

P13-2009-72

М. В. Булавин, Е. Н. Кулагин, С. А. Куликов, К. А. Мухин,  
Д. Е. Шабалин, Е. П. Шабалин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ТВЕРДЫХ  
ШАРИКОВ ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ:  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ**

Булавин М. В. и др.

P13-2009-72

Моделирование пневмотранспорта твердых шариков холодного замедлителя нейтронов: распределение скорости и времени движения

В модернизированном реакторе ИБР-2М в состав комплекса замедлителей нейтронов входят холодные замедлители, где рабочим веществом являются шарики из твердой замороженной смеси ароматических углеводородов — мезитилена и *m*-ксилола. Шарики будут доставляться в камеру замедлителя потоком холодного гелия. В данной работе пневмотранспорт шариков моделировался движением стеклянных шариков с азотом комнатной температуры в качестве транспортирующего газа. Выявлен стохастический характер движения шариков, измерены характеристики разброса скоростей и времени движения шариков на трассе длиной 11,4 м. Полученные результаты использованы для корректировки расчетной методики.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Bulavin M. V. et al.

P13-2009-72

Modeling of Pneumatic Transport of the Solid Balls of the Cold Neutron Moderator: the Distribution of Velocity and Traveling Time

In modernized reactor IBR-2M cold moderators are included into makeup of a complex of neutron moderators where working substance are balls from the solid frozen mix of aromatic hydrocarbons — mesitylene and *m*-xylene. Balls will be delivered into the chamber of moderator by flow of cold helium. In this work pneumotransport of balls was modeled by movement of glass balls with nitrogen of the room temperature as transporting gas. Stochastic character of movement of balls is revealed, characteristics of dispersion of speeds and time of movement of balls are measured for a line 11.4 m long. The obtained results are used for updating a calculation method.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

В модернизированном реакторе ИБР-2М [1] будет создан новый комплекс замедлителей нейтронов, в состав которого входят три холодных замедлителя [2]. Рабочим веществом холодных замедлителей будут шарики из твердой замороженной смеси ароматических углеводородов — мезитилена и *m*-ксилола. Шарики будут доставляться в камеру замедлителя потоком холодного гелия, которым они затем охлаждаются в процессе работы реактора. Из-за малой ударной прочности шариков скорость их транспортировки не должна превосходить определенного предела, а с другой стороны, время загрузки камеры не должно быть слишком долгим. Поэтому важным моментом разработки системы пневматической транспортировки шариков было исследование движения стеклянных шариков на макете пневмотрассы с теплым азотом в качестве транспортирующего газа с соблюдением принципа подобия [3]. В ходе выполнения этих исследований был выявлен стохастический характер движения шариков, обусловленный их столкновениями со стенками трубы, и возникла необходимость экспериментального определения величины разброса скоростей и времени движения шариков в реальной стальной трубе, что и явилось целью данной работы. В связи с этим была разработана теория движения идеальных шариков в гладкой трубе и приближенная теория влияния шероховатости стенок трубы и несферичности шарика [3, 4].

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились со стеклянными шариками в стальной круглой трубе, транспортируемыми потоком газа азота комнатной температуры. Результаты такого моделирования легко переносятся на случай движения шариков из мезитилена в потоке холодного гелия вследствие идентичности или близости определяющих параметров движения: чисел Рейнольдса, комплекс  $\rho_{\text{gas}}/(\rho_{\text{ball}}d_{\text{ball}})$ ,  $d_{\text{ball}}/D$  и  $(1+k)\mu$ , где  $\rho_{\text{gas}}$ ,  $\rho_{\text{ball}}$  — плотности соответственно газа и шарика,  $d_{\text{ball}}$  и  $D$  — диаметры шарика и трубы;  $k$  — коэффициенты восстановления скорости при ударе;  $\mu$  — коэффициенты трения скольжения (см. [3, 4]).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 и 2.

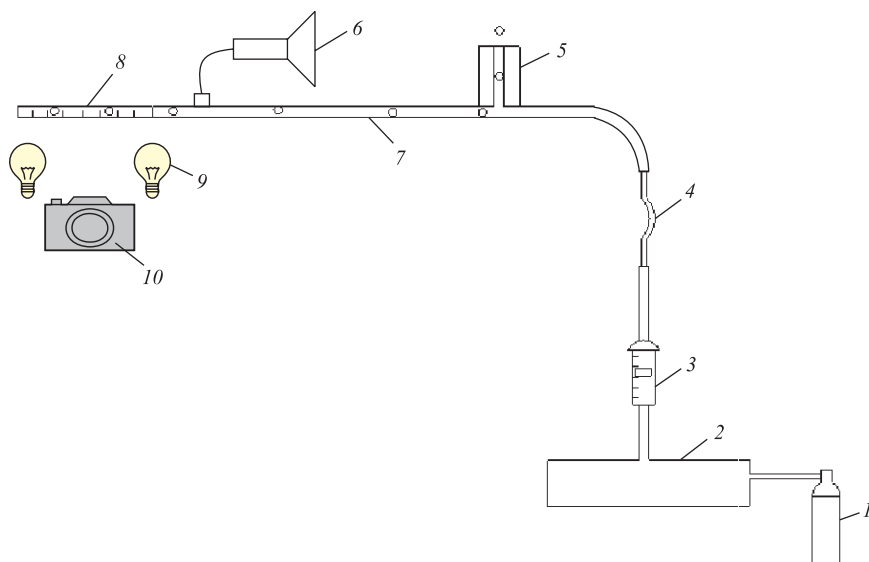


Рис. 1. Экспериментальная установка с прямым участком трубы: 1 — баллон со сжатым азотом; 2 — промежуточный баллон; 3 — поплавковый расходомер; 4 — узкий трубопровод; 5 — загрузочное устройство; 6 — осциллограф с пьезокристаллом; 7 — прямой участок стальной трубы; 8 — стеклянная труба; 9 — лампы; 10 — фотовидеокамера

Стальная транспортная труба длиной 11,4 м и внутренним диаметром 16 мм была составлена из двух равных отрезков, соединенных без порога. Прежде чем попасть в транспортную трубу, газ из баллона большого давления через понижающий регулируемый редуктор проходил через узкий трубопровод 4 и промежуточный баллон 2, которые служили фильтром колебаний расхода. Нужная скорость газа (расход) контролировалась поплавковым расходомером, проградуированным по дифференциальному манометру с трубкой Пито. В транспортную трубу шарик поступал из загрузочного устройства. Старт шарика был синхронизирован по времени с запуском осциллографа, который регистрировал импульсы пьезокристалла, прикрепленного к трубе. Импульсы возникают постоянно, пока шарик движется в трубе, из-за трения и ударов шарика о стенки. Это позволяло определять время движения шарика по трубе. Примерно одновременно со стартом шарика включали режим видеосъемки на видеокамере 10. Видеокамера регистрировала движение шарика по стеклянной трубе диаметром 17 мм, которая являлась продолжением стальной трубы. Данные с видеокамеры переносили в компьютер, и после обработки с помощью программ «Imagen» и «Origin» получали значение конечной

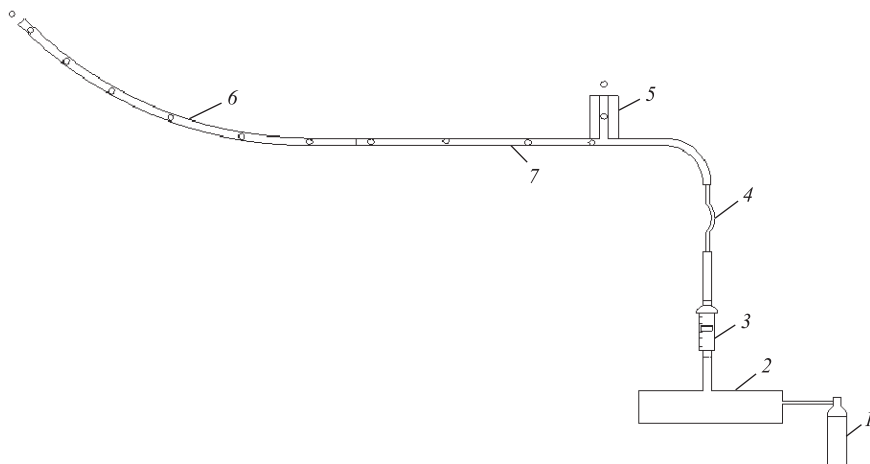


Рис. 2. Экспериментальная установка с участком подъема: 1 — баллон с сжатым азотом; 2 — промежуточный баллон; 3 — поплавковый расходомер; 4 — узкий трубопровод; 5 — загрузочное устройство; 6 — участок подъема; 7 — прямой участок стальной трубы

скорости шарика. Таким образом были получены распределения скоростей и времени движения по прямой трубе стеклянных шариков и осколков шариков разного размера при разном расходе газа.

Поскольку в реальном шариковом трубопроводе имеются наклонные части — подъемы, необходимо было установить предельную скорость газа, при которой шарик преодолевает подъем. Наибольший подъем (на высоту 70 см) идет под углом  $30^\circ$  к горизонту с заходом и выходом из подъема радиусом 40 см. Подъем такой же геометрии моделировался изогнутой стальной трубой, которая устанавливалась вместо стеклянной трубы (см. рис. 2). В экспериментах по прохождению шариками подъема фиксировался только факт выхода шарика из трубы и не фиксировались скорость и время движения шарика.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Результаты экспериментов по измерению распределения конечных скоростей и времени движения круглых стеклянных шариков диаметром 5 мм и осколков после прохождения по прямой стальной трубе диаметром 16 мм и длиной 11,4 м при разных скоростях транспортирующего газа азота представлены на рис. 3–11 и в таблице.

Были также проведены эксперименты по движению шариков на участке подъема трубопровода на  $30^\circ$  на высоту 70 см (соответственно, длина подъема — 1,4 м). Главной задачей этих опытов было определить, при какой скорости газа шарик преодолевает подъем.

Был осуществлен поочередный пуск восьми шариков, который показал, что значение скорости газа, при которой шарик преодолевает подъем, равна 6,6 м/с. Скорость газа, необходимая для преодоления подъема шариком с нулевой начальной скоростью у его основания, т. е. в тех случаях, когда шарик сразу не преодолел подъем, равна 11,4 м/с.

Было проведено также шесть пусков пар шариков. Пять пар преодолели подъем при скорости газа 8,2 м/с и выше, из шестой пары, пущенной при скорости газа 7,4 м/с, подъем преодолел только один шарик. При одновременном пуске трех шариков все они преодолели подъем при скорости

**Зависимость скорости шарика (осколка шарика) от габаритных размеров шарика (осколка шарика) и скорости газа**

Габаритные размеры, мм	Скорость газа, м/с	$V_{\text{мин}}$ , м/с	$V_{\text{среднее}}$ , м/с	$V_{\text{макс}}$ , м/с	$V_{\text{сред}}/V_{\text{газ}}$	$V_{\text{мин}}/V_{\text{газ}}$	$V_{\text{макс}}/V_{\text{газ}}$
5 (круглый шарик)	6	1,62	2,69	3,26	0,27	0,45	0,54
	8	2,01	3,34	4,14	<b>0,25</b>	<b>0,42</b>	<b>0,52</b>
	10	2,88	3,88	4,95	0,29	0,39	0,50
	13	3,48	5,29	6,3	0,27	0,41	0,48
4,5 × 5 × 5 (срезанный шарик)	8	1,14	2,49	3,69	<b>0,14</b>	<b>0,31</b>	<b>0,46</b>
3,5 × 4 × 3,5	8	1,2	2,3	3,36	<b>0,15</b>	<b>0,29</b>	<b>0,42</b>
1,5 × 4 × 1,5	8	1,05	1,53	2,01	<b>0,13</b>	<b>0,19</b>	<b>0,25</b>
	13	1,95	3,46	4,92	0,15	0,27	0,38
1 × 2 × 1	8	1,41	1,94	2,49	<b>0,18</b>	<b>0,24</b>	<b>0,31</b>
	13	2,4	3,73	5,76	0,18	0,29	0,44

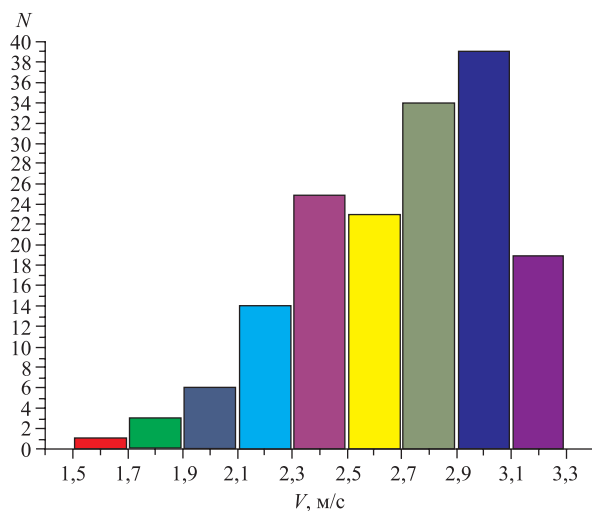


Рис. 3. Распределение конечной скорости движения круглых шариков по трубе длиной 11,4 м при скорости транспортирующего газа 6 м/с ( $N$  — количество шариков в интервале скоростей 0,2 м/с; полное число шариков — 164)

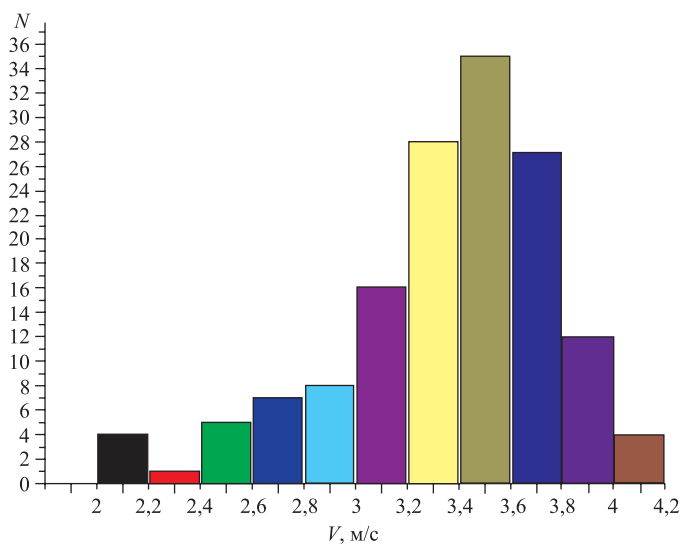


Рис. 4. Распределение конечной скорости движения круглых шариков при скорости транспортирующего газа 8 м/с ( $N$  — количество шариков в интервале скоростей 0,2 м/с; полное число шариков — 146)

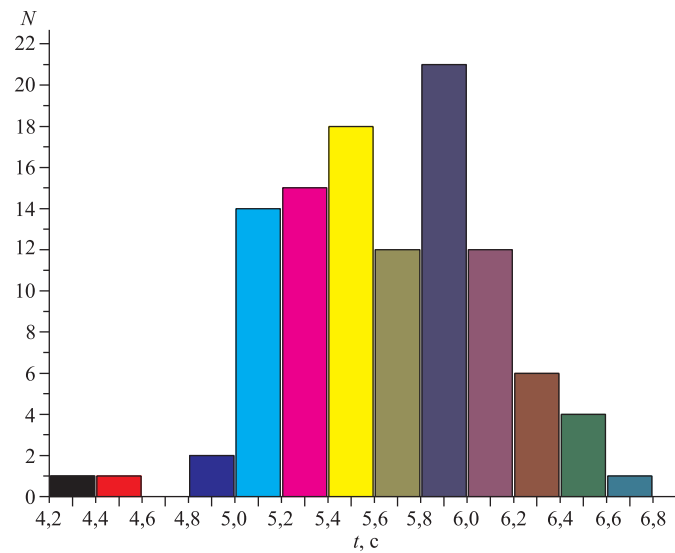


Рис. 5. Распределение времени движения круглых шариков по трубе длиной 11,4 м при скорости газа 8 м/с (полное число шариков — 113)

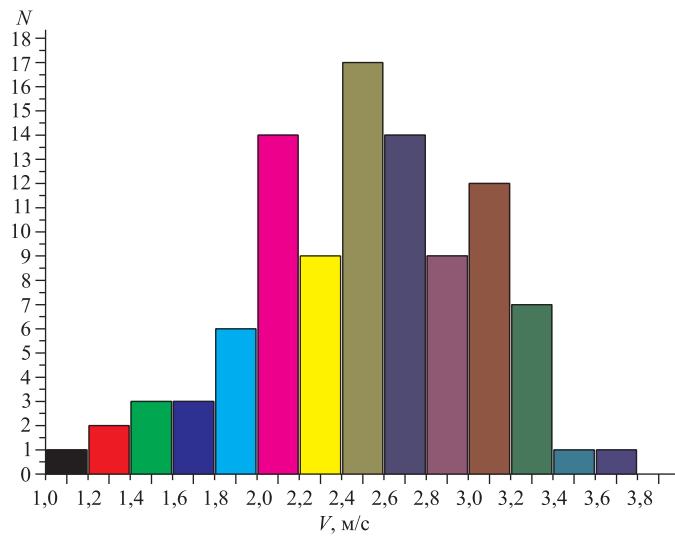


Рис. 6. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков с габаритными размерами  $4,5 \times 5 \times 5$  мм (шар со срезанной верхушкой) при скорости газа 8 м/с (полное число шариков — 100)



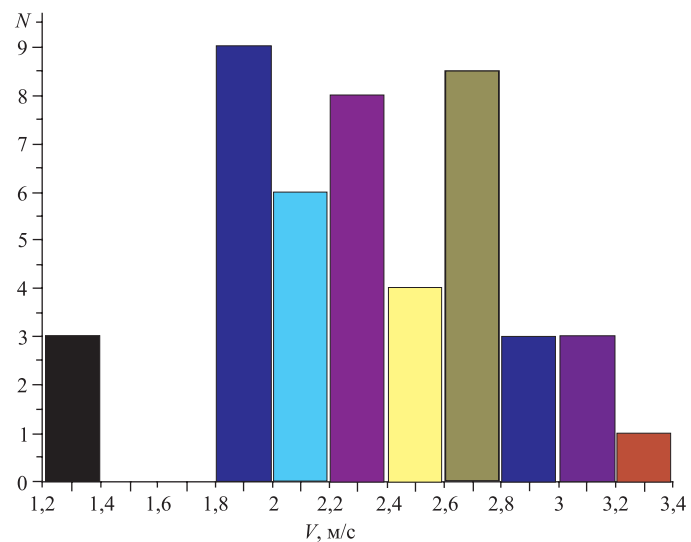


Рис. 7. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков неправильной формы с габаритными размерами  $3,5 \times 4 \times 3,5$  мм при скорости транспортирующего газа 8 м/с (полное число шариков — 44)

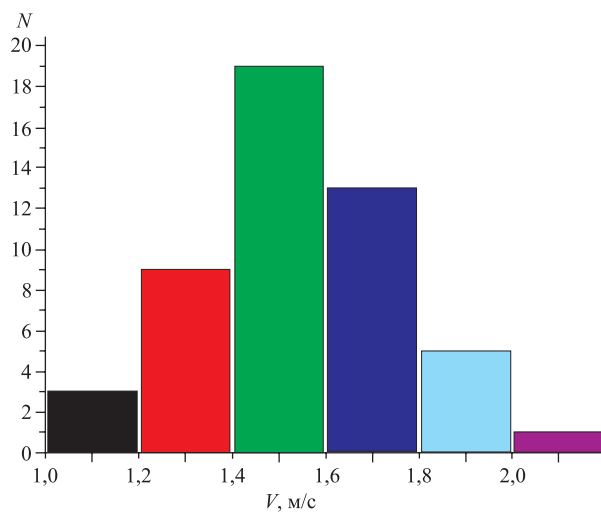


Рис. 8. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков неправильной формы с габаритными размерами  $1,5 \times 4 \times 1,5$  мм при скорости газа 8 м/с (полное число шариков — 51)

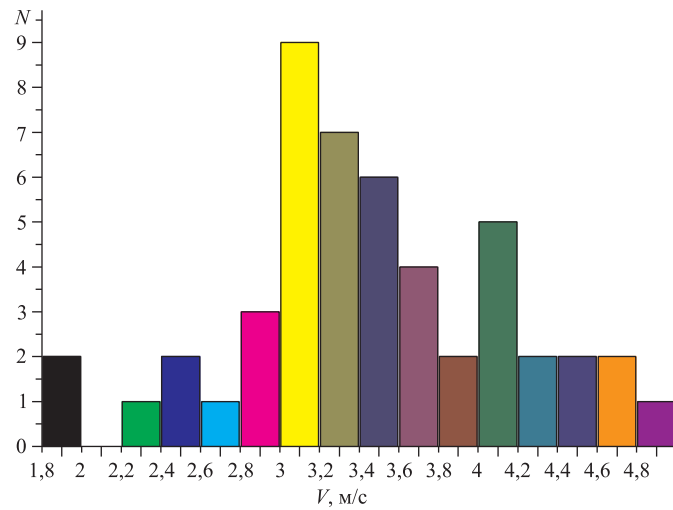


Рис. 9. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков неправильной формы с габаритными размерами  $1,5 \times 4 \times 1,5$  мм при скорости газа 13 м/с (полное число шариков — 49)

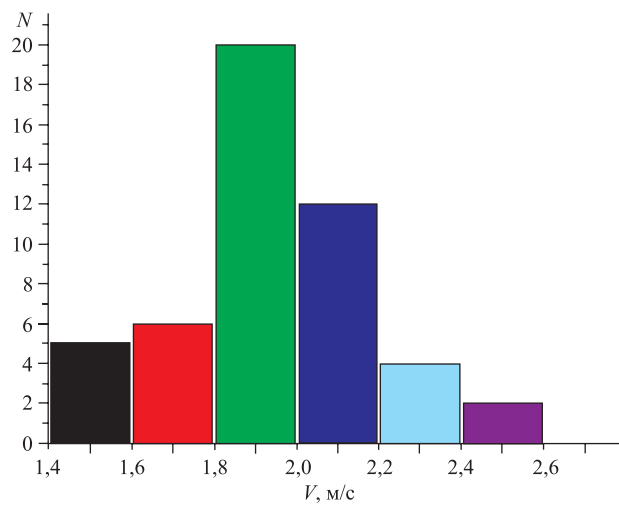


Рис. 10. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков неправильной формы с габаритными размерами  $1 \times 2 \times 1$  мм при скорости газа 8 м/с (полное число шариков — 48)

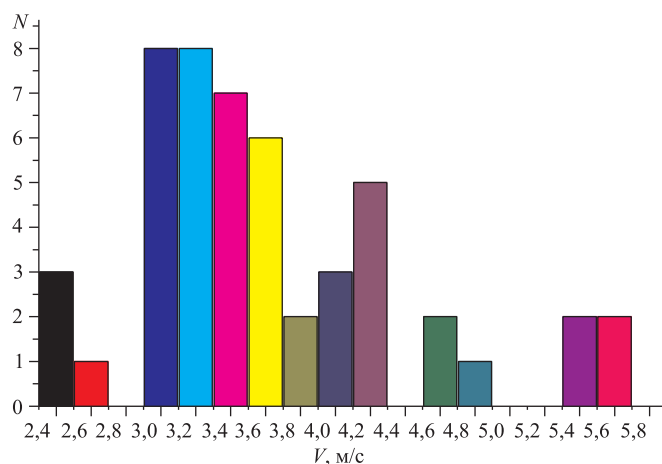


Рис. 11. Распределение конечной скорости движения осколков круглых шариков неправильной формы с габаритными размерами  $1 \times 2 \times 1$  мм при скорости газа 13 м/с (полное число шариков — 50)

газа 7,72 м/с; при скорости газа 7,4 м/с вылетел только один шарик, а два других вышли только при скорости газа 16 м/с.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Проведенные опыты подтверждают вывод предварительных экспериментов по транспорту шариков на коротком стеклянном трубопроводе [3] о нерегулярном движении шариков в цилиндрической реальной трубе. Разброс значений конечных скоростей движения по трубе длиной 11,4 м значителен (см. табл. и рис. 3, 4) — 54–64 % от среднего значения скорости шарика при скорости газа 6–10 м/с. Разброс времени движения меньше — 43 %, и это свидетельствует о том, что движение каждого индивидуального шарика не монотонно. На графике рис. 12 видно явное отсутствие зависимости конечной скорости от времени движения подобно изображенной на рисунке треугольниками.

Обнаруженный экспериментальный факт линейной зависимости конечной скорости (как минимальной, так и максимальной) от скорости газа (см. первые четыре строки в таблице) имеет большое значение для построения стохастической теории движения шарика. Такая зависимость может быть только в том случае, если эффективный (т. е. с учетом потери скорости на шероховатостях трубы и вследствие несферичности шарика) динамический коэффициент трения пропорционален квадрату текущей скорости шарика.

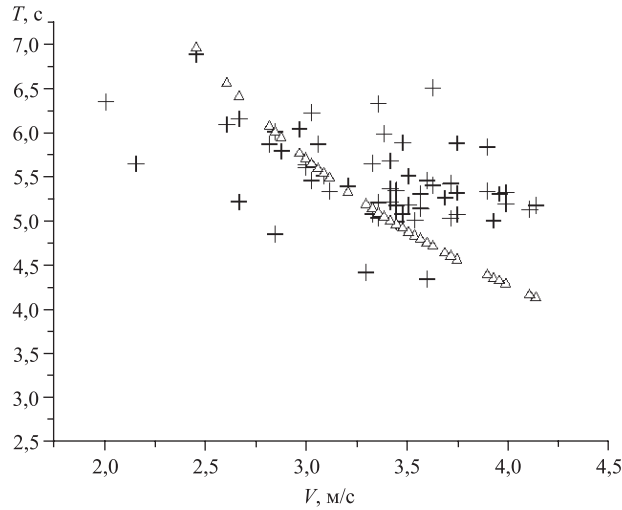


Рис. 12. Диаграмма конечных скоростей  $V$  и времени движения шариков  $T$  на пути 11,4 м. Крестики — эксперимент, треугольники — расчет при постоянном ускорении (зависящем от конечной скорости)

Действительно, установившееся (на каком-то небольшом конечном отрезке пути) значение минимальной скорости можно описать уравнением

$$0,5925 \cdot \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{ball}} d_{\text{ball}}} \cdot V_{\text{gas}}^2 \cdot (1 - ax + bx^2) = \mu \cdot g. \quad (1)$$

Здесь  $x = V_{\text{min}}/V_{\text{gas}}$ , коэффициенты  $a$  и  $b$  равны соответственно 1,8 и 0,708 для стеклянных шариков, движимых азотом, а коэффициент  $\mu$  — динамический коэффициент трения [4]. Как следует из экспериментальных данных, величина  $x$  не зависит от  $V_{\text{gas}}$ . А это возможно только тогда, когда динамический коэффициент трения  $\mu \sim \mu_0(V_{\text{ball}})^2$ . Уравнение (1) приобретает тогда следующий вид:

$$0,5925 \cdot \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{ball}} d_{\text{ball}}} \cdot (1 - 1,8x + 0,708x^2) = \mu_0 \cdot x^2 \cdot g. \quad (2)$$

Подставляя известные из описанных выше опытов параметры ( $x_{\text{min}} = 0,27$ , плотность шариков  $2600 \text{ кг/м}^3$ , диаметр шариков 5 мм), находим из (2) значение коэффициента  $\mu_0 = (0,043 \pm 10\%) \text{ с}^2/\text{м}^2$  для стеклянных шариков в стальной трубе; соответственно,  $\mu = 0,043 \cdot (V_{\text{ball}})^2$ . Можно заметить, что статический коэффициент трения стекла по стали равен 0,404 [3], т.е. для  $V_{\text{ball}} \leq 3 \text{ м/с}$  он больше динамического. На меньшее значение динамического коэффициента трения по сравнению со статическим указывается и в цитируемой литературе [5].

Естественно, значение параметра  $\mu_0$  не может быть постоянной величиной в процессе движения шарика; его следует считать случайной величиной. Из сделанных опытов можно извлечь только одну характеристику случайного процесса изменения  $\mu_0$  — это то, что его значение может изменяться примерно в 15–16 раз — от указанного выше максимального значения 0,043 до  $\sim 0,0026$ –0,003. Последний результат достигнут путем подбора значения  $\mu_0$  в уравнении движения шарика, чтобы получить максимально наблюдаемую конечную скорость шарика (вывод опускаем). Очевидно, что для идеально гладкой трубы и идеально сферического шарика  $\mu$  не зависит от скорости и равно значению коэффициента трения качения.

Понятно и наличие минимума скоростей при промежуточных размерах осколков шариков  $1,5 \times 4 \times 1,5$  мм (см. таблицу, выделенные жирным шрифтом числа). Большие осколки движутся медленнее целого шарика вследствие преимущественного скольжения вместо качения целого шарика. Однако при малых размерах осколка подъемная газодинамическая сила сказывается все сильнее, и трение о стенки трубы уменьшается. Наконец, при очень малых размерах осколок уже «витают» в газе, и тогда его скорость может превысить скорость целого шарика. Согласно работе [6] скорость газа, выше которой тело уже редко касается стенок («скорость витания»), описывается приближенным уравнением:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ball}}}{\rho_{\text{gas}}} d}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ball}}$  и  $\rho_{\text{gas}}$  — плотности тела и газа,  $d$  — размер тела в мм,  $v$  — скорость «витания» в м/с, а коэффициент  $k$  зависит от формы и размера тела и для шара 1–10 мм равен  $\sim 5$ . По формуле (3) размер «витающего» шарика для  $v \approx 9$  м/с (скорость газа в 1 мм от стенки трубы при средней скорости 13 м/с) оценивается в  $\sim 1,3$  мм (объем —  $1,1$  мм<sup>3</sup>). Значит, минимальный размер исследованных осколков уже не намного больше, чем размер «витающего» тела при средней скорости газа 13 м/с.

Анализ экспериментов по подъему шариков в наклонной трубе позволяет сделать вывод, что предельная скорость газа, выше которой шарик может преодолеть подъем в  $30^\circ$  при нулевой скорости у основания подъема, равна 11,4 м/с. Это точно соответствует значению, получающемуся теоретически согласно работе [3]. Для подъема двух шариков из состояния покоя требуется скорость 16 м/с — почти точно в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем для подъема одного шарика, т.е. сила, необходимая для одновременного подъема двух шариков, точно в два раза больше. Это значит, что при одновременном движении двух шариков они катятся, не касаясь друг друга; в противном случае требовалась бы большая скорость газа для преодоления силы трения между шариками. Такое странное, на первый взгляд, движение можно представить так: при подъеме вверх шарик, находящийся ниже («ведущий») время от

времени толкает передний («ведомый») шарик, вследствие чего ведомый шарик временно движется быстрее ведущего. Затем он теряет скорость, так как находится в газодинамической «тени» ведущего, и тот его догоняет. Скольжение шариков также исключается, так как по расчету с учетом коэффициента трения скольжения стекла по стали 0,404 для этого требуется скорость газа 17,6 м/с.

Подтверждение аналитических формул работы [3] позволяет использовать их для вычисления скорости газа, необходимой для подъема мезитиленового шарика потоком холодного гелия по трубе, наклоненной под углом 30°. Пусть температура гелия — 40 К, давление — 1,1 бар. При соответствующей плотности газа 1,3 кг/м<sup>3</sup> и размере и плотности мезитиленового шарика соответственно 4,4 мм и 1000 кг/м<sup>3</sup> получим предельную скорость 6,3 м/с вместо 11,4 м/с для стеклянного шарика 5 мм, транспортируемого азотом комнатной температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе экспериментальные данные дополняют ранее известные и в совокупности с аналитическими расчетами позволяют оценивать разброс скоростей и времени пневмотранспорта твердых мезитиленовых шариков (и их осколков) холодных замедлителей реактора ИБР-2 по цилиндрической трубе. Окончательный вывод о времени загрузки шариков в камеру замедлителя можно будет сделать после исследований пневмотранспорта на стенде макета холодного замедлителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов В.Л. Ядерный импульсный реактор // Наука в России. 2002. №6. С. 26–31.
2. Ananiev V., Belyakov A., Kulikov S., Kustov A., Romanova N., Shabalin D., Shabalin E. Complex of Moderators for the IBR-2M Reactor. // Proceedings of the 18th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVIII), Dongguang, China, April 2007. P. 473–478.
3. Бузыкин О.Г., Казаков А.В., Кулагин Е.Н., Куликов С.А., Шабалин Д.Е., Шабалин Е.П. О пневмотранспортировке твердых шариков холодного замедлителя нейтронов. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-116. Дубна, 2008. Принято для публикации в журнале «Прикладная механика и техническая физика».
4. Шабалин Е.П. О нерегулярности движения шара при пневмотранспорте в трубе. Сообщение ОИЯИ Р3-2008-67, Дубна, 2008.

5. *Domenech A.* A Classical Experiment Revisited: The Bounce of Balls and Superballs in Three Dimensions // *Am. J. Phys.* 2005. V. 73, № 1. P. 28–36.
6. *Борщев В. Я., Гусев Ю. И., Промтов М. А., Тимонин А. С.* Оборудование для переработки сыпучих материалов. М.: Изд. «Машиностроение-1», 2006.

Получено 18 мая 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 29.06.2009.

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

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 310 экз. Заказ № 56644.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)