УДК 621.926 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-98-106

# СТРУЙНО-ВИХРЕВОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

***Брайнин Д.Г., Веригин А.Н.***
*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** измельчение, измельчитель, дисперсные материалы, гидродинамика, вихревые потоки, диссипация энергии.
**Аннотация.** Статья посвящена разработке и исследованию струйно-вихревого измельчителя для тонкого и сверхтонкого помола кристаллических дисперсных материалов. Рассмотрены проблемы высокой энергоёмкости механического измельчения и преимущества газодинамических методов. С использованием SolidWorks Flow Simulation выполнено численное моделирование трёх исполнений аппарата (СВИ-00, СВИ-01, СВИ-02) и исследовано влияние зазора между корпусом и формирователем потока аппаратов. Показано, что тангенциальный вход в СВИ-02 обеспечивает максимальную удельную диссипацию энергии, но сопровождается ростом гидравлического сопротивления. Сделан вывод о необходимости экспериментальной проверки.

# JET-VORTEX PULVERIZER FOR DISPERSE MATERIALS

***Brainin D.G., Verigin A.N.***
*Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg*

**Keywords:** comminution, grinder, dispersed materials, hydrodynamics, vortex flows, energy dissipation.
**Abstract.** This article focuses on the development and investigation of a jet-vortex mill designed for the fine and ultrafine grinding of crystalline dispersed materials. The issues associated with the high energy consumption of mechanical grinding are discussed, alongside the advantages of gas-dynamic methods. Numerical modeling of three device configurations (SVI-00, SVI-01, and SVI-02) was performed using SolidWorks Flow Simulation to analyze the effect of the gap between the housing and the flow shaper. It is demonstrated that the tangential inlet in the SVI-02 model yields the highest specific energy dissipation, albeit at the cost of increased hydraulic resistance. The study concludes that experimental verification is required.

Измельчение дисперсных материалов (ДМ) применяется с целью увеличения их удельной поверхности, интенсификации физико-химических и тепло-массообменных процессов, повышения однородности смесей, улучшения растворимости, реакционной способности, а также для придания им требуемых эксплуатационных и технологических свойств.

Несмотря на высокую технологическую значимость, измельчение относится к числу наиболее энергоёмких операций промышленного производства. На измельчение приходится до 4% общего мирового промышленного потребления энергии [1]. При этом в традиционных мельницах с механическими рабочими органами значительная часть затрачиваемой энергии расходуется на преодоление трения, нагрев материала, износ рабочих поверхностей и приведение в движение массивных узлов оборудования.

В связи с ростом объёмов перерабатываемых ДМ, повышением требований к энергоэффективности и экологической безопасности технологий, всё большую

актуальность приобретают альтернативные методы измельчения, основанные на использовании энергии газовых потоков. Струйные и струйно-вихревые измельчители позволяют осуществлять разрушение частиц без непосредственного контакта с механическими рабочими органами, что снижает удельные энергозатраты, уменьшает износ оборудования, исключает загрязнение продукта помола и обеспечивает возможность получения тонкодисперсных порошков с узким распределением частиц по размерам.

Особый интерес представляют вихревые и струйно-вихревые методы измельчения кристаллических ДМ, в которых разрушение частиц происходит за счёт их высоких относительных скоростей, интенсивных сдвиговых напряжений и многократных столкновений в закрученном газовом потоке. Такие установки обладают потенциалом для повышения энергетической эффективности измельчения и расширения областей его промышленного применения.

Целью данного исследования является разработка вихревого измельчителя ДМ повышенной эффективности тонкого помола. Предлагаемое устройство обеспечивает достижение поставленной цели – повышение эффективности процесса тонкого помола за счёт интенсификации вихревого движения и классификации частиц ДМ непосредственно в рабочей камере.

**Объект исследования**

В качестве объекта исследования был выбран разработанный ранее струйный вихревой измельчитель (рис. 1), который показал довольно хорошую эффективность работы

Данный вихревой аппарат благодаря принципу работы и конструкции позволяет устранить основные недостатки струйных аппаратов, сохранив их достоинства. Основным его преимуществом является низкое энергопотребление, вызванное значительно меньшим давлением газа. Сравнительные характеристики струйных и вихревых измельчителей [2] приведены в таблице 1.

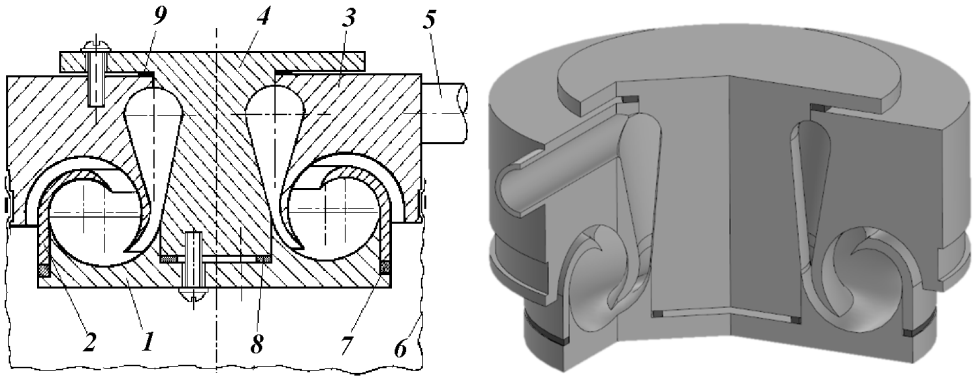


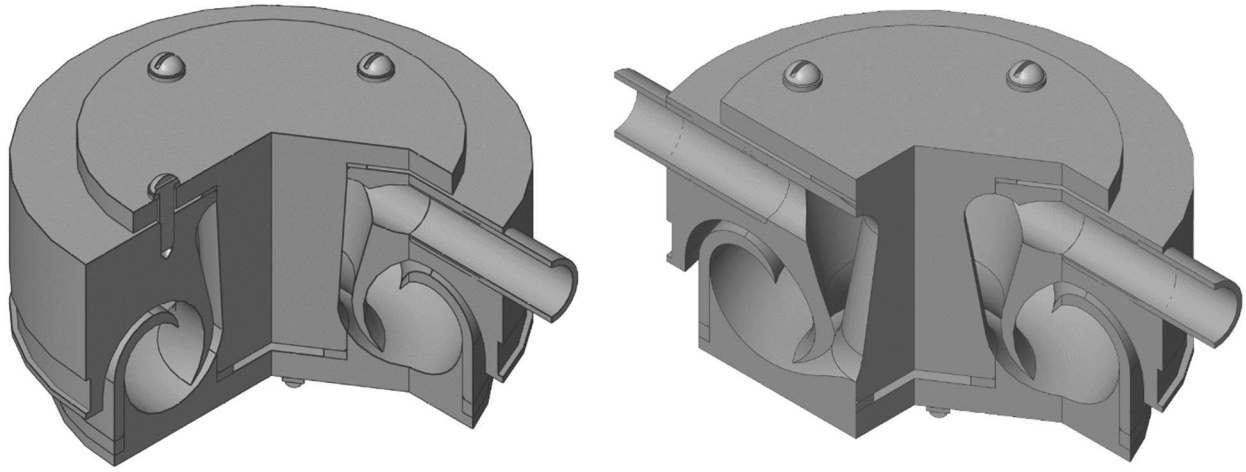

Рис. 1. Лабораторный струйно-вихревой аппарат измельчения

В рамках исследования была разработана конструкция аппарата нескольких исполнениях. Аппарат «СВИ-0» (рис. 1) состоит из корпуса 1; крышки 4; формирователей потока 2 и 3; патрубка 5 и прокладок – 7, 8, 9; рукавного фильтра – 6.

Конструкция струйно-вихревого измельчителя позволяет изменять величину зазора $h$ между корпусом 3 и формирователем потока 2 за счет увеличения толщины прокладки 7.

Табл. 1. Сравнительные характеристики струйных и вихревых измельчителей

| Аппарат | STJ-100 | JOM-0101C4C | СВА |
|---|---|---|---|
| Материал | Агрохимикаты, медикаменты, сажа, пигменты, карбонат кальция | | Нитраты, ВВ |
| Производительность, кг/ч | 0,5÷2,0 | 0,5÷2,0 | 0,5÷2,0 |
| Степень измельчения | 4÷20 | 4÷20 | 4÷17 |
| Расход воздуха, $м^3$/мин | 1,2 | 1,0 | 0,5 |
| Давление, $кг/см^2$ | 6,5÷7,0 | 6,5÷7,0 | 0,02 |
| Удельное энергопотребление, кВт·ч/кг | 5÷20 | 5÷20 | 0,05÷0,2 |



а б

Рис. 2. Струйно-вихревые измельчители: а – исполнение «СВИ-01»; б – исполнение «СВИ-02» в разрезе

Исполнение «СВИ-01» отличается конструкцией крышки 4 (рис. 2, а). Исполнение «СВИ-02» отличается конструкцией корпуса 1. В корпусе имеется еще один патрубок 5 (рис. 2, б).

**Принцип работы аппарата**

Сжатый воздух вместе с измельчаемым материалом поступает во входной патрубок 5 с внутренним диаметром $d_{вн} = 18$ мм, откуда попадает в рабочую камеру, в которой материал измельчается и выходит из канала кольцевой формы 2 (рис. 1). Рабочую камеру аппарата можно условно разделить на входной участок и зону, в которой происходит завихрение (вихревая камера).

За счёт тангенциального расположения входного патрубка аппарата относительно кольцевого сечения рабочей камеры, после входа в измельчитель поток начинает закручиваться.

Одновременно с закручиванием воздух опускается вдоль центральной оси аппарата и попадает в вихревую камеру, в которой (из-за формы камеры) поток начинает закручиваться в фронтальной плоскости аппарата. В аппарат поступает смесь измельчаемого ДМ и сжатого воздуха в виде взвеси, но внутри аппарата структура потока воздуха и структура потока частиц различаются. Структура воздушного потока изображена на рисунке 5, структура потока частиц во взвеси

на начальном участке рабочей камеры практически не будет отличаться от структуры потока воздуха, но в вихревой камере, за счет измельчения, происходят изменения. Поток, из входного участка попадает в вихревую камеру и сталкивается с потоком наиболее крупных частиц, которые за счет центробежной силы отбрасываются к стенкам вихревой камеры. В месте, где происходит столкновение потоков и одновременно измельчение основной массы материала (благодаря соударению потоков частицы истираются). Частицы также измельчаются и в других частях рабочей камеры (от ударов друг о друга и о стенки аппарата). В той части вихревой камеры, из которой выходят потоки, происходит отделение крупных и мелких частиц. Более крупные частицы удерживаются в создаваемом вихре и не покидают аппарат, а частицы, достигшие размеров витания, уносятся в потоке и выходят из камеры измельчителя вместе с воздухом.

**Инженерные расчеты**

Для выполнения расчетов и исследования характеристик СВИ использовался программный комплекс SolidWorks, включающий средства трехмерного твердотельного моделирования, а также модуль вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation. Выбор данного программного комплекса обусловлен возможностью построения параметрической модели аппарата и проведения численного моделирования течения газовой среды внутри его рабочей камеры.

Применяемый программный продукт позволяет осуществить моделирование газодинамики с учетом геометрии разрабатываемого устройства и определить основные параметры потока, используемые при анализе работы струйно-вихревого измельчителя. Результаты численного моделирования используются при дальнейшем обосновании конструктивных решений и анализе эффективности работы аппарата.

Основные этапы работы в SOLIDWORKS Flow Simulation включают:

Создание геометрии и задание условий: пользователь формирует CAD-модель устройства, задаёт области входа/выхода, условия течения (скорость, давление, температура), свойства среды (воздух) и граничные условия.

Построение сетки: пространство в области течения разбивается на конечные объёмы (ячейки). В каждой ячейке численно решаются уравнения: закона сохранения массы (непрерывности), импульса (уравнения Навье–Стокса), энергии (в случае тепловых процессов).

Итерационное решение: расчёт производится по итерационной схеме до достижения сходимости – то есть, когда изменения параметров от итерации к итерации становятся пренебрежимо малыми. Используются алгоритмы сглаживания, перед построением и адаптацией сетки (если включена соответствующая опция).

Получение результатов: программа предоставляет данные о распределении скорости, давления, температуры, турбулентности и других параметров по всему объёму расчёта.

Результаты визуализируются в виде сечений, изолиний, векторных полей, траекторий потока и графиков.

**Гидродинамический расчет**

При анализе аэродинамики аппарата целесообразным будет оценить характер изменения энергетических потерь при увеличении скорости среды, а также выявить диапазоны скоростей, в которых аппарат работает наиболее эффективно с точки зрения энергозатрат [3]. Для этих целей будет удобно рассматривать зависимость средней удельной скорости диссипации энергии от скорости движения среды на входе в аппарат $\varepsilon(w)$ и зависимость коэффициента гидравлического сопротивления, отнесенного к скорости на входе в аппарат от критерия Рейнольдса во входном патрубке $\zeta(Re)$.

Для определения параметров, подлежащих вычислению в ходе численного эксперимента, была составлена расчётная схема (рис. 3).

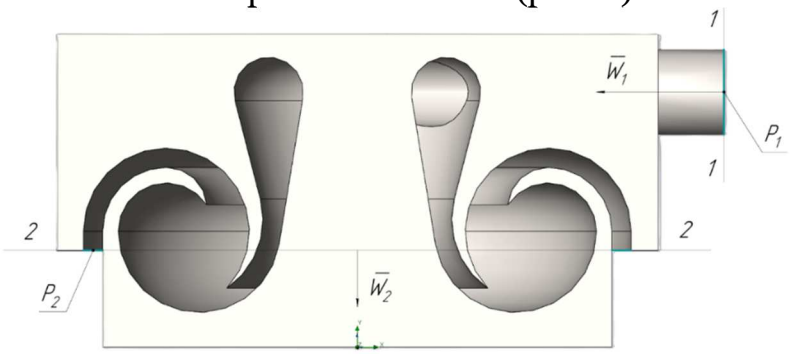



Рис. 3. Расчетная схема

Для определения искомых зависимостей требуется рассчитать следующие средние расходные параметры в сечении 1-1: полное давление ($p_1$), плотность ($\rho_1$), объемный расход ($Q_1$), скорость ($w_1$), динамическая вязкость ($\mu_1$), а также средне расходное полное давление в сечении 2-2 ($p_2$).

Для определения основных аэродинамических параметров в программе SolidWorks была создана эквивалентная 3D-модель аппарата (для экономии вычислительных ресурсов) и в модуле Flow Simulation был реализован расчет.

Перед началом расчета необходимо создать сетку (обязательно для решения методом конечных объемов). Включив функцию «адаптация сетки» можно локально улучшить разрешение сетки, построив зависимость размера одной ячейки от размера проточного канала. Так, в наиболее «узких» местах размер ячейки будет меньше. Такой подход необходим для повышения точности расчетов.

После создания сетки задаются граничные условия (ГУ). В качестве первого граничного условия в плоскости внешней грани входного патрубка была задана скорость $w_1$ на входе, в качестве второго граничного условия в плоскости на грани выходного кольцевого канала было задано статическое давление $p_{ст_2}$ на выходе (давление окружающей среды – атмосферное).

Для автоматизации расчетов удобно использовать параметрическое исследование, которое позволяет реализовать модуль Flow Simulation. В таком исследовании параметры, для которых это требуется, представляются, можно сказать, в виде дискретных функций. При каждом новом расчете будет создана новая расчетная точка, в которой выбранные граничные условия, параметры сетки и т.д. будут изменяться в соответствии с настройками. Имеет смысл задать граничное условие «скорость на входе» в виде такого параметра. При каждом

новом расчете скорость будет изменяться в диапазоне от 10 м/с до 90 м/с с шагом 2 м/с.

В качестве искомых параметров были заданы поверхностные цели: ($p_1$), ($\rho_1$), ($Q_1$), ($w_1$), ($\mu_1$), ($p_2$). Построить зависимости поможет создание целей-выражений (ЦВ) – параметров, рассчитывающихся из других целей по заданной закономерности (по формулам). С помощью ЦВ будут рассчитаны: критерий Рейнольдса во входном патрубке (Re), средняя удельная (в единице объема аппарата) скорость диссипации энергии (ε) и коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скорости на входе в аппарат (ζ).

Необходимо определить формулы для расчета ЦВ. Можно определить критерий Рейнольдса во входной трубе аппарата как Re для круглых труб и каналов:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_1 \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_1}{\mu_1}, \quad (1)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр входной трубы, м.

Формула для определения коэффициента гидравлического сопротивления аппарата имеет вид:

$$\zeta = \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho_1 \cdot {w_1}^2}, \quad (2)$$

Среднюю удельную (отнесенную к ед. объема) скорость диссипации энергии можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{Q_1 \cdot (p_1 - p_2)}{V_{\text{ап}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{ап}}$ – внутренний рабочий объем аппарата, м$^3$.

Для исключения ошибки и повышения точности расчет был повторен 6 раз. Аналогичным образом были проанализированы исполнения «СВИ -01» и «СВИ -02». Также расчет был проведен при различных значениях величины зазора $h$ (рис. 1) в диапазоне от 1 до 4 мм с шагом 1 мм.

Помимо аэродинамических параметров целью исследования являлись «картинки в сечениях» в плоскостях *XY* и *YZ*, которые отображают линии тока, изолинии и градиент назначенных параметров.

**Обработка и анализ результатов численного моделирования**

На основании серии параметрических расчётов, выполненных в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation, были получены количественные оценки аэродинамических и энергетических характеристик трёх конструктивных исполнений струйно-вихревого измельчителя (базовое исполнение 00, исполнение 01, исполнение 02), а также исследовано влияние величины осевого зазора $h$ между корпусом и формирователем потока.

Верификация результатов моделирования выполнялась путём шестикратного повторения расчётов для базового исполнения СВИ-00 при идентичных граничных условиях, но с перестроением расчётной сетки. Анализ показал, что расхождение между сериями не превышает 1,5% по значениям коэффициента гидравлического сопротивления ζ и средней удельной скорости диссипации энергии ε. Столь низкая вариативность свидетельствует о высокой

сходимости и воспроизводимости вычислительного эксперимента. В связи с этим последующие исследования для исполнений СВИ-01, СВИ-02 и различных зазоров выполнялись в однократном режиме, что является допустимым с точки зрения инженерной точности и позволяет существенно сократить вычислительные затраты.

При фиксированной скорости потока на входе (диапазон 10…90 м/с) максимальные значения удельной скорости диссипации энергии ε демонстрирует исполнение СВИ-02 (рис. 4). Например, при скорости 90 м/с, величина ε для исполнения СВИ-02 составляет $\approx 1{,}31 \cdot 10^6$ Вт/м³, что почти в два раза выше, чем у исполнения СВИ-01 ($\approx 0{,}73 \cdot 10^6$ Вт/м³) и более чем в два раза выше базового исполнения СВИ-00 ($\approx 0{,}60 \cdot 10^6$ Вт/м³). Аналогичная закономерность прослеживается для коэффициента гидравлического сопротивления ζ: исполнение СВИ-02 характеризуется наибольшим сопротивлением, исполнение СВИ-00 – наименьшим, исполнение СВИ-01 занимает промежуточное положение.

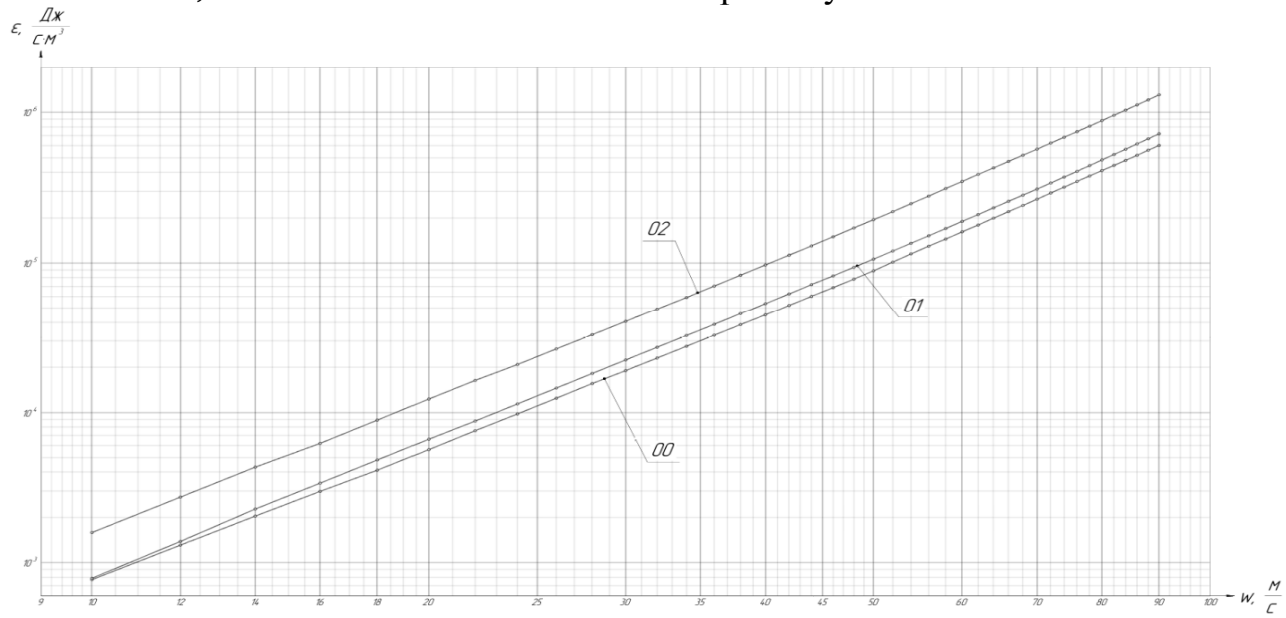



Рис. 4. Зависимость скорости диссипации ε от скорости *w*

Исследование четырёх значений зазора (1, 2, 3, 4 мм) выявило нелинейный характер зависимости аэродинамических характеристик от этого параметра. Наименьший зазор (1 мм) приводит к резкому росту коэффициента гидравлического сопротивления и, соответственно, к повышенной скорости диссипации энергии. При увеличении зазора до 2 мм и более значения ζ и ε снижаются и далее изменяются немонотонно, что, вероятно, связано с перестройкой вихревой структуры потока в рабочей камере. Отсутствие строгой пропорциональности между h и исследуемыми параметрами указывает на наличие нескольких конкурирующих механизмов формирования потерь, что требует дополнительного анализа поля скоростей и давления в окрестности зазора.

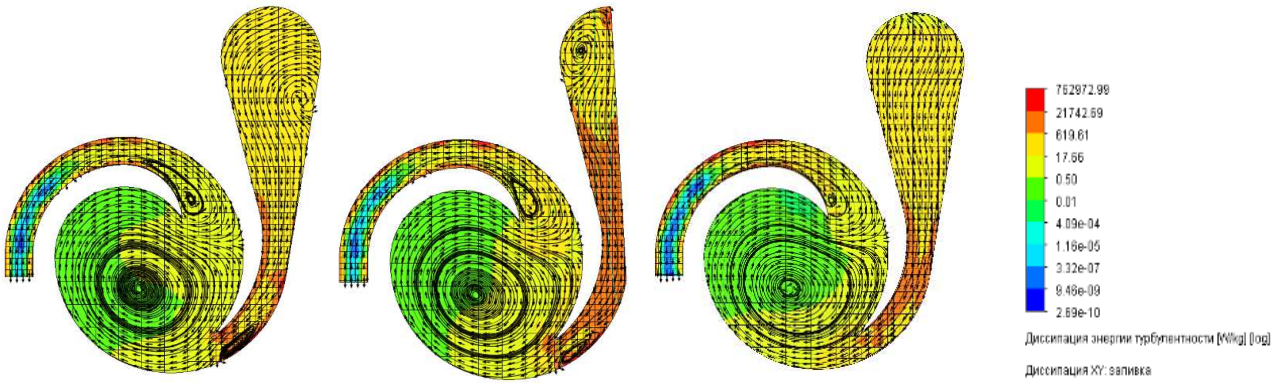
Полученные изображения «картинок в сечении» содержат изолинии, раскрашенные по параметру «давление» и градиент скорости диссипации энергии турбулентности.

Анализ картины течения базового исполнения показывает наличие вихревых структур как во входном участке, так и в вихревой камере аппарата (рис. 5, а). Формирование завихрений во входном участке обусловлено тангенциальным

вводом потока и резким изменением направления движения рабочей среды и сопровождается локальной диссипацией энергии до поступления рабочей среды в рабочую камеру. В вихревой камере при этом формируется устойчивая вихревая структура, обеспечивающая необходимые условия для реализации измельчения.

В исполнении СВИ-01, отличающемся конструкцией входного участка, наблюдается усиление завихрений как во входном участке, так и в вихревой камере по сравнению с базовым исполнением (рис. 5, б). Интенсивность вихревых структур во входном участке возрастает, что приводит к увеличению потерь энергии потока ещё до его поступления в рабочую зону аппарата. Аналогично, в вихревой камере исполнения СВИ-01 формируются более интенсивные завихрения по сравнению с базовым вариантом, что указывает на рост общей турбулентности потока. Вместе с тем в рассматриваемом сечении сохраняется выраженная асимметрия структуры течения, при которой интенсивность завихрений по разные стороны от оси аппарата различается.

Исполнение СВИ-02 оснащено дополнительным тангенциальным патрубком, установленным симметрично относительно оси аппарата. В результате в данном варианте наблюдается принципиально иная организация течения (рис. 5, в). Во входном участке аппарата выраженные вихревые структуры отсутствуют, поток имеет более упорядоченный характер, что, по-видимому, связано с симметричным подводом рабочей среды и выравниванием полей скорости. Картина течения в сечении отличается высокой степенью симметрии по отношению к оси аппарата, в отличие от базового исполнения и исполнения СВИ-01.




а б в

Рис. 5. «Картинка в сечении» в плоскости *XY* (скорость на входе 10 м/с): а – базовое исполнение СВИ-0, б – исполнение СВИ-01, в – исполнение СВИ-02

В вихревой камере исполнения СВИ-02 формируется устойчивая вихревая структура, интенсивность которой сопоставима с интенсивностью завихрений в вихревой камере базового исполнения. Существенного усиления или ослабления вихревого движения в рабочей камере по сравнению с базовым вариантом не наблюдается, что свидетельствует о сохранении условий для эффективного измельчения при одновременном снижении потерь энергии во входном участке.

**Выводы**

Сравнительный анализ показывает, что в базовом исполнении СВИ-01 значительная часть диссипации энергии потока происходит во входном участке аппарата, причём в исполнении СВИ-01 данный эффект выражен в большей

степени. В исполнении СВИ-02 за счёт симметричного тангенциального подвода рабочей среды удаётся практически устранить завихрения во входном участке и обеспечить более равномерную структуру течения, сохранив при этом требуемую интенсивность вихревого движения в рабочей камере.

Для струйно-вихревого измельчения принято, что интенсивность разрушения частиц пропорциональна удельной скорости диссипации энергии ε. Чем выше ε, тем больше сдвиговых напряжений и кинетической энергии передаётся дисперсной фазе, что способствует более эффективному измельчению и сокращению времени пребывания материала в камере.

Исходя из данного предположения, наибольшей потенциальной эффективностью обладает исполнение СВИ-02, обеспечивающее максимальные значения ε во всём исследованном диапазоне скоростей. Исполнение 01 также демонстрирует более высокие показатели по сравнению с базовой моделью, однако уступает исполнению СВИ-02.

Высокие значения диссипации энергии неразрывно связаны с ростом гидравлического сопротивления, что влечёт за собой увеличение затрат энергии на привод воздуходувных средств. Так, выбор рационального конструктивного исполнения должен основываться на компромиссе между интенсивностью измельчения и энергетической экономичностью. Исполнение СВИ-02 целесообразно рекомендовать для задач, требующих максимальной тонкости помола и высокой производительности, тогда как исполнение СВИ-01 может рассматриваться как сбалансированное решение.

Сформулированный вывод о предпочтительности исполнения СВИ-02 базируется на гидродинамическом критерии ε и носит расчётно-теоретический характер. Для окончательного подтверждения данной гипотезы требуется проведение натурных экспериментов. Только сопоставление численных данных с результатами физического эксперимента позволит однозначно верифицировать предложенную методику выбора конструкции и перейти к стадии опытно-конструкторских работ.

**Список литературы**

1. Аппараты для измельчения и классификаторы струйным потоком воздуха: Каталог / СЭИСИН. – Токио: Ентерпрайз Ко., ЛТД., 1989. – 6 с.
2. Ишутин А.Г., Веригин А.Н., Джангирян А.В. Мехатронные технологические комплексы обработки дисперсных материалов. – СПб.: Медиапапир, 2024. – 426 с.
3. Абиев Р.Ш. Вычислительная гидродинамика и тепломассообмен. Введение в метод конечных разностей: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во НИИХимии СПбГУ, 2002. – 576 с.

Сведения об авторах:
*Брайнин Даниил Глебович* – студент;
*Веригин Александр Николаевич* – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой МТК.