

Гидравлическое сопротивление засыпки из свинцовых шариков при высоких скоростях газовых потоков

А. В. Зюзько, В. И. Могорычный

Пористые структуры получили широкое применение, как в регенераторах, так и в качестве теплообменников с развитой поверхностью теплообмена в криогенных газовых машинах. Определение перепада давления играет важную роль в прогнозировании производительности криогенной газовой машины. В настоящей работе рассматривается сопротивление пористых структур, состоящих из свинцовых шариков при высоких скоростях потока. В качестве рабочих тел, протекающих через пористую структуру, были использованы азот и аргон. Скорость в пористой структуре изменялась в диапазоне от 3,5 до 7,5 м/с для азота и от 2,5 до 6,5 м/с для аргона. В качестве пористой структуры использовались свинцовые шарики со средним диаметром 0,223 мм. Диаметр канала, заполненного свинцовыми шариками, составлял 15 мм, длина 35 мм. Полученные данные для высоких скоростей могут быть актуальны для применения в теплообменных аппаратах, представляющее собой пористое тело из спеченных между собой шариков.

Ключевые слова: потери давления; засыпка из шариков; стационарный поток; гидравлическое сопротивление.

Введение

В криогенных газовых машинах основным элементом является регенератор, насадка которого представляет собой пористое тело. При этом эффективность работы регенератора очень сильно влияет на эффективность работы всей газовой криогенной машины. Одним из критериев эффективности регенератора является потери, связанные с трением. Изучение гидравлических потерь широко освещается в литературе, как для стационарных, так и нестационарных потоков [1–6].

Скорость движения рабочего тела в пористой структуре обычно составляет от 1,5 до 2,5 м/с. При этом данные по более высоким скоростям пока не приводятся. С одной стороны, приводимые данные по скоростям в пористой структуре соответствуют реальным скоростям, наблюдаемым в криогенных газовых машинах, с другой стороны, тенденции к миниатюризации криогенных газовых машин требуют использования компактных теп-

лообменных аппаратов. Уменьшение теплообменного аппарата можно добиться двумя способами. Первый способ – увеличение поверхности теплообмена. Второй – увеличение коэффициента теплоотдачи, который можно повысить за счёт увеличения скорости потока в теплообменном аппарате. Одним из типов таких теплообменных аппаратов являются теплообменники со спечёнными шариками. Опыт расчёта гидравлических потерь таких структур можно получить, используя данные по обычной засыпке из шариков.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование гидравлического сопротивления засыпки из свинцовых шариков, где в качестве рабочих газов использовались азот и аргон. Потери давления измерялись в диапазоне скоростей от 2,5 до 6,5 м/с для аргона и от 3,5 до 7,5 м/с для азота.

Для дальнейшего рассмотрения используем следующие условные обозначения.

- A – площадь поперечного сечения регенератора, м^2 ;
- D_n – эквивалентный диаметр засыпки из шариков, м ;
- $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика, м ;
- d – диаметр участка с гидравлическим сопротивлением, м ;
- G – расход газа, кг/с ;
- L – длина участка с гидравлическим сопротивлением, м ;
- Re – число Рейнольдса, безразмерное;

Зюзько Александр Вячеславович, аспирант.
 Могорычный Владимир Иванович, старший научный сотрудник.
 Национальный Исследовательский Университет «Московский Энергетический Институт».
 Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.13, корп. М.
 Тел. 8 (495) 362-79-33. E-mail: Zyzko_s@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 января 2017 г.

© Зюзько А. В., Могорычный В. И., 2017

S_0 – компактность теплообменника, $\frac{m^2}{m^3}$;

U_{pore} – скорость газа в пористой структуре, м/с;

ΔP – гидравлические потери на участке, Па (бар);

ρ – плотность, вычисленная при среднем давлении на входе и выходе из участка, $\frac{kg}{m^3}$;

ϕ – пористость засыпки, $\frac{m^2}{m^2}$;

η – вязкость газа, Па с⁻¹.

$$G = \rho \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P d}{\xi \rho L}}, \tag{1}$$

где G – расход газа; L – длина участка с гидравлическим сопротивлением; ΔP – гидравлические потери на участке; ρ – плотность, вычисленная при среднем давлении на входе и выходе из участка; d – диаметр участка с гидравлическим сопротивлением;

$$\xi = \frac{64}{Re}, \text{ при } Re \leq 2300; \tag{2}$$

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \text{ при } Re \geq 2300. \tag{3}$$

Описание эксперимента

Измерения гидравлического сопротивления засыпки из свинцовых шариков проводились на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рис. 1. Циркуляция рабочего тела в экспериментальном стенде обеспечивается компрессором КМ. Газ протекает через засыпку, которая расположена в стальной трубе. Манометр М2 служит для визуальной фиксации падения давления. Точное измерения давления происходит с помощью датчиков давления ДИ1 и ДИ2 на входе и выходе засыпки соответственно. Для измерения этих давлений используется датчики избыточного давления ПД100-ДИ2,5-111-0,25. В качестве расходомера используется прямолинейный участок трубы внутренним диаметром 4,83 мм и длиной 1 м. Расход вычисляется по перепаду давления на данном участке через уравнение Дарси-Вейсбаха [7].

После определения расхода производилось вычисление скорости газа в пористой структуре:

$$U_{pore} = \frac{G}{\phi A \rho}, \tag{4}$$

где U_{pore} – скорость газа в пористой структуре; A – площадь поперечного сечения регенератора; ϕ – пористость засыпки (для шариков диаметром 0,233 мм составляет 0,38).

Температура газа измеряется с помощью термопары медь-константан, закрепленной на входе в участок с гидравлическим сопротивлением (термопара крепится непосредственно на медную трубку на входе в участок и закрывается тепловой изоляцией).

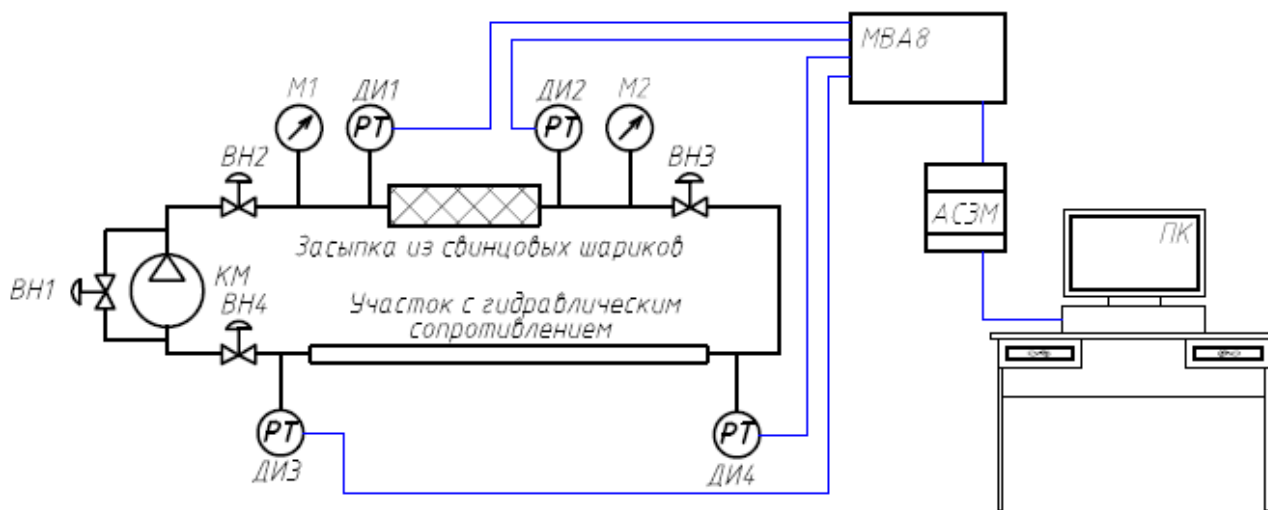


Рис. 1. Экспериментальный стенд измерения потерь давления в засыпке из свинцовых шариков. ВН1...ВН3 – вентили регулировки, ДИ1...ДИ4 – датчики избыточного давления, КМ – компрессор, М1...М2 – манометры.

Уменьшая проходное сечение вентиля ВНЗ (в системе создавалось дополнительное гидравлическое сопротивление), регулировался расход рабочего тела в системе (увеличение гидравлического сопротивления приводило к увеличению степени сжатия компрессора, что в свою очередь уменьшало коэффициент подачи компрессора и снижало расход в системе).

Экспериментальный участок представлял собой систему из двух цилиндров. В первый цилиндр вставлялся второй, внутри которого содержалась засыпка из свинцовых шариков. Предварительно в цилиндр с засыпкой насыпались шарики, слой шариков составлял высоту 35 мм. Шарики с обеих сторон закрывались двумя слоями латунной сетки, которая препятствовала высыпанию шариков и прижимались гайкой, которая закручивалась с обеих сторон. Толщина гайки составляла 4 мм, в гайке были проделаны отверстия диаметром 2 мм для прохождения потока газа. На рис. 2 показан эскиз цилиндра с засыпкой из шариков.

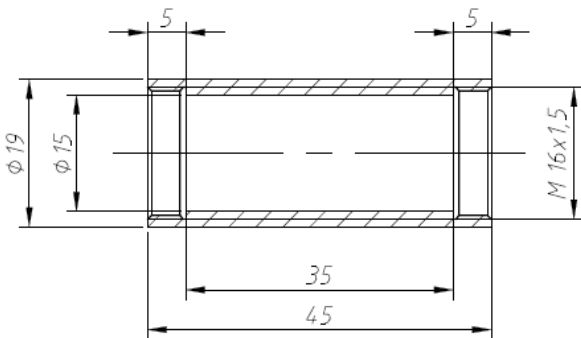


Рис. 2. Эскиз цилиндра с засыпкой из шариков.

На рис. 3 показан экспериментальный участок в сборе с установленной засыпкой из свинцовых шариков, которая находится внутри нержавеющей трубы.



Рис. 3. Экспериментальный участок.

В качестве засыпки использовались свинцовые шарики диаметром 223 мкм; рабочее тело – азот/аргон/гелий; измерения проводились при комнатной температуре; расход регулировался с помощью создания дополнительного гидравлического сопротивления в системе. Основная приве-

денная погрешность датчика давления – 0,25 % ВПИ (6,25 кПа). Полученные экспериментальные данные сравнивались с имеющимися зависимостями. В качестве одной из них была взята зависимость, предложенная Вазисовой, Елухиным и Платоновой для шариковой засыпки в работе [8]:

$$\Delta P = \xi_1 \frac{\rho U_{pore}^2}{D_h} L, \quad (5)$$

$$\text{где } \xi_1 = \frac{195}{Re} + 3, \text{ при } 10 < Re \leq 50 \quad (6)$$

$$\xi_1 = \frac{180}{Re} + \frac{7,5}{Re^{0,2}}, \text{ при } 50 < Re \leq 1000 \quad (7)$$

D_h – эквивалентный диаметр засыпки из шариков;

$$D_h = \frac{4\phi}{S_0}, \quad (8)$$

$$S_0 = \frac{6(1-\phi)}{d_{ш}}, \quad (9)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шарика.

Для экспериментального участка число Рейнольдса определялось по уравнению:

$$Re = \frac{D_h \rho U_{pore}}{\eta}. \quad (10)$$

При этом плотность рабочего тела и вязкость рассчитывались для среднего давления на входе и выходе из экспериментального участка.

В качестве другой зависимости для сравнения использовались формулы из руководства пользования программой Regen 3.3 [9]:

$$\Delta P = \text{sign}(U_{pore}) \frac{2Y(Re)Re^2 \eta^2}{A(Re)D_h^3 \rho} L, \quad (11)$$

где

$$Y(Re) = 0,23[1 + 0,7772(0,38 - \phi)]Re^{-0,3}, \quad (12)$$

$$A(Re) = 0,0022 Re, \text{ при } Re \leq 10, \quad (13)$$

$$A(Re) = -0,007 + 0,0126 \times \lg(Re), \quad (14)$$

при $10 < Re < 330$,

$$A(Re) = 0,1032 - 0,00695 \times \lg(Re), \quad (15)$$

при $Re \geq 330$.

Обсуждение результатов

Полученные результаты сравнивались с данными по зависимостям, приведённым выше. Также для сравнения полученных данных была взята формула для регенератора двигателя Стирлинга (прямой цикл), приведённая в [10], причем полученные результаты отличались на порядок. Данное отличие могло быть связано с тем фактом, что в регенераторах двигателей Стирлинга используются шарики, диаметром 10–20 мм, что практически в 1000 раз больше, чем диаметр шариков, используемых в эксперименте.

На рис. 4 показана зависимость потерь давления от скорости в пористой структуре для аргона.

Экспериментальные данные легли между двумя зависимостями. При этом значение, на графике представлены данные, рассчитанные по соотношениям Regen 3.3 по уравнению (15), даже для чисел Рейнольдса, меньше 330. При числах

Рейнольдса около 250 данные по уравнению (14) отличались от уравнения (15) на порядок и не согласовывались с экспериментальными данными. При малых скоростях потока в пористой структуре, значение потерь давления значительно меньше расчётных соотношений. Выпадение данной точки могло произойти из-за низкой точности измерительных приборов при малых потерях давления, когда происходило измерение перепада давления на расходомере (измеряемая величина перепада давления становилась равна погрешности измерения).

На рис. 5 показана зависимость потерь давления от скорости в пористой структуре для азота. Экспериментальные зависимости легли ближе к значениям, рассчитанным по формуле Regen 3.3. При этом так же использовалось уравнение (15) при значениях Рейнольдса около 250. Для нижних точек при малых скоростях потока так же характерно наличие высокой погрешности измерения перепада давления на расходомере.

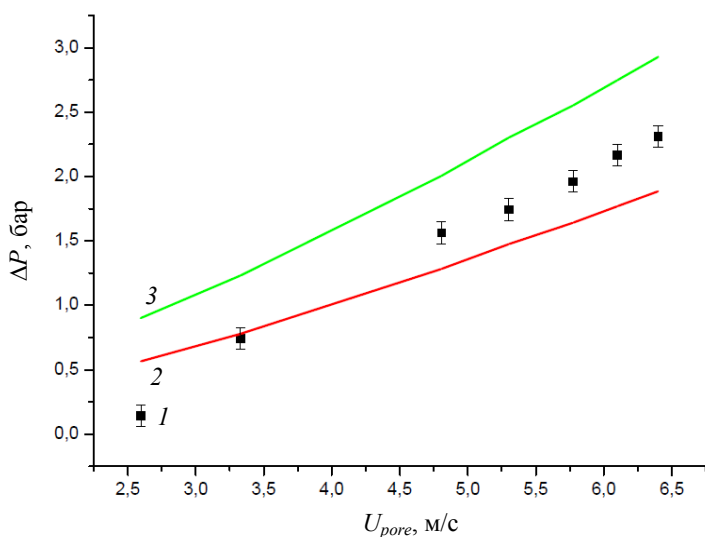
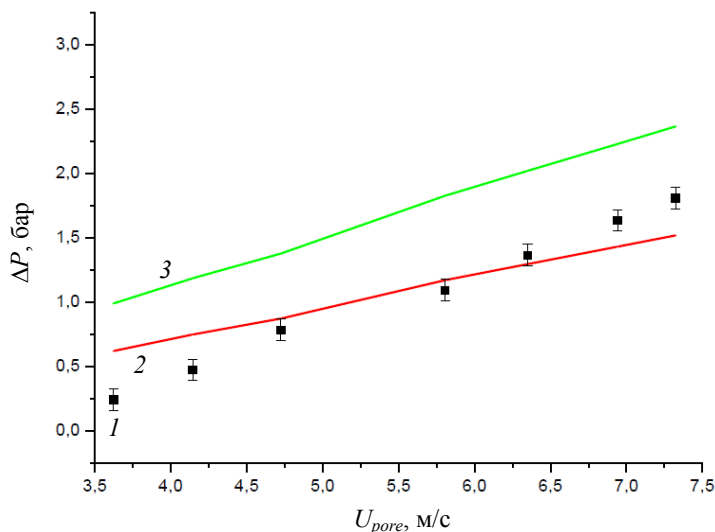


Рис. 4. Зависимость потерь давления ΔP от скорости в пористой структуре U_{pore} для аргона. Точки 1 – экспериментальные данные, кривая 2 – значения по Regen 3.3, кривая 3 – значения по работе Вазисова, Елухин, Платонова.

Рис. 5. Зависимость потерь давления ΔP от скорости U_{pore} в пористой структуре для азота. Точки 1 – экспериментальные данные, кривая 2 – значения по Regen 3.3, кривая 3 – значения по работе Вазисова, Елухин, Платонова.



Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

Для высоких скоростей потока можно рекомендовать применение любой из представленных формул, при этом следует пользоваться уравнением (15) при числах Рейнольдса выше 200 при использовании методики, изложенной в [9]. Для азота лучшее согласование с экспериментальными данными имеют зависимости, изложенные в [9] с учётом расширения интервала уравнения (15) до более низких чисел Рейнольдса.

Данная работа будет продолжена в следующих направлениях:

- проведение экспериментальных исследований с применением измерительных приборов, обеспечивающих более высокую точность измерений с более высокой точностью измерительных приборов при скоростях стационарного потока в пористой структуре в диапазоне от 2 до 3 м/с, что характерно для регенераторов криогенных газовых машин;
- проведение экспериментальных исследований по потерям давления в пористой структуре для пульсирующих газовых потоков с небольшой

частотой пульсаций, что типично для машин Гиффорда-МакМагона и низкочастотных пульсационных труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu S., Afacan A., Masliyah J. // Chem Eng Sci. 1994. Vol. 49. P. 3565.
2. Helvensteijn B. P. M., Kashani A., Spivak A. L., Roach P. R., Lee J. M., Kittel P. // Advances in Cryogenic Engineering. 1998. Vol. 43. P. 1619.
3. Jeong S., Nam K., Jung J. // Cryocoolers 12. 2002. Vol. 12. P. 531.
4. Kwanwoo Nam, Sangkwon Jeong // Cryogenics. 2006. Vol. 45. P. 733.
5. Cha J. S. PhD thesis – Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA; 2007.
6. Clearman W. M., Cha J. S., Ghiaasiaan S. M., Kirkconnell C. S. // Cryogenics. 2008. Vol. 48. P. 112.
7. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Суслов А. Д., Гороховский Г. А., Полтараус В. Б., Гориков А. М. Криогенные газовые машины. – М.: Машиностроение, 1982.
9. Gary John and O’Gallagher Abbie. National Institute of Standards and Technology, REGEN 3.3: USER MANUAL.
10. Juan Yu, Mingchuan Zhang, Weidong Fan, Yuegui Zhou, Guofeng Zhao // Applied Thermal Engineering. 2002. Vol. 22. P. 641.

PACS: 47.56. +r.

A hydraulic resistance of the filling of lead balls at high gas flow velocities

A. V. Zyuzko and V. I. Mogorychny

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
13 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: Zyuzko_s@mail.ru

Received January 27, 2017

Porous structures have been widely used as regenerators and heat exchangers with a developed heat transfer surface in cryogenic gas machines. Determination of the pressure drop plays an important role in predicting the performance of cryogenic gas machines. In this paper, we considered a resistance of porous structures consisting of lead balls at high flow rates. Nitrogen and argon were used as working fluids flowing through the porous structure. A speed in the porous structure was changed in the range from 3.5 to 7.5 m/s for nitrogen and from 2.5 to 6.5 m/s for argon. Lead balls with average diameter of 0.223 mm were used as the porous structure. The diameter of the channel filled with lead balls was 15 mm, length 35 mm. The data obtained for the high velocities may be relevant for use in heat exchangers which is a porous body of sintered together balls.

Keywords: pressure drop, filling of the balls, steady stream, hydraulic resistance.

REFERENCES

1. S. Liu, A. Afacan, and J. Masliyah, *Chem Eng Sci.* **49**, 356 (1994).
2. B. P. M. Helvensteijn, A. Kashani, A. L. Spivak, P. R. Roach, J. M. Lee, and P. Kittel. *Advances in Cryogenic Engineering* **43**, 1619 (1998).
3. S. Jeong, K. Nam, and J. Jung, *Cryocoolers* **12**, 531 (2002).
4. Kwanwoo Nam and Sangkwon Jeong, *Cryogenics* **45**, 733 (2006).
5. Cha J. S. PhD thesis (Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA; 2007).
6. W. M. Clearman, J. S. Cha, S. M. Ghiaasiaan, and C. S. Kirkconnell, *Cryogenics*. **48**, 112 (2008).
7. M. P. Malkov, I. B. Danilov, A. G. Zeldovich, and A. B. Fradkov, *Handbook of Physical-Technical Fundamentals of Cryogenics* (Energoatomisdat, Moscow, 1985) [in Russian].
8. A. D. Suslov, G. A. Gorohovsky, V. B. Poltarau, and A. M. Gorshkov, *Cryogenic Gas Machines* (Mashinostroenie, Moscow, 1982) [in Russian].
9. John Gary and Abbie O’Gallagher, National Institute of Standards and Technology, REGEN 3.3: USER MANUAL.
10. Yu Juan, Zhang Mingchuan, Fan Weidong, Zhou Yuegui, and Zhao Guofeng, *Applied Thermal Engineering*. **22**, 641 (2002).