели производительности и энергоёмкости.

**Н**а современном этапе развития технологии производства при разработке высокотехнологичной и конкурентоспособной продукции, возникает необходимость использования перспективных компьютерных технологий, которые позволяют обеспечить поддержку жизненного цикла продукции, так называемых CALS-технологий. Ядро CALS-технологий составляют CAD/CAE/ CAM/PDM – технологии, где традиционный последовательный подход к разработке новых изделий заменен принципиально новым интегрированным подходом, получившим название «параллельное проектирование». В основе этой технологии лежит идея совмещенного во времени компьютерного проектирования изделия (CAD), выполнения многовариантных инженерных расчетов (CAE, компьютерный инжиниринг – наукоемкая составляющая CALS-технологий) и технологической подготовки производства (CAM), что позволяет использовать проектные данные, начиная с самих ранних стадий проектирования и инженерного анализа одновременно различными группами специалистов (PDM) [1].

Объектом исследования является система очистки зерноуборочного комбайна (СОЗК) с учетом научных исследований, представленных в [2–4]. При этом основные проблемы при определении параметров системы очистки – заключаются в повышении ее производительности. 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 энергоёмкости технологического тракта.

Зерноуборочный комбайн (рисунок 1) 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 полова.



Рисунок 1 – Самоходный зерноуборочный комбайн КЗС-3219

В жатвенную часть комбайна входят мотовило, режущий аппарат и транспортирующие органы (рисунок 2). При раздельном комбайнировании мотовило и режущий аппарат не используется и заменяются подборщиком.

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

Технологический процесс прямого способа уборки урожая осуществляется следующим образом.

При движении комбайна лопасти мотовила 27 (см. рисунок 2) жатки для зерновых культур захватывают и подводят порции стеблей к режущему аппарату 26, а затем подают срезанные стебли к шнеку 25. Шнек, имея спирали правого и левого направления, перемещает срезанные стебли от краев к центру жатки, где расположен пальчиковый механизм. Пальчиковый механизм шнека захватывает их, а также стебли, непосредственно поступающие на него, и направляет в окно жатки, из которого масса отбирается к транспортеру наклонной камеры 24, подающему поток хлебной массы в молотильный аппарат к барабану-ускорителю 23, а затем к молотильному барабану 21, где и происходит обмолот. В процессе обмолота зерно, полова и мелкий солоmistый ворох просыпаются через решетку подбарабана 20 и 22 на стрясную доску 18, остальной ворох отбрасывается отбойным битером 19 на соломотряс 8, на клавишах которого происходит дальнейшее выделение зерна из солоmistого вороха.

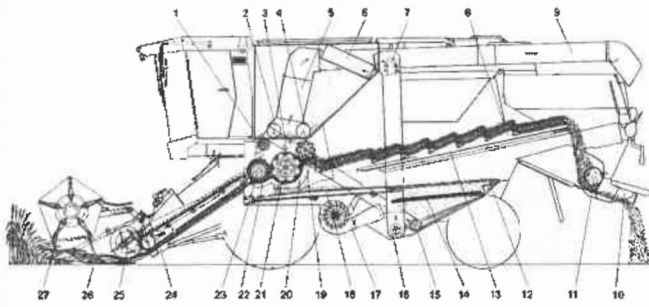


Рисунок 2 – Схема технологического процесса работы зерноуборочного комбайна:

1 – шнек распределительный; 2, 4 – шнеки горизонтальные выгрузные; 3 – элеватор колосовой; 5 – шнек наклонный выгрузной; 6 – шнек загрузной зерновой; 7 – элеватор зерновой; 8 – соломотряс; 9 – шнек поворотный выгрузной; 10 – дефлектор; 11 – соломоизмельчитель; 12 – верхний решетный стан; 13 – доска скатная; 14 – нижний решетный стан; 15 – шнек колосовой; 16 – шнек зерновой; 17 – вентилятор; 18 – доска стрясная; 19 – битер отбойный; 20 – подбарабанье; 21 – барабан молотильный; 22 – переднее подбарабанье; 23 – барабан-ускоритель; 24 – транспортер наклонной камеры; 25 – шнек; 26 – режущий аппарат; 27 – мотовило

Солома транспортируется клавишами соломотряса к заднему капоту и в зависимости от настройки соломоизмельчителя 11 формируется в валок или измельчается ротором соломоизмельчителя и через дефлектор 10 разбрасывается по полю. Полова и легкие примеси воздушным потоком вентилятора 17 выдуваются из очистки на поле. Зерновая смесь, попавшая на стрясную доску 18, транспортируется к верхнему решетному стану 12. При движении смеси по стрясной доске происходит предварительное разделение на фракции, зерно перемещается вниз, а остальное – вверх. Слой зерновой смеси, проваливающийся через пальцевую решетку стрясной доски, несколько разрыхляется, благодаря чему зерно и тяжелые примеси проваливаются вниз на дополнительное решето верхнего решетного стана, а полова и другие легкие примеси под действием воздушной струи вентилятора выдуваются из молотилки.

Часть зерна проваливается через дополнительное решето на нижнее решето решетного стана 14, а остальная часть с дополнительного решета попадает на верхнее решето решетного стана. С верхнего решета зерно просыпается на нижнее решето, с которого очищенное зерно сыпается через поддон к шнеку зерновому 16 и загружается в бункер элеватором зерновым 7 и шнеком загрузным 6. Через удлинитель верхнего решетного стана недомолоченные колоски сыплются в поддон к шнеку колосовому 15 и подаются элеватором колосовым 3 в домолочивающее устройство. Затем распределительный шнек домолочивающего устройства равномерно распределяет повторно обмолоченную смесь по ширине стрясной доски. Очищенное зерно после заполнения бункера зерна выгружается в транспортное средство шнеком выгрузным 9.

Качество выделения зерна из вороха, при прочих равных условиях, зависит от воздушного потока вентилятора, размеров отверстий решет 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

верхнего решета, и сходы с решета поступают в колосовой шнек, откуда в зависимости от содержания недомолоченного колоса направляются в молотильный аппарат или на соломотряс (рисунок 3).

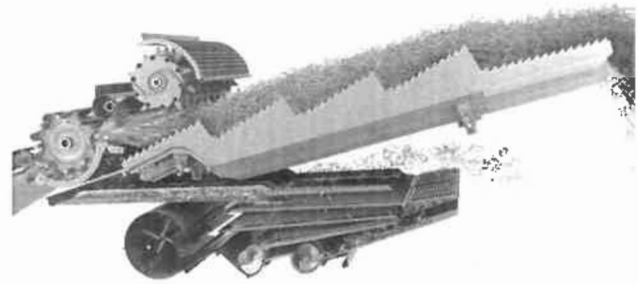


Рисунок 3 – Система очистки зерноуборочного комбайна

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.

Для компьютерного моделирования турбулентных течений в системе очистки зерноуборочного комбайна в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» используется модуль ANSYS Fluent программно-аппаратного комплекса ANSYS. 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 систем очистки зерноуборочных комбайнов.

На основании анализа результатов расчетов, проведенных с использованием приведенных выше моделей турбулентности, и экспериментальных исследований аэродинамических потоков в системах очистки зерноуборочных комбайнов, проведенных в НТЦК ОАО «Гомсельмаш», для расчета сплошной среды в системе очистки зерноуборочного комбайна было принято решение об использовании  $k-\epsilon$ -модели турбулентности при проведении компьютерного моделирования аэродинамики в проточных частях аэродинамического тракта комбайнов.  $k-\epsilon$ -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  $\mu_t$ .

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

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

и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности

$$\epsilon = 2\nu r \left( \overline{\text{grad} \vec{v}' \left( \text{grad} \vec{v}' \right)^T} \right) \quad (2)$$

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

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

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:

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

где  $v_t$  – кинематический коэффициент турбулентной вязкости;  $\sigma_k$  – безразмерная эмпирическая константа.

Тогда

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad}k \cdot \vec{v} = P_k + \text{div} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{ grad}k \right) - \varepsilon, \quad (5)$$

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

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

$$T_n = \frac{T_i}{\rho} = \frac{2\mu_t D - \frac{2}{3} p k l}{\rho} = \left[ v_t = \frac{\mu_t}{\rho} \right] = 2v_t D - \frac{2}{3} k l.$$

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

$$T_w = v_t \left( \text{grad} \vec{v} + \left( \text{grad} \vec{v} \right)^T \right) - \frac{2}{3} k l. \quad (7)$$

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:

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

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  $Re_\varepsilon$  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:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad}k \cdot \vec{v} = P_k + \text{div} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{ grad}k \right) - \varepsilon - f_k, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad} \varepsilon \cdot \vec{v} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} + \\ + \text{div} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{ grad} \varepsilon \right) - C_2 f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} - f_\varepsilon, \end{aligned} \quad (12)$$

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

Здесь введены четыре пристенные функции –  $f_k, f_2, f_\varepsilon$  и  $f_\mu$ , зависящие от  $k$  и  $\varepsilon$ .

В популярной низкорейнольдсовой модели функции задаются в форме

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

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

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

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

К достоинствам  $k$ - $\varepsilon$ -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 всё 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.

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).

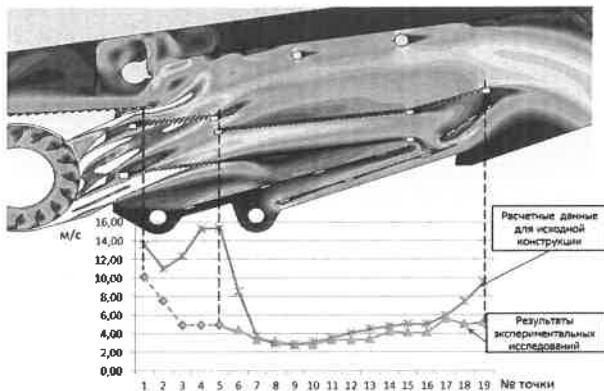


Рисунок 4 – Моделирование и верификация компьютерной модели с результатами экспериментальных данных

На рисунке 4 представлены результаты компьютерного моделирования аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна КЗС-3219, а также графики скоростей аэродинамического потока над верхним решетом по результатам эксперимента и компьютерного моделирования. Графики построены по результатам определения скоростей в точках, которые были равномерно распределены над верхним решетом и совпадали при проведении эксперимента и компьютерного моделирования. Из рисунка 4 следует, что настройки параметров компьютерной модели позволяют до-

Получено 11.01.2023

**V. B. Popov, I. A. Baran.** Study of aerodynamic flow velocities in the cleaning system of a self-propelled grain harvester using computer simulation.

The analysis of the cleaning system of a combine harvester, the influence of the technological path and design features on the formation of the technological flow in the cleaning system is considered. A formalized description of the  $k$ - $\varepsilon$ -model of turbulence used in the calculation of a continuous medium is formed. Conducting experimental studies made it possible to obtain the necessary parameters for computer simulation, calculation, analysis and development of a cleaning system for a combine harvester with a technological path, which has the best performance and energy intensity.

биться ее высокой степени адекватности по отношению к результатам эксперимента.

Внедренная в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» в процесс проектирования новой техники методика компьютерного моделирования аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна позволила создать зерноуборочный комбайн, имеющий лучшие показатели а также подобрать оптимальные конструктивные параметры технологического тракта для получения заданной производительности зерноуборочного комбайна и энергоёмкости процесса разделения зернового вороха на фракции.

Подготовка специалистов для развития всех отраслей машиностроения и обеспечения безопасных условий эксплуатации их продукции, соответствующих учебных и методических пособий с учетом изложенных выше новых подходов к обеспечению безопасной эксплуатации объектов техносферы и населения с использованием критериев риска [1–6] будут способствовать успешной реализации современных подходов к проектированию и эксплуатации высокорискового оборудования, а также переходу к новому этапу научных исследований, удовлетворяющих предъявляемым к нему повышенным комплексным требованиям по прочности, ресурсу, живучести и безопасности в ближайшем будущем и на отдаленную перспективу.

#### Список литературы

- 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 : П Международ. науч.-техн. конф. – М. : ЦИАМ, 6–9 дек. 2005 г. – Т. 1. – С. 3.
- 2 Бойко, Л. И. Динамическое взаимодействие колеблющегося органа ашины с источником энергии ограниченной мощности / Л. И. Бойко // Весці НАН РБ. Сер. фізіка-тэхнічных 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 // 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 докладов 2-й Междунар. науч.-практ. конф., 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. Выровский, 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. Ч. 3. – Минск, 2015. – 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.