



КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 631.354.2.076, 532.5

А.А. КАЛИНОВСКИЙ, магистр техн. наук
ведущий инженер-конструктор
E-mail: kiodpan@gomselmash.by
НТЦК ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11.07.2024.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДВИЖЕНИЯ РЕШЕТ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТОКИ В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

В работе рассмотрено аэродинамическое моделирование воздушных потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна. Разработана методика моделирования системы очистки с учетом движения ее элементов, таких как решета и доски, с применением программных комплексов Simcenter Amesim и Ansys Fluent. Основные этапы процесса аэродинамического моделирования системы очистки рассмотрены на примере зерноуборочного комбайна производства ОАО «Гомсельмаш». Выполнен сравнительный анализ воздушных потоков в системе очистки с подвижными элементами и при их фиксации в среднем положении в 2D-постановке. Приведены результаты численного моделирования аэродинамики воздушных потоков в виде численных значений в контрольных точках, проиллюстрированы поля скоростей и линии тока воздушного потока в проточной области. Результаты сравнительного анализа показали, что расхождения скоростей и направлений воздушного потока в контрольных точках составляют 50 % и 4,5° соответственно. Сделаны выводы, что движения элементов очистки при ее аэродинамическом моделировании необходимо учитывать в обязательном порядке для получения реальной картины течения воздушных потоков в проточной области. Результаты моделирования с фиксированными элементами очистки могут выступать в качестве предварительного расчета для проверки адекватности модели по результатам экспериментальных замеров в очистке также с неподвижными элементами. Разработанная методика моделирования аэродинамики проточной области очистки в дальнейших исследованиях системы очистки зерноуборочного комбайна будет применена для анализа совместного поведения воздушных потоков и вороха.

Ключевые слова: система очистки, проточная область, кинематический расчет, аэродинамическое моделирование, воздушные потоки, зерноуборочный комбайн

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-97-104>

Введение. Система очистки зерноуборочного комбайна предназначена для выделения зерна из вороха, поступающего из-под молотильного устройства, из соломосепаратора и колосодоомолачивающего устройства. Основными узлами системы очистки являются: решета и доски, колеблющиеся на подвесках, вентилятор, зерновой и колосовой шнеки, а также механизм привода. Разделение вороха в системе очистки на зерно

и незерновые примеси производится в основном по размерам и по парусности частиц. Сепарация вороха по размерам частиц выполняется посредством зазоров в решетках. Разделение по парусности осуществляется путем ввода материала в воздушный поток. В этом случае поток воздуха от вентилятора воздействует на массу и распределяет ее на фракции, отличающиеся друг от друга по коэффициенту парусности. Зерновой материал рас-

пределяется на решетках, воздушный поток уносит легкие объемные части, а зерно, пройдя через зазоры в решетках, поступает на зерновой шнек.

Направление движения потока воздуха от вентилятора задается элеронами или другими направляющими устройствами, а также жалюзями решет, сквозь которые поток непосредственно продувает ворох. Если направляющие устройства закреплены стационарно, то решетка совершает сложное плоскопараллельное движение, тем самым изменяя как направления движения воздушного потока, так и его скорость в проточной области системы очистки.

Амплитуда колебаний решет системы очистки зерноуборочных комбайнов находится в следующих пределах: для верхнего решета — 60...80 мм, для нижнего — 30...40 мм. Частота вращения приводного эксцентрикового вала составляет 200...300 об/мин, что соответствует частоте колебаний решет 3,3...5 Гц [1, 2].

Однако, несмотря на влияние перемещения решет на аэродинамические потоки, в работах, посвященных анализу систем очистки [3–5], исследования выполнены при отключенном приводе, что не соответствует действительности. В работе [6] при исследовании системы очистки движение решет реализовано, однако не учтено, что их перемещение происходит в противофазе. Стоит отметить, что экспериментальные исследования воздушных потоков системы очистки в динамике требуют уникального дорогостоящего измерительного оборудования [7], а виртуальное моделирование позволяет решить сложную задачу без него.

Целью данной работы является разработка методики по моделированию аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна с учетом движения решет и сравнительной оценки распределения воздушных потоков в проточной области с неподвижными и подвижными элементами очистки.

Методика моделирования системы очистки.

Анализ системы очистки с учетом движения решет состоит из решения двух междисциплинарных задач. В первую очередь необходимо выполнить кинематический расчет механизма системы очистки, в результате которого будут получены параметры, характеризующие движения решет и досок. Далее, используя данные кинематического расчета, осуществляется аэродинамический расчет воздушных потоков в проточной области с учетом движения элементов очистки.

Для выполнения кинематического анализа системы очистки использовался пакет компьютерного 1D-моделирования и анализа работы многодисциплинарных мехатронных систем Simcenter Amesim. Для создания аэродинамической модели применялась система вычислительной гидродинамики Ansys Fluent.



Рисунок 1 — Схема последовательности этапов моделирования
Figure 1 — Scheme of the sequence of modeling stages

Методика моделирования системы очистки с учетом движения решет состоит из этапов, последовательность выполнения которых представлена на рисунке 1.

Согласно приведенной схеме, этапы моделирования, относящиеся к кинематическому расчету механизма очистки и к подготовке проточной области очистки, не взаимосвязаны, следовательно, могут выполняться параллельно.

С учетом применяемых средств моделирования этапы представляют собой следующее:

- построение расчетной модели механизма системы очистки в 1D-представлении по геометрическим параметрам конструкторской проработки (Simcenter Amesim);
- выполнение кинематического расчета механизма, вывод результатов в виде зависимостей положения элементов от времени и их экспорт в текстовые файлы (Simcenter Amesim);
- построение проточной области системы очистки на основе геометрической конструкторской модели (SpaceClaim);
- построение конечно-объемной сетки по геометрии проточной области (Fluent Meshing);
- настройка аэродинамической модели, в которую входит импорт результатов кинематического расчета в качестве законов движения элементов очистки (Ansys Fluent);
- аэродинамическое моделирование системы очистки (Ansys Fluent);
- обработка и оценка результатов моделирования (Ansys Fluent).

Объект исследования. Рассмотрим более детально основные этапы процесса аэродинамического моделирования системы очистки на примере зерноуборочного комбайна производства ОАО «Гомсельмаш».

Система очистки настроена на уборку пшеницы согласно рекомендациям инструкции по эксплуатации. Размер зазора открытия жалю-

зей решет: верхнее решето 4–12 мм, удлинитель верхнего решета 6–9 мм, нижнее решето 5–8 мм. Частота вращения центробежного вентилятора 630 об/мин.

Частота вращения эксцентрикового вала привода механизма системы очистки составляет 270 об/мин.

Рассматриваемая проточная область в системе очистки комбайна ограничена соломосепаратором и молотильно-сепарирующим устройством (МСУ). Забор воздуха осуществляется в зоне МСУ и по внутреннему диаметру крыльчатки центробежного вентилятора. Выпуск воздуха выполнен на выходе из системы очистки.

Кинематический расчет. Механизм очистки зерноуборочного комбайна представляет собой плоский рычажный механизм второго класса по классификации Л.В. Асура [8], схема которого приведена на рисунке 2. Привод очистки осуществляется от эксцентрикового приводного вала 1, который в свою очередь приводится в движение от клиноременной передачи (на схеме не показано). Вращательное движение эксцентрикового приводного вала 1 преобразуется с помощью шатуна 2 в возвратно вращательное движение двуплечего рычага 3. От рычага 3 приводятся в движение верхнее 5 и нижнее 4 решета, а также стрясная 6 и скатная 7 доски. Решета и доски установлены на подвесах и совершают сложное плоскопараллельное движение. При этом доска скатная 7 и решето верхнее 5 движутся в противофазе по отношению к доске стрясной 6 и решету нижнему 4.

Заштрихованной зоной на рисунке 2 обозначена проточная область системы очистки, в границах которой в дальнейшем будет выполнено аэродинамическое моделирование.

Расчетная модель механизма очистки, реализованная средствами моделирования Simcenter Amesim [9, 10] согласно схеме работы механизма очистки (см. рисунок 2), приведена на рисунке 3. Представленная расчетная модель разработана с использованием встроенных компонентов библиотек 1D и 2D Mechanical для описания механической части и отслеживания положения элементов очистки (сенсоры положения 8), а также

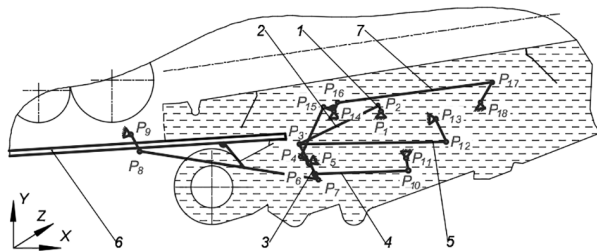


Рисунок 2 — Схема механизма очистки: 1 — вал приводной; 2 — шатун; 3 — рычаг двуплечий; 4 — решето нижнее; 5 — решето верхнее; 6 — доска стрясная; 7 — доска скатная; P1...P18 — шарниры

Figure 2 — Scheme of cleaning mechanism: 1 — drive shaft; 2 — connecting rod; 3 — double-shouldered lever; 4 — lower screen; 5 — upper screen; 6 — shaking board; 7 — slope board; P1...P18 — joints

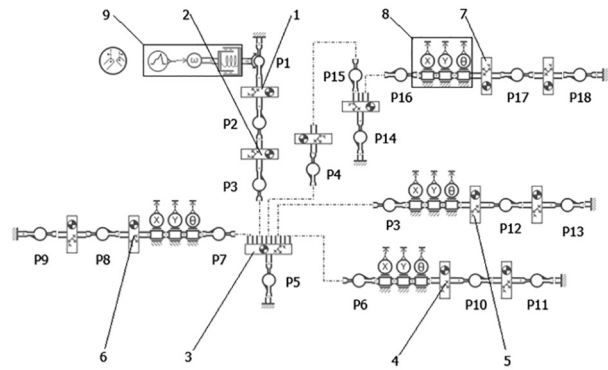


Рисунок 3 — Расчетная модель механизма очистки в Simcenter Amesim: 1 — вал приводной; 2 — шатун; 3 — рычаг; 4 — решето нижнее; 5 — решето верхнее; 6 — доска стрясная; 7 — доска скатная; 8 — сенсоры положения; 9 — привод; P1...P18 — шарниры

Figure 3 — Calculation model of the cleaning mechanism in Simcenter Amesim: 1 — drive shaft; 2 — connecting rod; 3 — lever; 4 — lower screen; 5 — upper screen; 6 — shaking board; 7 — slope board; 8 — position sensors; 9 — joints

библиотеки Signal-Control для задания закона движения приводного вала 1 (привод 9). Между элементами очистки стационарными точками описаны кинематические связи 9 с одной вращательной степенью свободы вокруг оси Z перпендикулярной продольной плоскости очистки. Решето, доски и рычаги смоделированы с помощью компонента твердого тела библиотеки 2D Mechanical с указанием координат точек механизма, центров тяжести и масс-инерционных характеристик элементов согласно конструкторской 3D-модели.

Кинематический расчет механизма очистки в Simcenter Amesim выполнялся итерационным решателем типа Regular с допуском сходимости 10^{-7} . Дискретность вывода данных для их последующего экспорта принята $2 \cdot 10^{-4}$ с для согласования с аэродинамическим расчетом, у которого соответствующий размер шага по времени.

Достоверность результатов расчета Simcenter Amesim проводилась по аналитической модели механизма очистки, выполненной векторным способом описания механизмов. Данный способ нашел широкое применение при проектировании механизмов в конструкторском бюро ОАО «Гомсельмаш». Описание и реализация векторного способа представлены в работе [11] на примере кинематического анализа привода системы очистки зерноуборочного комбайна КЗС-10К.

В результате кинематического расчета механизма очистки были получены линейные и угловые перемещения, скорости, ускорения элементов в характерных точках.

В качестве примера результатов кинематического расчета на рисунках 4 и 5 приведены зависимости положения оси подвеса верхнего решета (шарнира P3) относительно оси вращения приводного вала (шарнира P1) и угла поворота решета за 0,22 с, что соответствует одному обороту приводного вала. Перемещение шарнира P3 по осям

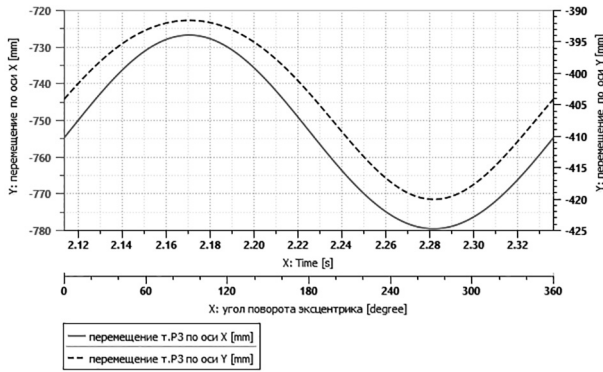


Рисунок 4 — Координаты положения шарнира P3 за один оборот приводного вала
Figure 4 — Position coordinates of joint P3 per revolution of the drive shaft

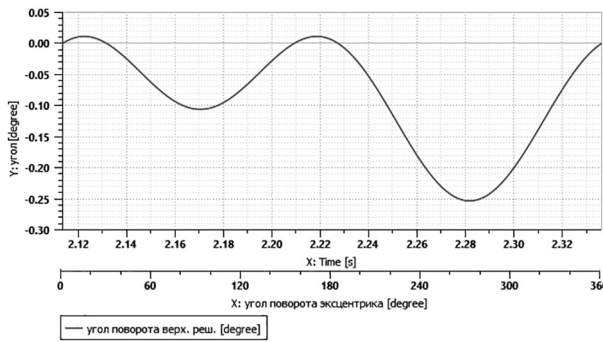


Рисунок 5 — Угол поворота верхнего решета за один оборот приводного вала
Figure 5 — Angle of rotation of the upper screen per revolution of the drive shaft

имеет синусоидальный закон движения, а угол поворота верхнего решета имеет в свою очередь более сложный закон движения.

Для дальнейшего аэродинамического моделирования системы очистки результаты кинематического расчета посредством внутренних инструментов Simcenter Amesim были экспортированы в файлы в формате .txt. Так как в последующем моделировании учувствуют только решета и доски, экспортировались данные только для характерных точек, в полной мере описывающие положение и ориентацию данных элементов, т. е. перемещения по осям X и Y и поворот вокруг оси Z . Для решета верхнего это шарнир P3, для решета нижнего — P6, для доски стрясной — P7, для доски скатной — P16.

Аэродинамическое моделирование. Моделирование воздушных потоков проточной области системы очистки выполнялось в двумерной постановке, что существенно снижает требования к вычислительным ресурсам, а также сокращается по времени. Задача решалась в нестационарной постановке, так как в модели присутствует интерфейс скользящей сетки и движения элементов очистки с перестроением конечно-объемной сетки.

Размер шага расчета по времени Δt был рассчитан согласно рекомендациям [12]. Для интерфейса скользящей сетки:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{v_m},$$

где Δs — размер элемента сетки в скользящем интерфейсе; v_m — относительная скорость движения движущей зоны.

Для проточных областей:

$$\Delta t \leq \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{v},$$

где L — характерный размер элемента сетки по направлению потока; v — скорость воздушного потока.

Лимитирующим значением шага расчета по времени в данной модели является интерфейса скользящей сетки, размер шага составил $2 \cdot 10^{-4}$ с.

Подробное описание методики создания упрощенной 2D-модели, в которую входит построение расчетной численной модели и постановка граничных условий и настройка решателя Ansys Fluent [13, 14], обработка и анализ полученных результатов, а также оценка адекватности модели, приведено в работе [15].

Сечение проточной области системы очистки комбайна представлено на рисунке 6. Контрольные точки замеров скоростей воздушного потока т.1...т.30 располагаются над стрясной доской 2, первым 4 и вторым 5 каскадами верхнего решета, его удлинителем 6, а также нижним решетом 7 на расстоянии 80 мм от их среднего положения.

Для моделирования движения элементов очистки использовалась функция Dynamic Mesh, обеспечивающая перемещение границ и перестроение конечно-объемной сетки [16]. В качестве методов моделирования движения сетки применены функции сглаживания Smoothing и локальное перестроение сетки Remeshing. Функция Smoothing обеспечивает движение зоны сетки с перемещением узлов без изменения их количества и связанности. Но так как смещения границ подвижных зон

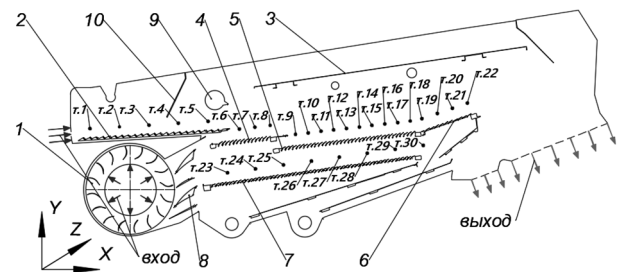


Рисунок 6 — Сечение проточной области системы очистки комбайна: 1 — вентилятор центробежный; 2 — доска стрясная; 3 — доска скатная; 4 — первый каскад верхнего решета; 5 — второй каскад верхнего решета; 6 — удлинитель верхнего решета; 7 — решето нижнее; 8 — элероны; 9 — кожух шнека домолата; 10 — бельтинг; т.1–т.30 — точки замеров

Figure 6 — Section of the flow area of the combine harvester cleaning system: 1 — centrifugal fan; 2 — shaking board; 3 — slope board; 4 — first cascade of the upper screen; 5 — second cascade of the upper screen; 6 — upper screen extension; 7 — lower screen; 8 — ailerons; 9 — auger housing; 10 — belting; т.1–т.30 — measuring points

велики, по сравнению локальными размерами сетки, качество ячеек может ухудшиться или ячейки могут стать вырожденными, что приведет к проблемам сходимости решения задачи. Поэтому дополнительно применена функция Remeshing, которая обеспечивает локальное перестроение сетки в случае неудовлетворения ее качества заданным параметрам. В качестве алгоритма перестроения сетки выбран Unified Remeshing с критерием перестроения сетки по асимметрии ячеек Skewness, установленным на 0,7 [12].

Сходимость решения на каждой итерации оценивалась по критерию уровня среднеквадратических невязок уравнения неразрывности и моментов количества движения, который принимался равным 10^{-4} .

В качестве законов движения элементов очистки использованы результаты кинематического расчета, которые были импортированы с помощью функции Profiles. Перед импортом данных кинематического расчета экспортированные файлы из Simcenter Amesim в формате .txt были подвергнуты обработке. Структура файла данных была приведена к виду, описанному на рисунке 7.

В данной структуре n это количество точек, определяющих положение элемента очистки, x , y , θ , z — координаты и угол в определенный момент времени $time$ соответственно. При обработке файлов данные по положению элементов во время разгона механизма в течение 2 с были исключены из диапазона выборки.

Результаты кинематического расчета были назначены в качестве законов движения решет и доок системы очистки соответственно.

Запись результатов аэродинамического моделирования выполнялась после стабилизации колебания скоростей воздушного потока в контрольных точках на каждой итерации расчета в течение 2 с.

Результаты исследования. Для сравнительной оценки распределения воздушных потоков в проточной области также был выполнен расчет при неподвижных элементах очистки, зафиксированных в среднем положении. В результате расчетов были получены значения скоростей и направлений воздушного потока. Значения вычисленных величин в контрольных точках т.1...т.30 (см. рисунок 6) после среднеквадратичного усреднения представлены в таблице.

Зависимости изменения скорости воздушного потока по длине очистки над стрясной доской, верхним решетом, удлинителем и нижним решетом приведены на рисунке 8.

```
((profile-name n point)
(time a1 a2 ... an)
(x b1 b2 ... bn)
(y c1 c2 ... cn)
(theta_z d1 d2 ... dn))
```

Рисунок 7 — Структура файла профиля движения
Figure 7 — Structure of motion profile file

Таблица — Результаты моделирования
Table — Modelling results

№ контрольной точки	Без движения решет		С движением решет	
	Скорость, м/с	Угол, град.	Скорость, м/с	Угол, град.
Доска стрясная				
т.1	8,3	-177,2	8,7	-178,2
т.2	8,5	-177,5	8,8	-177,3
т.3	8,9	-176,0	9,2	-176,4
т.4	4,7	-164,8	5,5	-164,6
т.5	3,9	-178,4	3,6	-189,8
Решето верхнее, первый каскад				
т.6	17,4	24,1	17,1	20,9
т.7	13,8	31,5	14,9	33,0
т.8	13,1	34,0	12,4	33,2
Решето верхнее, второй каскад				
т.9	13,7	33,1	12,5	31,1
т.10	9,4	27,0	10,6	23,5
т.11	5,7	22,7	7,6	18,7
т.12	4,3	20,0	6,3	15,5
т.13	4,0	16,5	6,0	13,9
т.14	3,9	14,7	5,8	12,6
т.15	4,0	13,8	5,7	11,5
т.16	4,2	11,5	5,9	11,4
т.17	4,3	9,9	6,3	12,4
т.18	4,3	9,8	6,7	13,9
Удлинитель верхнего решета				
т.19	4,6	12,7	7,1	15,3
т.20	5,9	17,4	8,1	19,4
т.21	7,8	20,0	9,9	20,2
т.22	10,5	16,0	12,4	14,0
Решето нижнее				
т.23	2,1	-150,3	2,3	-150,1
т.24	14,1	28,8	13,4	28,8
т.25	16,7	19,2	16,0	19,3
т.26	12,2	13,0	12,3	12,7
т.27	9,0	9,1	9,6	8,4
т.28	8,6	7,3	9,6	7,3
т.29	9,4	5,5	10,0	6,6
т.30	11,0	-1,3	9,1	-1,3

Примечание: *относительно оси X («-» — по часовой стрелке, «+» — против часовой стрелки).

На рисунках 9 и 10 изображены поля распределения скоростей воздушного потока для вариантов с неподвижными и подвижными элементами очистки. Выносками А и В показаны фрагменты полей скоростей с зонами наибольшего отличия в течении воздушного потока. Представленная визуализация основана на результатах математического моделирования, усредненных по времени.

По результатам аэродинамического моделирования параметры воздушного потока над стрясной доской (т.1...т.5) при реализации ее движения имеют существенные отличия от стационарной модели на конце доски в точках т.4...т.5. Разница в скоростях достигает 17 %. Анализируя поля скоростей (см. рисунки 9 и 10, зона А), видно, что

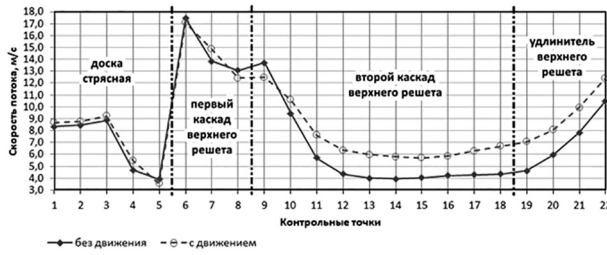


Рисунок 8 — Распределение скоростей потока в проточной области: *a* — над стрясной доской, верхним решетом и удлинителем т.1...т.22; *b* — над нижним решетом т.23...т.30
Figure 8 — Flow velocity distribution in the flow area: *a* — above the shaking board, upper screen and extension t.1...t.22; *b* — above the lower screen t.23...t.30

поток более интенсивно обтекает кожух шнека домолота сверху и его скорость непосредственно под кожухом падает.

Над первым каскадом верхнего решета (т.6...т.8) разница в скоростях воздушного потока не превышает 8 %. Здесь поток достигает максимальных значений скоростей над решетатами, а их

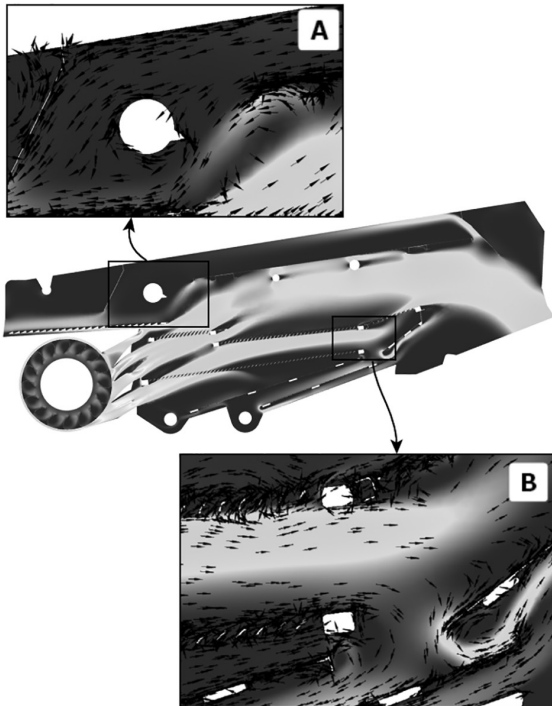
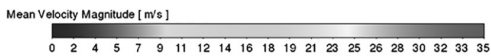


Рисунок 9 — Поля скоростей воздушного потока в проточной области без движения решет
Figure 9 — Air flow velocity fields in the flow area without screen movement

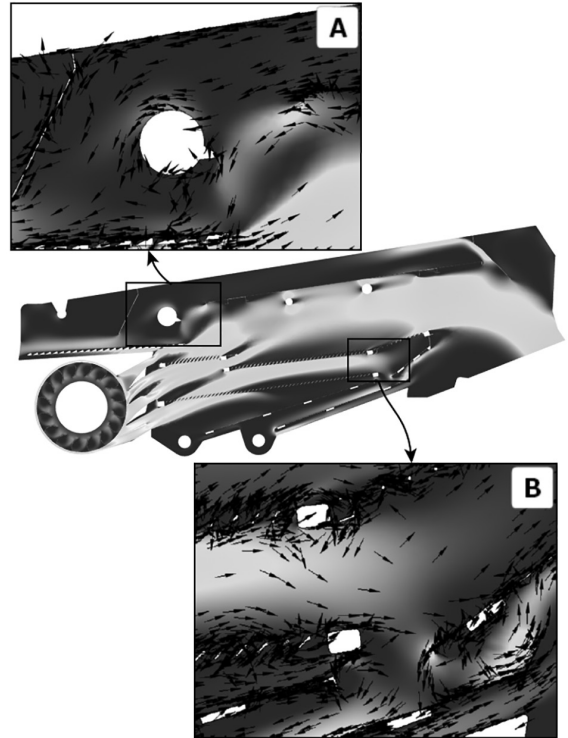
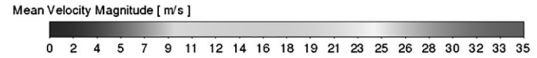


Рисунок 10 — Поля скоростей воздушного потока в проточной области с движением решет
Figure 10 — Air flow velocity fields in the flow area with screen movement

движение не оказывает значительного влияния на линии тока (см. рисунки 9 и 10).

Рассматривая воздушные потоки над вторым каскадом верхнего решета (т.9...т.18) и его удлинителем (т.19...т.22), можем наблюдать значительную разницу как в скоростях до 50 %, так и в направлении тока до 4,5°. Под вторым каскадом верхнего решета при его движении наблюдается падение скорости воздушного потока по длине (см. рисунки 9 и 10, зона *B*). Колебательные движения решет приводят к более активному продуванию жалюзи и придают потоку неравномерный характер.

В контрольных точках т.23...т.29 отличия значений скоростей воздушного потока для вариантов подвижного и зафиксированного нижнего решета составляют около 10 %. На конце нижнего решета в точке т.30 с учетом его движения наблюдается застойная зона (см. рисунок 10, зона *B*) и, как следствие, падение скорости потока на 18 %.

Отличия значений скоростей над вторым каскадом верхнего решета и его удлинителем в модели с неподвижными элементами в данном исследовании и работе [14] связано с тем, что контрольные точки были смещены выше для предотвращения их пересечения с решетатами при выполнении расчета с подвижными элементами.

Сопоставление результатов моделирования системы очистки с подвижными и с зафиксированными элементами показывает значительную

разницу в скоростях воздушных потоков в контрольных точках и в общей картине течения в проточной области очистки. В наибольшей степени это наблюдается над вторым каскадом верхнего решета, где происходит основное разделение вороха на фракции. Неправильная оценка скоростей воздушного потока в данном случае приведет к выносу зерна из системы очистки и, как следствие, к повышенным потерям.

По результатам выполненных исследований следует вывод, что движения решет и досок системы очистки оказывают существенное влияние на аэродинамические потоки в проточной области очистки зерноуборочного комбайна.

Заключение. Разработанная и представленная в настоящей работе методика позволяет выполнить оценку воздушных потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна с учетом движения ее элементов в полном соответствии с кинематикой привода.

По результатам сравнительных расчетов аэродинамики системы очистки с подвижными элементами и зафиксированными в среднем положении воздушные потоки имеют существенные отличия. Наиболее ярко эта картина проявляется над вторым каскадом верхнего решета. В контрольных точках данной зоны при учете движения решета скорости потока превышают значения скоростей без учета движения решета до 50 %, а отклонения направления потока — до 4,5°.

Следовательно, аэродинамическое моделирование системы очистки без учета движения ее элементов не отображает реальной картины течения воздушных потоков в проточной области. Результаты такого моделирования не могут быть использованы непосредственно при проектировании и оптимизации системы очистки. Однако учитывая, что экспериментальные исследования системы воздушных потоков очистки в динамике проблематичны и не всегда представляются возможными, моделирование с фиксированными элементами может выступать в качестве предварительного расчета для проверки адекватности модели по результатам экспериментальных замеров в очистке также с неподвижными элементами.

В дальнейших исследованиях системы очистки зерноуборочного комбайна разработанная методика моделирования аэродинамики проточной области очистки будет реализована с применением метода дискретных элементов (DEM) в 3D-постановке для анализа совместного поведения воздушных потоков и вороха.

Список литературы

1. Фролов, К.В. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / К.В. Фролов. — М.: Машиностроение, 2002. — Т. IV-16: Сельскохозяйственные машины и оборудование. — 720 с.
2. Miu, P. Combine harvesters: theory, modeling, and design / P. Miu. — Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016. — 436 p.
3. Experimental study on the influence of working parameters of centrifugal fan on airflow field in cleaning room / C. Zhang, D. Geng, H. Xu [et al.] // Agriculture. — 2023. — Vol. 13, iss. 7. — DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071368>.
4. Operation technological process research in the cleaning system of the grain combine / I. Badretdinov, S. Mudarisov, E. Khasanov [et al.] // Journal of Agricultural Engineering. — 2021. — Vol. 52, no. 2. — DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2021.1129>.
5. Бадретдинов, И.Д. Научное обоснование и совершенствование пневматических систем сельскохозяйственных машин на основе моделирования технологического процесса / И.Д. Бадретдинов, С.Г. Мударисов // Вестник НГИЭИ. — 2019. — № 9(100). — С. 5–16.
6. Korn, C. Coupled CFD-DEM simulation of separation process in combine harvester cleaning devices / C. Korn, T. Herlitzius // Agriculture Engineering. — 2017. — Vol. 72, no. 5. — Pp. 247–261. — DOI: <https://doi.org/10.15150/lt.2017.3170>.
7. Turbulent flow characteristics of the cleaning wind in combine harvester / Y. Ueka, M. Matsui, E. Inoue [et al.] // Engineering in Agriculture, Environment and Food. — 2012. — Vol. 5, iss. 3. — Pp. 102–106. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1881-8366\(12\)80022-X](https://doi.org/10.1016/S1881-8366(12)80022-X).
8. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для втузов / И.И. Артоболевский. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1988. — 640 с.
9. Digital Twin Development. An Introduction to Simcenter Amesim / F.U. Rückert, M. Sauer, T. Liimatainen, D. Hübner. — Springer Cham, 2023. — 125 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25692-9>.
10. Гимадиев, А.Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах: электрон. учеб. пособие / А.Г. Гимадиев, П.И. Грешняков, А.Ф. Синяков. — Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. — URL: <https://elck.ru/3ErUr4> (дата обращения: 07.07.2024).
11. Джасов, Д.В. Анализ кинематики механизма привода системы очистки зерноуборочного комбайна КЗС-10К / Д.В. Джасов, А.Н. Вьрский, Ю.В. Чупрынин // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2018. — Вып. 7. — С. 79–82.
12. Moukalled, F. The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish. — Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2016. — 791 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
13. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова [и др.]. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
14. Основы работы в Ansys 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.
15. Калиновский, А.А. Аэродинамический расчет системы очистки зерноуборочного комбайна в 2D-постановке / А.А. Калиновский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — №2 (67). — С. 53–60. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-53-60>.
16. Зиганшин, А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: методич. пособие для учеб. и науч. работы студентов направления 270800 — «Строительство» (квалификация «бакалавр» и «магистр») и аспирантов специальности 05.23.03 / А.М. Зиганшин. — Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. — 79 с.

KALINOUSKI Aliaksandr A., M. Sc. in Eng.
Leading Design Engineer
E-mail: kiodpan@gomsmash.by
Scientific and Technical Centre of Combine Harvesters Manufacturing OJSC “Gomsmash”, Gomel, Republic of Belarus

Received July 11, 2024.

ESTIMATION OF THE SCREEN MOVEMENT INFLUENCE ON AERODYNAMIC FLOWS IN THE COMBINE HARVESTER CLEANING SYSTEM

The paper examines aerodynamic modeling of air flows in the cleaning system of a combine harvester. A methodology has been developed for modeling the cleaning system, taking into account the movement of its elements, such as screens and boards, using the Simcenter Amesim and Ansys Fluent software packages. The main stages of the process of aerodynamic modeling of the cleaning system are considered using the example of the combine harvester produced by OJSC "Gomselmash". A comparative analysis of air flows in a cleaning system with moving elements and when they are fixed in the middle position in a 2D formulation was performed. The results of numerical modeling of the aerodynamics of air flows are presented in the form of numerical values at control points, and the velocity fields and streamlines of the air flow in the flow area are illustrated. The results of the comparative analysis showed that the discrepancy between the speeds and directions of the air flow at the control points is 50 % and 4.5°, respectively. It is concluded that the movements of the cleaning elements during its aerodynamic modeling must be taken into account in order to obtain a real pattern of the air flows in the flow area. The results of modeling with fixed cleaning elements can act as a preliminary calculation to check the adequacy of the model based on the results of experimental measurements in cleaning also with fixed elements. The developed methodology for modeling the aerodynamics of the cleaning flow area will be used in further studies of the cleaning system of the combine harvester to analyze the combined behavior of air flows and heaps.

Keywords: cleaning system, flow area, kinematic calculation, aerodynamic modelling, air flows, combine harvester

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-97-104>

References

1. Frolov K.V. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-16. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i oborudovanie* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-16. Agricultural machinery and equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 720 p. (in Russ.).
2. Miu P. *Combine harvesters: theory, modeling, and design*. Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 436 p.
3. Zhang C., Geng D., Xu H., Li X., Li D., Ming J., Li D., Wang Q. Experimental study on the influence of working parameters of centrifugal fan on airflow field in cleaning room. *Agriculture*, 2023, vol. 13, iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071368>.
4. Badretdinov I., Mudarisov S., Khasanov E., Nasurov R., Tuktarov M. Operation technological process research in the cleaning system of the grain combine. *Journal of agricultural engineering*, 2021, vol. 52, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2021.1129>.
5. Badretdinov I.D., Mudarisov S.G. Nauchnoe obosnovanie i sovershenstvovanie pnevmaticheskikh sistem sel'skokhozyaystvennykh mashin na osnove modelirovaniya tekhnologicheskogo protsessa [Scientific justification and improvement of pneumatic systems for agricultural machines based on the simulation of technological process]. *Vestnik NGIEI*, 2019, no. 9(100), pp. 5–16 (in Russ.).
6. Korn C., Herlitzius T. Coupled CFD-DEM simulation of separation process in combine harvester cleaning devices. *Agriculture engineering*, 2017, vol. 72, no. 5, pp. 247–261. DOI: <https://doi.org/10.1515/agt.2017.3170>.
7. Ueka Y., Matsui M., Inoue E., Mori K., Okayasu T., Mitsuoaka M. Turbulent flow characteristics of the cleaning wind in combine harvester. *Engineering in agriculture, environment and food*, 2012, vol. 5, iss. 3, pp. 102–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1881-8366\(12\)80022-X](https://doi.org/10.1016/S1881-8366(12)80022-X).
8. Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. (in Russ.).
9. Rückert F.U., Sauer M., Liimatainen T., Hübner D. *Digital twin development. An introduction to Simcenter Amesim*. Springer Cham, 2023. 125 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25692-9>.
10. Gimadiev A.G., Greshnyakov P.I., Sinyakov A.F. *LMS Imagine.Lab AMESim kak effektivnoe sredstvo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v mekhatronnykh sistemakh* [LMS Imagine.Lab AMESim as an effective tool for modelling dynamic processes in mechatronic systems]. Samara, SamarSKIY nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk Publ., 2014. Available at: <https://clck.ru/3ErUr4> (accessed July 7, 2024) (in Russ.).
11. Dzhasov D.V., Vyrskiy A.N., Chuprynin Yu.V. Analiz kinematiki mekhanizma privoda sistemy ochistki zernouborochnogo kombayna KZS-10K [Analysis of the drive mechanism kinematics of the purifying system of the grain harvesting combine "PALESSE GS10"]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 79–82 (in Russ.).
12. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab*. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 2016. 791 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
13. Bruyaka V.A., et al. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench* [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara, SamarSKIY gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2010. 271 p. (in Russ.).
14. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v Ansys 17* [Basics of working in Ansys 17]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 210 p. (in Russ.).
15. Kalinouski A.A. Aerodinamicheskiy raschet sistemy ochistki zernouborochnogo kombayna v 2D postanovke [Aerodynamic calculation of the combine harvester cleaning system in 2D formulation]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 4(65), pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-53-60> (in Russ.).
16. Ziganshin A.M. *Vychislitel'naya gidrodinamika. Postanovka i reshenie zadach v protsessore Fluent* [Computational hydrodynamics. Formulation and solution of problems in Fluent processor]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy arkhitekturostroitelnyy universitet Publ., 2013. 79 p. (in Russ.).