

УДК 621.926

**В. С. Францкевич**

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ  
С ДИНАМИЧЕСКИМ КЛАССИФИКАТОРОМ**

В статье приводятся результаты одного из этапов комплексных исследований помольных установок, агрегатированных энергоэффективными среднеходными мельницами, проводимых на кафедре «Машины и аппараты химических и силикатных производств» УО «Белорусский государственный технологический университет». Рассматривается исследование аэродинамики воздушно-го закрученного пространственного потока в сечении помольно-классификационного агрегата, включающего валковую среднеходную мельницу и динамический классификатор. Поставлена задача: на основе аналитических изысканий с использованием компьютерного моделирования все-сторонне изучить аэродинамику несущего газового потока с целью минимизации энергозатрат на классификацию и пневмотранспорт материала. В качестве инструмента для реализации задачи был выбран газодинамический программный комплекс. В результате проанализирована аэродинамика воздушно-го потока в среднеходной мельнице с динамическим классификатором, оценено влияние угла установки лопаток классификатора на структуру потока. Разработанная компьютерная модель позволяет установить оптимальные конструктивные и технологические параметры классификатора, при которых энергозатраты на классификацию и пневмотранспорт будут минимальны.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, аэродинамика, воздушная классификация, газодинамическое исследование, профиль скоростей, гидравлическое сопротивление, энергозатраты.

**V. S. Frantskevich**

Belarusian State Technological University

**INVESTIGATION OF THE AERODYNAMICS OF THE VALVE MILL  
WITH A DYNAMIC CLASSIFIER**

In the article the results of one of the stages of complex research of grinding plants, aggregated by energy-efficient medium-speed mills, conducted at the department “Machines and devices of chemical and silicate industries” of the BSTU are given. The study of the aerodynamics of an air swirling spatial flow in a section of a grinding-classification aggregate including a roll middle flow mill and a dynamic classifier is considered. The objective is to comprehensively study the aerodynamics of the carrier gas flow on the basis of analytical studies using computer simulation in order to minimize energy costs for the classification and pneumatic transport of the material. As a tool for the implementation of the task, a gas-dynamic software package was chosen. As a result, the aerodynamics of the air flow in a medium-flow mill with a dynamic classifier was analyzed, the influence of the angle of installation of the classifier blades on the flow structure was estimated. The developed computer model allows to establish the optimal design and technological parameters of the classifier, under which the energy consumption for classification and pneumatic transport will be minimal.

**Key words:** computer modeling, aerodynamics, air classification, gas dynamic study, velocity profile, hydraulic resistance, power consumption.

**Введение.** В последнее время среднеходные мельницы, в частности валковые фирм «Леше», «Пфайфер» начали активно внедряться в Республике Беларусь. Это агрегаты исключительно сухого помола с воздушной классификацией, обладающие высокой производительностью и низкими удельными энергозатратами. С учетом двух указанных показателей это в первую очередь подходит для таких крупнотоннажных технологий, как производство цемента, извести, гипса, доломита.

Принимая во внимание большие перспективы данного типа помольного оборудования, кафедра машин и аппаратов химических и силикатных производств на протяжении последнего десятилетия активно занималась его исследованием и оптимизацией [1–6]. Одним из важных выводов

всех исследований можно считать следующий: для равномерного распределения несущего воздушного потока и предотвращения возможности провала газ в подтарельчатое пространство должен подаваться в виде закрученного потока, а оптимальной конструкцией устройства для классификации измельченного продукта следует считать динамический роторный классификатор.

Специфика работы среднеходных мельниц заключается в том, что весь материал, выходящий с вращающегося размольного стола, независимо от размеров частиц должен уноситься потоком воздуха в сепарационную зону и далее в классификатор. В гравитационной сепарационной зоне осаждаются более крупные частицы и возвращаются на домол. Средний класс и мелкий товарный

продукт уносятся в классификатор, где разделяются: товарный продукт выводится из мельницы, а средний класс возвращается на доизмельчение. Так, организуется замкнутый цикл работы мельницы. Следовательно, в этих помольных агрегатах мельница и классификатор выступают как единое целое, а соответственно, и движение материальных потоков в них должно быть взаимосвязано.

До недавнего времени изучение поведения газожидкостных систем было ограничено экспериментальными методами, но в связи с быстрым ростом производительности компьютерных систем стало возможным анализировать и рассчитывать подобные процессы даже на персональных компьютерах. Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics) сегодня становится одной из составляющих процесса проектирования во множестве компаний, которые разрабатывают современное высокотехнологичное оборудование. Подобные расчеты позволяют получить характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения. Вычислительная гидродинамика используется во многих отраслях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, энергетическая, нефтяная и газовая промышленность, судостроение. Во всех этих отраслях применение CFD-технологий становится залогом создания конкурентоспособных изделий.

На кафедре машин и аппаратов создан многоцелевой испытательный стенд для исследований среднеходных мельниц, работающих с воздушными классификаторами различных типов. На этапе тестовых испытаний спроектированного динамического классификатора [6] были выявлены некоторые его конструктивные недостатки, проявляющиеся в образовании малоподвижных застойных зон, повышающих гидравлическое сопротивление и снижающих эффективность разделения. Для того чтобы опытный образец модели превратился в конечный продукт, необходимо протестировать десятки вариантов, что экономически нецелесообразно. В XXI в. все больше современных компаний стараются сократить временные и финансовые затраты, которые они понесут при разработке новых моделей. Большинство физических процессов, протекающих в природе, можно описать системой дифференциальных или интегральных уравнений и получить «виртуальные» варианты разрабатываемого устройства. То есть можно уйти от изготовления в «железе» каждого опытного образца и вести оптимизацию на уровне «проектирование модели – моделирование ее работы» до тех пор, пока расчетные параметры не будут оптимальными для данного изделия, и только тогда реализовывать модель как физический объект.

Таким образом, целью данной работы является изучение аэродинамики экспериментального помольно-классифицирующего агрегата путем его компьютерного моделирования.

**Основная часть.** В процессе разделения измельченного материала на фракции последний подвергается воздействию аэродинамической силы, характер которой зависит от структуры воздушного потока. Поэтому для того чтобы можно было далее говорить о самом процессе разделения измельченного материала на фракции, необходимо в первую очередь проанализировать аэродинамику воздушного закрученного потока.

В качестве объекта изучения была выбрана среднеходная мельница с тангенциальным вводом воздушного потока и установленным воздушным динамическим классификатором. Разработанная конструкция динамического воздушного классификатора среднеходной мельницы (рис. 1) представляет собой цилиндрический корпус, внутри которого установлен ротор с отбойными лопатками [6]. При вращении ротора с определенной скоростью более крупные частицы не успевают попасть во внутреннюю его часть и отбиваются лопатками к стенке классификатора, а затем возвращаются на помол. Вращающийся ротор также создает дополнительное вращение несущей среды, что позволяет увеличить центробежную силу, действующую на частицы материала.

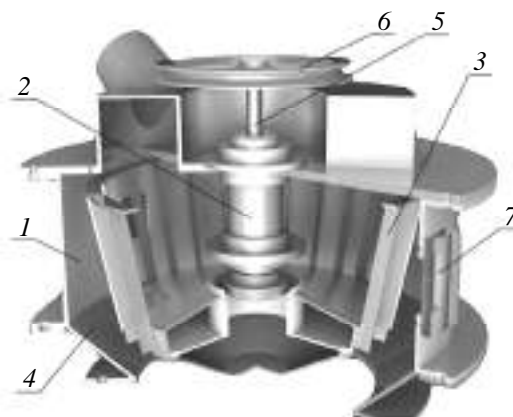


Рис. 1. Лабораторный динамический воздушный классификатор:

- 1 – цилиндрический корпус; 2 – подшипниковый узел; 3 – ротор с лопатками; 4 – конус; 5 – приводной вал; 6 – шкив; 7 – смотровое окно

Для интенсификации процесса разделения необходимо выявить малоинерционные застойные зоны и предложить рациональную внутреннюю конструкцию ротора динамического воздушного классификатора. Используя вычислительную гидродинамику, поставленную задачу можно решить в несколько этапов: создание или импорт моделей и сборка объекта, моделирование процесса, вывод и обработка результатов.

Поставленная задача моделирования является внутренней, т. е. движение газовой среды происходит в замкнутом пространстве, которое ограничено входным и выходным отверстиями и стенками модели [6]. Модель динамического воздушного классификатора в комплексе со среднеходной валковой мельницей была построена в системе трехмерного твердотельного моделирования в виде сборки, максимально близкой к реальному виду объекта. Были назначены две области вращения: размольный стол мельницы и ротор классификатора (рис. 2).

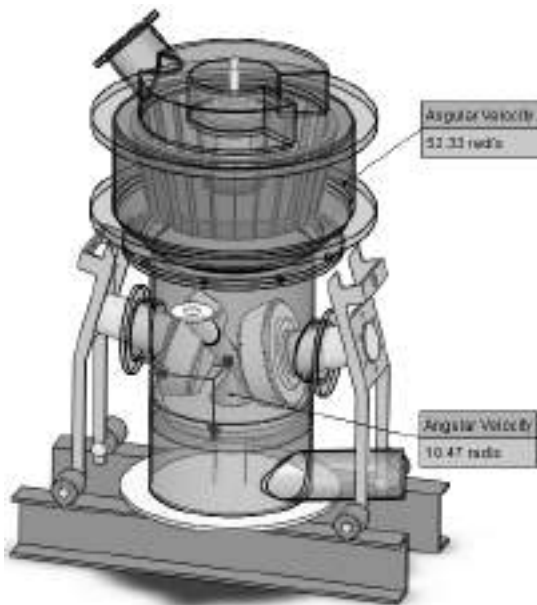


Рис. 2. Области вращения

Начальными условиями являлись: расход воздуха на входе в патрубок среднеходной мельницы  $0,278 \text{ м}^3/\text{с}$ , давление окружающей среды  $101\,325 \text{ Па}$ , плотность частиц  $2600 \text{ кг}/\text{м}^3$ , их размер  $100 \text{ мкм}$  и массовый расход  $100 \text{ кг}/\text{ч}$ . Граничные условия – реальная стенка на поверхностях ротора классификатора, размольного стола, валков и корпуса мельницы, а также реальная стенка с условием *stator* на поверхности корпуса и подшипникового узла классификатора. В качестве основной модели для определения полей скоростей газа приняты уравнения Рейнольдса, являющиеся модификацией уравнения Новье – Стокса [7]. Рейнольдс принял допущение, что мгновенную скорость газа  $U$  можно представить в виде осредненной по времени скорости  $\bar{U}$  и ее турбулентных пульсаций  $U'$ :

$$U = \bar{U} + U'. \quad (1)$$

Для решения уравнений Рейнольдса использована полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля, заключающаяся во введении параметра, называемого длиной пути смешения  $l$ , на котором постулируется сохранение определенных характе-

ристик турбулентного потока. В результате этого удалось получить линейную зависимость между турбулентными напряжениями и осредненными скоростями потока. При этом турбулентные напряжения в цилиндрической системе координат выражаются следующим образом [4, 7, 8]:

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_{rr} &= -\rho \cdot \bar{U}'_r{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{dU_r}{dr} \right), \\ \tau_{\phi\phi} &= -\rho \cdot \bar{U}'_\phi{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{1}{r} \frac{dU_\phi}{d\phi} + \frac{U_r}{r} \right), \\ \tau_{zz} &= -\rho \cdot \bar{U}'_z{}^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{dU_z}{dz} \right), \\ \tau_{r\phi} &= -\rho \cdot \bar{U}'_r \cdot \bar{U}'_\phi = \mu_T \cdot \left( \frac{1}{r} \frac{dU_r}{d\phi} + \frac{dU_\phi}{dr} - \frac{U_\phi}{r} \right), \\ \tau_{rz} &= -\rho \cdot \bar{U}'_r \cdot \bar{U}'_z = \mu_T \cdot \left( \frac{dU_r}{dz} + \frac{dU_z}{dr} \right), \\ \tau_{\phi z} &= -\rho \cdot \bar{U}'_\phi \cdot \bar{U}'_z = \mu_T \cdot \left( \frac{dU_\phi}{dz} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{d\phi} \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\mu_T$  – коэффициент турбулентной вязкости.

Таким образом, появилась возможность турбулентные течения рассматривать как фиктивные ламинарные с неньютоновским коэффициентом вязкости.

Далее для закрученного потока введены следующие допущения:

- поток в камере ассиметричен и стационарен;
- изменение всех параметров камеры по оси значительно меньше, чем по радиусу;
- коэффициент молекулярной вязкости  $\mu$  значительно меньше коэффициента турбулентной вязкости  $\mu_T$ , причем последний – величина скалярная.

С учетом этих допущений и уравнений (2) в цилиндрической системе координат уравнение Рейнольдса и неразрывности потока можно записать в виде [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} U_r \cdot \frac{dU_\phi}{dr} + \frac{U_r \cdot U_\phi}{r} &= \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_\phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_\phi}{dr} - \frac{U_\phi}{r^2} \right) + \\ &+ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \left( \frac{dU_\phi}{dr} - \frac{U_\phi}{r} \right), \\ U_r \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_\phi^2}{r} &= \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} \right) + \\ &+ \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d\rho}{dr}, \\ U_r \cdot \frac{dU_z}{dr} &= \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{dr} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_z}{dr}, \\ \frac{dU_r}{dr} + \frac{U_r}{r} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

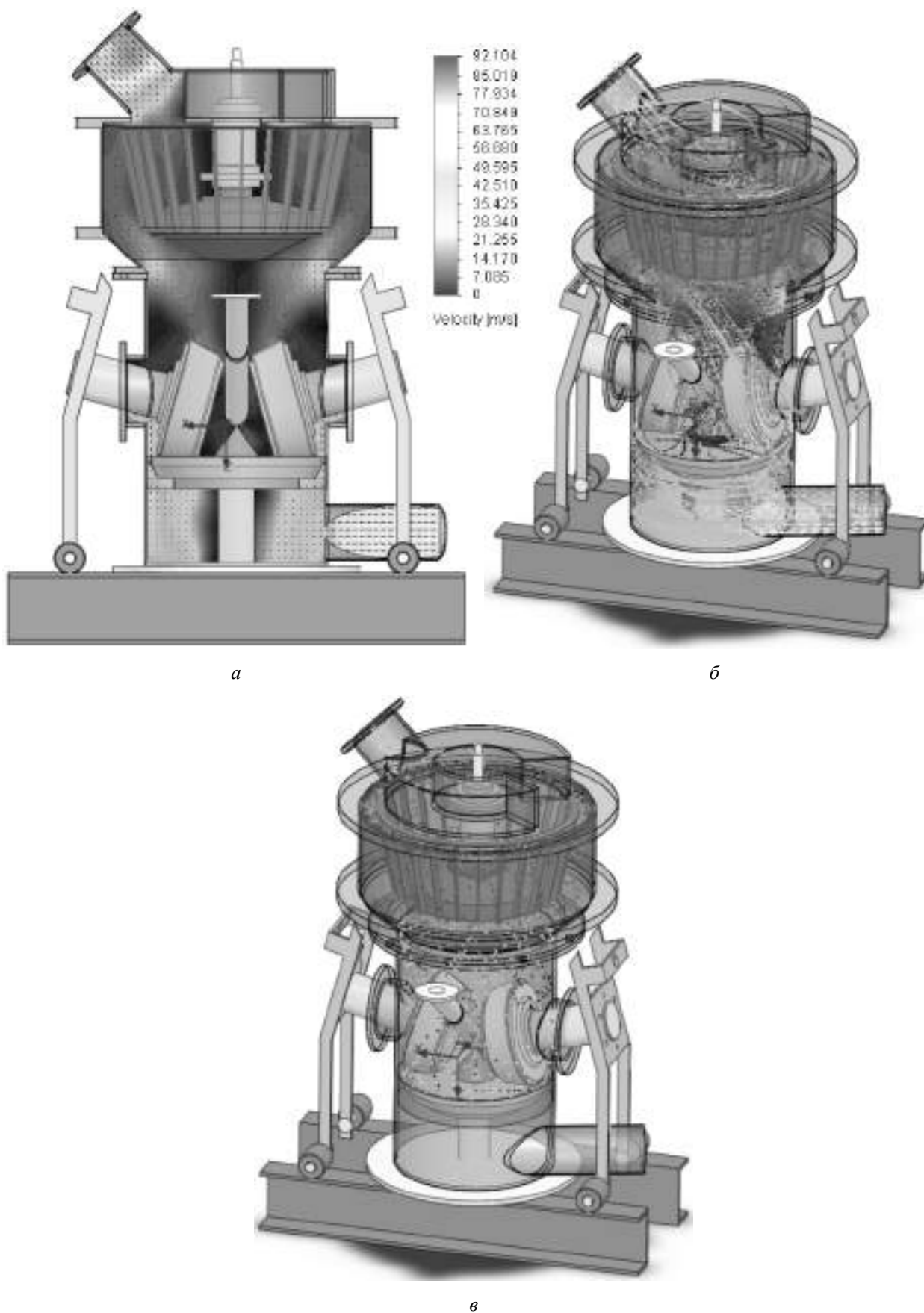


Рис. 3. Результаты расчета:  
*a* – профиль полной скорости в вертикальном сечении; *б* – траектории движения  
 воздушного потока; *в* – траектории движения сферических частиц

Результаты расчетов с помощью программного комплекса представлены в виде поля распределения скоростей по всему объему исследуемого агрегата (рис. 3). Из полученных результатов видно, что распределение скоростей в агрегате неравномерно, имеются малоподвижные застойные зоны, в которых относительная скорость на 30–80% меньше средней в данном сечении. Так, в зоне над размольными валками скорость потока снижается до 5–7 м/с, что ниже скорости витания, чего допускать нельзя. То есть конструкция и режим эксплуатации агрегата несовершенны и нуждаются в дальнейшей рационализации. В зоне вращения ротора динамического классификатора отчетливо наблюдается насосный эффект, скорость газа увеличивается до 30 м/с. Также на входе в классификатор наблюдается увеличение полной скорости, что обусловлено уменьшением проходного сечения и вращением ротора классификатора. Расчет показал, что траектория движения частиц практически полностью повторяет траекторию движения воздушного потока. Но имеется малоподвижная зона в верхней части области между корпусом классификатора и ротором, что необходимо учесть при проектировании элементов классификатора.

Любое технологическое оборудование, в качестве материальных потоков которого используется воздушная либо другая газовая среда, характеризуется наличием аэродинамического сопротивления, по величине которого можно судить об удельных энергозатратах на процесс классификации, что в итоге определяет экономическую целесообразность тех либо иных производственных процессов. Поэтому было рассчитано аэродинамическое сопротивление агрегата от скорости несущего потока при различных углах установки лопастей корзины классификатора. По полученным данным, сопротивление изменяется в квадратичной зависимости от скорости потока: с уменьшением угла установки лопастей она существенно повышается. Эти очевидные выводы говорят об адекватности разработанной модели.

В результате исследований установлен характер изменения скорости газа как по радиусу, так и по высоте мельницы. На основе полученных зависимостей можно сделать вывод о существовании по высоте мельницы двух областей течения: области формирования закрученного потока и области относительно стабилизированного течения. Область формирования потока находится непосредственно на входе в мельницу и над размольным столом.

Поток вентилируемого воздуха в размольной камере представляет собой осесимметричную закрученную турбулентную струю сложной формы с неосесимметричными возмущениями в виде размольных валков и их опор. Из-за небольших

габаритов лабораторной мельницы подводящий воздушный короб имеет ограниченные размеры, что приводит к неоднородности потока и как следствие – к окружной неравномерности распределения скоростей уже в кольцевом зазоре.

Сечение над размольным столом характеризуется неравномерным движением потока, скачками скорости. В центре мельницы над столом обнаружена обширная зона обратных токов, причем ее диаметр может составлять до 30% диаметра корпуса мельницы (в зависимости от размеров агрегата). При удалении от центра осевая и тангенциальная скорости возрастают до максимального значения в области кольцевого зазора, а затем резко уменьшаются до нуля возле стенки. Причем необходимо заметить, что максимальные их значения превышают среднерасходную скорость во много раз. В сечении над размольными валками поведение потока существенно меняется. Осевая скорость достигает своего максимума в центре мельницы и в центре кольцевого зазора, а между этими областями она вообще равна нулю. Что касается тангенциальной составляющей, то она, как и прежде, достигает своего максимального значения в центре кольцевого зазора, а в области размольного стола равна нулю. Анализ показывает, что газовый поток в этом сечении разделяется на две зоны: в центре преобладает осевой, а на периферии – закрученный. В области стабилизированного течения изменение осевой и тангенциальной скоростей более плавное. По высоте мельницы тангенциальная скорость с удалением от стола уменьшается, что свидетельствует о затухании закрутки потока, причем максимум ее смещается к центру.

**Заключение.** Изучение распределения скоростей в динамическом классификаторе показало сложность структуры потока. Очевидно, что максимальная полная скорость движения воздушного потока наблюдается в выхлопном патрубке динамического классификатора, а на входе в классификатор прослеживается значительное ее изменение. В зоне вращения ротора динамического классификатора отчетливо наблюдается насосный эффект. В области формирования потока (над размольным столом) скорости движение газа по всему сечению довольно трудно описать даже эмпирическими уравнениями, поэтому наиболее эффективным инструментом при газодинамических исследованиях течений газового потока в сложных геометрических системах является компьютерное моделирование. Применение компьютерного моделирования для исследования различных технологических процессов, в частности аэродинамики, эффективности классификации, позволяет с высокой степенью достоверности оценить их параметры, выявить преимущества и недостатки, найти оптимальные значения этих параметров.

### Литература

1. Францкевич В. С., Вайтехович П. Е. Определение траектории движения материала по размольной тарелке валково-тарельчатой мельницы // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. 2007. Вып. XV. С. 149–152.
2. Францкевич В. С., Дорогокупец А. С. Исследование аэродинамики сепарационной зоны вертикальной валковой мельницы // Строительная наука и техника. 2009. № 4. С. 72–75.
3. Францкевич В. С., Вайтехович П. Е., Дорогокупец А. С. Математическое описание процесса уноса измельченного материала в сепарационное пространство среднеходных мельниц // Труды БГТУ. 2013. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 141–145.
4. Дорогокупец А. С., Вайтехович П. Е., Францкевич В. С. Влияние технологических параметров динамического классификатора на аэродинамику и эффективность классификации измельченного продукта в среднеходной мельнице // Вестник ПГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2013. № 11. С. 44–51.
5. Францкевич В. С., Вайтехович П. Е., Дорогокупец А. С. Модель движения материала по сепарационному устройству среднеходной мельницы // Вестник ПГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2016. № 11. С. 41–46.
6. Дорогокупец А. С., Францкевич В. С. Влияние технологических параметров динамического сепаратора среднеходной мельницы на энергозатраты // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 105–109.
7. Аэродинамика закрученной струи / Р. Б. Ахмедов [и др.]. М.: Энергия, 1977. 240 с.
8. Гупта А., Лиллей Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.

### References

1. Frantskevich V. S., Vaytekhovich P. E. Determination of the trajectory of the material motion along a grinding plate of a roller-plate mill. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Ser. III, Chemistry and Technology of Inorganic Substances, 2007, issue, XV, pp. 149–152 (In Russian).
2. Frantskevich V. S., Dorogokupets A. S. Investigation of the aerodynamics of the separation zone of a vertical roller mill. *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Building Science and Engineering], 2009, no. 4, pp. 72–75 (In Russian).
3. Frantskevich V. S., Vaytekhovich P. E., Dorogokupets A. S. Mathematical description of the process of entrainment of crushed material into the separation space of medium-flow mills. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 141–145 (In Russian).
4. Dorogokupets A. S., Vaytekhovich P. E., Frantskevich V. S. Influence of technological parameters of a dynamic classifier on aerodynamics and efficiency of classification of a crushed product in a medium-flow mill. *Vestnik PGU. Ser. B. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the PSU. Ser. In, Industry. Applied Science], 2013, no. 11, pp. 44–51 (In Russian).
5. Frantskevich V. S., Vaytekhovich P. E., Dorogokupets A. S. Model of the movement of material along the separating device of the medium-flow mill. *Vestnik PGU. Ser. B. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the PSU. Ser. In, Industry. Applied Science], 2016, no. 11, pp. 41–46 (In Russian).
6. Dorogokupets A. S., Frantskevich V. S. The influence of technological parameters of the dynamic separator of a bowl roller mill on energy costs. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 105–109 (In Russian).
7. Akhmedov R. B., Balagula T. B., Rashidov F. K., Sakayev A. Yu. *Aerodinamika zakruchennoy strui* [Aerodynamics of a swirling jet]. Moscow, Energia Publ., 1977. 240 p.
8. Gupta A., Lilley D., Saird N. *Zakruchennyye potoki* [Swirling flows]. Moscow, Mir Publ., 1987. 588 p.

### Информация об авторе

**Францкевич Виталий Станиславович** – кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

### Information about the author

**Frantskevich Vitaliy Stanislavovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Acting Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Поступила 05.10.2017