

## О МЕТОДЕ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОТКАЧКИ СТУПЕНИ ДИФФУЗИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

К.Е. Демихов

ked@bmstu.ru

А.А. Очков

aochkov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

В настоящее время пароструйные вакуумные насосы широко используются в различных областях науки и техники в силу целого ряда преимуществ относительно других средств откачки, таких как высокая надежность, относительная простота конструкции, технологичность изготовления. Проанализированы существующие математические модели рабочих процессов, методы расчета откачных параметров пароструйных вакуумных насосов. Проблема совершенствования методов расчета параметров откачки пароструйных вакуумных насосов, применяемых при проектировании, актуальна и в настоящее время. Сделана попытка дальнейшего развития этих моделей в целях повышения их практической значимости для проектирования насосов, в частности, рассмотрены процессы откачки первыми ступенями диффузионного насоса, поскольку именно они определяют эффективность работы насоса в целом. Приведены аналитические зависимости для расчета основных откачных параметров широко применяемых диффузионных вакуумных насосов. Полученные уравнения являются определенной уточняющей коррекцией известных положений по данной тематике. Приведены выводы, имеющие практическую значимость для проектирования современных пароструйных вакуумных насосов

### Ключевые слова

*Предельное остаточное давление, быстрота откачки, поток молекул газа, энергообмен между молекулами газа и пара*

Поступила 21.05.2020

Принята 15.07.2020

© Автор(ы), 2021

---

**Введение.** С момента своего появления в начале прошлого века пароструйные вакуумные насосы нашли достаточно широкое применение в самых различных областях техники [1–6]. Это стало возможным благодаря целому ряду преимуществ, которые имеют эти насосы. Прежде всего, это высокая надежность, относительная простота конструкции и технологичность изготовления. Важно также отметить высокую экономичность процесса создания и эксплуатации таких насосов. При этом не следует за-

бывать о серьезном недостатке пароструйных насосов: в процессе эксплуатации они являются непосредственным источником «загрязнения» откачиваемого объема парами рабочей жидкости, применяемой в данном насосе, в основном это органические соединения — специальные вакуумные масла и эфиры. Такое обстоятельство накладывает определенные ограничения на возможность их использования в целом ряде областей науки и техники. Но как показывает анализ различных систем, где требуется применение вакуумных средств откачки, интерес к паромасляным диффузионным вакуумным насосам (ПДВН) не снижается. Поэтому проблема совершенствования методов расчета основных параметров откачки, применяемых при проектировании, остается актуальной.

**Материалы и методы решения задач.** Впервые теоретическое описание процесса откачки ступенями диффузионного насоса выполнено в работе [5]: создана знаковая физическая модель действия насоса, выведены основные зависимости для оценки основных параметров откачки насоса. Дальнейшее развитие эта модель получила в работе [6], в которой изложен метод расчета пароструйного диффузионного вакуумного насоса. Полученные на основании сделанных допущений зависимости позволяют проанализировать качественное влияние различных факторов на основные параметры откачки насоса. Однако уравнения, приведенные в работах [5, 6], характеризуются достаточными отклонениями расчетных данных от реальных значений.

В работе [7] предложена более удачная с этой точки зрения расчетная модель, однако для ее практического применения требуются знания конкретных параметров насоса, что на этапе проектирования вызывает серьезные осложнения, попытки преодоления которых приводят к снижению точности расчетов, что ставит под сомнение необходимость применения этой теоретической модели с учетом наличия более простых моделей, предложенных в [3].

В настоящей работе сделана попытка дальнейшего развития этих моделей с целью повысить их практическую значимость при проектировании насосов, в частности, рассмотрен процесс откачки первыми ступенями диффузионного насоса, поскольку именно они определяют эффективность работы насоса в целом. На рис. 1 приведена расчетная схема полости всасывания ПДВН. Рассмотрим возможность переноса молекул газа, прошедших через кольцевую диафрагму ( $D-d_{c1}$ ) и взаимодействовавших с молекулами пара, вылетевшими из сопла первой ступени.

При рассмотрении данного процесса приняты следующие допущения:

- при взаимодействии частиц имеет место полный энергетический обмен;
- в рассматриваемой зоне температура парогазовой смеси остается постоянной;
- о гарантированном переносе молекул газа в направлении откачки выносится заключение: после не более одного соударения частиц прошедшими являются те молекулы газа, которые после взаимодействия не проходят через сечение  $BC$  (см. рис. 1) в обратном направлении.

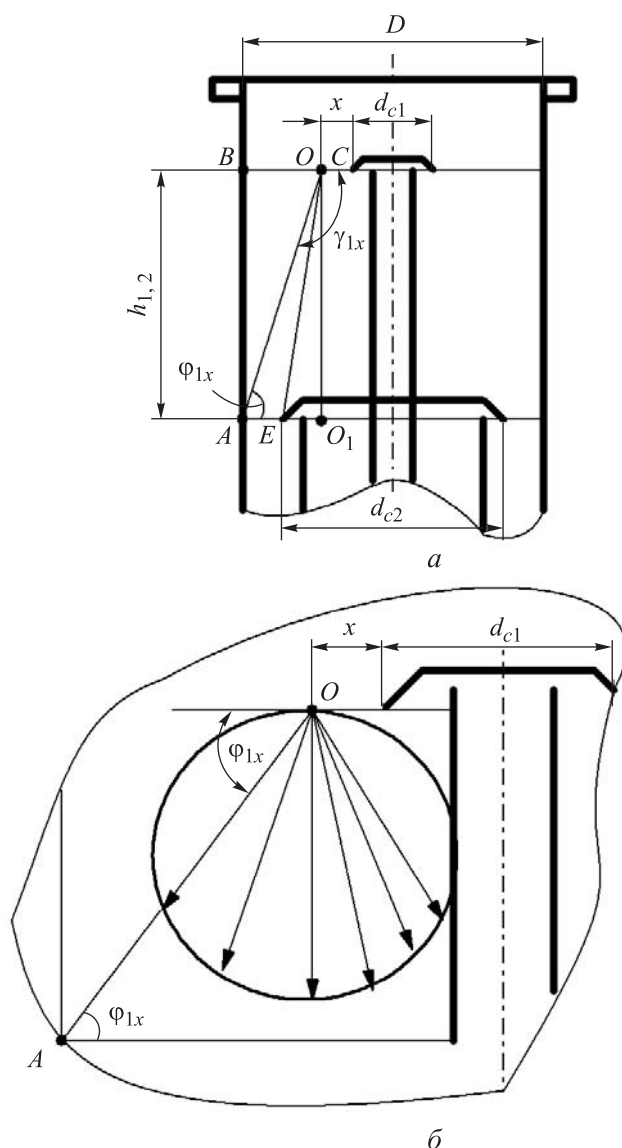


Рис. 1. Расчетная схема полости всасывания ПДВН

В соответствии с принятыми допущениями из числа молекул газа, прошедших в зону действия потока пара (вышедшего из сопла первой ступени), в окрестности точки  $O$  на отрезке  $BC$  пройдут те, вектор скорости теплового движения которых будет лежать в пределах угла  $\angle AOC = \gamma_{1x}$  (см. рис. 1).

Как следует из рис. 1,  $a$ , угол  $\gamma_{1x}$  определяется как  $\gamma_{1x} = \pi - \varphi_{1x}$ , где  $\varphi_{1x} = \angle OAO_1$ .

Тогда прошедшую в направлении откачки часть молекул можно характеризовать коэффициентом

$$K_{1x} = \frac{\pi - \varphi_{1x}}{\pi}.$$

Рассмотрев (треугольник)  $\Delta AOO_1$  (см. рис. 1,  $a$ ), можно заключить, что

$$\varphi_{1x} = \arctg\left(\frac{2h_{1,2}}{D - 2x - d_{c1}}\right),$$

где  $h_{1,2}$  — расстояние между срезами зонта сопла первой и второй ступеней;  $D$  — диаметр входного сечения насоса;  $d_{c1}$  — диаметр зонта сопла первой ступени.

Для оценки вероятности переноса в направлении откачки всех молекул газа, прошедших через сечение  $BC$  (см. рис. 1,  $a$ ), можно использовать зависимость

$$K_{1x} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \varphi_{1x})}{n},$$

где  $n$  — число участков входного сечения  $BC$ , на которое оно разбивается (предлагается  $n = 10-100$ ).

Рассмотрим основные режимы работы насоса, оценивая эффективность откачки во всасывающем сечении.

1. Режим предельного остаточного давления ( $p = p_0$ ;  $S_H = 0$ ). В этом случае прямой поток молекул (в направлении откачки) равен обратному потоку, состоящему из молекул газа, диффундирующих из парогазовой смеси [3]:

$$n_{1r}v_{1r} = D \frac{dn_{1r}}{dx}, \quad (1)$$

где

$$n_{1r} = n_{1c} K_{1cp} \quad (2)$$

— концентрация молекул, участвующих в процессе энергетического обмена с молекулами пара, с учетом принятых допущений;  $v_{\text{п}}$  — скорость потока пара, истекающего из сопла первой ступени;  $D$  — коэффициент диффузии молекул газа в поток пара. На основании молекулярно-кинетической теории газа можно записать [3]

$$D = D_0 \frac{1}{n_{\text{г}} + n_{\text{п}}},$$

где  $D_0$  — константа диффузии;  $n_{\text{п}}$  — концентрация молекул пара.

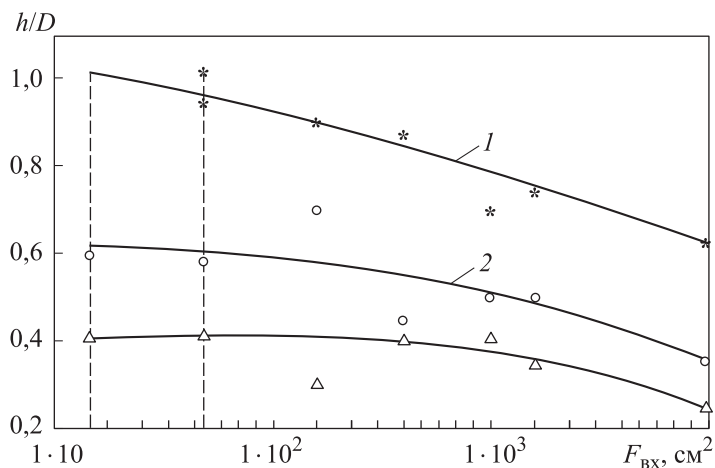
В диффузионном насосе обычно  $n_{\text{г}} \ll n_{\text{п}}$ , тогда  $D \approx \frac{D_0}{n_{\text{п}}}$ .

Решая дифференциальное уравнение (1) [3] и учитывая условие (2), получаем следующую зависимость:

$$p_0 = p_{\text{Н1}} \exp\left(-\frac{v_{\text{п}} n_{\text{п}} K_{\text{Icp}}}{D_0} h_{1,2}\right), \quad (3)$$

где  $p_0$  — минимальная величина давления на всасывании;  $p_{\text{Н1}}$  — давление газа на стороне нагнетания первой ступени.

Осевую протяженность ( $h$ , см. рис. 1) зоны действия отдельных сопел ПДВН можно определить на основании результатов, приведенных в работах [8, 9] и на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость относительного параметра  $h/D$  от площади  $F_{\text{вх}}$  входного сечения насоса:

- 1 — относительное расстояние  $h/D$  между срезами сопел первой и второй ступеней;
- 2 —  $h/D$  между срезами сопел второй и третьей ступеней;
- 3 —  $h/D$  между срезом сопла третьей ступени и осью сопла

На рис. 2 характерными знаками показаны величины относительных параметров  $h/D$  ( $h$  — протяженность зоны действия соответствующих сопел) для различных отечественных диффузионных насосов.

Кривые представляют собой геометрическое место точек, наиболее характерных во всем диапазоне изменения значений  $h/D$  для различных насосов.

2. Режим откачки ( $S_n \neq 0$ ). С учетом принятых допущений для определения числа молекул, прошедших через единичную площадку сечения ВС (см. рис. 1, а), можно записать следующее уравнение [3]:

$$v_{\text{п}} n_{\Gamma}(x) - \frac{dn_{\Gamma}(x)}{dx} D = n_{\text{вн}} S',$$

где  $n_{\Gamma}(x)$  — концентрация молекул, прошедших в направлении откачки, из числа попавших в зону действия струи пара через сечение  $dx$  в окрестности точки  $O$  (см. рис. 1, а);  $n_{\text{вн}}$  — концентрация молекул газа во внутренней полости насоса над соплом первой ступени;  $S'$  — объем газа, прошедший в единицу времени через единичную площадку входного сечения насоса.

Тогда, с учетом условия, определенного зависимостью (2), можно записать

$$v_{\text{п}} n_{\Gamma}(x) K - \frac{dn_{\Gamma}(x)}{dx} DK \approx n_{\text{вн}} S'.$$

Решив данное дифференциальное уравнение по методике [3], получим следующую зависимость:

$$S'_n = \frac{v_{ap}}{4} \frac{1}{1 + (1/4)((v_{ap} / (v_{\text{п}} K_{\text{Icp}}))}, \quad (4)$$

где  $S'_n$  — максимальная величина удельной быстроты откачки насоса.

**Заключение.** Приведенные расчетные зависимости (3) и (4) являются определенной коррекцией известных уравнений из работы [3] и позволяют определить основные параметры насосов [10–15] с большей точностью, исключив некоторые недостатки из аналитических зависимостей, приведенных в работах [3, 5, 6].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хоффман Д., Сингх Б., Томас III Дж. Справочник по вакуумной технике и технологиям. М., Техносфера, 2011.
- [2] Демихов К.Е., ред. Вакуумная техника. М., Машиностроение, 2009.
- [3] Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. М.-Л., Энергия, 1965.

- [4] Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. М., Энергия, 1969.
- [5] Gaede W. Die Molekularluftpumpe. *Ann. Phys.*, 1913, vol. 346, no. 7, pp. 337–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133460707>
- [6] Яккель Р. Получение и измерение вакуума. М., ИИЛ, 1959.
- [7] Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М., Наука, 1976.
- [8] Скобелкин В.И., Ющенкова Н.И. Теория пароструйного вакуумного насоса. *ЖТР*, 1954, т. 24, № 10, с. 1879–1892.
- [9] Путиловский Ф.Д., Гумеров Н.М., Хисамеев И.Г. и др. К расчету диффузионных насосов. В: Физика и техника вакуума. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 1974, с. 89–101.
- [10] Vacuum technology book. Vol. 2. Pfeiffer Vacuum. *pfeiffer-vacuum.com: веб-сайт*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how> (дата обращения: 20.05.2020).
- [11] Hybrid turbomolecular pumps. Adixen Alcatel, 2013.
- [12] Giors S., Colombo E., Inzoli F., et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1584–1591. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.2178362>
- [13] Umrath D.W., ed. Fundamentals of vacuum technology. Leybold, 2007.
- [14] Pfeiffer Vacuum Catalogs, 2013. *directindustry.com.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/pfeiffer-vacuum-14656.html> (дата обращения: 20.05.2020).
- [15] Agilent Turbo-V Pumps. 2013. *agilent.com: веб-сайт*. URL: [https://www.agilent.com/cs/library/catalogs/public/07\\_turbo\\_pumps](https://www.agilent.com/cs/library/catalogs/public/07_turbo_pumps) (дата обращения: 20.05.2020).

**Демихов Константин Евгеньевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1).

**Очков Андрей Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Демихов К.Е., Очков А.А. О методе расчета параметров откачки ступени диффузионного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 85–93.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-85-93>

---

## ON THE METHOD OF CALCULATING DIFFUSION VACUUM PUMP STAGE PUMPING PARAMETERS

К.Е. Demikhov

А.А. Ochkov

ked@bmstu.ru

aochkov@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

At present, steam jet vacuum pumps are widely used in various fields of science and technology due to a number of advantages, e.g., reliability, relative simplicity of design, and manufacturability, over other pumping means. The paper analyzes the existing mathematical models of working processes, methods for calculating the pumping parameters of steam-jet vacuum pumps. The problem of improving these methods, which are used in the design, is still urgent. The study attempts to further develop the models in order to increase their practical significance for the pumps design: in particular, the processes of pumping by the first stages of a diffusion pump are considered, since it is they that determine the efficiency of the pump as a whole. Analytical dependences for calculating the main pumping parameters of widely used diffusion vacuum pumps are presented. The obtained equations are a certain clarifying correction of the known provisions on this topic. Findings of research are of practical importance for the design of modern steam-jet vacuum pumps

### Keywords

*Limit residual pressure, pumping speed, flow of gas molecules, energy exchange between gas and steam molecules*

Received 21.05.2020

Accepted 15.07.2020

© Author(s), 2021

---

### REFERENCES

- [1] Hoffman D.M., Singh B., Thomas J.H., eds. Handbook of vacuum science and technology. Academic Press, 1997.
- [2] Demikhov K.E., ed. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.
- [3] Tseytlin A.B. Parostruynye vakuumnnye nasosy [Steam-ejecting vacuum pumps]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1965.
- [4] Power B.D. High vacuum pumping equipment. London, Chapman and Hall, 1966.
- [5] Gaede W. Die Molekularluftpumpe. *Ann. Phys.*, 1913, vol. 346, no. 7, pp. 337–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133460707>
- [6] Jaeckel R. Kleinste Drucke ihre Messung und Erzeugung. Berlin, Gottingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1950.



- [7] Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1976.
- [8] Skobelkin V.I., Yushchenkova N.I. Theory of steam jet vacuum pump. *ZhTR*, 1954, vol. 24, no. 10, pp. 1879–1892 (in Russ.).
- [9] Putilovskiy F.D., Gumerov N.M., Khisameev I.G., et al. K raschetu diffuzionnykh nasosov [To the calculation of diffusion pumps]. V: *Fizika i tekhnika vakuuma* [In: Vacuum physics and technique]. Kazan, Kazanskii Univ. Publ., 1974, pp. 89–101 (in Russ.).
- [10] Vacuum technology book. Vol. 2. Pfeiffer Vacuum, 2013. *pfeiffer-vacuum.com: website*. Available at: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how> (accessed: 20.05.2020).
- [11] Hybrid turbomolecular pumps. Adixen Alcatel, 2013.
- [12] Giors S., Colombo E., Inzoli F., et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance. *J. Vac. Sc. Technol. A*, 2006, vol. 24, no. 4, pp. 1584–1591. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.2178362>
- [13] Umrath D.W., ed. *Fundamentals of vacuum technology*. Leybold, 2007.
- [14] Pfeiffer Vacuum Catalogs, 2013. *directindustry.com.ru: website*. Available at: <https://www.directindustry.com.ru/prod/pfeiffer-vacuum-14656.html> (accessed: 20.05.2020).
- [15] Agilent Turbo-V Pumps. 2013. *agilent.com: website*. Available at: [https://www.agilent.com/cs/library/catalogs/public/07\\_turbo\\_pumps](https://www.agilent.com/cs/library/catalogs/public/07_turbo_pumps) (accessed: 20.05.2020).

**Demikhov K.E.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5/1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Ochkov A.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5/1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Demikhov K.E., Ochkov A.A. On the method of calculating diffusion vacuum pump stage pumping parameters. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 85–93 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-85-93>