

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.51

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ

К.Е. Демихов

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

e-mail: ked@bmstu.ru

Турбомолекулярные вакуумные насосы широко применяются в самых различных областях науки и техники, в результате чего не ослабевает интерес к проблеме создания новых видов насосов. Разработана теория рабочих процессов в проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов при различных условиях эксплуатации, одним из весомых показателей которой является возможность выполнять расчеты основных параметров и характеристик таких насосов с достаточной точностью, что позволяет исследовать влияние на них различных факторов. Тем самым, наверное, для единственного высоковакуумного насоса обеспечивается оптимизация его проточной части при различных критериях оптимальности. Накоплена обширная база данных, позволяющая создавать эффективные турбомолекулярные вакуумные насосы с различными исходными параметрами. Поэтому в настоящее время актуальной проблемой становится поиск перспективных направлений дальнейшего развития турбомолекулярных вакуумных насосов. Рассмотрены современные направления совершенствования конструкций турбомолекулярных вакуумных насосов с использованием комбинированных схем проточной части. Отмечены преимущества использованных конкретных схем, даны рекомендации по области их применения. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности использования различных схем проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов.

Ключевые слова: проточная часть, рабочее колесо, быстрота действия, параметры откачки, предельное остаточное давление.

CURRENT TRENDS OF HIGH-VACUUM MECHANICAL PUMP

K.E. Demikhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: ked@bmstu.ru

Turbomolecular vacuum pumps are widely applied in various spheres of science and technology. That is why the interest in the problem of new types of pumps designing never wanes. The theory of working processes in flow channel of turbomolecular vacuum pumps at different operation conditions was developed. Thereby perhaps, the optimization is ensured for a single high-vacuum mechanical pump and its flow channel. A vast data base which allows creating of efficient turbomolecular vacuum pumps with various initial parameter was pooled. That is why the search of promising directions of further development of turbomolecular vacuum pumps is currently becoming the issue of the day. Current trends of designs perfection of turbomolecular vacuum pumps which use combined schemes of flow channels were considered. Advantages of usage of certain design were shown and recommendations of their usage sphere were given. The results of comparative analysis of usage of different flow channel designs are provided.

Keywords: flow channel, rotor wheel, agility, pumping characteristics, ultimate vacuum.

С момента своего появления (60-е годы прошлого столетия) вакуумные турбомолекулярные насосы (ТМН) быстро завоевали достойное место в ряду высоковакуумных средств откачки. Имея целый ряд существенных преимуществ, ТМН серьезно потеснили безусловных фаворитов по объему использования в вакуумных системах паромасляные диффузионные вакуумные насосы, которые никак нельзя отнести к так называемым безмасляным средствам откачки (не являющихся источником “загрязнения” объема органическими соединениями). Все это, безусловно, привлекло к ТМН внимание исследователей различных стран. Как следствие этого, появилось достаточное число научных работ, посвященных исследованию процессов, протекающих в проточной части ТМН [1, 2].

И сегодня можно обоснованно утверждать, что ТМН — одни из немногих высоковакуумных насосов, имеющие достаточное теоретическое обеспечение для разработки современных насосов без последующей экспериментальной проверки и доводки созданных образцов.

Значительный вклад в это внесли исследования, проведенные коллективом ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана, в результате которых впервые создано программное обеспечение для оптимизации проточной части высоковакуумных механических насосов (ВМН) [3]. Все это было заложено в основу созданной совместно с СКТЬ ПО “Вектор” впервые в мировой практике в области вакуумного машиностроения САПР ВМН. Аналогов такой системы в области вакуумного машиностроения до настоящего времени не создано.

Введение же в эксплуатацию этой системы с 1985 г. позволило только в течение двух лет впервые разработать и организовать серийное производство целого ряда оптимизированных ВМН: ТМНГ-450, ТМНГ-500, ТМНГ-600ХС (в химически стойком исполнении), ТМНГ-1000 и ТМНГ-100 (рис. 1).

Особо следует выделить насос ТМНГ-100. Это единственный в мире абсолютно стерильный ВМН, имеющий атмосферное давление нагнетания. Аналога такому насосу в настоящее время нет.

Разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана программы расчета ВМН позволяют обеспечить многопараметрическую и многокритериальную оптимизацию их параметров и характеристик, что обеспечивает большой запас при разработке современных эффективных ВМН [3].

Кроме того, это дает еще возможность реализовать в полном объеме все имеющиеся резервы обеспечения оптимизации всех характеристик насоса.

В современных условиях повышенное внимание исследователи уделяют формализации структурной оптимизации разрабатываемых объектов. К сожалению, учитывая сложность проблемы в настоящий



TMHG-450



TMHG-600XC



TMHG-1000



TMHG-100

Рис. 1. Отечественные ВМН, разработанные совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана

момент, решить данную задачу для ВМН пока не представляется возможным.

Поэтому по результатам работ, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, была предложена концепция выбора на основе современных требований перспективных схем проточной части ВМН по ряду основных направлений [3]. К таким направлениям улучшения структуры проточной части ТМН относится совершенствование конструкций рабочих колес насоса.

Таким образом, предложена конструкция ТМН [3] (рис. 2, *а*), в проточной части которого на стороне нагнетания размещены колеса с двухъярусными каналами, наклонные каналы в этих ярусах выполнены зеркально отраженным, что обеспечивает соответствующее направление потока газа (см. рис. 2, *а*). В ступице колес имеются сквозные отверстия для отвода газа на стороне нагнетания. Отдавая должное возникающим определенным технологическим сложностям, необходимо отметить сокращение габаритных размеров насоса при условии обеспечения требуемой степени повышения давлений. Этой же цели служит конструкция проточной части ТМН с применением в статорных колесах наклонных радиально-торцевых лопаток (рис. 2, *б*), обеспечивающих радиальное направление потока газа попеременно

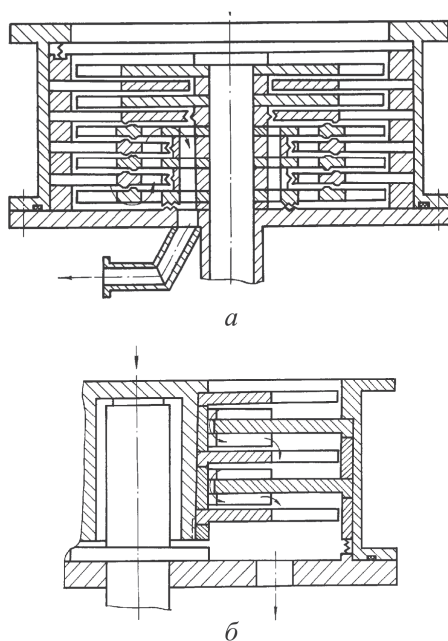
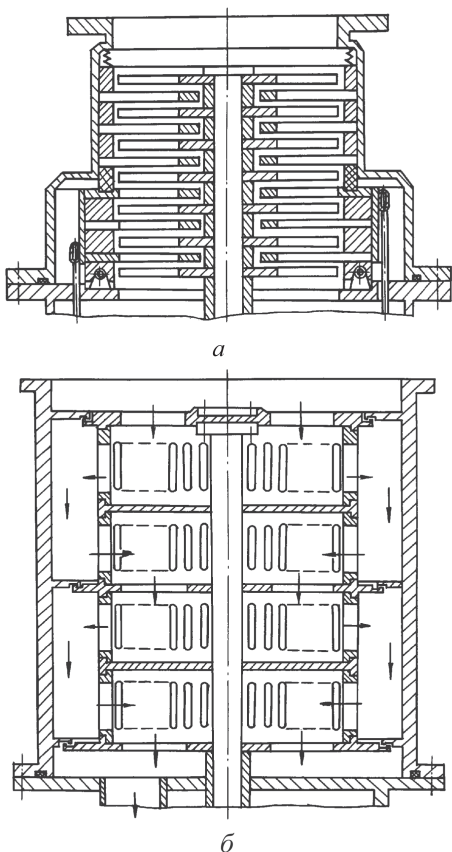


Рис. 2. Конструктивные схемы ТМН с поворотом газа (*а*) и с торцевыми радиальными лопатками на статорных колесах (*б*)

направление потока газа попеременно



к оси и от нее. Это приводит к увеличению создаваемой протяженными каналами степени повышения давлений в ограниченных габаритных размерах проточной части ТМН.

Другим перспективным направлением совершенствования конструкции ВМН является объединение в проточной части насоса элементов вакуумного ТМН и других видов высоковакуумных насосов, основанных на иных принципах откачки.

Предложена конструкция ТМН (рис. 3, а), в специальных полостях выходящих статорных колес которого размещают адсорбент. Это позволяет обеспечить дополнительную откачку газа в этих колесах. Для повышения эффективности поглощения газа эти колеса (расположенные на стороне нагнетания насоса) охлаждаются до 80...100 К жидким азотом, подаваемым в специальную рубашку охлаждения, расположенную в вакуумной полости. Применение та-

Рис. 3. Конструктивные схемы ВМН с адсорбционным насосом на стороне нагнетания (а) и осевым и радиальным потоком газа в роторе (б)

кой схемы проточной части ВМН позволяет не использовать масляные форвакуумные насосы для обеспечения предварительного разрежения при запуске насоса от атмосферного давления, так как эту функцию будет выполнять адсорбент. Причем его регенерация при насыщении может осуществляться без остановки ТМН и отсоединения от системы откачки.

Как известно, для откачки газовых сред, содержащих твердые макрочастицы, не рекомендуется применять ТМН без специальной защиты, так как это приводит к определенному ухудшению откачных параметров.

Были разработаны конструкции ТМН с переменным направлением потока, не содержащие статорные колеса. Это позволяет откачивать газовые среды с содержанием твердых макрочастиц, что очень важно для различных напылительных установок. Один из вариантов насоса показан на рис. 3, б.

Особенностью конструкции является сочетание в проточной части насоса рабочих колес с попеременным изменением осевого и радиального направлений потока газа. В результате возрастает эффективность работы каждой ступени.

Уменьшить габаритные размеры ТМН позволяет применение проточной части с размещением на стороне нагнетания колес с радиальным направлением потока газа (рис. 4).

Как показали проведенные исследования, такая схема имеет существенные резервы, особенно при использовании многопараметрической оптимизации основных характеристик ТМН.

Повысить создаваемое отношение давлений без увеличения габаритных размеров насоса можно, применяя конструкцию насоса с агрегатированием в проточной части осевых ступеней ТМН и блока цилиндрического молекулярного вакуумного насоса (МВН).

На рис. 5 для сравнения приведены чертежи насосов ТМНГ-500 (вариант 1) и ТМНГ-450 (вариант 2). В насосе ТМНГ-500 проточная часть содержит традиционный пакет осевых роторных и статорных лопаточных колес, в ТМНГ-450 она состоит из блоков осевых лопаточных колес и цилиндрического молекулярного насоса с винтовыми каналами, выполненными на корпусе насоса.

Вал в этих насосах установлен на двух радиальных и одной осевой аэростатической опорах.

Разработка насоса ТМНГ-500 была обусловлена необходимостью проверки на практике полученных данных об эффективности использования схем ТМН с комбинированной проточной частью, а также оценки степени трудоемкости изготовления по сравнению с насосом ТМН-450, проточная часть которого содержит осевые ступени и блок молекулярных ступеней.

В результате сравнения серийно созданных машин установлено, что при увеличении номинального значения быстроты действия на 25 % объем и масса насоса ТМНГ-500 становятся больше на 20 % и 6 % соответственно, чем у ТМНГ-450. При этом по данным СКТБ ПО "Вектор", производственные затраты на изготовление насосов этих моделей составили соответственно 862 (ТМНГ-500) и 950 (ТМНГ-450) нормо-часов. Все это свидетельствует о преимуществе насосов с комбинированной проточной частью, как обладающих улучшенными массогабаритными характеристиками с учетом определенной сложности

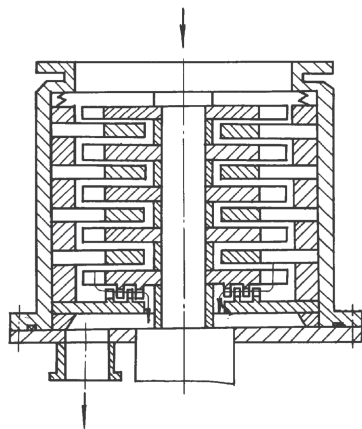


Рис. 4. Конструктивная схема ТМН с комбинированной проточной частью

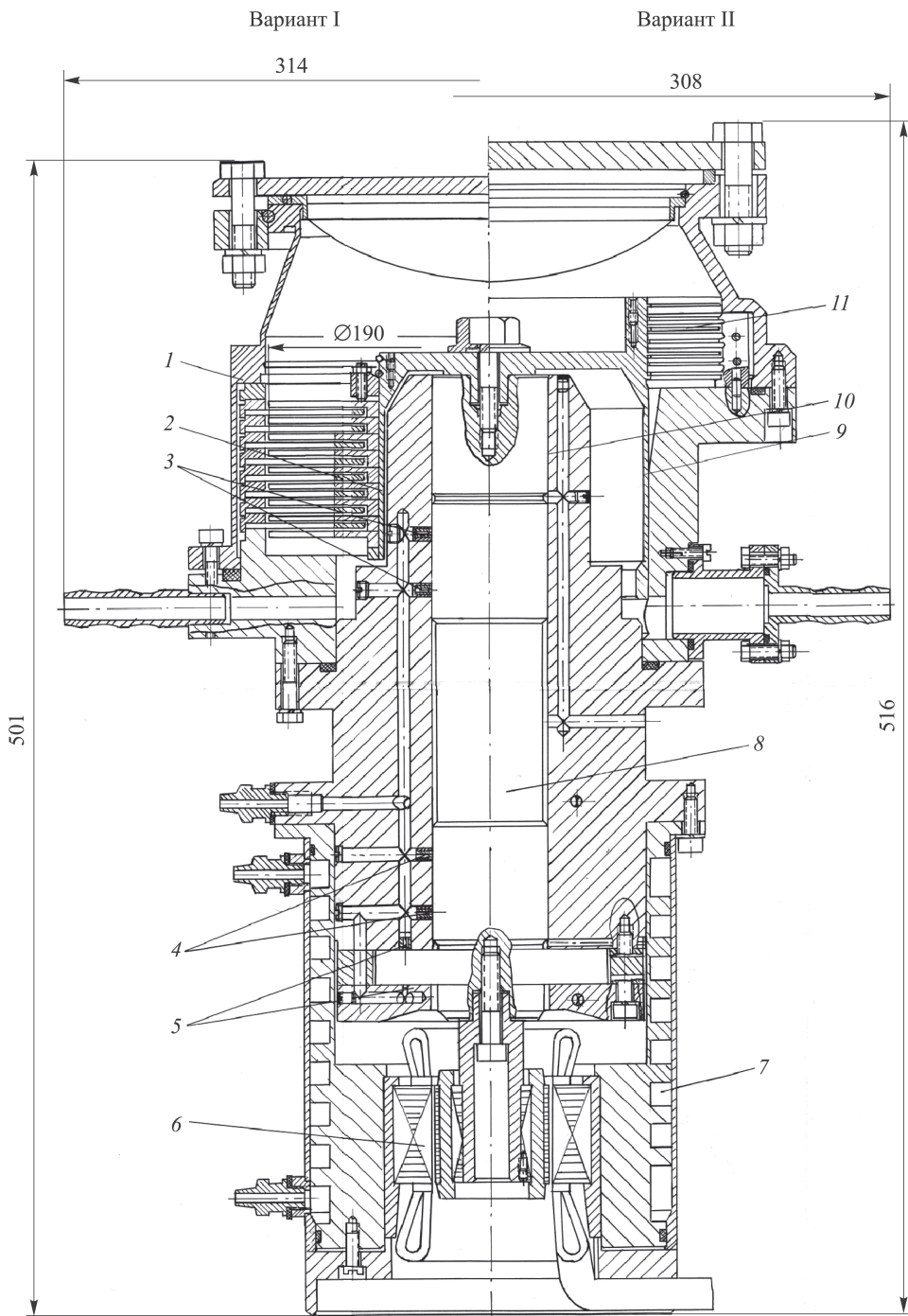


Рис. 5. Общий вид конструкции ВМН

их изготовления. Это подтверждается также сформировавшейся в мировой практике тенденцией увеличения числа выпускаемых ведущими зарубежными фирмами моделей вакуумных ТМН с комбинированной проточной частью (с осевыми и молекулярными ступенями) [4–8].

В целях более детального анализа эффективности использования различных конструктивных схем проточной части ВМН с оптимизацией основных параметров и характеристик был рассчитан ряд насосов с быстротой действия S_H по азоту и водороду 1,5; 3,5; 50; 10; 20 м³/с. Давление всасывания по азоту $p = 1 \cdot 10^{-6}$ Па, по водороду $p = 1 \cdot 10^{-5}$ и форвакуумное давление $p_\phi = 0,1$ Па. Результаты расчета приведены в таблице.

В качестве управляемых параметров были выбраны: угол наклона лопаток α ; относительная ширина каналов a/b ; относительная высота

Сравнение оптимальных параметров проточной части ВМН с различными конструктивными схемами

$S_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Газ	Схема	$N_{0c}/N_{6(m)}$	$V_{\text{пч}}, \text{ м}^3 \cdot 10^3$	$M, \text{ кг}$
1,5	N ₂	1	15/-	6,9	8,9
		2	9/13	4,4	4,8
		3	9/13	5,6	5,3
	H ₂	1	46/-	23	30,8
		2	35/19	18	22,4
		3	27/26	17	16,7
3,5	N ₂	1	14/-	15	19,3
		2	9/10	10	11,4
		3	9/11	15,3	13,7
	H ₂	1	45/-	53	70,4
		2	33/18	39,6	49,1
		3	27/25	47,3	40,8
5	N ₂	1	13/-	39,7	54,4
		2	7/13	22	26,0
		3	8/11	32,5	34,5
	H ₂	1	44/-	148	206,0
		2	34/20	110	142,0
		3	25/28	109	105,8
10	N ₂	1	11/-	110	157,1
		2	7/8	73	90,9
		3	7/10	85	89,6
	H ₂	1	36/-	380	529,9
		2	26/18	270	359,0
		3	21/25	255	267,0
20	N ₂	1	11/-	230	314,4
		2	7/7	145	181,0
		3	7/10	181	195,7
	H ₂	1	36/-	755	1066,4
		2	23/24	487	623,0
		3	21/24	500	557,0

каналов λ . Расчеты по оптимизации проточной части проводились для критериев оптимальности: объем $V_{\text{пч}}$ и масса M проточной части.

При этом проанализированы следующие схемы (см. таблицу): традиционная проточная часть с осевым направлением потока (1), проточная часть с использованием на стороне всасывания осевых ступеней, на стороне нагнетания ступеней с радиальным направлением потока газа (от периферии к центру) (2); проточная часть с комбинированием осевых ступеней (на всасывании) и молекулярных (на нагнетании) (3).

В результате сравнения расчетных данных выявлено, что применение комбинированных схем проточной части дает достаточное преимущество по различным критериям оптимальности. Так, объем проточной части уменьшился от 1,3 до 1,8 раз в зависимости от быстроты действия и рода откачиваемого газа, масса проточной части снижена от 1,7 до 2 раз.

Степень выигрыша по объему проточной части выше в большинстве случаев при использовании схемы на основе осевых и барабанных ступеней (вариант 2). При выборе в качестве критерия оптимальности массы проточной части предпочтительней выглядит схема с осевыми и молекулярными ступенями (вариант 3), особенно, когда рабочим газом является водород.

Таким образом, применение созданного программного обеспечения при разработке современных ТМН позволяет значительным образом повысить их эффективность за счет оптимизации основных параметров и характеристик. Другим перспективным направлением дальнейшего совершенствования ТМН является разработка и использование новых конструктивных схем проточной части с учетом конкретных условий эксплуатации насоса и возможности применения соответствующих производственных технологий. И, конечно, как перспектива — формализация основ полной структурной оптимизации при проектировании современных ТМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по вакуумной технике и технологиям* / под ред. Д. Хоффмана, Б. Сингха, Дж. Томаса III. М.: Техносфера, 2011. 736 с.
2. *Вакуумная техника: Справочник* / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др. / под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
3. *Оптимизация высоковакуумных механических насосов* / К.Е. Демихов, Н.К. Никулин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 с.
4. *Product Leitfaden*. Alcatel Hochvakuumtechnik. GmbH, Annecy, 1995.
5. *Komponenten für die Vakuumtechnik*, Balzers-Pfeiffer GmbH, Balzers, 1996.
6. *Vakuum katalog*. Edwards. Hochvakuum. GmbH, Marburg, 1993.
7. *Katalog HV300*, Teil B., Leybold AG, Cologne, 1994.
8. *Vacuum product katalog*, Varian Ass. Lexington. 1995–1998.

REFERENCES

- [1] Hoffman D.M., Singh B., John H. Thomas III, eds. Handbook of Vacuum Science and Technology Academic Press, 1997 . 835 p. (Russ. Ed.: Khoffman D. (red.), Singkh B. (red.), Dzh. Tomas III (red.) Spravochnik po vakuumnoy tekhnike i tekhnologiyam. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 736 p.).
- [2] Demihov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K. Avtonomova I.V., Aleksandrova A.T., Androsov A.V., Burmistrov V.A., Bykov D.V., Deulin E.A., Ivanovskij G.F., Isaev A.V., Kalinkin D.A., Kapustin E.N., Kemenov V.N., Kuprijanov V.I., eds. Vakuumnaja tehnika: Spravochnik [Handbook of vacuum technology]. 3rd Ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p.
- [3] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2010. 255 p.
- [4] Product Leitfaden [Product Guide]. Alcatel Hochvakuumtechnik GmbH, Annecy, 1995.
- [5] Komponenten für die Vakuumtechnik [Components for vacuum technology]. Balzers-Pfeiffer GmbH, Balzers, 1996.
- [6] Vakuum katalog [Vacuum catalog]. Edwards Hochvakuum GmbH, Marburg, 1993.
- [7] Katalog HV 300, Teil B [Catalog HV 300, Part B]. Leybold AG, Cologne, 1994.
- [8] Vacuum products catalog. Varian Ass. Inc., Lexington, 1995–1998.

Статья поступила в редакцию 10.06.2014

Демихов Константин Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ. Автор более 170 научных работ в области вакуумного машиностроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Demikhov K.E. — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Vacuum and Compressor Units” department of the Bauman Moscow State Technical University, honored scientist of the Russian Federation. Author of more than 170 publications in the field of vacuum machine building.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.