

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА ЗАПУСКА МОНОТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

© 2024

В. А. Зрелов доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; zrellov07@mail.ru

А. Ю. Лыкин старший преподаватель кафедры инженерной графики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; auforstud@gmail.com

Вопрос улучшения энергомассовых характеристик является одним из наиболее важных при разработке газогенераторов различного назначения. В связи с этим, в рамках работ по поиску путей использования перспективных видов топлив проводились экспериментальные исследования газогенератора, работающего на смесевом монотопливе на базе нитроэфиров. В качестве устройства, инициирующего реакцию горения, использовался гранулированный саморазогревающийся тепловой аккумулятор запуска, размещающийся в цилиндрической камере сгорания. Экспериментальные исследования позволили выявить особенности сложного и многостадийного процесса преобразования монотоплива, происходящего в поровом пространстве камеры сгорания газогенератора на поверхностях гранул и внутри сложной системы каналов, состоящих из элементарных ячеек, образованных этими гранулами. При этом поровое пространство теплового аккумулятора представляет собой гранулированную засыпку из монодисперсных гранул неупорядоченной структуры. Задачей работы, описываемой в статье, являлось создание математического описания гранулированной засыпки неупорядоченной структуры, решаемой в двумерной постановке. Предлагается метод перехода от гексагональной укладки к условно-упорядоченной, сочетающей в себе компактность гексагональной и удобство описания – кубической. Получаемая укладка позволяет представить половину фронтального сечения гранулированного теплового аккумулятора в виде вертикального плоского слоя с заданной структурой, определяемой пористостью, диаметром гранул и габаритами камеры сгорания – её длиной и диаметром. Предложенный подход перехода от неупорядоченной структуры засыпки к условно-упорядоченной позволил разработать математическую модель, описывающую внутреннюю структуру теплового аккумулятора запуска, и определить координаты зон теплового аккумулятора, в которых происходят различные стадии преобразования монотоплива. Это позволит перейти к формированию описания рабочего процесса газогенератора с гранулированным саморазогревающимся тепловым аккумулятором запуска.

Монотопливный газогенератор; поровое пространство; типы гранульных упаковок; условно-упорядоченная укладка; площадь проходного сечения; координаты центров гранул; оценка изменения площади засыпки

Цитирование: Зрелов В.А., Лыкин А.Ю. Разработка математической модели внутренней структуры гранулированного теплового аккумулятора запуска монотопливного газогенератора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 177-187.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-177-187

Сложный и многостадийный процесс преобразования монотоплива в камере сгорания газогенерирующего устройства – газогенератора (ГГ) с гранулированным саморазогревающимся тепловым аккумулятором (ТА) запуска – происходит в поровом пространстве ТА. Результаты экспериментальных исследований, представленные в работах [1; 2], позволили авторам раскрыть физическую картину развития этих процессов и определить взаимозависимость и особенности протекания физических процессов пре-

образования смесевых монотоплив в условиях различных режимов работы ГГ, а также разработать модель рабочего процесса. С учётом особенностей протекания рабочего процесса в ГГ целесообразно формировать такую модель как регулярную, которая будет отражать реальные структуры и процессы в исследуемом объекте и опираться на теоретическое описание физических процессов [3]. При этом модель рабочего процесса монотопливного ГГ представляется в виде совокупности взаимосвязанных моделей, отражающих следующие стадии рабочего процесса – режим запуска, установившийся и режим останова, а также режим пауз между включениями.

На всех режимах работы ГГ процессы преобразования монотоплива происходят в поровом пространстве гранулированного ТА, на поверхностях гранул и внутри сложной системы каналов, состоящих из элементарных ячеек, которые образованы этими гранулами. При этом поровое пространство гранулированного ТА представляет собой засыпку из монодисперсных гранул неупорядоченной структуры.

Следует отметить, что устройства, у которых в основе их принципа действия заложены процессы, протекающие в пористых структурах, размещаемых в замкнутом объёме, нашли широкое применение в различных областях техники. В качестве пористых структур наиболее часто используются гранулированные засыпки, состоящие из сферических гранул неупорядоченной структуры. Гранулированные засыпки в таких устройствах выполняют различные функции. Это и охлаждение/нагрев, происходящие в теплообменных аппаратах [4 – 6], фильтрация твёрдых частиц, присутствующих в жидких и газообразных средах [7; 8], осаждение различных вредных примесей в адсорберах различной конструкции [9; 10]. Нашли широкое применение катализаторы, выполненные в виде гранулированных засыпок, размещаемые в реакторах [11 – 14].

Модели рабочих процессов, протекающих в пористых структурах, используют различные подходы при описании свойств гранулированной засыпки. В работах [15 – 17], описывающих процессы тепломассообмена, пористые структуры, представляющие собой неупорядоченную засыпку из сферических гранул, в математической модели реализуются в виде системы тонких трубок извилистой формы равной длины.

В ряде работ [18; 19] при определении теплопроводности пористых структур параметры поровой среды определяются на базе экспериментальных данных, при этом структура засыпки не учитывается. При построении температурного профиля по толщине гранулированной засыпки на базе экспериментальных данных она рассматривается как кубическая [20]. Моделирование укладки гранул предлагается осуществлять на основе разработанной программы, которая методом подбора радиусов гранул формирует 2D поле гранул разных размеров, контактирующих между собой [21]. Однако такая модель ориентирована в большей степени на определение пятен контактов гранул и проходных сечений между ними, что не даёт представления о координатах гранул.

Известны модели, применяемые в фармацевтической промышленности, модели, используемые при описании различных строительных смесей [22], при рассмотрении распределения активного вещества внутри связующего [23]. Также используются методы описания пространственных гранулированных структур, в качестве которых рассматривается расположение атомов в кристаллической решётке, как это принято в кристаллографии [24], где задача решается в трёхмерном виде. Однако, эти модели не позволяют описывать такие структуры в двумерной постановке.

В настоящей работе даётся математическое описание геометрических особенностей ТА во фронтальном сечении по оси камеры сгорания. К геометрическим особенностям гранульной засыпки авторы относят как координаты поверхностей гранул, на которых происходит первичное взаимодействие капельно-жидкостного факела, так и системы каналов, образованных гранулами, в которых происходит течение двухфазного потока и конечное преобразование монотоплива в продукты сгорания.

Создание математической модели неупорядоченной засыпки представляется возможным на основе анализа свойств известных структур в виде сферических монодисперсных гранул [15]. При этом наименее плотной моделью укладки является кубическая, а наиболее плотной – гексагональная. Все другие типы упаковок по плотности занимают промежуточное положение между этими двумя.

Гранульные засыпки принято характеризовать следующими основными параметрами: средняя объёмная пористость Π ; удельная поверхность α_g ; площадь активного взаимодействия $S_{ТА}$; средняя площадь проходного сечения $F_{ТА}$. При этом наиболее важными параметрами являются координационное число K , определяемое как число соседних гранул, находящихся в контакте с выбранной гранулой, и угол укладки φ . На рис. 1 показаны основные типы гранульных упаковок, отличающихся друг от друга взаимной ориентацией гранул, и приведены соответствующие им значения пористости и координационного числа.

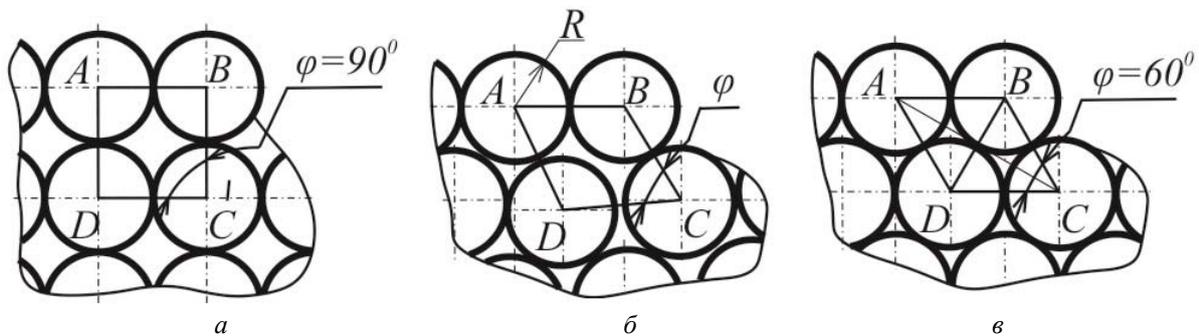


Рис. 1. Зависимость пористости (Π) и координационного числа (K) от типа укладки гранульных засыпок:
 а – кубическая ($\Pi = 0,476$; $K = 3$); б – произвольная ($0,395 < \Pi < 0,476$; $K = 4$);
 в – гексагональная ($\Pi < 0,395$; $K = 6$)

Наиболее распространённым объёмом для упаковки засыпок, как и в случае расположении ТА в объёме камеры сгорания объекта исследования [1], является цилиндр конечных размеров.

Для этого случая упаковки, анализируя параметры гранульных засыпок из монодисперсных сферических гранул, на основании данных [15; 17; 25] можно сделать вывод о том, что любая засыпка может быть полностью охарактеризована четырьмя основными параметрами: пористостью Π , радиусом гранул R , диаметром ограничивающего цилиндра D и его длиной L . Учитывая связь этих параметров и координационного числа [15; 16], можно утверждать, что они полностью и однозначно характеризуют любую гранульную засыпку.

Анализ показывает, что наиболее целесообразно свести представление неупорядоченной укладки при неизменных габаритах цилиндра к условно-упорядоченной, сочетающей в себе компактность гексагональной и удобство описания свойств – кубической. Начало пространственных координат удобнее всего располагать по оси ТА на верхней границе первого от форсунки ряда гранул (рис. 2, а).

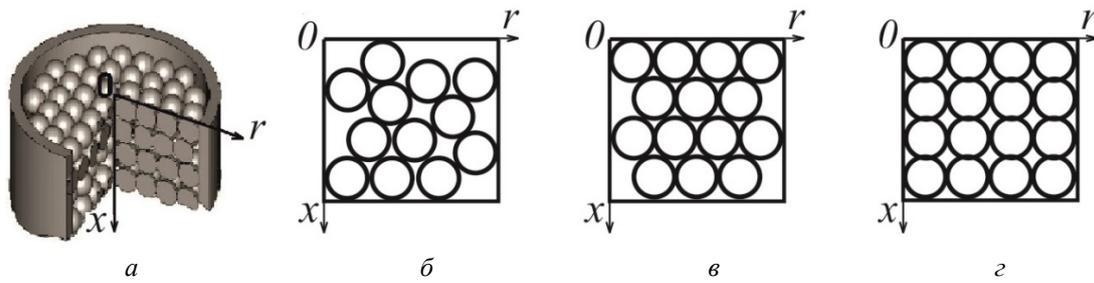


Рис. 2. Последовательность трансформации укладки:
 а – объёмная модель; б – неупорядоченная;
 в – гексагональная; з – условно-упорядоченная (кубическая)

При разработке математической модели реальной засыпки в двумерной постановке (рис. 2, б) использована схема самой плотной – гексагональной укладки гранульной засыпки, как имеющей наиболее близкие к неупорядоченной значения пористости и координационного числа. При этом в ней назначаются реальные значения пористости, диаметры гранул и габариты цилиндра. Такая укладка будет иметь одинаковое с реальной количество гранул, площадь активного взаимодействия, свободный объём, приходящийся на одну гранулу, координационное число, площадь проходного сечения и др., но несколько иные межслойные (межцентровые) расстояния. Такой подход позволяет получить условную упорядоченную (гексагональную) структуру с минимальным расстоянием между центрами гранул в соседних горизонтальных слоях, но обладающую всеми остальными свойствами реальной (рис. 2, в). Следующим шагом преобразования укладки является трансформация условной гексагональной структуры в кубическую, что во фронтальном сечении цилиндра будет выражаться в сдвиге горизонтальных слоёв относительно друг друга в радиальном направлении на величину половины диаметра гранулы. При этом получается условная кубическая укладка гранул в половине фронтального сечения с горизонтальными слоями гранул в осевом направлении, перекрывающимися друг друга на некоторую высоту (рис. 2, з).

Проверка вариативности предложенного метода представления произвольной гранульной укладки проводилась по оценке погрешности, возникающей при изменении площади гранул, располагающихся в половине фронтального сечения цилиндра. Это изменение площади, занимаемой гранулой, возникает в результате перекрытия смещаемой в радиальном направлении гранулой сектора площади гранулы верхнего слоя (рис. 2, в).

Результаты расчётов показали, что изменение площади при разных вариантах габаритов укладки не превышает 5,6%, что в рамках ранее изложенных доводов позволяет сделать вывод о возможности использования предложенного метода описания случайной укладки в виде условно-упорядоченной в широком диапазоне как габаритных размеров цилиндра, так и диаметров сферических гранул.

Получаемая в результате трансформаций условно-упорядоченная кубическая структура засыпки обладает всеми свойствами реальной неупорядоченной, а её интегральные характеристики могут быть получены простым умножением характеристик вертикального слоя в половине фронтального сечения ТА на количество таких вертикальных слоёв. Полученная структура позволяет осуществить переход от сферической гранулы, как элементарной составляющей гранульной засыпки, к понятию элементарной ячейки, которое используется при формировании модели ТА и двумерной модели внутрикамерных процессов. При делении ТА на элементарные ячейки во фронтальном сечении получается прямоугольная сетка, образованная границами элементарных ячеек. Начало пространственных координат, как указывалось выше, удобнее всего распо-

лагать по оси ТА на верхней границе первого от форсунки ряда ячеек. Обозначив и за-координировав во фронтальном сечении ТА центры элементарных ячеек, можно получить точки сосредоточения таких среднеинтегральных параметров ячеек, как температура твёрдой фазы, температура, давление и плотность газовой фазы.

Предлагаемый способ дискретизации пространства гранулированного теплового аккумулятора существенно отличается от способов, традиционно используемых для разбиения пространства теплообменных устройств. Особенность в том, что количество элементарных ячеек при его применении соответствует количеству гранул в реальной неупорядоченной структуре, а свойства элементарных ячеек соответствуют свойствам сферических гранул. Исходя из этого, можно составить математическое описание структуры гранулированного ТА. Принимая за основные параметры известные значения габаритов цилиндрического ТА – D , L , радиус сферических гранул R и среднеобъёмную пористость случайной укладки Π , можно рассчитать случайное количество гранул ТА по соотношению

$$N = \frac{3}{16} \frac{D^2 L (1 - \Pi)}{R^3}, \quad (1)$$

и округлить до ближайшего целого значения.

Для этапа перехода от неупорядоченной структуры ТА к условной гексагональной количество горизонтальных слоев гранул во фронтальном сечении ТА может быть определено выражением

$$N_x = \frac{L - 2R}{R\sqrt{3}} + 1. \quad (2)$$

Руководствуясь невозможностью выходить за габариты цилиндрического ТА, выражение необходимо округлить до ближайшего целого значения в сторону уменьшения. Количество гранул в слое при гексагональном типе укладки можно определить выражением

$$N_r^{\text{гекс}} = N / N_x, \quad (3)$$

где N_x определяется выражением 2.

Переходя от гексагональной укладки к условно-упорядоченной кубической и считая, что по контуру, ограничивающему фронтальное сечение ТА, гранулы вплотную примыкают к его границам, межцентровые расстояния в осевом и радиальном направлениях можно определить соотношениями:

$$l_x = \frac{L - 2R}{N_x - 1}, \quad (4)$$

$$l_r = \frac{D - 2R}{2N_r^{\text{упор}} - 1}, \quad (5)$$

где $N_r^{\text{упор}}$ – количество гранул, уместяющееся в радиальном направлении от оси до границ ТА в случае условно-упорядоченной кубической укладки. Оно может быть определено выражением

$$N_r^{\text{упор}} = D/4R, \quad (6)$$

которое необходимо округлить до ближайшего целого значения в сторону уменьшения по соображениям, изложенным выше.

Схема расположения гранул в условно-упорядоченной кубической укладке в половине фронтального сечения ТА приведена на рис. 3.

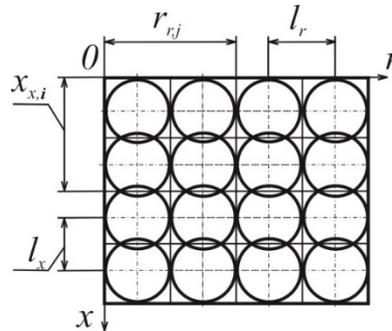


Рис. 3. Схема расположения гранул в тепловом аккумуляторе (фронтальное сечение)

При этом количество гранул, когда горизонтальные слои условно вдвинуты один в другой на некоторое расстояние, будет составлять $N_{\text{упор}} = N_x \cdot N_r^{\text{упор}}$. Изменение количества гранул в результате трансформации произвольной засыпки в условно-упорядоченную кубическую укладку оценивается соотношением

$$N_o = \frac{N}{N_{\text{упор}}} = \frac{N}{N_x \cdot N_r^{\text{упор}}}. \quad (7)$$

Значение N_o в общем случае может быть дробным. Условное смещение гранул не влияет на результаты расчётов при описании внутрикамерных процессов, так как высота слоёв в любом случае соответствует размеру гранул. Переходя от гранул к элементарным ячейкам, их границы окончательно можно определить по выражениям:

– в осевом направлении:

$$x_{r,i} = R + (2i - 1) \frac{l_x}{2}; \quad (8)$$

– в радиальном направлении:

$$r_{r,j} = j \cdot l_r, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, (N_x - 1)$; $j = 1, 2, 3, \dots, (N_r^{\text{упор}} - 1)$.

Координаты центров элементарных ячеек определяются по выражениям:

– в осевом направлении:

$$x_{\text{ци}i} = R + (1 - i)l_x; \quad (10)$$

– в радиальном направлении:

$$r_{иj} = \frac{l_r}{2} + (j-1)l_r, \quad (11)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, N_x$; $j = 1, 2, 3, \dots, N_r^{\text{упор}}$.

Площадь торцевой поверхности элементарной ячейки с учётом её радиального положения определяется выражением:

$$F_j = \frac{\pi}{N_o} (r_{r,j}^2 - r_{r,j-1}^2), \quad (12)$$

а условная ширина ячейки определяется соответственно:

$$l_{o,j} = \frac{F_j}{(r_{r,j} - r_{r,j-1})}, \quad (13)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, (N_r^{\text{упор}} - 1)$.

Другие параметры гранулированного теплового аккумулятора из сферических гранул могут быть получены с учётом основных (Π , D , L , R , K) по элементарным геометрическим соотношениям.

Таким образом, основываясь на анализе традиционных описаний структуры гранулированных засыпок, разработана математическая модель неупорядоченной засыпки из монодисперсных сферических гранул, формирующей внутреннее пространство ТА запуска. Модель позволяет определить координаты зон ТА, в которых происходят различные стадии преобразования монотоплива. Это дает возможность осуществить оценку проникающего воздействия полидисперсного капельно-жидкостного факела при его взаимодействии с гранулированной структурой ТА, что является одним из важных аспектов рабочего процесса монотопливного ПГ с гранулированным ТА запуска.

Библиографический список

1. Зрелов В.А., Лыкин А.Ю. Экспериментальное исследование температурного поля порового пространства гранулированного теплового аккумулятора // Двигатель. 2020. № 4-6 (130-132). С. 40-43.
2. Зрелов В.А., Лыкин А.Ю. Экспериментальное исследование процесса взаимодействия капельно-жидкостного факела с гранулированным тепловым аккумулятором // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 1 (38). С. 21-26.
3. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
4. Ratuszny P. Thermal energy storage in granular deposits // E3S Web of Conferences. 2017. V. 19. DOI: 10.1051/e3sconf/20171901022
5. Rady M. Granular phase change materials for thermal energy storage: experiments and numerical simulations // Applied Thermal Engineering. 2009. V. 29, Iss. 14-15. P. 3149-3159. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.018
6. Ibrahim N.I., Al-Sulaiman F.A., Rahman S., Yilbas B.S., Sahin A.Z. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical

review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 74. P. 26-50. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.169

7. Соловьева О.В., Хусаинов Р.Р. Сравнение гранулированных фильтров с разными по форме частицами // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 12. С. 214-217.

8. Портнова Т.М., Витковская Р.Ф., Дрегуло А.М., Кудрявцев А.В., Родионов В.З., Проценко О.В., Фуртатова А.С. Реактивация сорбента (гранулированного активированного угля) двухслойных скорых фильтров для оптимизации качества питьевого водоснабжения // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2021. № 1 (85). С. 3-8. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.3-8

9. Chen W., Zhao H., Xue Y., Chang X. Adsorption effect and adsorption mechanism of high content zeolite ceramsite on asphalt VOCs // *Materials*. 2022. V. 15, Iss. 17. DOI: 10.3390/ma15176100

10. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 1999. 469 с.

11. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Ахметвалеева Л.В. Сравнительный расчёт движения химически-реагирующего потока газа при прохождении через традиционный гранулированный слой катализатора и катализатор на основе высокопористого ячеистого материала // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 4. С. 80-83.

12. Нецкина О.В., Комова О.В., Симагина В.И. Гранулированные родиевые катализаторы гидролиза боргидрида натрия для генераторов высокочистого водорода // *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89, № 10. С. 1305-1311.

13. Холиков М.М., Сафаров М.М., Джураев Д.С. Плотность и изохорная теплоёмкость катализаторов на основе пористой гранулированной оксиды алюминия // *Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инновации*. 2018. № 4 (44). С. 36-40.

14. Александров П.В., Бухтиярова Г.А., Носков А.С. Современные подходы к тестированию гранулированных катализаторов гидроочистки нефтяных фракций в лабораторных условиях // *Катализ в промышленности*. 2014. № 5. С. 88-94.

15. Лыков А.В. Теплообменник. М.: Энергия, 1978. 480 с.

16. Справочник по теплообменникам / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

17. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиномов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

18. Beck A.E. An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks // *Geophysics*. 1976. V. 41, Iss. 1. P. 133-144. DOI: 10.1190/1.1440596

19. Baumann T., Zunft S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. V. 143. P. 38-47. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.06.037

20. Duan L., Qi Ch., Ling X., Peng H. The contact heat transfer between the heating plate and granular materials in rotary heat exchanger under overloaded condition // *Results in Physics*. 2018. V. 8. P. 600-609. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.12.018

21. Géminard J.-Ch., Gayvallet H. Thermal conductivity of a partially wet granular material // *Physical Review E*. 2001. V. 64. DOI: 10.1103/physreve.64.041301

22. Кузьменков М.И., Куницкая Т.С. Вяжущие вещества и технология производства изделий на их основе: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2003. 218 с.

23. Van Hauwermeiren D., Verstraeten M., Doshi P., Ende M.T., Turnbull N., Leed K., De Beer T., Nopens I. On the modelling of granule size distributions in twin-screw

wet granulation: Calibration of a novel compartmental population balance model // Powder Technology. 2019. V. 341. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.025

24. Брусенцов Ю.А., Минаев А.М. Основы физики и технологии оксидных полупроводников: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2002. 80 с.

25. Duran J. Sands, powders, and grains: An Introduction to the physics of granular materials. New York: Springer, 2000. 214 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0499-2

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE INTERNAL STRUCTURE OF A GRANULAR HEAT ACCUMULATOR FOR LAUNCHING A MONO-FUEL GAS GENERATOR

© 2024

V. A. Zrelov Professor of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; zrelov07@mail.ru

A. Yu. Lykin Senior Lecturer; Department of Engineering Graphics, Samara National Research University, Samara, Russian Federation; auforstud@gmail.com

The issue of improving energy-mass characteristics is one of the most important ones in the development of gas generators for various purposes. In this regard, as part of the search for ways to use promising types of fuels, experimental studies of gas generators operating on composite mono-fuel based on nitrate esters were carried out. As a device initiating the combustion reaction, a granular self-heating heat accumulator was used, which was placed in a cylindrical combustion chamber. Experimental studies made it possible to reveal the features of a complex and multi-stage process of mono-fuel conversion occurring in the pore space of the gas generator combustion chamber on the surfaces of the granules and inside a complex system of channels consisting of elementary cells formed by these granules. In this case, the pore space of the heat accumulator is granular filling of mono-dispersed granules of a disordered structure. The task of the work described in the article was to create a mathematical description of granular filling of a disordered structure, solved in a two-dimensional formulation. The article proposes a method of transition from hexagonal stacking to conditionally ordered one that combines the compactness of hexagonal stacking and the ease of description of cubic stacking. The resulting stacking makes it possible to represent half of the frontal section of the granular heat accumulator in the form of a vertical flat layer with a given structure determined by porosity, granule diameter and dimensions of the combustion chamber – its length and diameter. The proposed approach for the transition from a disordered filling structure to a conditionally ordered structure made it possible to develop a mathematical model that describes the internal structure of the launch heat accumulator and determine the coordinates of the heat accumulator zones in which various stages of monopropellant conversion take place. This will allow us to proceed to the formation of a description of the working process of gas generators with a granular self-heating heat launch accumulator.

Mono-fuel gas generator; pore space; types of granular packing; conventionally ordered packing; passage area; coordinates of granule centers; assessment of change in backfill area

Citation: Zrelov V.A., Lykin A.Yu. Development of a mathematical model of the internal structure of a granular heat accumulator for launching a mono-fuel gas generator. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 177-187. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-177-187

References

1. Zrelov V.A., Lykin A.Yu. Experimental study of the temperature field of the pore space of a granular heat accumulator. *Dvigatel'*. 2020. No. 4-6 (130-132). P. 40-43. (In Russ.)

2. Zrelov V.A., Lykin A.Yu. Experimental study of the interaction process of a dropliquid torch with a granulated heat accumulator. *Pumps. Turbines. Systems*. 2021. No. 1 (38). P. 21-26. (In Russ.)

3. Chuyan R.K. *Metody matematicheskogo modelirovaniya dvigateley letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie* [Methods of mathematical modeling of aircraft engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 288 p.

4. Ratuszny P. Thermal energy storage in granular deposits. *E3S Web of Conferences*. 2017. V. 19. DOI: 10.1051/e3sconf/20171901022

5. Rady M. Granular phase change materials for thermal energy storage: experiments and numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*. 2009. V. 29, Iss. 14-15. P. 3149-3159. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.018

6. Ibrahim N.I., Al-Sulaiman F.A., Rahman S., Yilbas B.S., Sahin A.Z. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 74. P. 26-50. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.169

7. Soloveva O.V., Khusainov R.R. Comparison of granular filters with various forms of particles. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019. No. 12. P. 214-217. (In Russ.)

8. Portnova T.M., Vitkovskaya R.F., Dregulo A.M., Kudryavtsev A.V., Rodionov V.Z., Protsenko O.V., Furtatova A.S. Sorbent (granulated activated carbon) reactivation in dual-media rapid filters to optimize the quality of drinking water. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021. No. 1 (85). P. 3-8. (In Russ.). DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.3-8

9. Chen W., Zhao H., Xue Y., Chang X. Adsorption effect and adsorption mechanism of high content zeolite ceramics on asphalt VOCs. *Materials*. 2022. V. 15, Iss. 17. DOI: 10.3390/ma15176100

10. Karnaukhov A.P. *Adsorbtsiya. Tekstura dispersnykh i poristykh materialov* [Texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1999. 469 p.

11. Soloveva O.V., Solovev S.A., Ahmetvaleeva L.V. Comparative calculation of chemically-responsive gas flow through the traditional granular catalyst layer and the catalyst based on open cell foam material. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020. No. 4. P. 80-83. (In Russ.)

12. Netskina O.V., Komova O.V., Simagina V.I. Granulated rhodium catalysts of sodium borohydride hydrolysis for generators of high-purity hydrogen. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016. V. 89, Iss. 10. P. 1625-1631. DOI: 10.1134/S1070427216100104

13. Kholikov M.M., Safarov M.M., Juraev D.S. Density and exhaust heat capacity of catalysts based on porous granulated aluminum oxide. *Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*. 2018. No. 4 (44). P. 36-40. (In Russ.)

14. Alexandrov P.V., Bukhtiyarova G.A., Noskov A.S. Modern approaches to testing granulated catalysts in the hydrotreatment of oil distillates under laboratory conditions. *Catalysis in Industry*. 2015. V. 7, Iss. 1. P. 47-53. DOI: 10.1134/S207005041501002X

15. Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat-and-mass transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 480 p.

16. *Spravochnik po teploobmennikam / pod red. B.S. Petukhova, V.K. Shikova. T. 1.* [Directory of heat exchangers / ed. by B.S. Petukhov, V.K. Shikov. V. 1]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1987. 560 p.

17. Vargaftik N.B., Filippov L.P., Tarzinamov A.A., Totskiy E.E. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov* [Reference book on heat conduction of liquids and gases]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p.

18. Beck A.E. An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks. *Geophysics*. 1976. V. 41, Iss. 1. P. 133-144. DOI: 10.1190/1.1440596
19. Baumann T., Zunft S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. V. 143. P. 38-47. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.06.037
20. Duan L., Qi Ch., Ling X., Peng H. The contact heat transfer between the heating plate and granular materials in rotary heat exchanger under overloaded condition. *Results in Physics*. 2018. V. 8. P. 600-609. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.12.018
21. Géminard J.-Ch., Gayvallet H. Thermal conductivity of a partially wet granular material. *Physical Review E*. 2001. V. 64. DOI: 10.1103/physreve.64.041301
22. Kuz'menkov M.I., Kunitskaya T.S. *Vyazhushchie veshchestva i tekhnologiya proizvodstva izdeliy na ikh osnove: ucheb. posobie* [Binders and technology for making products based on them. Study guide]. Minsk: Belarusian State Technological University Publ., 2003. 218 p.
23. Van Hauwermeiren D., Verstraetenb M., Doshi P., Ende M.T., Turnbull N., Leed K., De Beer T., Nopens I. On the modelling of granule size distributions in twin-screw wet granulation: Calibration of a novel compartmental population balance model. *Powder Technology*. 2019. V. 341. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.025
24. Brusentsov Yu.A., Minaev A.M. *Osnovy fiziki i tekhnologii oksidnykh poluprovodnikov: ucheb. posobie* [Fundamentals of physics and technology of oxide semiconductors: Study guide]. Tambov: Tambov State Technical University Publ., 2002. 80 p.
25. Duran J. Sands, powders, and grains: An Introduction to the physics of granular materials. New York: Springer, 2000. 214 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0499-2