

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Прец М. А, Вдовина В. А.

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация*

Научный руководитель: Зинуров В. Э. – к.т.н., и. о. зав. кафедрой ИГ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки инженерной методики расчета мультिवихревого классификатора с соосно расположенными трубами для фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов. Подробно описан процесс создания параметрической САД-модели аппарата в среде КОМПАС-3D, позволивший оперативно генерировать множество конструктивных вариантов для последующего численного моделирования в ANSYS Fluent. На основе анализа данных CFD-моделирования выявлены зависимости фракционной эффективности от геометрических параметров.

Ключевые слова: мультिवихревой классификатор, фракционирование, параметрическое моделирование, КОМПАС-3D, численное моделирование, CFD

Введение. Современное производство предъявляет всё более высокие требования к качеству переработки сыпучих материалов, особенно в таких отраслях, как химическая промышленность, фармацевтика, производство строительных смесей, агропромышленный комплекс и экологическая инженерия [1]. Одной из ключевых технологических операций в этих процессах является классификация – разделение материала по размеру частиц. Эффективность данного этапа определяет не только качество конечной продукции, но и экономичность, безопасность и устойчивость всего производственного цикла.

Особую сложность представляет фракционирование мелкодисперсных частиц размером менее 60-100 мкм. Традиционные методы разделения, такие как механическое просеивание, гравитационные и инерционные сепараторы, циклоны, обладают рядом ограничений: от износа оборудования и невысокой селективности до больших энергетических затрат и низкой эффективности в указанном диапазоне размеров [2]. В связи с этим возрастает интерес к использованию инерционных методов, основанных на динамике движения частиц в закрученных газовых потоках, не требующих подвижных частей и отличающихся высокой надёжностью.

Основная часть. Для решения проблем классификации мелкодисперсных материалов разработан мультिवихревой классификатор с соосно расположенными трубами (рисунок 1). Данный аппарат является статическим устройством, не содержит подвижных элементов, а разделение частиц происходит исключительно за счёт центробежных и инерционных сил, возникающих при движении закрученного газового потока.

Принцип работы классификатора строится на разделении основного воздушного потока с образованием дополнительных вихрей. Воздух с взвешенными частицами поступает через вертикальную трубу. В нижней части этой трубы выполнены вертикальные прямоугольные щели, через которые газовый поток поступает в кольцевое пространство между внутренней и наружной трубами. Благодаря такой организации потока формируются устойчивые вертикальные вихри, количество которых в два раза превышает число щелей. Вихри располагаются касательно по отношению друг к другу, что обеспечивает их взаимную закрутку и интенсификацию вращательного движения. В результате воздействия центробежных сил крупные частицы выбиваются из общего потока, сталкиваются со стенками наружной трубы и под действием силы тяжести падают в бункер сбора крупной фракции. Мелкие частицы, обладающие меньшей инерцией, не способны преодолеть аэродинамическое сопротивление и уносятся воздушным потоком на дальнейшую очистку в циклоны и фильтры.

Стенки наружной трубы выполнены закруглёнными, что исключает зоны локального отрыва потока и повторный унос материала.

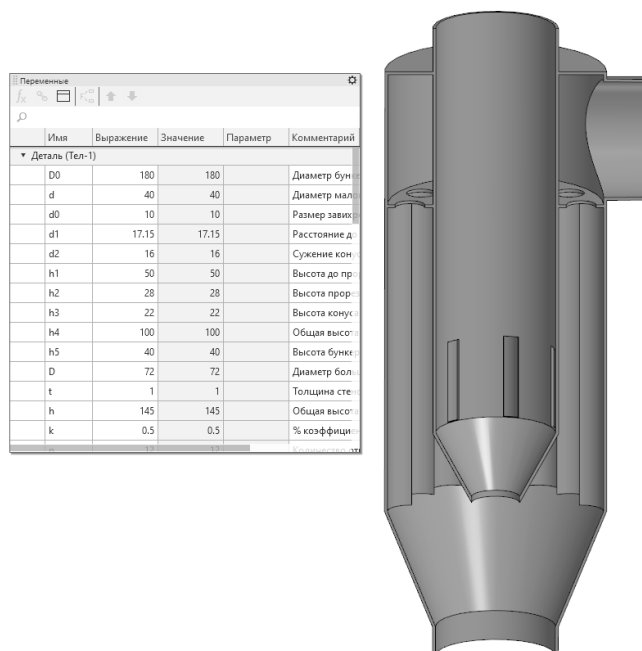


Рисунок 1 – Параметрическая модель мультивихревого классификатора (в разрезе).

Целью настоящей работы является создание инженерной методики расчета мультивихревого классификатора, позволяющей по заданному размеру граничного зерна (т.е. крупности частиц, подлежащих выделению) определять основные геометрические размеры конструкции аппарата. Такая методика необходима для оперативного проектирования оборудования под конкретные технологические задачи без проведения длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

На первом этапе для определения базовой конструкции аппарата и выявления влияния геометрических параметров на эффективность разделения было выполнено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent. В процессе CFD-моделирования варьировались следующие параметры: диаметры внутренних и наружных труб, размеры, положение и степень раскрытия вертикальных щелей, высота основных элементов аппарата и др.

Учитывая большое количество исследуемых вариантов конструкции, было принято решение о создании параметрической модели в среде КОМПАС-3D [3]. Модель строилась таким образом, чтобы все основные размеры задавались не числами, а буквенными параметрами и формулами с зависимостями. В результате была сформирована таблица переменных, изменение значений в которой позволяло автоматически перестраивать геометрию аппарата, что значительно ускорило процесс подготовки данных для последующих расчетов.

Готовая CAD-модель экспортировалась в ANSYS Fluent для проведения сеточной дискретизации и последующего численного эксперимента. Для повышения точности расчетов и снижения вычислительных затрат использовалась осевая симметрия – моделирование проводилось для одного характерного сектора кольцевого канала.

В ходе численных экспериментов были получены зависимости фракционной эффективности от конструктивных параметров при различных входных условиях. Результаты моделирования подтвердили, что при определённой конфигурации устройства возможно достичь эффективности фракционирования свыше 95 % для частиц размером 20–40 мкм [4]. На основе анализа результатов CFD-моделирования были установлены количественные

зависимости геометрических размеров базовой конструкции от требуемого размера граничного зерна [5]. Полученные данные легли в основу разрабатываемой инженерной методики расчета. В докладе будет представлена инженерная методика расчета классификатора, включающая критериальные уравнения, позволяющие определить основные размеры аппарата, а также методики технико-экономического и эрозионного расчетов, необходимые для оценки эффективности и надежности работы оборудования в реальных условиях эксплуатации.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана параметрическая модель мультивихревого классификатора и выполнена серия численных экспериментов по оценке влияния геометрических параметров на его эффективность. Установлены конструктивные зависимости, обеспечивающие эффективность фракционирования свыше 95 % для частиц размером 20–40 мкм. На основе полученных данных сформулированы основы инженерной методики расчета аппарата под заданный размер граничного зерна, что позволяет перейти к проектированию промышленных образцов оборудования.

Исследование выполнено в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение 1РПИШ от 19.12.2025 г.

Список литературы

1. Прец, М. А. Исследование влияния изменения размеров прямоугольных щелей классификатора на эффективность улавливания частиц / М. А. Прец, А. М. Мунинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 206. – С. 242–249. – DOI 10.21515/1990-4665-206-020.
2. The Influence of the Design of a Static Multi-Vortex Classifier on the Efficiency Fractionation of Silica Gel Particles / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A. M. Muginov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 645–650. – DOI 10.1134/s0040579524600992.
3. Прец, М. А. Разработка параметрической модели мультивихревого классификатора для фракционирования твердых частиц / М. А. Прец, А. М. Мунинов, А. И. Юмадилова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 203. – С. 280–288. – DOI 10.21515/1990-4665-203-025.
4. Эффективность фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала в мультивихревом классификаторе при изменении конструктивных параметров / М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, В. А. Вдовина // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 7. – С. 128–133. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_7_128.
5. Фракционирование твердой дисперсной фазы в воздушном потоке в мультивихревом классификаторе / М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, А. М. Мунинов // Башкирский химический журнал. – 2025. – Т. 32, № 3. – С. 107–115. – DOI 10.17122/bcj-2025-3-107-115.

UDC 66.074.2

DEVELOPMENT OF AN ENGINEERING METHODOLOGY FOR CALCULATING A MULTI-VORTEX CLASSIFIER FOR FRACTIONATION OF BULK MATERIALS

Prets.M.A., Vdovina V.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Zinurov. V.E. – Cand. of Sci., Acting Head of the department of EG

Annotation. The article presents the results of developing an engineering methodology for calculating a multi-vortex classifier with coaxial pipes for fractionation of fine-grained bulk materials. The process of creating a parametric CAD model of the apparatus in the КОМПАС-3D environment is described in detail, which made it possible to quickly generate a variety of design options for subsequent numerical modeling in ANSYS Fluent. Based on the analysis of CFD modeling data, the dependencies of fractional efficiency on geometric parameters were identified.

Keywords: multi-vortex classifier, fractionation, parametric modeling, КОМПАС-3D, numerical modeling, CFD