

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.767.55

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69



## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЕЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Тюкин А.П.

Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

**Аннотация.** В статье приводится анализ существующих программных комплексов, позволяющих моделировать гидродинамические процессы, а также программных комплексов, в функционал которых входит расчет обогащительных и металлургических технологических схем. В связи с тем, что программных средств, объединяющих в себе обе рассмотренные области функционала, на рынке автором найдено не было, разработан собственный программный инструмент, моделирующий процесс газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком газа, рассчитывающий технические показатели обогащения и в автоматическом режиме подбирающий оптимальные параметры процесса с целью достижения максимальной эффективности разделения. Описана работа модулей физико-математической модели, отвечающих за просчет процессов ускорения частиц в разгонном канале, вылета из него, движения в струе газа, выхода из струи, свободного падения сквозь среду и улавливания в приемных контейнерах, а также модулей, отвечающих непосредственно за расчет показателей обогащения и расчет различных величин по двумерным матрицам входных параметров. Разработанный программный инструмент (физико-математическая модель газодинамической сепарации), находящийся в открытом доступе, позволяет изучать закономерности и особенности каждой составляющей процесса газодинамической сепарации при различных комбинациях свойств разделяемых компонентов и режимных параметров, а также позволяет в автоматическом режиме подобрать режимные параметры газодинамической сепарации новой смеси двух компонентов, обеспечивающие максимальную эффективность разделения с учетом критерия Ханкока-Луйкена с поправкой на критерий Шехирева.

**Ключевые слова:** обогащение, газодинамическая сепарация зернистых материалов, математическая модель, программно-аппаратная реализация

© Тюкин А.П., 2024

### Для цитирования

Тюкин А.П. Физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов и ее программно-аппаратная реализация // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 60-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF GAS DYNAMIC SEPARATION OF GRANULAR MATERIALS AND ITS HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION

Tukin A.P.

Institute of Mining of the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

**Abstract.** The article provides an analysis of existing software systems that allow modeling hydrodynamic processes, as well as software systems whose functionality includes the calculation of ore processing and metallurgical technological schemes. Due to the fact that the software tools combining both considered functional areas were not found on the market, the software tool that simulates the process of gas-dynamic separation of granular materials by laminar gas flow, calculates the technical parameters of concentration and automatically selects the optimal process parameters in order to achieve maximum separation efficiency was developed. The work of the modules of the physic and mathematical model responsible for calculating the processes of particle acceleration in the acceleration channel, departure from it, movement in a gas jet, exit from the jet, free fall through the medium and collection in receiving containers, as well as modules responsible directly for calculating concentration indicators and calculating various values using two-dimensional matrices of input parameters is described. The developed software tool (a physic and mathematical model of gas dynamic separation), which is in the public domain, allows to study the patterns and features of each component of the gas dynamic separation process with various combinations of properties of the separated components and operating parameters, and also allows to automatically select the operating parameters of the gas dynamic separation of a new mixture of two components, ensuring maximum separation efficiency taking into account the Hancock-Luiken criterion adjusted by the Shekhirev criterion.

**Keywords:** concentration, gas dynamic separation of granular materials, mathematical model, hardware and software implementation

## For citation

Tukin A.P. Physical and Mathematical Model of Gas Dynamic Separation of Granular Materials and its Hardware and Software Implementation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 60-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69>

## Введение

Ранее автором была разработана физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком газа [1-3]. Данная модель позволяет на основе заданных средних величин характеристик частиц каждого компонента смеси и параметром разброса данных величин выполнять расчет разделения такой смеси и рассчитывать показатели обогащения.

В ходе работы возник вопрос о программно-аппаратной реализации указанной физико-математической модели. Стандартными средствами Microsoft Excel с использованием среды программирования Visual Basic for Applications (VBA) реализация возможна, но расчеты занимают существенное время, вплоть до недель и месяцев, так как физико-математическая модель является детерминированной и просчитывает траекторию полета каждой частицы, что предполагает выполнение десятков миллиардов элементарных арифметических операций, для чего MS Excel не оптимизирован.

В связи с этим на определенном этапе исследований возник вопрос о программно-аппаратной реализации разработанной физико-математической модели. Математические модели гидродинамических процессов, в

том числе таких, как поток газа в трубе, движение струи газа, обтекание твердых тел, широко применяются в машиностроении [4]. В частности, система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks, разработанная и поддерживаемая французской компанией Dassault Systèmes SE, содержит модуль автоматизированного расчета потоков сред, интегрированный в основной интерфейс данной САПР. Это позволяет инженерам проектировать и моделировать потоки жидкостей и газов одновременно, с самого начала процесса проектирования, что имеет существенное коммерческое значение, так как значительно ускоряет сроки проектирования [5, 6].

Вместе с тем указанный программный инструмент не содержит функционала для расчета разгона твердых частиц, имеющих случайные характеристики с заданными параметрами разброса, потоком газа в разгонном канале целевого сечения с последующим движением частиц в струе газа, выходом из нее, улавливанием в приемные контейнеры и расчетом показателей обогащения.

Программный пакет Fluent, разработанный и поддерживаемый американской компанией Ansys, Inc., позволяет создавать физические модели и анализировать различные явления в жидкостях и газах, в том числе позволяет проектировать наземные, авиационные и

аэрокосмические транспортные средства, рассчитывать газовые турбины, процессы смешивания, теплообмена и др. [7, 8]. При этом аналогично Solid Works программный пакет Fluent не содержит встроенных средств для расчета показателей обогащения зернистых материалов методом газодинамической сепарации.

Программный пакет FlowVision, разработанный и поддерживаемый российской инжиниринговой компанией «ТЕСИС», также позволяет выполнять расчеты и решать задачи в аэрокосмической области, в области автомобилестроения, турбомашиностроения, энергетики (в том числе атомной), судостроении, химической промышленности, биомеханики и строительства [9]. Отечественный программный пакет поддерживает технологию параллельных вычислений и многопоточный режим расчета, что позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы [10].

Вместе с тем специалисты в области обогащения руд и металлургии во всем мире широко используют так называемый «Chemical Engineering», то есть различные программные пакеты, позволяющие моделировать соответствующие процессы и рассчитывать их показатели. По состоянию на май 2024 года существует, как минимум, 98 таких программных пакетов [11].

Вместе с тем даже такие приближенные к специфике рассматриваемой задачи программные пакеты, как, например, MetSim (разработчик – MetSim International, LLC, США [12]) и JKSimMet (разработчик – The University of Queensland, Австралия [13]), позволяющие выполнять широкий спектр обогатительных и металлургических расчетов, в ряде случаев уже содержащие информацию о химизме ряда процессов, тем не менее не решают задачи гидродинамики в условиях рассматриваемого способа газодинамической сепарации.

Таким образом, за время исследований с 2013 по 2024 годы на рынке программного обеспечения автором не найдено ни одного готового программного инструмента, который позволил бы рассчитать показатели газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком разреженного газа, задавая на вход свойства частиц смеси и параметры разброса этих свойств.

### Теория, методы исследования и технические разработки

В качестве аппаратной вычислительной платформы автором был выбран сервер российского хостинг-провайдера АО «Региональный Сетевой Информацион-

ный Центр». Программа написана автором собственными силами на языке программирования PHP, все данные хранятся в базе данных в формате MySQL. Интерфейс также написан собственными силами на языках HTML и JavaScript. Все вышеуказанные форматы являются открытыми в Российской Федерации, поддерживаются бесплатно (за исключением услуг хостинга), какие-либо затруднения, связанные с санкционной политикой недружественных стран, не влияют на их работу и не создают рисков попадания в зависимость от чьих-либо коммерческих интересов.

В частности, это означает, что при использовании в будущем физико-математической модели для решения задач, попадание результатов которых к потенциальным противникам и конкурентам России является недопустимым (например, [14]), будет возможно обеспечить требования технологического и информационного суверенитета.

Физико-математическая модель размещена автором в открытом доступе и доступна для проверки и работы с ней [15].

Упрощенная принципиальная схема процесса газодинамической сепарации показана на **рис. 1**.

На вход модели подаются следующие параметры:

- характеристики двух разделяемых компонентов смеси: диаметр частиц (среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение), коэффициент сферичности (среднее и СКО), эффективный коэффициент трения (среднее и СКО), плотность, масса навески для расчета;

- режимные параметры процесса сепарации: температура, молярная масса, статическое давление, плотность и динамическая вязкость рабочей среды (газа), линейная скорость газа в начальной точке разгонного канала, длина, ширина и высота внутренней части разгонного канала, ускорение свободного падения в месте проведения сепарации (важно для расчета процесса за пределами Земли), коэффициент ширины струи и коэффициент турбулентного перемешивания;

- параметры расчета: шаг интервала продольного расстояния (определяет количество итераций и точность расчета), количество отдельных частиц каждого компонента (определяет точность расчета стохастических характеристик разброса компонентов), высота установки разгонного канала над приемными контейнерами, длина приемного контейнера и общая длина установки.

Математический аппарат физико-математической модели в настоящей статье не дублируется, так как детально описан в [3].

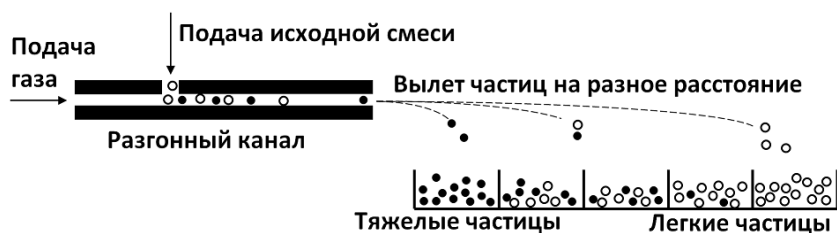


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема газодинамической сепарации  
 Fig. 1. Simplified schematic diagram of gas dynamic separation

## Результаты работы и их обсуждение

Физико-математическая модель позволяет рассчитывать и визуализировать следующие процессы:

1. Ускорение твердых частиц под воздействием ламинарного потока газа в горизонтальном разгонном канале, имеющем малую высоту, сравнимую с размерами частиц, и ширину, многократно превышающую размер частиц. Такая форма сечения позволяет снизить гидравлический диаметр трубы и, как следствие, сместить режим проведения процесса в ламинарную область при сохранении требуемой линейной скорости газа.

2. Движение твердых частиц по баллистическим траекториям после выхода из разгонного канала и их падение в приемные контейнеры. Условно делится на составляющие:

2.1. Вылет частиц из разгонного канала, кратковременное повышение продольного ускорения за счет потери трения о нижнюю стенку разгонного канала при сохранении динамического давления рабочей среды.

2.2. Движение частиц в расширяющейся плоской турбулентной струе рабочей среды, снижение продольного ускорения.

2.3. Выход частиц из плоской турбулентной струи, свободное падение в приемные контейнеры и торможение о рабочую среду.

Работа с физико-математической моделью газодинамической сепарации осуществляется в следующем общем порядке:

1. Занесение в базу данных информации о разделяемых материалах (компонентах смеси).
2. Занесение в базу данных информации о режимных параметрах газодинамической сепарации.
3. Настройка отдельных параметров расчета.
4. Выполнение необходимых расчетов и визуализации.

«Расчет ускорения» – модуль, предназначенный для расчета и визуализации процессов, происходящих

в разгонном канале. В этом разделе при помощи физико-математической модели можно визуализировать форму разгонного канала, построить графики средних скоростей частиц разных компонентов смеси, график отношения скоростей и графики ускорений частиц.

Пример работы модуля «Расчет ускорения» показан на **рис. 2**.

Модуль «Расчет ускорения» позволяет визуализировать изменение ширины сечения разгонного канала по его длине, а также построить диаграммы линейной скорости газа, скоростей частиц двух разделяемых материалов, их ускорений, а также отношения их скоростей.

«Расчет потока» – модуль, предназначенный для расчета и визуализации процессов, происходящих после выхода частиц из разгонного канала. В этом разделе при помощи физико-математической модели можно визуализировать расширяющуюся струю газа, построить траектории частиц разных компонентов разделяемой смеси, оценить разброс траекторий и расстояний, на котором частицы улавливаются в приемные контейнеры.

Модель позволяет расчетно отключить взаимодействие частиц со средой сразу после их выхода из разгонного канала. Такой режим предназначен для изучения разделительного массопереноса внутри самого разгонного канала.

Примеры работы модуля «Расчет потока» показаны на **рис. 3 и 4**.

«Обогащение» – модуль, предназначенный для расчета показателей газодинамической сепарации и отображения столбчатой диаграммы, позволяющей наглядно увидеть, как распределяется каждый из двух компонентов смеси по приемным контейнерам, а также в автоматическом режиме рассчитать показатели обогащения при условном выделении хвостов и концентрата на том или ином расстоянии по длине ряда приемных контейнеров.

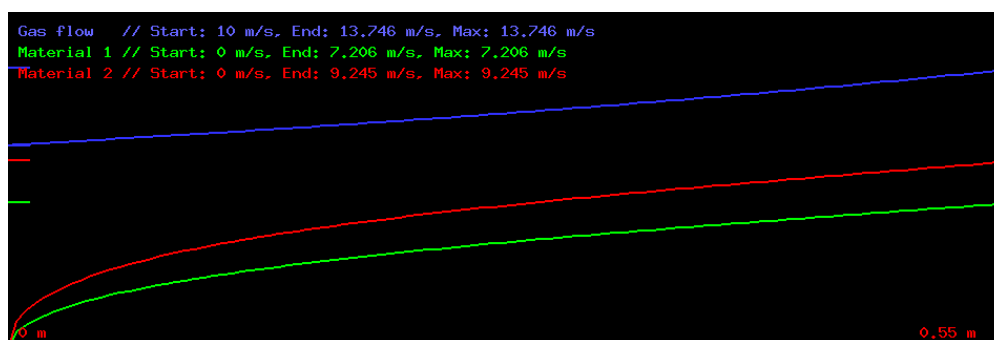


Рис. 2. Построенные диаграммы средней линейной скорости частиц ильменита (зеленым цветом), кварца (красным цветом) и собственной линейной скорости потока газа (синим цветом) в линейно сужающемся разгонном канале (ширина диаграммы 0,55 м)

Fig. 2. Diagrams of the average linear velocity of ilmenite particles (in green), quartz (in red) and the intrinsic linear velocity of the gas flow (in blue) in a linearly narrowing acceleration channel (diagram width 0.55 m)

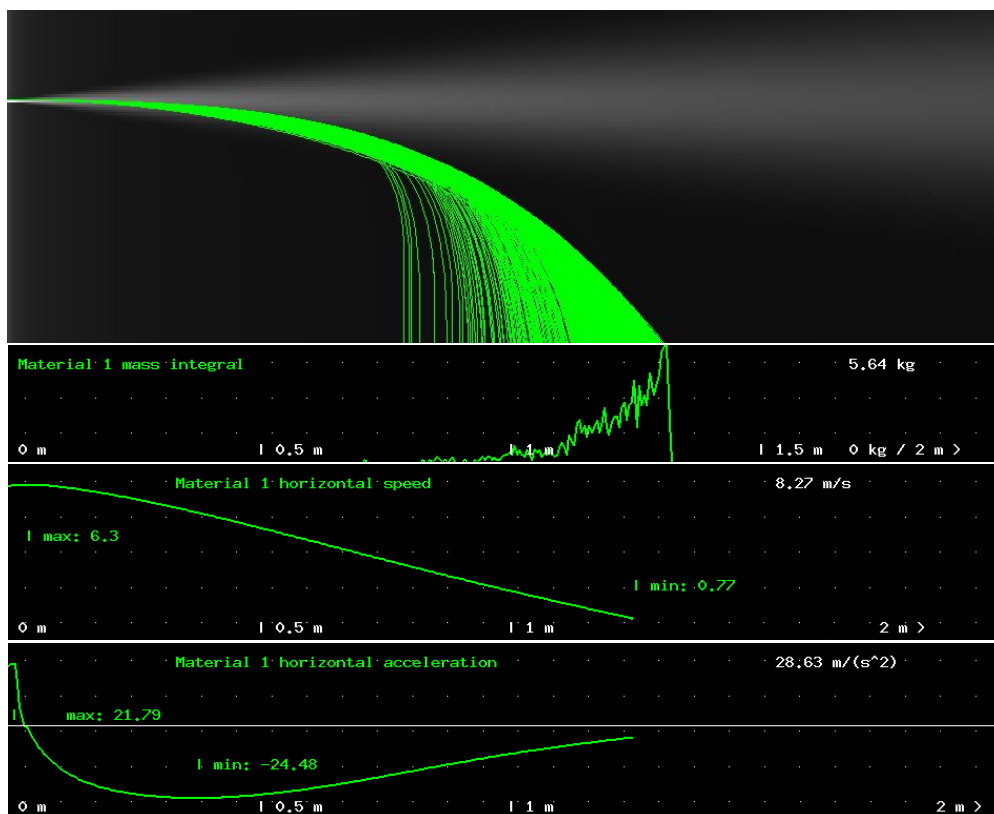


Рис. 3. Пример работы модуля «Расчет потока»: в верхней части – цветовая визуализация струи газа, выходящего из разгонного канала, траектории частиц материала; во второй части – распределение масс уловленных частиц; в третьей части – график горизонтальной проекции средневзвешенной скорости частиц; в нижней части – график горизонтальной проекции ускорения частиц

Fig. 3. An example of the operation of the Flow Calculation module: in the upper part – a color visualization of the gas jet coming out of the acceleration channel, the trajectory of the material particles; in the second part – the distribution of the masses of collected particles; in the third part – a graph of the horizontal projection of the weighted average particle velocity; in the lower part – a graph of the horizontal projection of particle acceleration

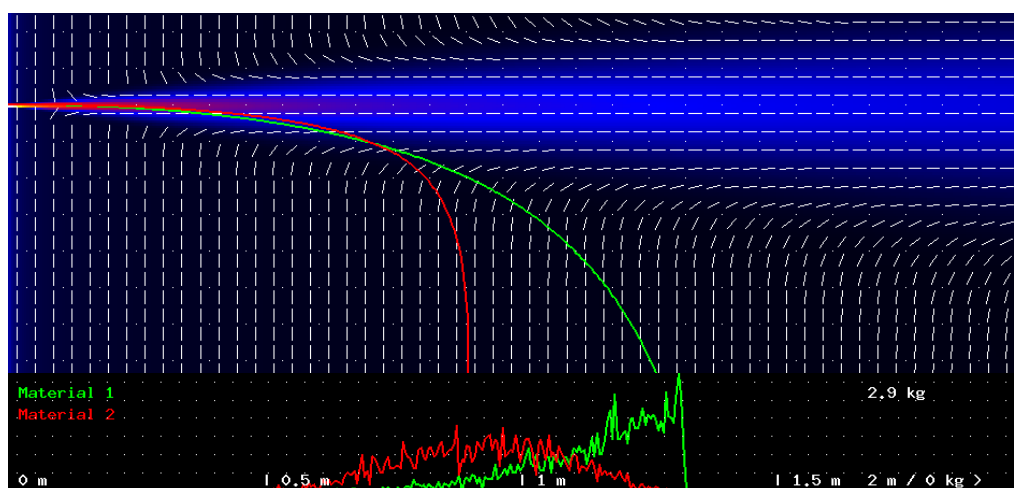


Рис. 4. Пример работы модуля «Расчет потока»: в верхней части – цветная визуализация струи газа, средние траектории частиц материалов, штриховые обозначения вектора линейной скорости газа; в нижней части – распределения масс уловленных частиц материалов

Fig. 4. An example of the operation of the Flow Calculation module: in the upper part – a color visualization of a gas jet, average trajectories of material particles, dashed designations of the linear velocity vector of the gas; in the lower part – mass distributions of collected material particles



Пример работы модуля «Обогащение» показан на рис. 5 и в табл. 1. Конечным результатом работы модуля является информация о том, начиная с какого приемного контейнера материал необходимо выделить в концентрат (либо, наоборот, в хвосты) для достижения максимальной эффективности разделения (по критерию Ханкока-Луйкена) с учетом задаваемой цели – работы на качество либо на извлечение (по критерию Шехирева [16]).

Также модуль «Обогащение» выдает отчет о показателях обогащения. Для рассмотренного примера данная информация получена в следующем виде:

«Концентрат: дальнее поле  
Отсечка после контейнера № 9 (0,9 м)  
 $m_{исх} = 200$  кг,  $m_k = 74,7$  кг,  $m_{хв} = 125,3$  кг  
 $\gamma_k = 37,35\%$ ,  $\gamma_{хв} = 62,65\%$   
 $\alpha = 50,00\%$ ,  $\beta = 94,91\%$ ,  $\theta = 23,22\%$   
 $\varepsilon_k = 70,90\%$ ,  $\varepsilon_{хв} = 29,10\%$   
 $\beta / \alpha = 1,90$  (степень концентрации)  
 $E = 0,67$  (критерий Ханкока-Луйкена)  
 $D = 0,12$  (критерий Шехирева)».

«Серии экспериментов» – модуль, предназначенный для расчета различных искомых результирующих величин при подстановке разных значений каких-либо двух входных параметров.

Первым параметром двумерной матрицы серии расчетных экспериментов могут быть:

- сопротивление в цепи компрессора, кОм, – сопротивление в электрической цепи привода компрессора сепаратора, построенного автором, задаваемое переменными резисторами с пульта управления и определяющее линейную скорость газа;
- температура газа, К;
- линейная скорость газа, м/с;
- плотность 1-го материала, кг/м<sup>3</sup>;
- диаметр частицы 1-го материала, мкм;
- эффективный коэффициент трения 1-го материала;
- длина разгонного канала, мм.

Вторым параметром могут быть:

- статическое давление рабочей среды, мбар, – давление рабочей среды (газа) после выхода из разгонного канала;
- температура газа, К;
- коэффициент сферичности 1-го материала.

Искомой величиной, рассчитываемой физико-математической моделью, могут быть:

- скорость частицы в точке выхода из разгонного канала, м/с;

- горизонтальная координата падения, м, – рассчитывается по одной частице с заданными свойствами (диаметр, коэффициент сферичности и эффективный коэффициент трения);

- средняя горизонтальная координата падения, м, – рассчитывается для каждой частицы в выборке, размер которой задан в выбранном наборе настроек, и вычисляется среднее арифметическое значение;

- среднеквадратическое отклонение координаты падения, отн. %;

- среднеквадратическое отклонение скорости частицы в точке выхода из разгонного канала, отн. %;

- средняя линейная скорость газа в канале, м/с;

- число Рейнольдса для режима течения газа в разгонном канале;

- средняя скорость слоя, действующего на сферическую частицу, м/с;

- начальное отношение скоростей двух частиц (с возможностью выбора прямого или обратного соотношения);

- конечное отношение скоростей двух частиц (с аналогичным выбором);

- поле улавливания концентрата (ближнее/дальнее);

- номер контейнера отсечки – номер приемного контейнера, после которого происходит разделение продукта на концентрат и хвосты (данный параметр, как и все последующие показатели обогащения, рассчитывается автоматически по критерию Ханкока-Луйкена и критерию Шехирева);

- масса концентрата, кг;

- масса хвостов, кг;

- выход концентрата, %;

- выход хвостов, %;

- содержание 1-го компонента в руде, %;

- содержание 1-го компонента в концентрате, %;

- содержание 1-го компонента в хвостах, %;

- извлечение 1-го компонента в концентрат, %;

- извлечение 1-го компонента в хвосты, %;

- степень концентрации;

- критерий Ханкока-Луйкена;

- критерий Шехирева.

Значения искомой величины при различных значениях 1-й и 2-й входных переменных отображаются в виде таблицы. Пример работы модуля «Серии экспериментов» показан в табл. 2 и 3.

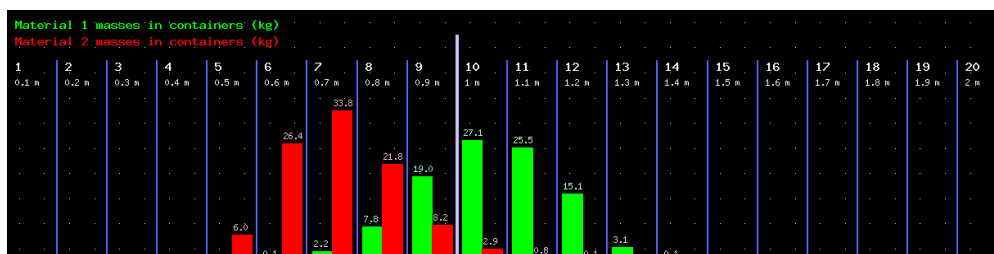


Рис. 5. Результат работы модуля «Обогащение»: 20 приемных контейнеров общей длиной 2 м и массы кварца (красный) и ильменита (зеленый) в каждом из них

Fig. 5. The result of the Concentration module: 20 receiving containers with a total length of 2 m and masses of quartz (red) and ilmenite (green) in each of them are shown

**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

Таблица 1. Результаты работы модуля «Обогащение» для условной смеси, состоящей из 100 кг кварца и 100 кг ильменита

Table 1. Results of the Concentration module for a conditional mixture consisting of 100 kg of quartz and 100 kg of ilmenite

<b>Контейнеры</b>																					
Номер Контейнера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Всего
L мин, м	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	
L макс, м	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	
<b>Массы компонентов в контейнерах</b>																					
Ильменит, кг						0,1	2,2	7,8	19,0	27,1	25,5	15,1	3,1	0,1							<b>100</b>
Кварц, кг					6,0	26,4	33,8	21,8	8,2	2,9	0,8	0,1									<b>100</b>
Смесь, кг					6,0	26,5	36,0	29,6	27,2	30,0	26,3	15,2	3,1	0,1							<b>200</b>
<b>Массы компонентов с 1-го по текущий контейнер</b>																					
Ильменит, кг						0,1	2,3	10,1	29,1	56,2	81,7	96,8	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Кварц, кг					6,0	32,4	66,2	88,0	96,2	99,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Смесь, кг					6,0	32,5	68,5	98,1	125,3	155,3	181,6	196,8	199,9	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	
<b>Массы компонентов с текущего по последний контейнер</b>																					
Ильменит, кг	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	97,7	89,9	70,9	43,8	18,3	3,2	0,1							
Кварц, кг	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	67,6	33,8	12,0	3,8	0,9	0,1									
Смесь, кг	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	194,0	167,5	131,5	101,9	74,7	44,7	18,4	3,2	0,1							
<b>Содержание компонентов в контейнерах</b>																					
Ильменит, %					0,0	0,4	6,1	26,4	69,9	90,3	97,0	99,3	100,0	100,0							
Кварц, %					100,0	99,6	93,9	73,6	30,1	9,7	3,0	0,7	0,0	0,0							
<b>Содержание компонентов с 1-го по текущий контейнер</b>																					
Ильменит, %					0,0	0,3	3,4	10,3	23,2	36,2	45,0	49,2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
Кварц, %					100,0	99,7	96,6	89,7	76,8	63,8	55,0	50,8	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
<b>Содержание компонентов с текущего по последний контейнер</b>																					
Ильменит, %	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	51,5	59,6	74,3	88,2	94,9	98,0	99,5	100,0	100,0							
Кварц, %	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	48,5	40,4	25,7	11,8	5,1	2,0	0,5	0,0	0,0							
<b>Выход продукта с 1-го по текущий контейнер («ближнего»)</b>																					
$\gamma_{бл.}, \%$					3,0	16,3	34,3	49,1	62,7	77,7	90,8	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Выход продукта с текущего по последний контейнер («дальнего»)</b>																					
$\gamma_{дал.}, \%$	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,0	83,8	65,8	51,0	37,4	22,4	9,2	1,6	0,1							
<b>Извлечение в продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)</b>																					
Ильменит, %						0,1	2,3	10,1	29,1	56,2	81,7	96,8	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Кварц, %					6,0	32,4	66,2	88,0	96,2	99,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
<b>Извлечение в продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)</b>																					
Ильменит, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	97,7	89,9	70,9	43,8	18,3	3,2	0,1							
Кварц, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	67,6	33,8	12,0	3,8	0,9	0,1									
<b>Критерий Ханкока-Луйкена, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)</b>																					
Ильменит, %						-0,32	-0,64	-0,78	-0,67	-0,43	-0,18	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Кварц, %					0,06	0,32	0,64	0,78	0,67	0,43	0,18	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>Критерий Ханкока-Луйкена, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)</b>																					
Ильменит, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,32	0,64	0,78	0,67	0,43	0,18	0,03	0,00							
Кварц, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,32	-0,64	-0,78	-0,67	-0,43	-0,18	-0,03	0,00							
<b>Критерий Шехирева, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)</b>																					
Ильменит, %						0,24	0,40	0,49	0,58	0,69	0,85	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Кварц, %					0,00	0,00	0,06	0,46	0,88	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
<b>Критерий Шехирева, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)</b>																					
Ильменит, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,54	0,12	0,02	0,00	0,00								
Кварц, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,76	0,60	0,51	0,42	0,31	0,15									
<b>Степень концентрации, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)</b>																					
Ильменит, %						0,01	0,07	0,21	0,46	0,72	0,90	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Кварц, %					2,00	1,99	1,93	1,79	1,54	1,28	1,10	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
<b>Степень концентрации, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)</b>																					
Ильменит, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03	1,19	1,49	1,76	1,90	1,96	1,99	2,00	2,00							
Кварц, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,81	0,51	0,24	0,10	0,04	0,01									

Таблица 2. Пример работы модуля «Серии экспериментов»: значение критерия эффективности разделения Ханкока-Луйкена при различных значениях линейной скорости газа и абсолютного статического давления рабочей среды

Table 2. An example of the operation of the Series of Experiments module: the value of the Hancock-Luiken separation efficiency criterion for various values of linear gas velocity and absolute static pressure of the working medium

Линейная скорость газа, м/с	Статическое давление рабочей среды $P$ , мбар		
	200	600	1000
10	0,70	0,63	0,62
12	0,66	0,79	0,73
14	0,69	0,65	0,79
16	0,78	0,65	0,71
18	0,77	0,64	0,64
20	0,64	0,66	0,63

Таблица 3. Пример работы модуля «Серии экспериментов»: расчетные величины расстояния улавливания твердых частиц при различных значениях их плотности и коэффициента сферичности

Table 3. An example of the operation of the Series of experiments module: calculated values of the distance of particulate trap at different values of their density and the coefficient of sphericity

Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сферичности материала								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
<b>2500</b>	0,49	0,53	0,57	0,62	0,67	0,72	0,76	0,81	0,80
<b>3000</b>	0,50	0,55	0,61	0,67	0,73	0,77	0,83	0,88	0,88
<b>3500</b>	0,52	0,58	0,65	0,72	0,78	0,84	0,90	0,95	0,95
<b>4000</b>	0,53	0,61	0,69	0,76	0,83	0,90	0,96	1,01	1,02
<b>4500</b>	0,55	0,64	0,73	0,80	0,88	0,95	1,01	1,06	1,07
<b>5000</b>	0,57	0,67	0,76	0,85	0,92	1,00	1,06	1,11	1,12
<b>5500</b>	0,59	0,69	0,79	0,89	0,97	1,04	1,10	1,15	1,16
<b>6000</b>	0,61	0,73	0,83	0,92	1,01	1,08	1,13	1,18	1,18
<b>6500</b>	0,63	0,75	0,87	0,97	1,04	1,11	1,17	1,21	1,21
<b>7000</b>	0,65	0,77	0,89	1,00	1,08	1,14	1,19	1,23	1,24
<b>7500</b>	0,67	0,80	0,92	1,03	1,11	1,17	1,22	1,25	1,25
<b>8000</b>	0,69	0,83	0,95	1,06	1,13	1,19	1,24	1,27	1,28

### Выводы

Разработанная физико-математическая модель газодинамической сепарации позволяет на основе входных данных о характеристиках разделяемых компонентов смеси и режимных параметрах сепарации рассчитывать и визуализировать процессы ускорения частиц в разгонном канале и их последующего свободного падения по баллистическим траекториям с улавливанием в приемные контейнеры. Модель позволяет в автоматическом режиме рассчитывать показатели обогащения и подбирать оптимальные режимы исходя из постановки задачи (работа на качество/извлечение).

Научная задача, решаемая при помощи физико-математической модели, – изучение закономерностей и особенностей каждой составляющей процесса газодинамической сепарации при различных комбинациях свойств разделяемых компонентов, режимных параметров и условий сепарации, а также поиск и формулирование правил и принципов, позволяющих определять режимные параметры для наиболее эффективной сепарации заданной смеси твердых компонентов.

Практическая задача, решение которой обеспечивается при помощи физико-математической модели, – расчет режимных параметров сепарации новой смеси твердых материалов для последующей разработки технологического регламента на проектирование участка сепарации и базового инжиниринга оборудования. В том числе, например, для проектирования газодинамического сепаратора для обогащения роголита при использовании оборотного газа низкого давления в легкой барокамере с получением металлосодержающего концентрата.

### Список источников

1. Тюкин А.П. Разработка комбинированного метода обогащения зернистых материалов с применением технологий аэродинамической и ударной сепарации: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2013. 151 с.
2. Тюкин А.П., Юшина Т.И. Математическое моделирование процессов газодинамической сепарации // Цветные металлы. 2020. № 7. С. 9–17.
3. Тюкин А.П. Усовершенствованная детерминированная физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов // Цветные металлы. 2023. № 5. С. 8–13.



4. Киреев В.И., Войновский А.С. Численное моделирование газодинамических течений. М.: Изд-во МАИ, 1991. 254 с.
5. Официальный сайт программного пакета SolidWorks, раздел «Моделирование потоков». <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>. (2024).
6. Steve Grace. Introducing Fluid Dynamics Engineer – The SolidWorks Blog, September 16, 2020. <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2020/09/introducing-fluid-dynamics-engineer.html>.
7. Официальный сайт компании Ansys, Inc., раздел «Fluent». <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. (2024).
8. Shawn Wasserman. ANSYS Fluent 17.0 Introduces New User Interface. – Engineering.com, February 5, 2016. <https://www.engineering.com/story/ansys-fluent-170-introduces-new-user-interface>.
9. Официальный сайт программного пакета FlowVision, раздел «Области применения». <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications/applications-review>. (2024).
10. Коньшин В. Параллельная реализация программного комплекса FlowVision // САПР и графика. 2006. № 12. С. 6–12.
11. List of chemical process simulators. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_chemical\\_process\\_simulators](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_process_simulators). (2024).
12. Официальный сайт компании Metsim International, LLC. <https://metsim.com/products/>. 2024.
13. Официальный сайт университета Куинсленда, Австралия, раздел «Software». <https://jktech.com.au/>. (2024).
14. Соглашение № 20220146 от 25.11.2022 между Правительством РФ и Правительством КНР «О сотрудничестве в области создания Международной научной лунной станции» / Правовой департамент МИД России. [https://www.mid.ru/ru/foreign\\_policy/international\\_contracts/international\\_contracts/2\\_contract/61731/](https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_contracts/international_contracts/2_contract/61731/)
15. Тюкин А.П. Физико-математическая модель газодинамической сепарации. <https://gasflow.org>. (2024).
16. Шехирев Д.В., Думов А.М., Стрижко В.С. Феноменологический смысл эффективности разделения по Ханкоку-Луйкену и дополнительный критерий эффективности // Обогащение руд. 2010. № 2. С. 31–35.
3. Tugin A.P. An improved deterministic physical and mathematical model of gas dynamic separation of granular materials. Tsvetnie metally [Non-ferrous Metals], 2023;(5):8-13. (In Russ.)
4. Kireev V.I., Vojnovskij A.S. Chislennoe modelirovanie gazodinamicheskikh techenij [Numerical simulation of gas dynamic flows]. Moscow: MAI Publishing House, 1991, 254 p. (In Russ.)
5. Oficialnyj sajt programmnogo paketa SolidWorks, razdel “Modelirovanie potokov” [The official website of the SolidWorks software package, section “Flow modeling”]. Available at: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>. (2024).
6. Steve Grace. Introducing Fluid Dynamics Engineer – The SolidWorks Blog, September 16, 2020. <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2020/09/introducing-fluid-dynamics-engineer.html>.
7. Oficialnyj sajt kompanii Ansys, Inc., razdel “Fluent” [The official website of Ansys, Inc., section “Fluent”]. Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. (2024).
8. Shawn Wasserman. ANSYS Fluent 17.0 Introduces New User Interface. Engineering.com, February 5, 2016. Available at: <https://www.engineering.com/story/ansys-fluent-170-introduces-new-user-interface>.
9. Oficialnyj sajt programmnogo paketa FlowVision, razdel “Oblasti primeneniya” [The official website of the FlowVision software package, the “Application areas” section]. Available at: <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications/applications-review>. (2024).
10. Konshin V. Parallel implementation of the FlowVision software package. SAPR i grafika [SAPR and graphics], 2006;(12). (In Russ.)
11. List of chemical process simulators. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_chemical\\_process\\_simulators](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_process_simulators), 2024.
12. Oficialnyj sajt kompanii Metsim International, LLC [Official website of Metsim International, LLC]. Available at: <https://metsim.com/products/>. (2024).
13. Oficialnyj sajt universiteta Kuinslenda, Avstraliya, razdel “Software” [Official website of the University of Queensland, Australia, section “Software”], 2024. Available at: <https://jktech.com.au/>.
14. Soglashenie № 20220146 ot 25.11.2022 mezhdru Pravitelstvom RF i Pravitelstvom KNR “O sotrudnichestve v oblasti sozdaniya Mezhdunarodnoj nauchnoj lunnoj stancii” [Agreement No. 20220146 dated November 25, 2022 between the Government of the Russian Federation and the Government of the People's Republic of China “On cooperation in the field of creating an International scientific Lunar Station”]. Pravovoj departament MID Rossii [Legal Department of the Russian Foreign Ministry]. Available at: [https://www.mid.ru/ru/foreign\\_policy/international\\_contracts/international\\_contracts/2\\_contract/61731/](https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_contracts/international_contracts/2_contract/61731/).
15. Tugin A.P. Fiziko-matematicheskaya model gazodinamicheskoi separacii [Physical and mathematical

#### References

1. Tugin A.P. Razrabotka kombinirovannogo metoda obogasheniya zernistykh materialov s primeneniev tehnologiy aerodinamicheskoi i udarnoi separatsii [Development of a combined method of concentration of granular materials using aerodynamic and hit separation technologies]. Moscow: MISiS, 2013, 151 p. (In Russ.)
2. Tugin A.P., Yushina T.I. Mathematical modeling of gas dynamic separation processes. Tsvetnie metally [Non-ferrous Metals], 2020;(7):9-17. (In Russ.)

model of gas dynamic separation]. Available at: <https://gasflow.org/>. (In Russ.) (2024).  
16. Shekhirev D.V., Dumov A.M., Strizhko V.S. The phenomenological meaning of the effectiveness of the

Hankok-Luiken separation and an additional criterion of effectiveness. *Obogashenie rud* [Ore concentration], 2010;(2):31-35. (In Russ.)

Поступила 22.07.2024; принята к публикации 18.09.2024; опубликована 24.12.2024  
Submitted 22/07/2024; revised 18/09/2024; published 24/12/2024

**Тюкин Александр Павлович** – кандидат технических наук, соискатель ученой степени доктора технических наук кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия.  
Email: [TukinAP@yandex.ru](mailto:TukinAP@yandex.ru)

**Alexander P. Tukin** – PhD (Eng.), Candidate for the degree of Doctor of Technical Sciences, Department of Concentration and Processing of Minerals and Man-made Raw Materials, Institute of Mining of the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia.  
Email: [TukinAP@yandex.ru](mailto:TukinAP@yandex.ru)