

М. И. Курилович, В. В. Голдыбан, В. П. Селиванова

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

Минск, Республика Беларусь

E-mail: labpotato@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ СТРУЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Проведено исследование взаимодействия сжатой струи воздуха с клубнем картофеля в зоне вальцово-подающего конвейера с целью определения оптимальных параметров форсунки и воздушного потока для надежного отделения некондиционных клубней при минимальных энергозатратах. В качестве базового варианта рассмотрена цилиндрическая форсунка диаметром 5 мм, расположенная без смещения относительно оси клубня. Моделирование выполнено в среде FlowVision с использованием сжимаемой модели течения, уравнений Навье-Стокса и турбулентной модели Spalart-Allmaras (SA). Получены поля давления и скорости, линии тока, временные зависимости проекций аэродинамических сил на оси X и Y для давления 4–8 атм.

Ключевые слова: моделирование, картофель, форсунка, воздушный поток, автоматическая сортировальная машина, вальцово-подающий конвейер.

M. I. Kurylovich, V. V. Holdyban, V. P. Selivanova

RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: labpotato@mail.ru

SIMULATION OF THE PROCESS OF SEPARATION OF SUB-CONDITIONED POTATO TUBERS BY A JET OF COMPRESSED AIR

Abstract. This paper presents a study of the interaction of a compressed air jet with a potato tuber in the area of a roller conveyor. The aim is to determine the optimal nozzle and airflow parameters for the reliable separation of substandard tubers with minimal energy consumption. A cylindrical nozzle with a diameter of 5 mm, positioned without offset from the tuber axis, is used as the baseline. The simulation was performed in the FlowVision environment using a compressible flow model, the Navier-Stokes equations, and the Spalart-Allmaras turbulence model (SA). Pressure and velocity field, streamlines, and time dependences of aerodynamic forces projections on the X and Y axes for pressures of 4–8 atm are obtained.

Keywords: simulation, potato, nozzle, airflow, automatic sorting machine, roller conveyor.

Введение

Автоматизация сортировочных процессов в сельском хозяйстве является одним из ключевых направлений повышения эффективности производства и качества продукции. В современных линиях сортировки картофеля задача оперативного и точного отделения некондиционных клубней традиционно решается вручную или с использованием механических устройств низкой адаптивности, что ограничивает пропускную способность, повышает трудозатраты. Применение импульсных воздушных форсунок в сочетании с оптической системой распознавания дефектов представляет собой перспективное техническое решение, позволяющее исключить ручной труд, повысить производительность линии и обеспечить более мягкое обращение с продукцией.

Численное моделирование взаимодействия сжатой струи воздуха с поверхностью клубня дает возможность детально изучить поля давления и скорости, характер ударного импульса и распределение аэродинамических сил. Эти данные необходимы для обоснования геометрии форсунки, выбора ее положения относительно клубня и разработки алгоритмов импульсной

подачи, которые минимизируют энергозатраты при гарантированном отделении. Важными инженерными критериями являются величины проекций сил по осям, время фиксирования установившегося режима, локализация пятна удара и оценка требуемой мощности компрессора.

В работе выполнено комплексное CFD-исследование базового варианта – цилиндрической форсунки диаметром 5 мм, установленной без смещения относительно оси клубня. Моделирование проведено в нестационарной постановке с учетом сжимаемости воздуха и турбулентности (Spalart-Allmaras), с локальным сгущением сетки в области сопла и вокруг клубня. Рассмотрены режимы подачи с давлением на входе форсунки от 4 до 8 атм; для каждого режима получены поля давления и скорости, линии тока, временные зависимости проекций аэродинамических сил и интегральные характеристики расхода и скорости на входе.

Основная часть

Задача исследования разделялась на три взаимосвязанных направления: воспроизведение рабочих полей скорости и давления при ударе струи по клубню, определение геометрии форсунки и ее расположения, а также выбор оптимальных параметров воздушного потока, обеспечивающих гарантированное удаление при минимальной энергетической нагрузке. В качестве базового варианта была исследована цилиндрическая форсунка диаметром 5 мм, расположенная без смещения относительно оси клубня. Ниже приведена геометрическая схема, определяющая взаимное расположение элементов и ключевые размеры зоны взаимодействия; она служит исходной основой для генерации расчетной области и анализа газодинамики (рисунок 1).

Выбранная конфигурация обеспечивает симметричное обтекание клубня и позволяет сфокусировать струю на его центральной зоне. Это критично для повторяемости результата отделения и минимизации случайных отклонений траектории.

В расчетах принята модель сжимаемого воздуха с решением уравнений Навье – Стокса. Турбулентность описана моделью Spalart-Allmaras (SA) с логарифмическим законом у стенки. Опорные величины: абсолютное давление воздуха $P_{аб} = 101\,330$ Па (1 атм) и температура $T = 293$ К (25 °С). Теплоперенос учтен через параметр H (перенос энтальпии), что позволяет корректно учитывать тепловые эффекты при сжатии и расширении в струе [1].

Граничные условия заданы следующим образом. На входе форсунки применено граничное условие «вход/выход» с параметризуемым давлением на входе в режимах 4–8 атм (данный интервал был определен экспериментально). На выходе расчетной области установлен свободный выход с атмосферным статическим давлением. Клубень, корпус форсунки и вальцы заданы как твердые стенки с логарифмическим законом у стенки. Плоскость симметрии задана как условие симметрии с проскальзыванием.

Расчет выполнялся в нестационарной постановке с использованием неявной схемы второго порядка по времени. Сетка сформирована с локальным сгущением в области форсунки, ядра

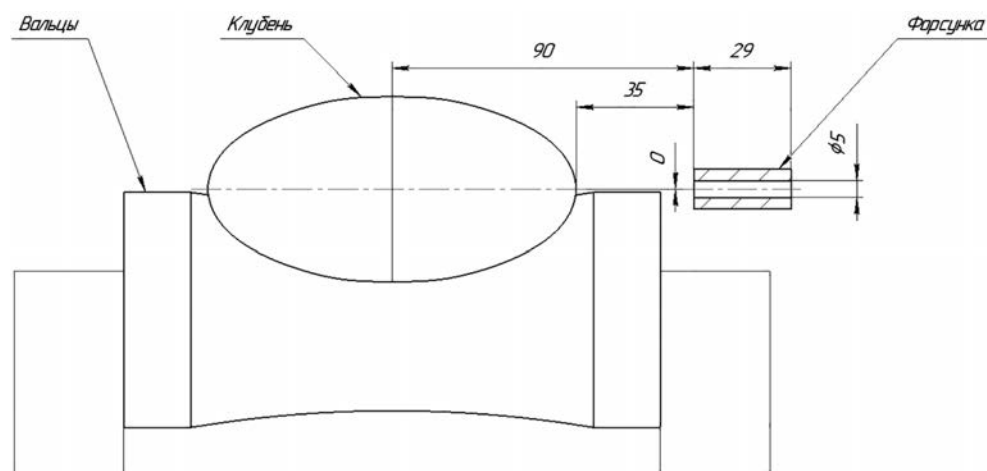


Рисунок 1 – Схема расположения форсунки относительно клубня

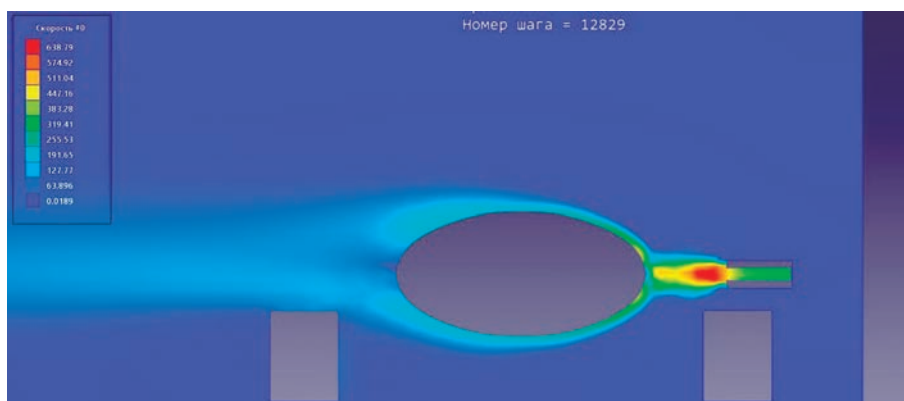


Рисунок 2 – Распределение давления в плоскости симметрии, Па

струи и вокруг клубня, при этом для SA-модели целевой диапазон y^+ у стенок принят равным 30–100, вблизи сопла сформирована пристенная призматическая структура. Временной шаг выбирался с учетом критерия Куранта – Фридрихса – Леви (CFL): в критических областях поддерживались значения CFL порядка 1 для точного разрешения фронтов, а в целом допускалось увеличение до ≈ 5 за счет неявной интеграции при контроле точности. Сходимость считалась достигнутой при снижении нормированных невязок уравнений массы, импульса (компоненты X, Y, Z), энергии (энтальпия) и уравнения Spalart – Allmaras до порядка 10^{-4} – 10^{-6} и при стабилизации интегральных метрик во времени.

Для понимания структуры течения и локализации силового воздействия были проанализированы поля давления и скорости, а также линии потока в плоскости симметрии. На рисунке 2 показано распределение статического давления в плоскости симметрии. В зоне прямого удара струи по поверхности клубня фиксируется максимум давления, далее вдоль оси потока формируется выраженный градиент, связанный с ускорением и расширением струи и развитием зон сдвига. За клубнем наблюдается область пониженного давления, где формируются рециркуляционные структуры.

Распределение давления на поверхности клубня концентрируется в центральном пятне удара и снижается к краям обдуваемой зоны; такая картина соответствует ожидаемому при осевом попадании струи из цилиндрического сопла и определяет локальную нагрузку, преодолевающую удерживающие силы контакта с вальцами. На выходе сопла формируется узкое ядро струи с вы-

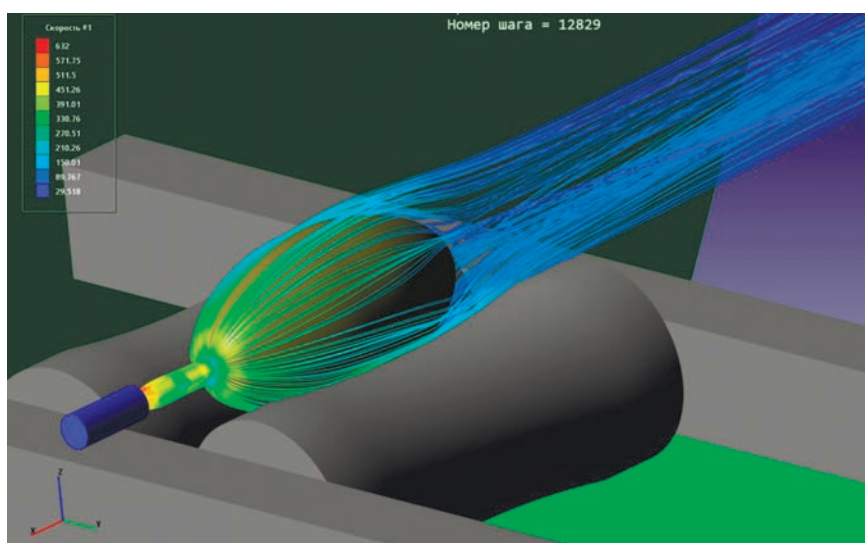


Рисунок 3 – Линии тока воздушного потока из форсунки, м/с

сокими скоростями (порядка 300 м/с в исследованных режимах). При взаимодействии с клубнем струя локально тормозится в зоне нормального удара и частично ускоряется в зоне обтекания, что видно по карте скоростей.

Линии тока (стримлайны), представленные на рисунке 3, демонстрируют характерное ударное взаимодействие: часть потока отражается и отклоняется вверх и в стороны, формируя вихревые зоны позади клубня. Такая топология важна для оценки устойчивости отделения и возможного влияния струи на соседние объекты на конвейере.

Ключевым показателем эффективности является интегральная сила, действующая на клубень, и ее компоненты по осям X (продольная, вдоль транспортирования) и Y (перпендикулярная, «поднимающая» от вальцов). Для давлений 4–8 атм были получены временные зависимости (рисунки 4 и 5), отражающие характер ударного импульса и последующее затухание колебаний. На графиках наблюдается резкий начальный пик силы в первые миллисекунды, соответствующий удару фронта струи, после чего сила снижается и переходит в режим затухающего взаимодействия с установлением устойчивого уровня. В качестве иллюстрации формы кривой и временного отклика представлены два характерных графика для режима 4 атм: проекция силы на ось X (рисунок 4) и проекция на ось Y (рисунок 5).

Резкий начальный пик (порядка 10 Н) соответствует удару фронта струи; далее наблюдается быстрый спад и автоколебания, стабилизирующиеся в течение 0,01–0,014 с на уровнях, близких к средним значениям из интегральной таблицы.

Начальный пик сменяется затухающими колебаниями; устойчивый уровень силы по оси Y при 4 атм составляет около 10,9 Н. Эта величина определяет способность струи срывать клубень с линии при минимальном исследованном давлении.

Аналогичные закономерности наблюдаются и при давлении в 5, 6, 7 и 8 атм. Различие заключается в величине установившихся сил:

- при 5 атм $X \approx 5,2$ Н, $Y \approx 13,5$ Н;
- при 6 атм $X \approx 6,3$ Н, $Y \approx 15,3$ Н;
- при 7 атм $X \approx 7,2$ Н, $Y \approx 17,6$ Н;
- при 8 атм $X \approx 8,7$ Н, $Y \approx 19,4$ Н.

По всем режимам сила по оси Y стабильно превосходит силу по оси X , что отражает доминирующую «поднимающую» роль потока в процессе отделения клубня от вальцов. Начальный ударный пик в первые миллисекунды задает основной импульс, после чего система входит в режим затухающего взаимодействия и установившегося воздействия на клубень.

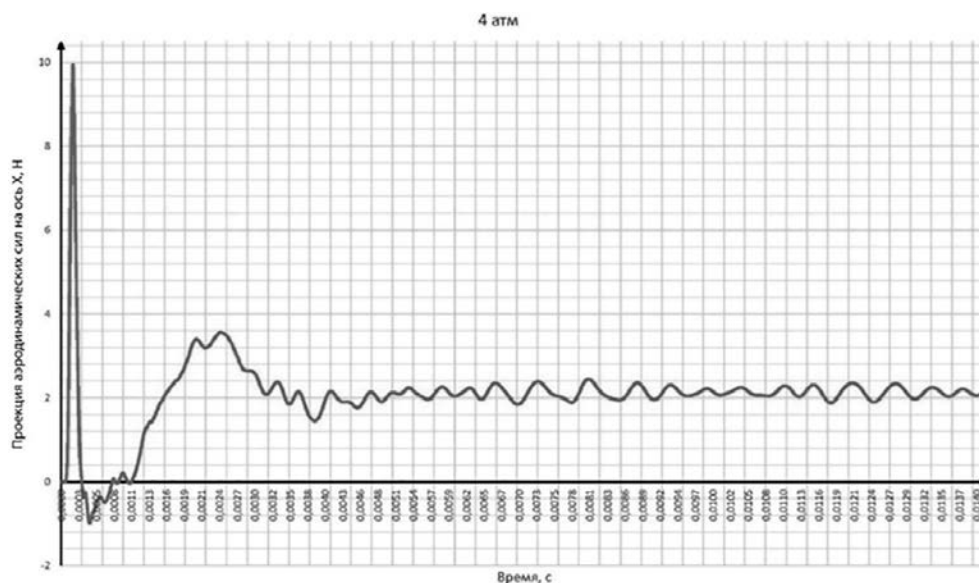


Рисунок 4 – График зависимости проекции аэродинамических сил на ось X от времени, 4 атм

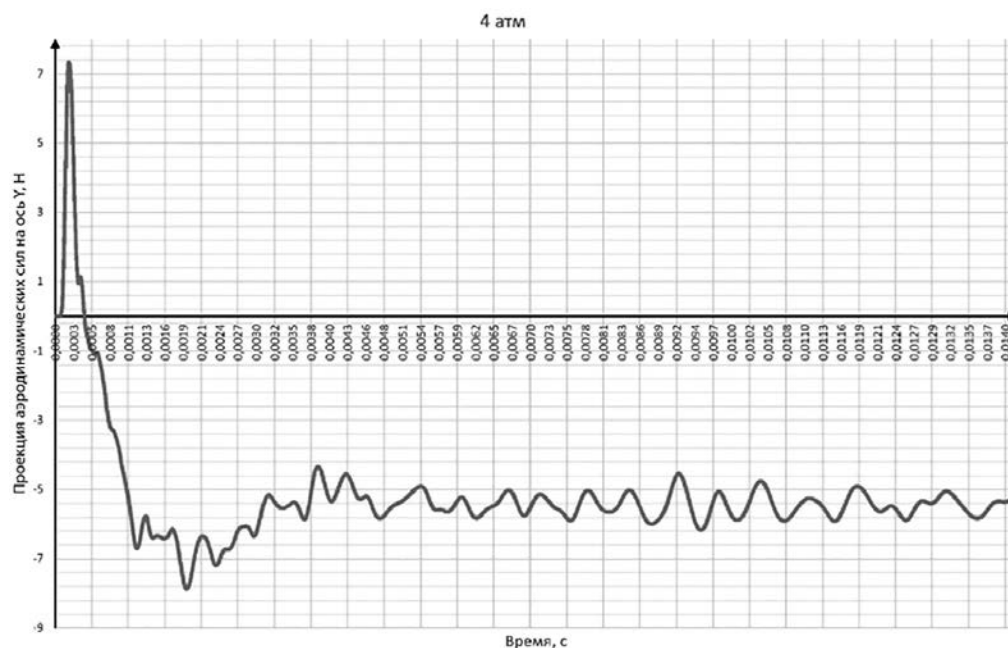


Рисунок 5 – График зависимости проекции аэродинамических сил на ось Y от времени, 4 атм

Сводные интегральные значения сил и расходно-скоростных параметров для цилиндрической форсунки 5 мм представлены в таблице. Скорость потока на входе в форсунку изменяется незначительно при росте давления (в диапазоне 301,86–304,04 м/с), что объясняется газодинамикой потока при фиксированном диаметре сопла; объемный расход остается стабильным (≈ 354 –356 л/мин), что важно для энергетической оценки работы компрессора и прогнозирования нагрузки при импульсной подаче.

Результаты расчета характеристик форсунки

Давление, атм.	Проекция аэродинамических сил на ось X, Н	Проекция аэродинамических сил на ось Y, Н	Скорость потока воздуха на входе в форсунку, м/с	Расход, м ³ /с	Расход, л/мин
4	4,26	10,90	301,86	0,005 897	353,85
5	5,20	13,52	302,50	0,005 909	354,60
6	6,26	15,28	303,21	0,005 924	355,42
7	7,16	17,58	303,67	0,005 930	355,96
8	8,66	19,38	304,04	0,005 940	356,39

Даже при минимальном исследованном давлении (4 атм) система создает существенную поднимающую силу (≈ 11 Н), однако надежность отделения в реальных условиях будет зависеть от вариабельности клубней (масса, форма, шероховатость и т. д.) и от контактных сил с вальцами. Начиная с 6 атм сила по оси Y превышает ≈ 15 Н – этот уровень принят как практический порог надежного отделения, поскольку он существенно превышает удерживающие силы взаимодействия клубня с вальцами и тем самым обеспечивает реальную способность струи инициировать и поддерживать отрыв, а также достижим и устойчив в численных режимах (начиная с 6 атм) без экстремального увеличения давления или расхода, и дает разумный запас надежности против вариативности реальных условий и неопределенностей модели. Диапазон 7–8 атм обеспечивает дополнительный запас по усилию и устойчивости процесса, но сопровождается ростом ударного воздействия и энергозатрат. Для промышленного применения целесообразно ориентироваться на режим 6 атм с импульсной подачей короткой длительности (порядка 0,01–0,02 с), что обеспечивает требуемый импульс силы при минимальном расходе энергии.

Заключение

Выполненное моделирование в FlowVision дало целостное представление о взаимодействии сжатой воздушной струи с клубнем картофеля в зоне вальцово-подающего конвейера. Базовый вариант цилиндрической форсунки диаметром 5 мм, расположенной без смещения относительно оси клубня, обеспечивает симметричное обтекание, выраженное локальное давление и устойчивые уровни сил, достаточные для отделения клубня. По результатам серии расчетов оптимальным режимом можно считать диапазон давления 6–8 атм, где сила по оси Y составляет 15–19 Н, обеспечивая надежное отделение при умеренных расходах (~354–356 л/мин) и скоростях на входе ~302–304 м/с.

Авторы статьи выражают благодарность ООО «ТЕСИС» за предоставленную лицензию на программный комплекс FlowVision и оказанную помощь в проведении данного исследования.

Список использованных источников

1. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа : учеб. пособие / Т. В. Кондранин, Б. К. Ткаченко, М. В. Березникова [и др.]. – М. : МФТИ, 2005. – 104 с.