

P16-2010-41

Рем Кван Чол, Е. П. Шабалин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОЗАТОРА ПАССИВНОГО ТИПА
ДЛЯ ШАРИКОВОГО ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ
НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Рем Кван Чол, Шабалин Е. П.

P16-2010-41

Исследование возможности использования дозатора пассивного типа для шарикового холодного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2М

Проведено исследование поведения шариков в пассивном дозаторе (типа песочных часов) для проектируемого холодного замедлителя реактора ИБР-2М на основе программы PFC-3D, предназначенной для решения многочастичных задач DEM-методом. Численными экспериментами показано, что при размере шариков 4 мм и диаметре выпускной трубки дозатора больше 13 мм заторы движения шариков не возникают во всех частях дозатора. Также вычислено, что крайние шарики выходят из дозатора в 1,3–1,4 раза медленнее, чем центральные. Найдена специальная геометрия и размеры выпускной трубки дозатора, обеспечивающие необходимый (с точки зрения допустимого времени пребывания метановых шариков в камере замедлителя) расход шариков — 1–1,2 шарика в секунду.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Ryom Kwang Chol, Shabalin E. P.

P16-2010-41

Possibility Research to Use a Passive Type Feeder for the Pelletized Cold Neutron Moderator of the IBR-2M Pulsed Reactor

The investigation of the behavior of balls in a passive feeder (of a sandwatch type) for the prospective cold moderator of the IBR-2M pulsed reactor on the basis of the PFC-3D program intended for the analysis of multiparticle problems with the so-called DEM method has been carried out. Numerical experiments have shown that no jams of the flow of 4 mm balls occurred, provided that the diameter of a discharging tube is more than 13 mm. And it is also shown that balls of the boundary layer come out of the feeder at 1.3–1.4 times more slowly than balls of the central position. Eventually, special geometry and sizes of the discharging tube ensuring needed (in view of admissible residence time of methane in a moderator chamber) flow rate of balls 1–1.2 balls per second are obtained.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В реакторе ИБР-2М шарики замедлителя (из твердого мезитилена или метана) диаметром 4 мм должны поступать в систему холодного замедлителя со средним расходом 1–2 шарика в секунду. Разработанный в настоящее время дозатор основан на принципе пропускания шариков через отверстия в медленно вращающемся диске. Такое устройство может применяться только для загрузки шариков в тракт подачи их к камере холодного замедлителя. Выброс замедлителя из камеры предполагается производить в жидкой фазе, периодически отогревая камеру [1]. Более эффективной была бы постоянная смена шариков в камере, обеспечивающая непрерывную работу замедлителя. Для этого простым и надежным устройством может быть дозатор типа *песочных часов*, будем называть его *пассивным* дозатором. Из камеры замедлителя, состоящей из нескольких отсеков с отводками в виде воронки и выпускной изогнутой трубки (см. рис. 1), шарики выкатываются с заданной частотой. На шарики замедлителей в дозаторе действуют гравитационная сила и силы трения. В этих условиях можно подобрать такие геометрию и размеры частей дозатора, что при достижении динамического равновесия между действующими на шарики силами установится требуемый расход шариков. Холодный замедлитель нейтронов с таким дозатором ранее никем не предлагался.

В работе исследовано поведение шариков в пассивном дозаторе для проектируемого холодного замедлителя реактора ИБР-2М на основе программы PFC-3D, предназначенной для решения многочастичных задач DEM-методом [2, 3].

ПРИНЦИП РАБОТЫ И СТРУКТУРА ПАССИВНОГО ДОЗАТОРА

На рис. 1 представлена схема пассивного дозатора холодного замедлителя.

В системе холодного замедлителя шарики замедляющего вещества (мезитилена, метана) диаметром ~ 4 мм заполняют отсеки камеры замедлителя до определенной высоты. Под действием гравитации через конусный и трубный участки дозатора они удаляются из камеры с установленной частотой, и с такой же частотой в камеру подсыпаются «свежие» шарики (принцип подачи шариков в камеру может быть таким же или иным; это не является задачей

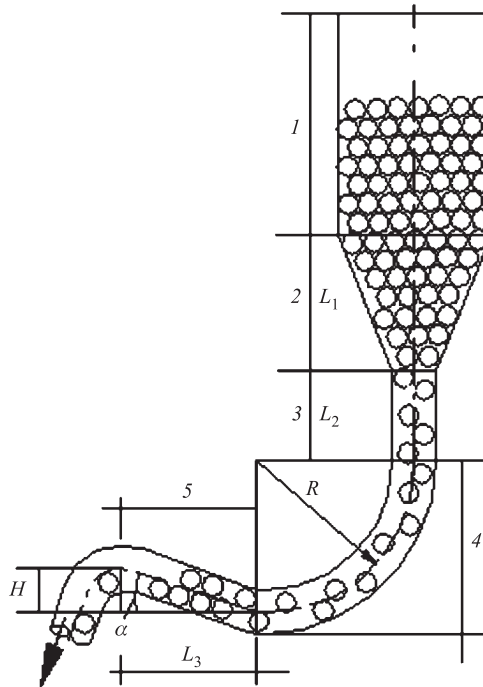


Рис. 1. Схема пассивного дозатора шариков холодного замедлителя нейтронов: 1 — цилиндрический участок (отсек камеры замедлителя); 2 — конусный участок; 3 — прямая часть выпускной трубки; 4 — изогнутая часть трубки; 5 — наклонная часть трубки

данной работы) с тем, чтобы высота засыпки оставалась постоянной. При этом диаметр выпускной трубки должен быть выбран таким, чтобы не возникали заторы в движении шариков. После прохождения прямой части трубки шарики замедлителя испытывают постепенно увеличивающееся сопротивление в изогнутой части трубки, которое потом, в ходе прохождения наклонной части трубки, будет максимальным. Таким образом, подбором высоты подъема и длины наклонной части трубки можно достигнуть динамического равновесия между сопротивлением шариков и гравитационной нагрузкой от всех шариков, заполняющих отсек камеры. При этом, очевидно, средний расход шариков достигнет стабильного требуемого расхода.

Задача оптимизации конфигурации дозатора есть проблема динамического равновесия в многочастичном процессе; это равновесие очень чувствительно как к геометрии дозатора, так и к физическим свойствам материалов (коэффициенты трения шариков о стенки дозатора и между собой, плотность

Таблица 1. Главные данные объекта моделирования

Параметр	Шарик замедлителя	Стенки дозатора
Материал	Твердый метан при $T = 20$ К	Алюминий (Al)
Коэффициент трения	0,5	0,5
Плотность, г/см ³	0,5	2,7
Диаметр, мм	~ 4,0	—
Коэффициент жесткости	10^4	10^4

шариков, коэффициенты жесткости, адгезионные свойства и др.). В табл. 1 представлены главные данные объекта моделирования.

Основы теории расчета многочастичного ансамбля шариков. Силы, действующие на шарики, и движение шариков определяются классическими законами движения и тяготения с применением следующих дополнительных условий.

1. Шарики рассматривают как сплошные сферические твердые тела.
2. Контакты возникают на очень маленьких площадях («точечные» контакты).
3. В контактах между шариками сцепляющие связи (притягивающие силы) не существуют.
4. Шарики двигаются независимо друг от друга, а взаимодействуют только в контактах между собой или с границами стенок дозатора.
5. Закон движения применяется только к шарикам, но не к стенкам (т.е. силы, которые действуют на стенку, не влияют на ее движение).

При выполнении этих условий движение каждого шарика полностью определено действующими на него силами и моментами сил, непрерывно меняющимися в ходе движения всего ансамбля шариков.

Движение твердого шарика определено поступательным движением центра массы в шарике и вращательным движением шарика. Поступательное движение центра массы описано на основе его положения x_i , скорости \dot{x}_i и ускорения \ddot{x}_i ; вращательное движение шарика описано на основе его угловой скорости ω_i и углового ускорения $\dot{\omega}_i$. Тогда движения шариков описываются следующими векторными уравнениями:

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (\text{для поступательного движения}), \quad (1)$$

$$M_i = I \cdot \dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{5}mR^2\right) \cdot \dot{\omega}_i \quad (\text{для вращательного движения}), \quad (2)$$

где F_i — сумма всех внешних сил, действующих на i -й шарик; m — масса шарика; g_i — проекция вектора ускорения, вызванного силой тяготения; M_i — суммарный момент, действующий на шарик; I — момент инерции шарика; R — радиус шарика.

Уравнения движения (1) и (2) интегрируются методом конечных разностей с временным шагом Δt . Значения величин \dot{x}_i и ω_i вычисляются в середине временных интервалов $t \pm n\Delta t/2$, в то время как значения величин x_i , \ddot{x}_i , $\dot{\omega}_i$, F_i и M_i вычисляются на границе интервалов $t + n\Delta t$.

Тогда, используя скорости поступательного движения и угловые скорости в середине временных интервалов, поступательные и угловые ускорения в момент времени t можно вычислить как

$$\begin{aligned}\ddot{x}_i^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right), \\ \dot{\omega}_i^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left(\omega_i^{(t+\Delta t/2)} - \omega_i^{(t-\Delta t/2)} \right).\end{aligned}\tag{3}$$

Поступательные и угловые скорости в момент $t + \Delta t/2$ вычисляются как

$$\begin{aligned}\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t, \\ \omega_i^{(t+\Delta t/2)} &= \omega_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{M_i^{(t)}}{I} \right) \Delta t.\end{aligned}\tag{4}$$

Наконец, скорости в уравнении (4) используются, чтобы обновить положение центра массы шарика:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t.\tag{5}$$

При этом $\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)}$ и $\omega_i^{(t+\Delta t/2)}$ применяются для получения значений $F_i^{(t+\Delta t)}$ и $M_i^{(t+\Delta t)}$, которые будут использованы в следующем цикле применением закона *силы-смещения* в контактах. Закон *силы-смещения* связывает относительное смещение двух предметов в точке контакта с силой, действующей на предметы в контакте (контакт *шарик-шарик* или контакт *шарик-стенка*).

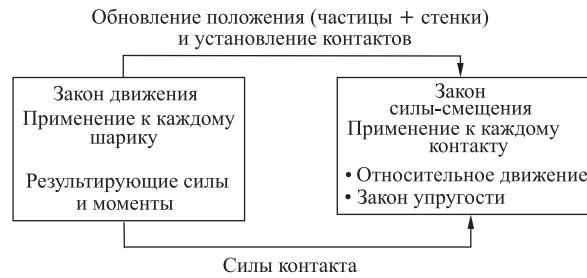


Рис. 2. Цикл вычисления в PFC-3D

Применение закона движения к каждому шарiku и закона силы-смещения к каждому контакту для каждого интервала Δt постоянно обновляет относительные положения шариков (см. рис. 2). Контакты, которые могут существовать между двумя шариками или между шариком и стенкой, формируются и уничтожаются автоматически в течение моделирования в PFC-3D.

СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Геометрическая модель дозатора шарикового замедлителя была создана с использованием программ PFC-3D и Rhinoceros 4.0. Сравнительно простые геометрические объекты, такие как прямые цилиндрические части и конусная часть, были созданы с использованием программы PFC-3D, а более сложные — изогнутая и наклонная части — с использованием программы Rhinoceros 4.0 [4]. Геометрические объекты, созданные в Rhinoceros 4.0, после преобразования к типу файла «*.STL» через процесс зацепления были введены в PFC-3D на начальном этапе моделирования с использованием функции чтения FISH с CAD-поддержкой.

Объекты моделирования — шарики замедлителя — генерировались с использованием встроенной функции в программе PFC-3D. Во избежание перекрытия созданных шариков сначала они генерировались с меньшим диаметром 2 мм, который постепенно увеличивался до номинального диаметра 4 мм при постоянном значении коэффициента пористости. Увеличение диаметра прекращалось автоматически, как только шарики начинали перекрываться. Созданная таким образом геометрическая модель представлена на рис. 5 и 7.

Граничные и начальные условия. Граничные условия. Границы моделирования задавались внутренним объемом созданной геометрической модели, а также простирались на небольшое расстояние после выхода из дозатора. Для моделирования реального процесса непрерывной смены шариков в камере замедлителя шарики, которые покидают дозатор, удаляются из моделирования, одновременно новые шарики программно создаются наверху цилиндрической части дозатора и добавляются в моделирование.

Начальные условия. В начальный момент моделирования на каждый шарик действует только гравитация, а с момента возникновения контактов начинают действовать все силы, в том числе сила трения. Коэффициент пористости при создании полного ансамбля шариков был установлен равным 0,4.

Определение временного шага для стабильности моделирования. Моделирование в программе PFC-3D является устойчивым, только если временной шаг не превышает некоторого критического значения, которое связано с минимальным собственным периодом полной системы. Этот критический временной шаг зависит от физических свойств, особенно от массы шариков и значений коэффициентов жесткости. Его значение для нашей задачи было

рассчитано автоматически с использованием функции FISH в PFC-3D и оказалось равным приблизительно $2,2 \cdot 10^{-5}$ с. Реальный временной шаг был выбран равным 0,8 от критического временного шага.

ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PFC-3D

После установления граничных и начальных условий программа PFC-3D проводит моделирование поведения шариков в дозаторе. Общая процедура моделирования представлена на рис. 3.



Рис. 3. Общая процедура моделирования в PFC-3D

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численные эксперименты по возникновению заторов в дозаторе. Эти численные эксперименты были проведены для определения целесообразного диаметра выпускной трубки дозатора. Их результаты представлены на рис. 4.

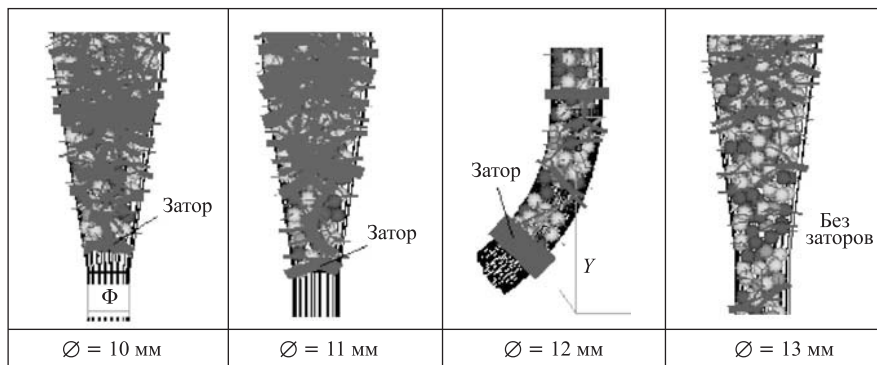


Рис. 4. Результаты численных экспериментов для определения диаметра выпускной трубки

Из рис. 4 видно, что в случае диаметра выпускной трубки дозатора меньше 12 мм возникают существенные заторы и течение шариков прекращается. Но в случае диаметра больше 13 мм заторы во всех частях дозатора не возникают и течение шариков не прекращается.

Численные эксперименты для оценки влияния трения на радиальное распределение скорости движения шариков. Наличие трения между стенками и шариками и между шариками приводит к замедлению движения шариков, граничащих со стенками дозатора, по сравнению с центрально расположенными шариками. Для проведения численного эксперимента по оценке эффектов трения при передвижении шариков-замедлителей в дозаторе использовалась функция окрашивания объектов в PFC-3D. Шариками в дозаторе были разделены на три слоя: красный, синий и зеленый, что позволило выявить зависимость времени выхода шарика из дозатора от его начального положения относительно оси цилиндрической части дозатора (рис. 5). Результат этого эксперимента представлен в табл. 2 и на рис. 6, 7.

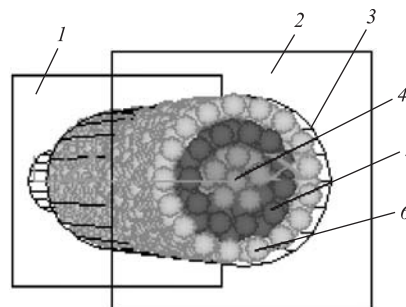


Рис. 5. PFC-3D геометрия, созданная для моделирования распределения скорости падения шариков в дозаторе: 1 — сечение в нижней части дозатора; 2 — сечение в верхней части дозатора; 3 — цилиндрическая стенка; 4 — красные шарики в центре; 5 — синие шарики в середине; 6 — зеленые шарики вблизи стенки

Таблица 2. Изменение количества и относительной доли шариков, имеющих данный цвет, в общем количестве шариков, удаленных из дозатора

Общее количество шариков, удаленных из дозатора	Зеленые, количество (доля)	Синие, количество (доля)	Красные, количество (доля)
201	79 (2,257)	87 (2,486)	35 (1,00)
400	155 (2,067)	170 (2,267)	75 (1,00)
600	239 (2,173)	251 (2,282)	110 (1,00)
820	328 (2,172)	341 (2,258)	151 (1,00)
1000	411 (2,356)	416 (2,405)	173 (1,00)
1223	503 (2,351)	506 (2,364)	214 (1,00)
1309	552 (2,544)	540 (2,488)	217 (1,00)
1369	595 (2,717)	555 (2,534)	219 (1,00)
1393	614 (2,778)	558 (2,525)	221 (1,00)
1404	623 (2,819)	560 (2,534)	221 (1,00)
1500	717 (3,244)	562 (2,543)	221 (1,00)

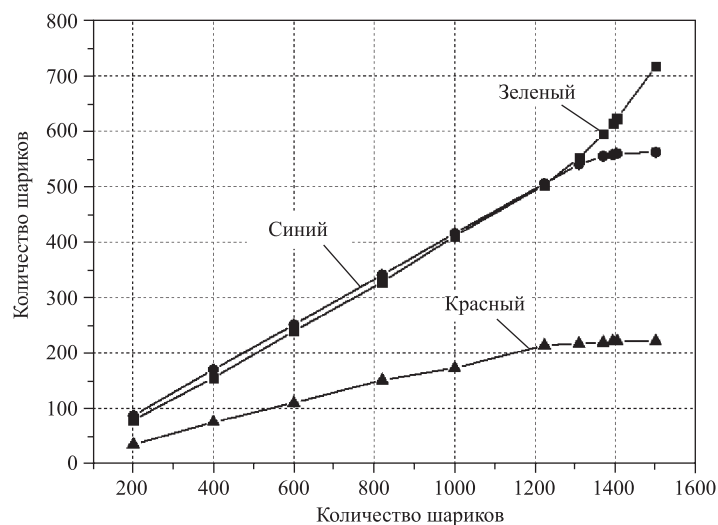


Рис. 6. Изменение количества шариков, имеющих данный цвет, в общем количестве шариков, удаленных из дозатора

Из приведенных данных следует, что крайние шарики выходят из дозатора в 1,3–1,4 раза медленнее, чем центральные.

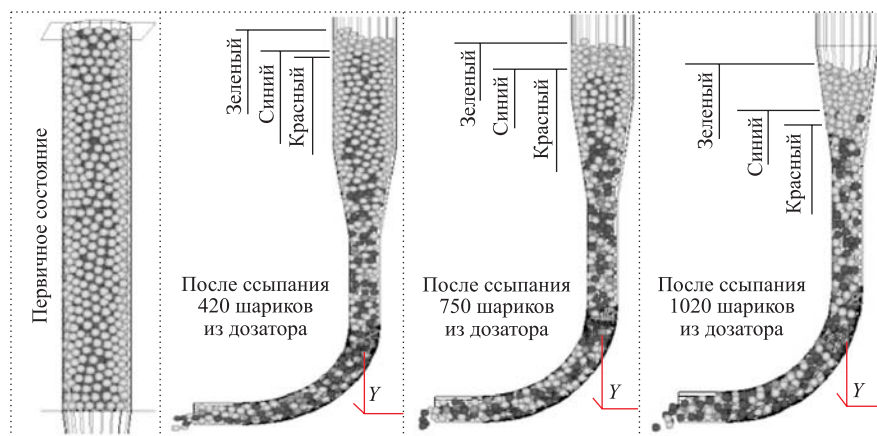


Рис. 7. Иллюстрация движения шариков в дозаторе замедлителя

Таблица 3. Количество шариков, удаленных из дозатора, в зависимости от времени при длине наклонной трубки $L = 90$ мм и разных высотах (H)

Время, с	$H = 16,0$ мм, $\alpha = 10,08^\circ$	$H = 17,0$ мм, $\alpha = 10,70^\circ$	$H = 18,0$ мм, $\alpha = 11,31^\circ$	$H = 19,0$ мм, $\alpha = 11,92^\circ$	$H = 20,0$ мм, $\alpha = 12,53^\circ$
2	40	38	26	22	20
4	98	95	64	37	34
6	172	151	96	50	46
8	221	200	131	59	53
10	298	252	163	61	54
12	380	301	194	63	54
14	439	350	226	65	54
16	525	403	264	67	54
18	596	454	296	69	54
20	668	506	316	72	54
22	750	553	330	76	54
24	835	604	338	78	54
26	876	652	344	79	54
28	900	701	349	81	54
30	975	756	362	83	54

Численные эксперименты по оптимизации размеров частей дозатора, обеспечивающих заданную среднюю скорость выброса шариков. Скорость выброса шариков из камеры замедлителя нейтронов является строго определенной величиной. Дело в том, что время пребывания метановых шариков в камере замедлителя ограничено, так как при облучении твердого метана выше определенной дозы возникает самопроизвольная цепная реакция рекомбинации радикалов, сопровождающаяся значительным повышением темпера-

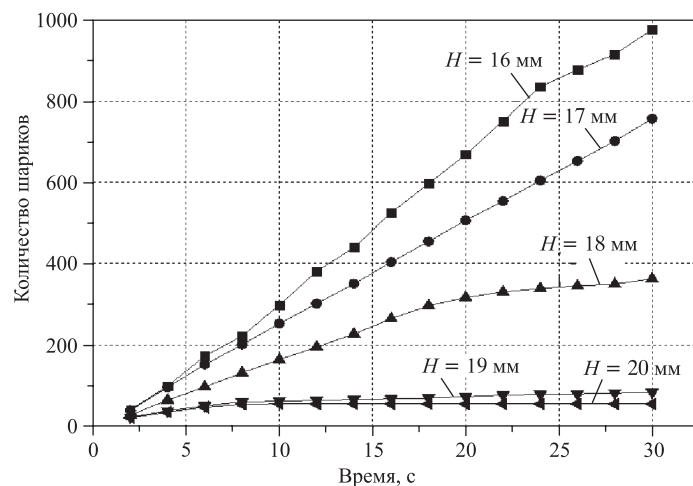


Рис. 8. Количество шариков, удаленных из дозатора, в зависимости от времени (ось абсцисс, секунды) при длине наклонной трубки $L = 90$ мм и разных высотах (H)

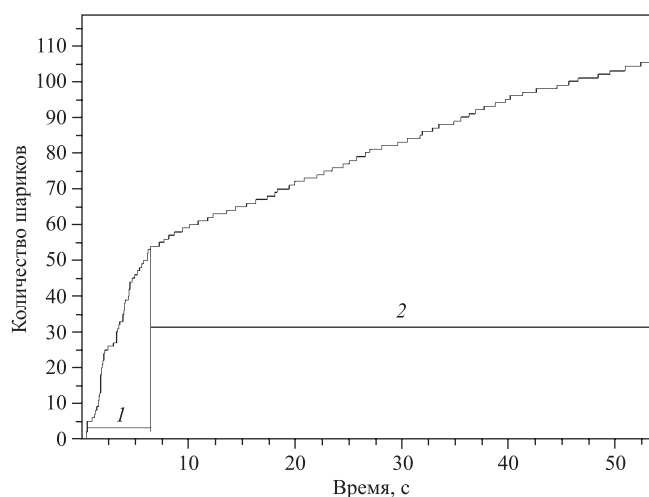


Рис. 9. Количество шариков, удаленных из дозатора, в зависимости от времени при длине наклонной трубки $L = 90$ мм и оптимальной высоте ее наклона $H = 19$ мм: 1 — переходный режим; 2 — стабилизированный режим (средняя скорость выброса 1–1,2 шарика в секунду)

туры. Это время, определенное для реактора ИБР-2 экспериментально [5], составляет 3–4 ч. При высоте замедлителя 20 см это ограничение времени пребывания метановых шариков в камере замедлителя соответствует скоро-

сти выброса шариков 1–1,2 шарика в секунду. Скорость выброса шариков можно варьировать путем выбора размеров наклонной прямой части выпускной трубки пассивного дозатора — L_3 и H (рис. 1). Результаты численных экспериментов для варианта $L = 90$ мм при разных значениях H представлены в табл. 3 и на рис. 8, 9. Из приведенных данных видно, что при $L = 90$ мм и $H = 19$ мм получается необходимый (с точки зрения допустимого времени пребывания метановых шариков в камере замедлителя) расход шариков — 1–1,2 шарика в секунду.

ВЫВОДЫ

1. Для моделирования работы пассивного (основанного только на действии гравитации) дозатора шарикового замедлителя реактора ИБР-2М с успехом использована PFC-3D — программа моделирования задачи многих тел, использующая DEM-метод [4].

2. Были определены целесообразные размеры элементов пассивного дозатора с использованием разработанной методики (см. рис. 1 и табл. 4).

Таблица 4. Целесообразные размеры элементов пассивного дозатора шарикового замедлителя реактора ИБР-2М

Переменные проектирования	Размер
Минимальный внутренний диаметр выпускной трубки, мм	13
Высота конусного участка (L_1), мм	50
Высота прямой части выпускной трубки (L_2), мм	30
Радиус части изогнутой выпускной трубки (R), мм	70
Горизонтальная проекция длины части наклонной трубки (L_3), мм	90
Вертикальная проекция длины части наклонной трубки (H), мм	19
Угол наклона выпускной трубки (α), °	≈ 12

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kulikov S., Shabalin E.* New Complex of Moderators for Condense Matter Research at the IBR-2M Reactor // *Romanian Journal of Physics.* 2009. V. 54.
2. PFC-3D (Version 4.0) User's Guide (2007).
3. *Cundall P. A.* Distinct Element Models of Rock and Soil Structure // *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, Ch. 4. / Ed. by E. T. Brown. London: Allen & Unwin., 1987. P. 129–163.
4. Rhinoceros 4.0 (NURBS Modeling for Windows) Training Manual (2008).
5. *Shabalin E., Kulagin E., Kulikov S., Melikhov V.* Radiation Effects in Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy // *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B.* 2004. V. 215. P. 181–186.

Получено 30 марта 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 26.05.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 230 экз. Заказ № 57007.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/