

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПОЛОСТИ С МИКРОПОРИСТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

*Н.К. Никулин, Р.О. Андреев*

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (МГТУ)  
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5  
Тел.: +7 (925) 891-32-81, e-mail: romanandreev94@gmail.com

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

Целью работы является определение влияния состава и свойств наполнителя (вакуумной изоляции, сорбента) на время вакуумирования и распределение давления в вакуумируемой полости. В работе приняты допущения: молекулярный режим течения газа, микропористая структура представлена капилляром эквивалентной длины и диаметра, газовыделение с поверхности не зависит от давления и постоянно по длине условного капилляра. Процесс вакуумирования был рассмотрен для установившегося режима откачки и для процесса откачки с постоянным потоком откачиваемого газа. Соответственно, получены аналитические зависимости распределения давления в капилляре и время откачки в заданном диапазоне давлений.

Ключевые слова: молекулярный режим течения газа, проводимость, время, давление, капилляр, вакуум, процесс откачки, эквивалентная длина, гидравлический диаметр, газовыделение.

## STUDY OF PRESSURE CHANGE IN THE CAVITY WITH A MICROPOROUS FILLER

*N.K. Nikulin, R.O. Andreev*

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman (MSTU)  
5, 2-nd Baumanskaya, 105005, Moscow, Russia  
Tel.: +7 (925) 891-32-81, e-mail: romanandreev94@gmail.com

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

The aim of the study is to determine influence of composition and properties of filler (vacuum insulation, sorbent) of pumping time and pressure distribution in the pumping cavity. In the work accepted assumptions: molecular flow regime of gas, microporous structure is presented of capillary equivalent length and diameter, gassing from the surface independent of pressure and are constant along the length of conventional capillary. Pumping process has been considered for steady pumping process and pumping process with constant pumped gas flow. Accordingly were obtained analytical dependence of pressure distribution in capillary and time of pumping process for design pressure ranges.

Keywords: molecular flow regime of gas, conductivity, time, pressure, capillary, vacuum, the pumping process, equivalent length, hydraulic diameter, gas emission.



*Николай  
Константинович  
Никулин  
Nikolay K. Nikulin*

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
**Образование:** МГТУ им. Н.Э.Баумана (1970).  
**Область научных интересов:** высоковакуумные средства откачки, механические и немеханические средства откачки, тепловая вакуумная изоляция.  
**Публикации:** более 100.

**Information about the author:** Ph.D., associate professor of N.E. Bauman MSTU.  
**Education:** N.E. Bauman MSTU (1970).  
**Research area:** high vacuum pump means, mechanical and non-mechanical means of pumping, thermal vacuum insulation.  
**Publications:** more than 100.



Роман Олегович Андреев  
Roman O. Andreev

**Сведения об авторе:** магистр по направлению «технологические машины и оборудование», студент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Образование:** МГТУ им. Н.Э.Баумана (2017).

**Область научных интересов:** криогенно-вакуумная техника, пневмотранспорт, вакуумная тепловая изоляция.

**Information about the author:** master of technological machinery and equipment.

**Education:** N.E. Bauman MSTU (2017).

**Research area:** cryovacuum technical equipment, pneumatic transport, vacuum thermal insulation.

Для защиты трубопровода низкотемпературного хладагента ( $N_2$ , He) используется вакуумная порошковая или стекловолоконная изоляция [1]. Вакуумирование закрытой полости, в которой размещен порошковый или стекловолоконный наполнитель, это сложный процесс массопереноса газа [2]. В то время как газ откачивается, в полость поступают газы выделения из изоляционного материала (рис. 1).

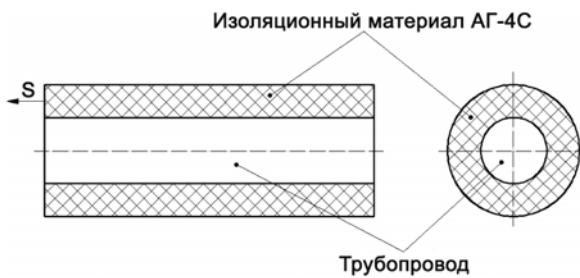


Рис. 1. Схема вакуумирования  
Fig. 1. Circuit pumping

Собственно процесс вакуумирования осуществляется безмасляными средствами откачки, расчет которых рассмотрен в работах [3-6].

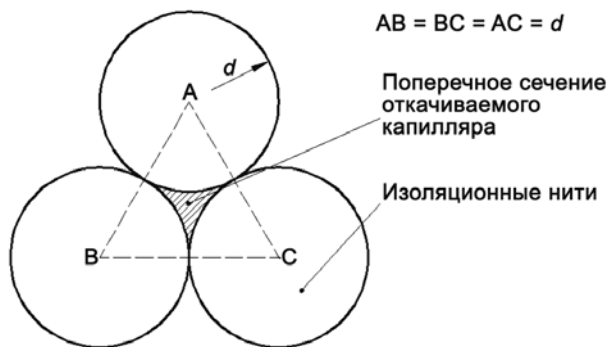


Рис. 2. Поперечное сечение откачиваемого капилляра  
Fig. 2. The cross-section of the capillary pumped

Процесс вакуумирования полости рассмотрен на примере вакуумпровода, представляющего собой два коаксиальных цилиндра, где диаметр внешнего цилиндра  $D_1 = 60 \cdot 10^{-3}$  м, внутреннего –  $D_2 = 40 \cdot 10^{-3}$  м, длина  $L = 1$  м.

Рассматриваемый изоляционный материал АГ-4С представляет собой стеклянные нити диаметром  $d = 6 \cdot 10^{-6}$  м, длиной  $l = 1$  м [7].

Откачиваемый объем – это полость сложного сечения между изоляционным материалом (рис. 2).

Для расчета вакуумных параметров в объеме применяются разные методы. В последнее время исследования проводимости каналов и распределения давления осуществляются статистическими методами [8-11], в данной работе рассматривается процесс молекулярной диффузии.

Для упрощения формы канала течения поперечное сечение представим в виде круга с гидравлическим диаметром, который равен:

$$d_{\text{гид}} = \sqrt{\frac{4(S_{\text{тр}} - 3S_{\text{сек}})}{\pi}} = 6,032 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

где  $S_{\text{тр}} = 0,5d^2 \sin 60^\circ = 4,33 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ ;

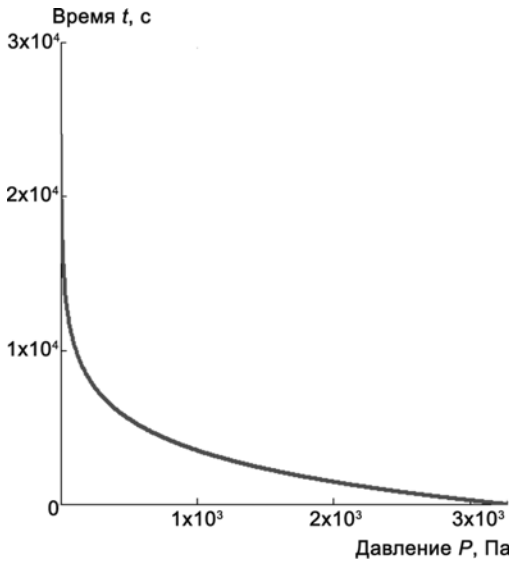
$$S_{\text{сек}} = \frac{d^2 \pi}{4} \frac{60^\circ}{360^\circ} = 1,3091 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2.$$

Так как диаметр во много раз меньше длины, то считаем откачиваемую полость капилляром. Соответственно, объем будет равен:  $V = S_{\text{кап}} L = 2,513 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , где  $S_{\text{кап}} = \pi d_{\text{гид}}^2 / 4 = 4,737 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Изменение параметров газа по длине трубы при постоянной распределенной нагрузке газовой выделению:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{q}{V} + \frac{U}{V} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2},$$

где  $U$  – проводимость капилляра;  $V$  – объем капилляра.



**Рис. 3.** График изменения времени вакуумирования объема в зависимости от давления начала процесса откачки  
**Fig. 3.** Schedule changes pumping time volume versus pressure the start pumping process

В общем случае для капилляра с постоянной проводимостью зависимость времени вакуумирования от давления  $p_1 = 3,2 \cdot 10^3$  Па до  $p_2 = 1$  Па будет определяться по формуле (рис. 3)

$$t(p) = - \int_{p_1}^p \frac{V(U+S)dp}{USp},$$

где  $V$  – откачиваемый объем;  $S$  – быстрота действия насоса,  $S = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $U$  – проводимость капилляра,  $U = 121d_{\text{гид}}^3 n/L = 2,655 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$  [3], где  $n$  – количество капилляров,  $n = S_{\text{пов}}/S_{\text{кап}} = 3,2 \cdot 10^{-7}$ , где

$$S_{\text{пов}} = \frac{\pi D_1^2}{4} - \frac{\pi D_2^2}{4} = \text{м}^2.$$

Рассмотрим случай, в котором изменение давления от времени равно нулю. Такой случай называется квазистационарным.

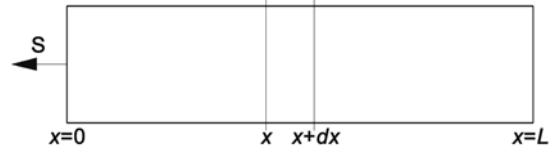
На элементарном участке  $dx$  откачиваемой камеры длиной  $L$ ,  $L = 1 \text{ м}$ , с периметром, не зависящим от  $x$ ,  $\Pi = \pi d_{\text{гид}} = 0,019 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , площадью поперечного сечения  $F$ ,  $dp/dt = 0$ , распределенная газовая нагрузка  $q$ . Насос, стоящий в сечении  $x = 0$ , откачивает камеру (рис. 4).

$$F dx dp = q \Pi (L-x) dt - Sp(x) dt,$$

так как  $dp/dt = 0$ , то получим (рис. 5)

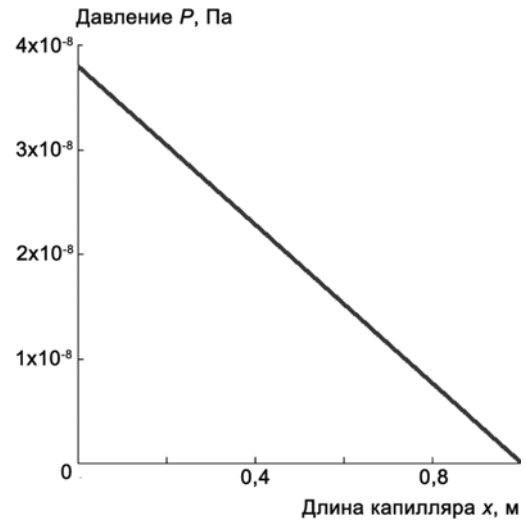
$$p(x) = \frac{q \Pi (L-x)}{S}.$$

В общем случае давление  $p$  зависит от  $t$ . При расчете принимаем:  $q$  – не зависит от  $p$  ( $q = \text{const}$ ) и быстрота откачки газа в сечении  $x$  трубы зависит от его проводимости.



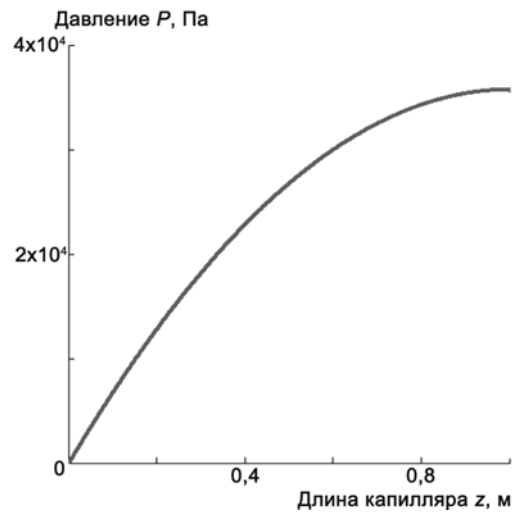
**Рис. 4.** Расчетная схема удаления газа из откачиваемого объема

**Fig. 4.** Settlement circuit removing gas from the pumped volume



**Рис. 5.** График распределения давления по длине капилляра (камеры)

**Fig. 5.** Schedule pressure distribution along the length of the capillary (the chamber)

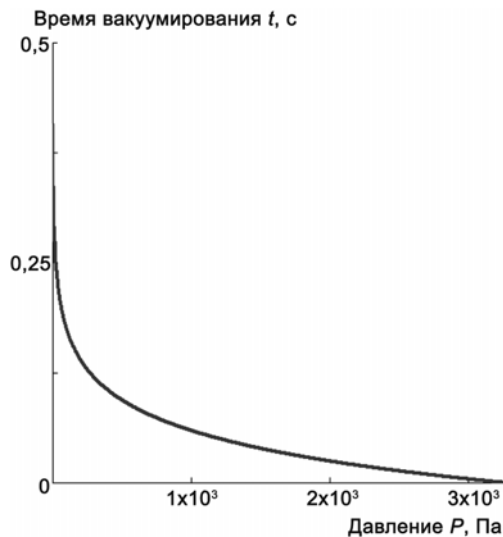


**Рис. 6.** График распределения давления по длине откачиваемой камеры

**Fig. 6.** Schedule pressure distribution along the length of the pumped chamber

Проводимость (для воздуха при  $T = 293 \text{ К}$ ) в данном случае будет определяться как  $U(x) = 121d_{\text{гид}}^3/x \text{ м}^3/\text{с}$ .





**Рис. 7.** График изменения времени достижения заданного давления  $p$  в выбранном сечении канала в зависимости от давления начала процесса откачки  
**Fig. 7.** Schedule changes the time to reach a predetermined pressure  $p$  in a selected section of the channel depending on the pressure the start pumping process

Тогда распределение давления по длине (рис. 6):

$$p(z) = \int_0^z \frac{q\Pi(L-z)dz}{121d_{гид}^3}.$$

Зная распределение давления по длине, можем получить зависимость давления от времени вакуумирования для любого сечения откачиваемой камеры.

Так, зная давление в интересующем сечении, например, где давление  $p_x = 3,2 \cdot 10^3$  Па (из рис. 6), можем определить время откачки до нужного давления  $p = 1$  Па (рис. 7):

$$t(p) = - \int_{p_x}^p \frac{V dp}{Sp - q\Pi L}.$$

В работе были получены математические зависимости распределения давления по длине трубопровода в установившемся режиме течения и влияние времени откачки объема в зависимости от начального давления процесса вакуумирования.

### Список литературы

1. Коганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных теплоизоляционных конструкциях. М.: Энергия, 1979.
2. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980.
3. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. Вакуумная техника: справочник. М.: Машиностроение, 2009. С. 56-61.
4. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкаръ Е.В. Расчет течения газа в проточной части молекулярного вакуумного насоса. «Вакуумная техника, материалы и технология». Материалы VIII Международной научно-технической конференции / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА, 2013. С. 111-118.
5. Демихов К.Е., Дронов А.В., Никулин Н.К. Расчет откачных параметров молекулярновязкостного вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 3-9.
6. Серяков А.С., Никулин Н.К. Статистическое моделирование процесса перехода молекул газа через межлопаточный канал рабочего колеса ТМН. V Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология», 19-21 апреля 2011 г.: материалы конференции. Казань: КГТУ, 2011. С. 184.
7. ГОСТ 8325-93. Стекловолокно. Нити крученые комплексные. Технические условия. Введ. 1996-07-01. М.: Издательство стандартов, 2002.

### References

1. Kaganer M.G. Teplomassoobmen v nizkotemperaturnyh teploizolacionnyh konstrukciâh. M.: Ènergiâ, 1979.
2. Saksaganskij G.L. Molekulârnye potoki v složnyh vakuumnyh strukturah. M.: Atomizdat, 1980.
3. Demihov K.E., Panfilov Ū.V., Nikulin N.K. Vakuumnaâ tehnika: spravočnik. M.: Mašinstroenie, 2009. S. 56-61.
4. Demihov K.E., Nikulin N.K., Svičkar' E.V. Rasčet tečeniâ gaza v protočnoj časti molekularnogo vakuumnogo nasosa. «Vakuumnaâ tehnika, materialy i tehnologiâ». Materialy VIII Meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii / pod red. d-ra tehn. nauk, prof. S.B. Nesterova. M.:NOVELLA, 2013. S. 111-118.
5. Demihov K.E., Dronov A.V., Nikulin N.K. Rasčet otkačnyh parametrov molekularnovâzkostnogo vakuumnogo nasosa // Vestnik MGTU im. N.È. Baumana. Ser. «Mašinstroenie». 2012. S. 3-9.
6. Serâkov A.S., Nikulin N.K. Statističeskoe modelirovanie processa perehoda molekul gaza čerez mežlopatočnyj kanal rabočego kola TMN. V Rossijskaâ studenčeskaâ naučno-tehničeskaâ konferenciâ «Vakuumnaâ tehnika i tehnologiâ», 19-21 aprilâ 2011 g.: materialy konferencii. Kazan': KGTU, 2011. S. 184.
7. GOST 8325-93. Steklovolokno. Niti kručenyje kompleksnye. Tehničeskie usloviâ. Vved. 1996-07-01. M.: Izdatel'stvo standartov, 2002.

8. Демихов К.Е., Макаров А.М., Никулин Н.К., Сви́чкарь Е.В. Методика расчета откачной характеристики кинетического высоковакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5(17). URL: <http://engjournal.ru/search/author/452/page1.html>.

9. Шемарова О.А., Никулин Н.К. Определение проводимости в молекулярном и переходном режимах течения газа методом частиц в ячейках // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5(17). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/753.html>.

10. Шемарова О.А., Никулин Н.К. Математическое моделирование течения разреженного газа при наличии возмущающих воздействий. VIII Международная научно-техническая конференция. Вакуумная техника, материалы и технология». Материалы / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Б. Нестерова. М.:НОВЕЛЛА, 2013. С. 105-111.

11. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Сви́чкарь Е.В. Течение газа в спиральном канале молекулярного вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 10-20.

8. Demihov K.E., Makarov A.M., Nikulin N.K., Svičkar' E.V. Metodika račeta otkáčnoj harakteristiki kinetičeskogo vysokovakuumnogo nasosa // Inženernyj žurnal: nauka i innovacii. 2013. № 5(17). URL: <http://engjournal.ru/search/author/452/page1.html>.

9. Šemarova O.A., Nikulin N.K. Opredelenie provodimosti v molekularnom i perehodnom režimach tečeniâ gaza metodom častic v âčejkah // Inženernyj žurnal: nauka i innovacii. 2013. № 5(17). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/753.html>.

10. Šemarova O.A., Nikulin N.K. Matematičeskoe modelirovanie tečeniâ razrežennogo gaza pri naličii vozmušauših vozdeystvij. VIII Meždunarodnaâ naučno-tehničeskââ konferenciâ. Vakuumnaâ tehnika, materialy i tehnologiâ». Materialy / pod red. d-ra tehn. nauk, prof. S.B. Nesterova. M.:NOVELLA, 2013. S. 105-111.

11. Demihov K.E., Nikulin N.K., Svičkar' E.V. Tečenie gaza v spiral'nom kanale molekularnogo vakuumnogo nasosa // Vestnik MGTU im. N.É. Baumana. Ser. «Mašinstroenie». 2012. S. 10-20.

*Транслитерация по ISO 9:1995*

