

Technological principles of drying into layer fluidized and its application for kaolin dry enrichment

N.A. Dvornikov

*Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Thermophysics named after. S.S. Kutateladze of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ac. Lavrentiev Pr., Bldg. 1, Novosibirsk, 630090, Russia
Tel.: +73833309040
E-mail: lab2-1@itp.nsc.ru*

Article info: received 20.03.2018, revised 26.03.2018, accepted 28.03.2018

Dvornikov, N.A. (2018) Technological principles of drying into layer fluidized and its application for kaolin dry enrichment 1(38), doi: 10.26909/csl.1.2018.4

The model of numerical calculation of drying in vortex devices and particle-classifying devices is given.

In a swirling stream, drying and simultaneous grinding of natural aggregates occurs due to friction and collision of particles of different mass and nature with each other and their separation. This ensures the achievement of high dispersion of clay and the preservation of the structure and size of sand particles.

The construction of the installation was carried out based on the results of mathematical modeling of the processes embodied in the technological ideas of kaolin enrichment, the calculation model of which is given below.

Three-dimensional models for calculating gas-dispersed turbulent flows in the presence of heat and mass transfer were used to simulate the drying and classification of clay raw materials. Since the layer in the lower part of the chamber is not formed, the main role of the rotor consists in the initial destruction of the wet aggregates of the feed material. Taking into account that the wear of the rotor increases with the energy of collision of the material with the rotor, and the collision energy quadratically increases depending on the rotor speed, it is desirable to reduce the rotor speed to increase its service life, as long as the rotor provides initial destruction of the material lumps, but does not destroy grains of sand in the feed material.

The results of industrial introduction of drying-separation plants in the processes of kaolin enrichment are described.

Key words: gas-dispersed turbulent flows, drying in vortex devices, kaolin enrichment.

Технологические основы сушки в псевдосжиженном слое и ее применение для сухого обогащения каолина

Н.А. Дворников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

Приведена модель численного расчета сушки в вихревых аппаратах и классифицирующих частицы устройствах.

В завихренном потоке происходит сушка и одновременное измельчение природных агрегатов за счет трения и соударения частиц разной массы и природы друг с другом и их сепарация. Это обеспечивает достижение высокой дисперсности глинистых и сохранение структуры и размера песчаных частиц.

Конструирование установки осуществлялось по результатам математического моделирования процессов, заложенных в технологических идеях обогащения каолина, модель расчета которых приводится ниже.

Для моделирования процессов сушки и классификации глинистого сырья использовались трехмерные модели расчета газодисперсных турбулентных потоков при наличии тепло- и массообмена. Поскольку слой в нижней

части камеры не формируется, основная роль ротора состоит в первоначальном разрушении влажных агрегатов подаваемого материала. Учитывая, что износ ротора растет с увеличением энергии соударения материала с ротором, а энергия соударения квадратично растет в зависимости от скорости вращения ротора, желательнее снижать скорость вращения ротора для увеличения срока его службы, до тех пор, пока ротор обеспечивает первоначальное разрушение комков материала, но не разрушает песчинок в подаваемом материале.

Изложены результаты промышленного внедрения сушильно-сепарационных установок в процессах обогащения каолина.

Введение

Подавляющее большинство технологических процессов при производстве керамических изделий, так или иначе, связано с сушкой, помолом и классификацией сырьевых материалов. Являясь одной из важнейших технологических операций в процессах переработки минерального сырья, сушка требует значительных затрат энергии, поэтому всегда актуальными являются вопросы ее экономии.

Главным источником уменьшения затрат при сушке является ее интенсификация, которая обуславливает эффективное использование объема сушилки. Для увеличения напряженности аппарата по влаге обычно стремятся к уменьшению размеров частиц высушиваемого материала и к увеличению его концентрации в рабочей зоне, то есть - к увеличению поверхности фазового контакта. Кроме этого, необходимо увеличивать относительную скорость дисперсной и газовой фаз, а также движущую силу процесса сушки.

Всем этим требованиям отвечают аппараты, работающие в режиме пневмотранспорта, особенно вихревые сушилки со встроенными в них дезинтеграторами или активаторами для измельчения влажного материала, в которых эффективное увеличение относительной скорости достигается при закручивании потока газозвеси материала. Кроме этого, вихревые камеры таких сушилок практически нечувствительны к нагрузкам. К достоинствам сушилки минерального сырья в псевдосжиженном слое теплоносителя следует отнести также возможность выдержки высушиваемого материала в зоне сушки, что является важным фактором при переработке пород с трудноудаляемой остаточной влагой (трепелы, диатомиты, вермикулит и т.п.).

Попытки минимизировать затраты при переработке глинистого сырья привели к созданию сушильных аппаратов, способных выполнять несколько функций, по типу «два - в одном» и «три - в одном». К таким агрегатам можно отнести мельницы-сушилки известных фирм «Manfredini & Schianchi» (Италия), «Novorotor» (Германия), «Finpulva» (Финляндия) «Micro Fuel Corporation» (США). Для глинистого сырья разработаны сушилки безуносного типа: вихревые, со встречными закручивающимися потоками и спирально-вихревые, которые позволя-

ют совмещать процесс сушки в псевдосжиженном слое с сепарацией и пылеулавливанием продуктов и решать уникальные задачи. Так, впервые была решена проблема сухого одностадийного обогащения вермикулита, имеющего пластинчатую структуру и существенное перекрытие по скорости витания полезного продукта и загрязняющих его глинистых частиц [1].

В настоящее время в России имеет место объективный дефицит производства отечественных каолиновых продуктов для нужд керамической, целлюлозно-бумажной, огнеупорной и цементной промышленности. Несмотря на то, что в Сибири и на Дальнем Востоке есть ряд месторождений каолина, по своему качеству не уступающих Глуховецким и Просьяновским каолинам, запасы этих месторождений и существующие на сегодняшний день технологические способы его обогащения не достаточны для создания в России эффективного производства, способного удовлетворить промышленные потребности. В этой связи разработка эффективных технологий обогащения и их аппаратурного обеспечения является актуальной задачей.

Сухое обогащение каолина имеет ряд технологических и технических недостатков, которые пока не позволяют ему конкурировать с технологией мокрого обогащения:

- а) выход готового продукта ниже, чем при флотационном способе;
- б) из-за нерегулярного состава тонкодисперсного каолина, выделенного на операции пылеулавливания, его необходимо направлять на вторичную перемешку или в линию мокрого обогащения. Зачастую этот продукт направляется в отходы.

Эти недостатки связаны с несовершенством некоторых технологических процессов, в частности, операции отделения каолинита от других минералов, слагающих породу. При измельчении высушенного каолина происходит или неполное раскрытие минералов, или переизмельчение сопутствующих порообразующих минералов, имеющих одинаковую или близкую плотность с каолинитом. В первом случае на поверхности зерен кварца остается большее количество каолинита, в противном случае – тонкодисперсный кварц попадает в готовый продукт, снижая его качество.

Материалы и методы исследований

Разработка конструкции установки для одностадийного сухого обогащения каолина базировалась на двух технологических идеях:

1. Процессы сушки и разрушения природной структуры глинистого сырья должны происходить одновременно, так как высушенный до влажности 0,5 - 1% каолин обладает высокой прочностью, что затрудняет организацию его селективного помола при разделении этих процессов (традиционная технология);
2. При селективном помоле сырья песчаные фракции не должны измельчаться, но при этом полностью избавляться от «каолининовой рубашки», а глинистые наоборот переходить в тонкодисперсное состояние, что позволит эффективно отделять в гравитационных классификаторах песок от каолинита.

Реализация технологических идей привела, прежде всего, к созданию новой конструкции вихревой камеры сушильно-сепарационной установки, показанной на рис. 1.

Сушка и селективное разрушение природной структуры каолина осуществляются в псевдосжиженном слое, который образуется тремя потоками

воздуха с температурой, соответственно, в диапазонах: 20-25 °С; 90-100 °С и 350-400 °С. Движение потоков воздуха, поступающих в вихревую камеру соответственно через горизонтальный, 1-й и 2-й вертикальные завихрители, обуславливается работой вентиляторов-дымососов. Равномерное распределение предварительно раздробленного каолина и поддержание псевдосжиженного слоя происходит за счет вращения с умеренной скоростью ($300 \div 600 \text{ мин}^{-1}$) ротора (рис. 1).

В завихренном потоке происходит сушка и одновременное измельчение природных агрегатов за счет трения и соударения частиц разной массы и природы друг с другом и их сепарация. Это обеспечивает достижение высокой дисперсности глинистых и сохранение структуры и размера песчаных частиц.

Конструирование установки осуществлялось по результатам математического моделирования процессов, заложенных в технологических идеях обогащения каолина, модель расчета которых приводится ниже.

Для моделирования процессов сушки и классификации глинистого сырья использовались трехмерные модели расчета газодисперсных турбулентных потоков при наличии тепло и массообмена.

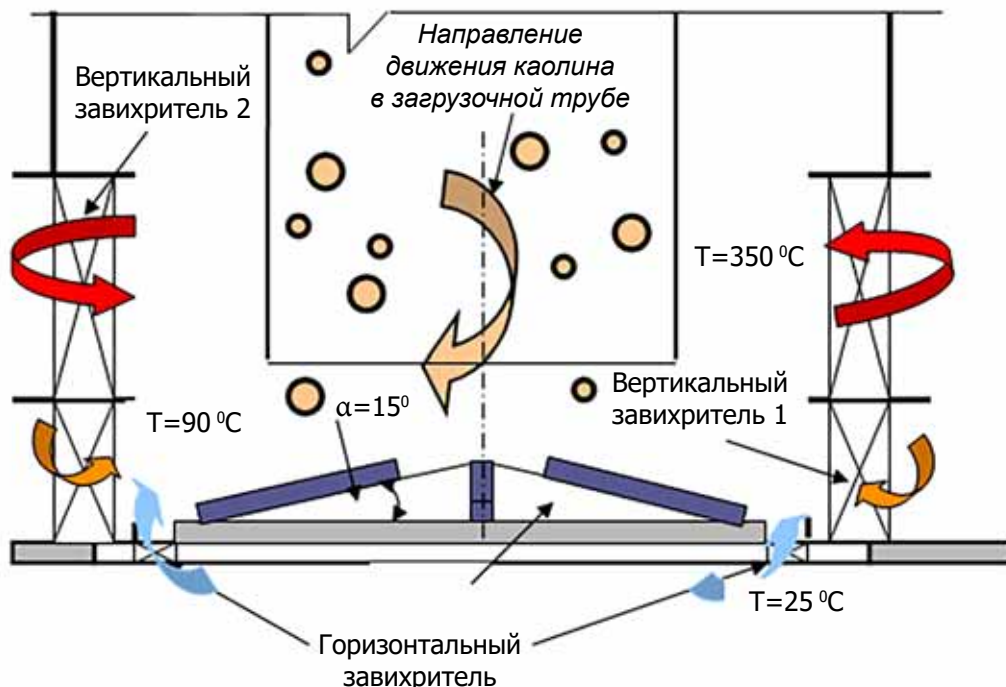


Рис. 1. Схема вихревой камеры измельчительно-сепарационной установки

Основные уравнения для моделирования процессов взяты из работ [2 - 6].

Закрученные, химически реагирующие, однофазные дозвуковые турбулентные течения описываются следующими уравнениями переноса:

$$\frac{\partial(\rho ur\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vr\Phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(r\mu_c \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + S_{\Phi} + S, \quad (1)$$

Движение частиц, прогрев и испарение влаги из них, определялись по модели Лагранжа, а также по модели взаимопроникающих жидкостей.

Уравнение движения частиц, согласно модели Лагранжа при условии, что взаимодействие частиц между собой отсутствует, имеет вид:

$$m_p \frac{dV^p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A^p |V - V^p| (V - V^p) + m_p g, \quad (2)$$

здесь:

$$C_D = \frac{24}{Re^p} (1 + 0,15 Re^{p,687}).$$

Уравнение прогрева частицы в пренебрежении радиационным теплообменом:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \pi \lambda d_p (T - T_p) Nu + L \frac{dm_p}{dt}, \quad (3)$$

Число Нуссельта Nu в формуле (3) рассчитывалось по зависимости:

$$Nu = 2,0 + 0,6 \sqrt{Re_p} \times Pr^{1/3}, \quad (4)$$

Уравнение для изменения массы частицы, включающее в себя число Шервуда, имеет вид:

$$\frac{dm_p}{dt} = Sh \cdot \pi \rho D d_p (c - c_s), \quad (5)$$

$$c_s = \frac{M_k P_s}{\rho R T_p},$$

$$Sh = 2 + 0,6 Re_p^{0,5} Sc^{1/3}.$$

При достижении температуры кипения жидкости, масса частицы изменяется по уравнению:

$$L \frac{dm_p}{dt} = -Nu \cdot \pi \cdot \lambda \cdot d_p (T - T_p). \quad (6)$$

Вид источниковых членов в формуле (1) S_p , обусловленных взаимодействием газа и частиц, записывался по PSI-CELL модели [2]. Для решения системы уравнений применялся метод контрольного объема с использованием процедуры SIMPLE [3].

Граничные условия. Для всех компонент скорости по заданному расходу и геометрии входа задавались нормальная к стенке и касательная компоненты скорости. Кинетическая энергия турбулентности на входе определялась по зависимости $k = 1,5 Tu^2 (u^2 + w^2)$, а величина $Tu = 0,1$ для периферийного и осевого потоков. Диссипация энергии турбулентности задавалась по формуле, приведенной в [7], $\varepsilon = C_{\mu} k^{3/2} / (0,03L)$, где L - поперечный масштаб струи. На выходе из вихревой камеры для всех переменных задавалось равенство нулю первой производной вдоль осевой координаты, а на оси задавалось равенство нулю первой производной вдоль радиальной координаты. Исключение составляла радиальная компонента скорости, для которой задавалась нулевая скорость на выходе из оси камеры и тангенциальная скорость, для которой задавалось равенство нулю на оси камеры. На стенках камеры ставились условия, вытекающие из логарифмического профиля скорости для компонент вдоль стенок [2], и условие непроницаемости стенок для нормальных компонент скорости.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования течения в вихревой камере приведены рис. 2 - 5.

Траектории мелких 100 мкм и крупных 1 мм частиц на рис. 2 показывают характер их взаимодействия с ротором и завихрителями в камере.

Поле тангенциальной скорости частиц диаметром 100 мкм (рис. 3) позволяет установить, что скорости вращения частиц и соответственно соударения со стенками завихрителей достигает величины порядка 20 м/с, что близко к величине скорости соударения частиц с ротором. Поскольку слой в нижней части камеры не формируется, основная роль ротора состоит в первоначальном разрушении влажных агрегатов подаваемого материала. Учитывая, что износ ротора растет с увеличением энергии соударения материала с ротором, а энергия соударения квадратично растет от скорости вращения ротора, желательно снижать скорость вращения ротора для увеличения срока его службы, до тех пор, пока ротор обеспечивает первоначальное разрушение комков материала, но не разрушает песчинок в подаваемом материале.

Температура воздуха (рис. 4) после прохождения слоя частиц близка к температуре частиц и равновесной температуре газа и частиц после высушивания материала.

Оценки показали, что при средней температуре газа 189,3 °С миллиметровая частица глины с влажностью 13% высыхает до влажности 1% за 2,79 с, тогда как время ее нахождения в нижней части камеры – 21,7 с.

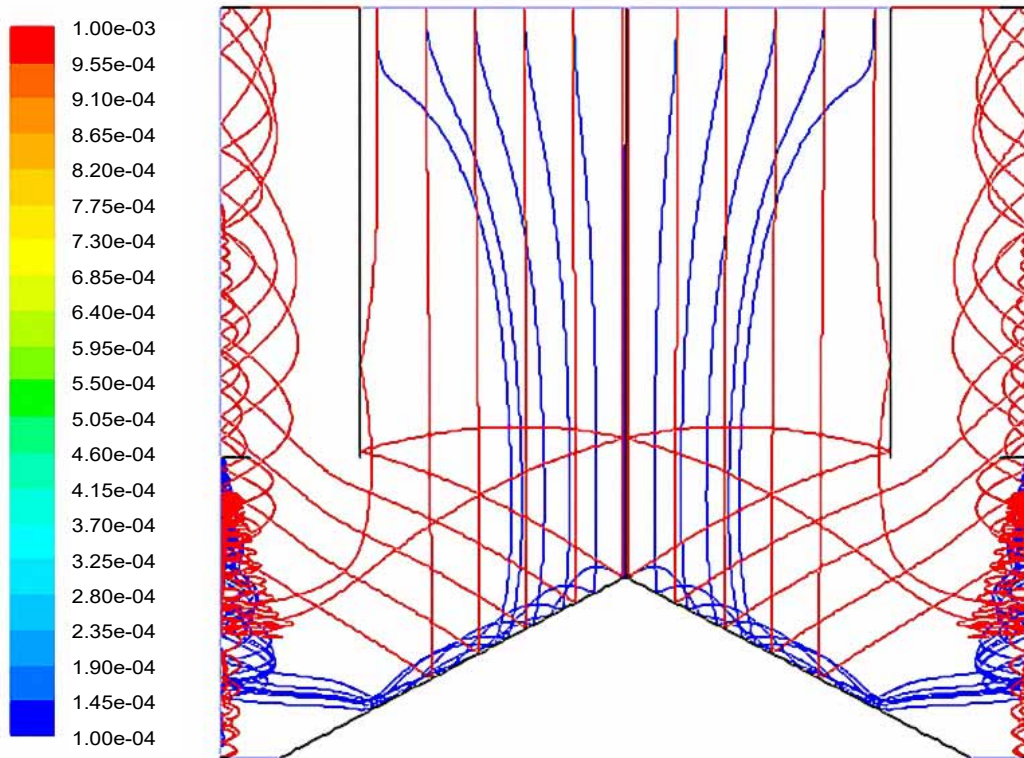


Рис. 2. Траектории частиц каолина: 1 мм (красные линии) и 100 мкм (синие линии)

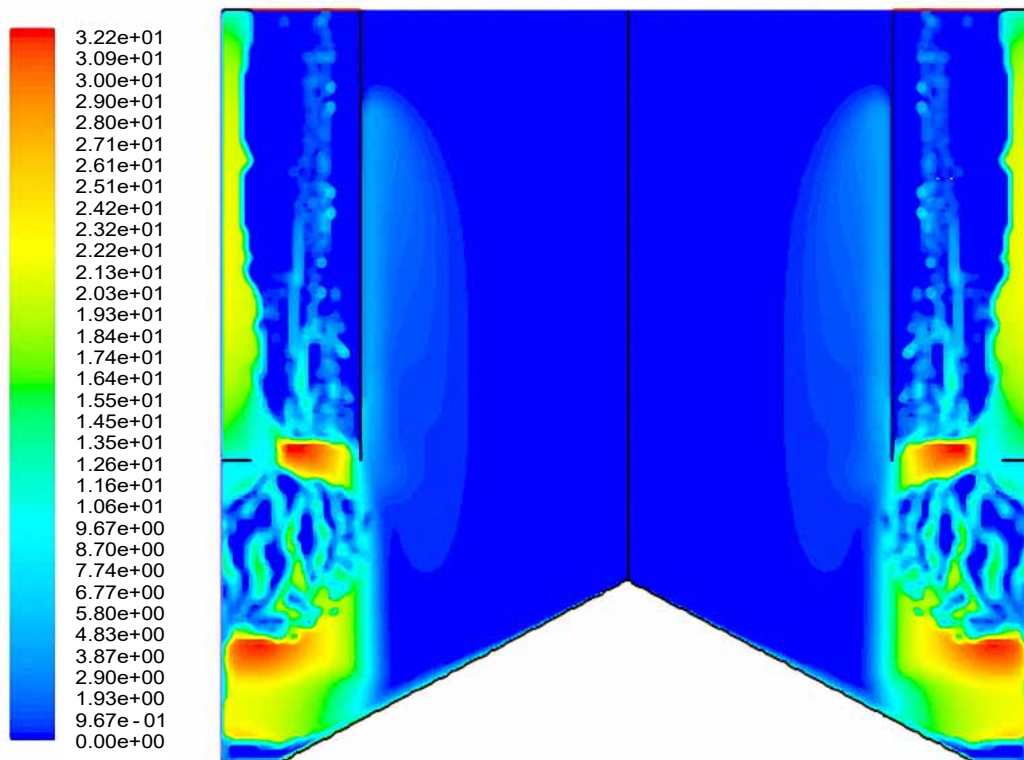


Рис. 3. Поле тангенциальной скорости (м/с) частиц каолина 100 мкм в вихревой камере

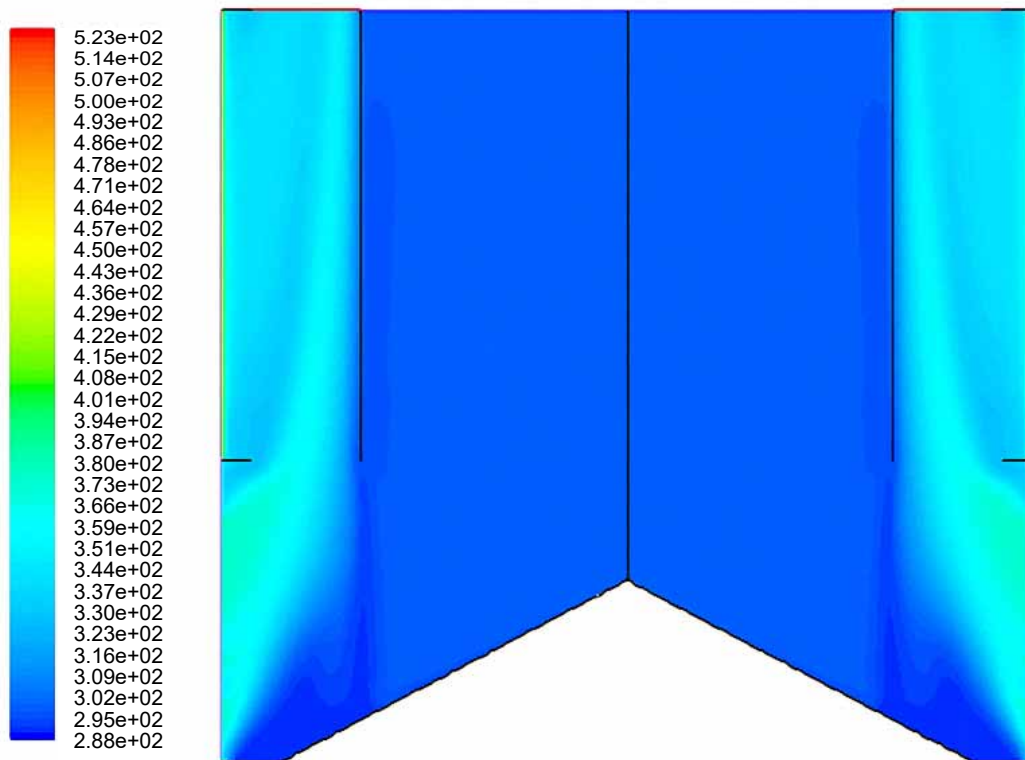


Рис. 4. Поле температуры (К) воздуха в вихревой сушильной камере

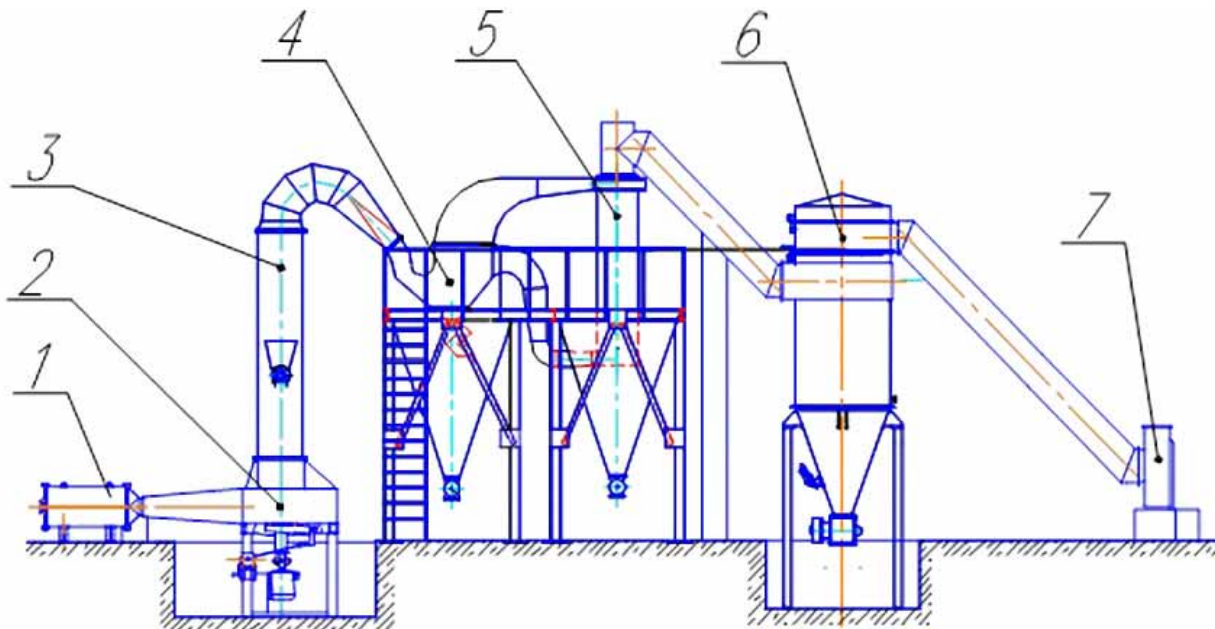


Рис. 5. Схема сушильно-сепарационной установки

В качестве примеров промышленного использования технологии одностадийного сухого обогащения ООО «НПП Баскей» можно привести два завода: вновь построенный фирмой «Geomaginvestprom LTD» завод по сухому обогащению глинистого сырья месторождения «Макванети» в Республике Грузия; и реконструированный цех обогащения каолина Компановского месторождения в г. Зеленогорске (Красноярский край, Российская Федерация).

Главной целью строительства завода в Грузии был выпуск сухих керамических масс (СКМ) для производства керамической посуды (фаянс, майолика, фарфор) и огнеупорных материалов. Годовая мощность предприятия 30000 т/год.

«Макванети» числится как месторождение белых каолиновых огнеупорных глин, и находится в 4 км от г. Махарадзе (Озургети). Каолины имеют повышенное содержание Fe_2O_3 (по сравнению с Просьяновскими и Глуховецкими каолинами) и R_2O . Глины бледно-желтого цвета, жирны на ощупь, малопластичны. В качестве механических примесей встречаются обломки трахитов. Исследования показали, что глины являются тугоплавкими, полукислыми, со средним и высоким содержанием красящих оксидов, низкодисперсными и умереннопластичными. Минеральный и химический составы представлены в таблицах 1 и 2.

Каолины после первичного дробления поступали в сушильно-сепарационную установку, схема которой показана на рис. 5. Сырье одновременно сушится и измельчается в вихревой сушильной камере (2), откуда попадают на классификацию в инерционно-гравитационные аппараты (4) для раз-

деления частиц в диапазоне 50- 5000 мкм. Наиболее мелкие фракции улавливаются в циклоне ВЗП (5), ультрадисперсные частицы - в рукавных фильтрах (6). Производительность установки от 8 до 10 т/час.

При сухом обогащении за счет измельчения трахитов, составляющих каменистую и песчано-пылеватую фракции, получается сырье с повышенным содержанием K_2O . Продукт на выходе можно отнести к щелочным каолинам с массовым соотношением $K_2O/Na_2O > 20$. Подобные каолины выпускает ОАО «Стройфарфор» г. Шахты Ростовской области. При переработке опытных партий получился материал с содержанием ортоклаза до 60% и выше, что обеспечивает содержание по K_2O около 9-10%.

Промпродукт, выделяющийся в 1-й и 2-й ступенях аспирационной системы (1 и 2 бункеры), содержит много трахита с 5-10% фракции менее 100 мкм и является хорошо спекающимся сырьем с малой огневой усадкой, которое может стать заменителем шамота. При повторной перемешке за счет разрушения и истирания фракции в 3 и 4 бункерах образуется порошок с содержанием полевого шпата до 70% и выше.

Таким образом, получаемый в результате переработки продукт является готовой сухой, тонкодисперсной, обогащенной (без каменистых включений трахитов) керамической смесью (по аналогии с сухими строительными смесями), которую можно использовать для получения широкого спектра керамических изделий, в том числе и тонкой керамики.

В результате обработки технологического режима были получены следующие энергетические затраты при температуре окружающего воздуха 27 °С

Таблица 1.

Минеральный состав щелочных каолинов месторождения Макванети

Наименование разности	Содержание в %				
	ортоклаз	гидромусковит	каолинит	кварц	примеси
белый	35	26	31	6	2
бледно-желтый	45	19	29	5	2

Таблица 2.

Химический состав щелочных каолинов месторождения Макванети

Материал	Содержание в % на высушенное вещество								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п
исходный	55,20	24,33	2,77	0,66	0,5	0,71	8,40	0,44	7,09
1 бункер	55,98	23,34	2,70	0,64	<0,5	0,69	7,86	0,45	6,88
2 бункер	56,32	25,04	2,78	0,65	<0,5	0,63	7,5	0,45	6,79
3 бункер (ВЗП)	55,54	25,45	2,42	0,66	<0,5	0,54	8,46	0,57	6,55
рукавный фильтр	55,10	25,24	2,38	0,66	0,52	0,5	9,11	0,63	6,56

Таблица 3.

Гранулометрический состав

Размер частиц, мм	исходный		1 бункер		2 бункер		3 бункер	рукавный фильтр
	сухой	мокрый	сухой	мокрый	сухой	мокрый	мокрый	мокрый
0-006	4,0	69,9	11,5	60,0	9,4	43,0	92,4	99,5
006-01	1,5	3,0	11,7	4,7	8,4	3,9	3,4	0,3
01-02	3,8	5,3	35,0	14,0	25,5	11,9	3,3	0,2
02-03	3,4	2,5	20,8	9,2	21,0	12,4	0,7	0,0
03-05	4,8	2,7	12,4	7,2	19,5	14,9	0,2	0,0
05-1,6	21,3	9,0	7,8	4,7	15,8	13,7	0,0	0,0
1,6-2,5	19,2	4,3	0,4	0,1	0,4	0,3	0,0	0,0
2,5-5	42,2	3,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Запесоченность		30,1		40,0		57,0	7,6	0,5

Таблица 4.

Результаты анализа химического состава каолина

Материал	Содержание оксидов в % на сухое вещество							
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	ППП
Исходный	23,4	63,8	1,43	0,6	0,19	2,35	0,15	8,07
1 бункер	21,9	67,1	1,81	0,57	0,17	2,17	0,18	7,2
2 бункер	13,2	78,1	1,64	0,44	0,12	1,7	0,15	5,2
3 бункер	30,8	53,4	1,72	0,71	0,16	1,95	0,17	10,5
рукавный фильтр	33	49,7	1,8	0,87	0,18	1,24	0,18	12,9

и относительной влажности 95%. Расход природного газа на 1 тонну сухого продукта 22 м³ н или 3200 кДж/кг испаренной влаги. Расход электроэнергии на 1 тонну сухого продукта 15 кВт/час.

Испытания технологической линии по одностадийному обогащению каолина в цехе керамики и огнеупоров «ПО ЭХЗ» (г. Зеленогорск) проводились в 2008 году и показали следующие результаты. Выход готового продукта составил 60%, извлечение каолина – 79,6%. Влажность сырья, идущего на обогащение – 13-15%; влажность каолина после обогащения – 0,2-0,5%; Содержание песчаных частиц в исходном сырье и по ступеням аспирационной системы технологической линии приведены в табл. 3, химический состав - в табл. 4.

Выводы

Таким образом, сочетание математического моделирования установок для сушки и сепарации глинистого сырья с применением современных математических моделей, опыта их конструирования и внедрения позволяет с уверенностью использовать их для решения широкого класса новых технологических задач с иными требованиями по производительности и составу получаемого продукта.

References

1. *Стороженко, Г.И.* Новая технология сухого обогащения вермикулита [Текст] / Г.В. Болдырев, В.Г. Ярошук, М.И. Маценко, В.А. Самура, Н.А. Дворников // Строительные материалы. – 2004. – №1. – С. 20 – 21.
2. *Crowe, C.T.* The Particle Source in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows [Text] / M.P. Sharma, D.E. Stock // Trans. ASME, J. Fluids Eng.. – 1977. – P. 325.
3. *Launder, B.E.* The calculation of turbulent boundary layers on spinning and curved surfaces [Text] / C.H. Priddin, B.I. Sharma // Trans. Am. Soc. mech. Engrs. J. Fluids Eng. – 1977. – V. 99. – P. 231 – 239.
4. *Patankar, S.V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere. – 1980. – 435 p.
5. *Khalil, E.E.* The Calculation of Local Flow Properties in Two-Dimensional Furnaces [Text] / D.B. Spalding, J.H. Whitelaw // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1975. – V. 186. – P. 775 – 791.
6. *Гунта, А., Лилли, Д., Сайред, Н.* Закрученные потоки. – М.: Мир. – 1987. – 588 с.
7. *Volchkov, E.P.* Turbulent combustion modeling in a boundary layer over a porous flat plate with ethanol injection [Text] / N.A. Dvornikov, L.N. Perepechko // Russian journal of engineering thermo physics. – 1995. – V.5. – № 4.