Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/03TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/03TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/03TVN115>)

УДК 550.837

Челпанов Игорь Борисович

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Россия, г. Санкт-Петербург¹

Профессор, доктор технических наук

E-mail: igorchelp@yandex.ru

Блажнов Александр Андреевич

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Россия, г. Санкт-Петербург

Аспирант

E-mail: soni.81@mail.ru

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Россия, г. Пермь

Профессор, доктор технических наук

E-mail: soni.81@mail.ru

Бесконтактное вихревое вакуумное захватное устройство для промышленных роботов

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы исследования вихревого вакуумного захватного устройства, в частности определены свойства первичных (круговых) и вторичных (тороидальных вихревых) течений рабочего газа внутри вихревой камеры. Получена структура потоков внутри вихревой камеры. Проведён анализ изменения скоростей выходящей из сопла струи рабочего газа. Особое внимание обращено на вторичные течения. Получено векторное поле распределения скоростей вторичных течений по радиальному сечению камеры. Проанализировано влияние вторичных течений газа на градиент статического давления. Исследование вторичных течений выполнено на основании решения задачи Бедевадта.

Ключевые слова: вихревое вакуумное захватное устройство; газодинамическая модель; численные эксперименты; первичные и вторичные течения; распределения скоростей и давлений.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Челпанов И.Б., Блажнов А.А., Кочетков А.В. Бесконтактное вихревое вакуумное захватное устройство для промышленных роботов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/03TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03TVN115

¹ 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

В современном автоматизированном производстве используется десятки и сотни различных робототехнических и мехатронных систем. При этом в технологических процессах возникает множество задач по манипулированию с различными объектами. Промышленные манипуляционные системы применяются на самых разнообразных операциях и работают с деталями, различающимися по прочности, массе, габаритам, конфигурации, расположению центра масс, шероховатости поверхности. Детали могут быть изготовлены из различных металлов, керамики, стекла, пластмассы.

Это могут быть и число всевозможных захватных устройств, которые при необходимости легко и быстро заменяются и монтируются на конечное звено манипулятора.

Бесконтактное удержание может представлять интерес для специальных технологических процессов. Сочетание отталкивающего и притягивающего усилий в газодинамическом потоке позволяет создавать вакуумные устройства удерживающие предмет производства бесконтактно. Бесконтактное удерживание может представлять интерес для технологических процессов, например в полупроводниковой промышленности при производстве чипов, ячеек солнечных батарей [6] и полупроводниковых элементов.

Удерживать и перемещать, чистые тонкие кремниевые пластины при помощи механических захватных устройств, сложно [4]. При силовом воздействии во время удержания пластина деформируется и может сломаться, также высока вероятность повредить поверхность или боковую кромку, что также является недопустимым.

Вакуумные захватные устройства, в которых отсутствует контакт с захватываемой поверхностью, представляют собой оптимальное решение для манипулирования и перемещения таких хрупких объектов или объектов с особо чистыми поверхностями.

Постановка задач исследований

Вихревое проточное бесконтактное захватное устройство (на рисунке 1 изображена его четверть) представляет из себя камеру b , цилиндрической формы, в стенки которой встроены сопла 3. Через эти сопла подается сжатый рабочий газ (воздух), создающий цилиндрический вихрь, в центральной части которого образуется область разрежения, а на периферии – область несколько повышенного (по отношению к атмосферному) давления. Между удерживаемым плоским объектом 2 и захватным устройством существует кольцевой зазор a , через который газ из области повышенного давления выходит в атмосферу [1].

Рис. 1. Общий вид четверти вихревого захватного устройства в разрезе

Сопла установлены таким образом, чтобы выходящие из них струи рабочего газа попадали в камеру тангенциально. В этом случае поток повышенной скорости "прилипает" к цилиндрической стенке камеры и движется по окружности, раскручивая газовую среду внутри рабочей камеры вокруг её оси. В результате образуется цилиндрический вихрь. Если на периферии давление близко к атмосферному, то в области, удаленной от стенок, давление ниже атмосферного (рисунок 2), что интегрально создаёт усилие, удерживающее объект. Рабочий газ из периферийной области повышенного давления выходит через кольцевой зазор между объектом удержания и вихревой камерой; в зазоре образуется область повышенного давления, что интегрально по зазору дает отталкивающую силу.

Выбор расчетных моделей, методология расчета и анализа вихревых захватных устройств основывается на положениях теории вихрей в газодинамике, основным в этой области следует считать фундаментальные работы [3, 6, 9, 10]. Описание программного обеспечения для численного решения этих задач содержится в материалах [12].

Серия численных экспериментов газодинамики позволила авторам смоделировать структуру и количественно определить параметры вихря, получить распределение скоростей и давления внутри вихревой камеры. На рисунке 2 представлены результаты расчета распределения по радиусу в камере с типовыми размерами (диаметр 50 мм, диаметры сопел 2 мм, количество сопел 4) давления на объект газа отрицательного по отношению к атмосферному.

Для удобства сравнения диаметр камеры представлен в безразмерном виде. Область с положительным (по отношению к атмосферному) давлением находится на радиусах, превышающих или равных радиусу камеры (на графике данная область не отображена), то есть в области кольцевого зазора между корпусом захвата и объектом. Компьютерные расчеты проводились при использовании вычислительного программного комплекса ANSYS FLUENT.

Рис. 2. График изменения давления от оси камеры ($x=0$) до внешнего радиуса камеры ($x=1$)

Видно, что на значительной части интервала перепад давления по отношению к атмосферному в среднем составляет 0,04 МПа; исходя из этого интегрированием может быть оценена несущая способность вакуумного вихревого захватного устройства.

При давлении рабочего газа 0,6 МПа скорость потока на срезе сопла равна скорости звука. После выхода из сопла в выходном сечении сопла образуется зона высоких скоростей, то есть выходное сечение запирается, а далее после расширения струи скорости убывают.

Поток, выходящий из сопла, прижимается к стенке центробежными силами и частицы газа двигаются по криволинейной траектории, зона которой ограничена стенкой камеры. У стенок камеры возникает зона повышенного давления, под действием которого газ через щель над объектом вытекает из камеры. В свою очередь, силы вязкого трения заставляют раскручиваться весь объем газа в камере, и при определенных условиях можно считать, что после завершения переходного процесса все частицы в камере вращаются как единое твердое (недеформируемое) тело по законам вынужденного вихря [6]. При этом на все частицы газа, находящегося в камере, действуют центробежные силы, направленные к периферии камеры. В результате этого возникает градиент статического давления в радиальном направлении (что и демонстрирует рисунок 2).

Решение задачи на основе рассмотрения вторичных течений в вихревой камере бесконтактно захватного устройства

В рассматриваемой задаче газодинамики в дополнение к круговым движениям частиц газа с тангенциальными составляющими скоростей также важную роль играют вторичные течения. Во-первых, нужно учитывать течения газа в вертикальных плоскостях, проходящих через ось камеры. Во-вторых, для их расчёта необходимо ввести в рассматриваемую газодинамическую модель пристенные течения в пограничном слое.

Известны серьезные вычислительные трудности при расчете пограничных слоев методом конечных элементов. При использовании вычислительного программного комплекса ANSYS FLUENT требуется разбить объемы на малые конечные элементы таким образом, чтобы расчёт пограничного слоя стал возможным.

Задача пограничного слоя в свободном вихре описана Бёдевадтом [5]. Картина распределения скоростей показана на рисунке 3.

Рис. 4. Поле векторов скоростей вторичных течений в радиальном сечении камеры схвата

Как видно на рисунке, вторичные течения в радиальном сечении возле границ направлены к оси камеры, а в центральной части — от оси. График радиальных скоростей в зависимости от относительной высоты камеры представлен на рисунке 5.

Рис. 5. График радиальных скоростей

Отчетливо видны резкие изменения скоростей вблизи границ интервала. В пограничном слое большое влияние на суммарные силы, действующие на каждый выделенный элементарный объем газа, вносит сила трения о стенки. График зависимости коэффициента трения от высоты камеры представлен на рисунке 6.

Рис. 6. График коэффициента трения

Силы трения на большей части интервала очень малы, но быстро возрастают у границ. Это означает, что около стенок камеры силы трения значительно больше, тогда как в центре коэффициент трения равен нулю, соответственно и силы трения малы. В результате получаются вторичные потоки газа, направленные к оси вблизи стенок, и от оси в центре (рисунок 4). Толщина пограничного слоя в данной задаче составила порядка 5% высоты или приблизительно 250 мкм. Далее нужно учитывать, что на каждый элементарный объем газа действуют три силы: центробежная, сила трения и сила от действия градиента давления.

Логично было бы предположить, что для увеличения быстродействия захвата есть смысл уменьшить рабочий объем камеры.

На рисунке 7 приведены сравнительные схемы двух вакуумных захватов с различной геометрией камер.

Рис. 7. Две схемы схватов

Исследование варианта конструкции вихревой камеры 1 (рисунок 7) представлено выше.

При детальном рассмотрении варианта конструкции 2 (рисунок 7) с уменьшенным объемом рабочей камеры за счёт центральной выступающей части оказалось, что при такой конструкции разрежение в центральной части становится меньше. При малом зазоре между телом камеры и деталью в центральной части, верхний и нижний пограничные слои, примыкающие к стенкам, становятся близкими, а затем как бы сливаются. В этом случае слой обратных токов с низким давлением либо отсутствует, либо он совсем мал, а давление в этом слое наиболее низкое. Как следствие захват с уменьшенным внутренним объёмом даёт меньшее разрежение и соответственно меньшую удерживающую силу.

В таблице 1 приведены результаты расчетов подъемной силы захватных устройств с уменьшенным объемом для различных диаметров. Таблица составлена для питающего давления газа 0,4 МПа.

Таблица 1

Характеристики захватного устройства с выступающей центральной частью

Диаметр камеры, мм	40	60	80	100
Подъемная сила, Н	11	19	27	35
Расход воздуха, л/мин	145	170	200	240

В таблице 2 приведены значения подъемной силы, рассчитанные для полной вихревой камеры.

Таблица 2

Характеристики для захватного устройства с полнообъемной вихревой камерой

Диаметр камеры, мм	40	60	80	100
Подъемная сила, Н	41	63	77	94

Сравнительные графики усилия, удерживающего объект, приведены на рисунке 8.

По графикам видно, что захватное устройство с полным объемом камеры имеет явные преимущества по подъемной силе (почти в 3-4 раза). Даже если учесть достаточно большие погрешности расчетов (порядка 20-25 %), всё равно разница между вариантом с уменьшенным объемом и полным объемом вихревой камеры значительна.

Рис. 8. Графики подъемных усилий захватных устройств с полной и уменьшенной вихревыми камерами

Был рассчитан вариант с диаметром вакуумной камеры 40 мм. На рисунке 9 изображены поля давлений для захватов с большим (а) и малым (б) объемами рабочих камер.

Рис. 9. Поля давлений для двух вариантов устройства вакуумной камеры

На рисунке 10 приведены графики изменения отрицательных давлений (разрежения по отношению к атмосферному) по радиусу. Как видно, за счёт центральной части камеры давление в камере уменьшенного объема имеет меньшее среднее значение.

Максимальное значение разрежения для камеры с уменьшенным объёмом составляет - 35 кПа, а для камеры с полным объёмом — 39 кПа. Таким образом, уменьшение объёма камеры уменьшает разрежение на величину порядка 10%.

Рис. 10. Графики изменения давления по радиусу в схвате с полным и уменьшенным объемами

Обсуждение результатов. Выводы.

На сегодняшний день в промышленности остро стоят задачи по оптимизации устройств в направлении снижения энергозатрат и повышения удельных характеристик. При проектировании оптимального вихревого захвата необходимо учитывать влияние большого числа аэродинамических факторов, таких как скорость и структура входного потока из подводящих сопел, влияние расхода сжатого газа на структуру вихря в вакуумной камере и множество других. В частности, на степень разрежения и как следствие на подъемное усилие вакуумного вихревого захватного устройства сильно влияют структура, направление и взаиморасположение потоков газа во вторичных течениях. На примере, рассмотренном выше видно, что при определённой геометрии вакуумной камеры вторичные течения могут заметно снизить характеристики захватного устройства. Вторичный поток от оси камеры к периферии должен превышать поток пристенных течений, направленный к оси вакуумной камеры, в противном случае захватное устройство не будет развивать больших значений подъемного усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блажнов, А.А. Вихревое вакуумное бесконтактное захватное устройство. Научно-технические ведомости СПбГПУ / А.А. Блажнов. – СПб: изд. СПбГПУ, 2014. – 212 с.
2. Бушунов, Б.Н. Производственные машины – автоматы / Б.Н. Бушунов, Б.Б. Бежанов. – Л. : Машиностроение, 1973. – 360 с.
3. Гольдштик, А.М. Вихревые потоки / А.М. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 268 с.
4. Козырев, Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов / Ю.Г. Козырев. – М. : КНОРУС, 2010. – 312 с.
5. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа/ Л. Г. Лойцянский. Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. — М. : Дрофа, 2003. — 840 с.
6. Меркулов, А.П. Вихревой эффект и его применение в технике / А.П. Меркулов. – М. : Москва, 1969. – 185 с.
7. Пат. № 2043193 Вакуумный захват / Краснослободцев В.Я., Сергиенко А.Г.; заявитель и патентообладатель Краснослободцев В.Я; заявл. 03.12.1990; опубл. 10.09.1995, Бюл. № 25. – 12 с.
8. Пат. № 88775 Вихревой эжектор / М. Г. Дубинский, С. З. Копелев и А. О. Мацук.; заявитель и патентообладатель М. Г. Дубинский; заявл. 25.10.1946; опубл. 01.01.1950, 2 с.ил.
9. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
10. Суслов, А.Д. Вихревые аппараты / А.Д.Суслов, С.В.Иванов. - М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
11. Челпанов, И.Б. Схваты промышленных роботов / И.Б. Челпанов, С.Н. Колпашников. – Л. : Машиностроение, 1989. – 287 с.
12. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, April 2009, p. 816.
13. Chengming Gao Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, ISBN 90-386-2361-5, Technische Universiteit Eindhoven, 2005, p.159.
14. Ranque G.J., Method and Apparatus for Obtaining from Fluid Under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures, Patent US, no. 1.952.281, 1934.
15. Bödewadt, U. T. Die Drehströmung über festem Grund [Text] / U. Bödewadt // ZAMM № 20, 1940. – S. 241-253.

Рецензент: Кокодеева Наталия Евсегнеевна, профессор, доктор технических наук. ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Chitpanov Igor Borisovich

St. Petersburg state polytechnical university
Russia, St. Petersburg
E-mail: igorchelp@yandex.ru

Blazhnov Aleksandr Andreevich

St. Petersburg state polytechnical university
Russia, St. Petersburg
E-mail: soni.81@mail.ru

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university
Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Analysis of primary and secondary flows of gas in the vortex chamber of noncontact vacuum gripper

Abstract. The paper deals with the study of the vortex suction gripper. In particular primary and secondary flows of the working gas inside the vortex chamber. The flow structure inside the vortex chamber is received. The input jet of the working gas is analyzed. The effect of blocking the nozzle exit on the structure of the vortex is examined. Secondary flows are calculated. Vector field of the distribution secondary velocities of the chamber radial section are received. Influence of the secondary flows on the gradient of static pressure is analyzed. The boundary layer was examined on the basis of the problem Bedevadta.

Keywords: vortex vacuum gripper; gas-dynamic model; numerical experiments; the results; primary and secondary flows; distribution of velocities and pressures.

REFERENCES

1. Blazhnov, A.A. Vkhrevoe vakuumnoe beskontaktnoe zakhvatnoe ustroystvo. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU / A.A. Blazhnov. – SPb: izd. SPbGPU, 2014. – 212 s.
2. Bushunov, B.N. Proizvodstvennye mashiny – avtomaty / B.N. Bushunov, B.B. Bezhanov. – L. : Mashinostroenie, 1973. – 360 s.
3. Gol'dshtik, A.M. Vkhrevye potoki / A.M. Gol'dshtik. – Novosibirsk: Nauka, 1981. – 268 s.
4. Kozyrev, Yu.G. Zakhvatnye ustroystva i instrumenty promyshlennykh robotov / Yu.G. Kozyrev. – M. : KNORUS, 2010. – 312 s.
5. Loytsyanskiy, L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza/ L. G. Loytsyanskiy. Ucheb. dlya vuzov. 7-e izd., ispr. — M. : Drofa, 2003. — 840 s.
6. Merkulov, A.P. Vkhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike / A.P. Merkulov. – M. : Moskva, 1969. – 185 s.
7. Pat. № 2043193 Vakuumnyy zakhvat / Krasnoslobodtsev V.Ya., Sergienko A.G.; zayavitel' i patentoobladatel' Krasnoslobodtsev V.Ya; zayavl. 03.12.1990; opubl. 10.09.1995, Byul. № 25. – 12 s.
8. Pat. № 88775 Vkhrevoy ezhektor / M. G. Dubinskiy, S. 3. Kopelev i A. O. Matsuk.; zayavitel' i patentoobladatel' M. G. Dubinskiy; zayavl. 25.10.1946; opubl. 01.01.1950, 2 s:il.
9. Prandtl', L. Gidroaeromekhanika / L. Prandtl'. - Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000. – 576 s.
10. Suslov, A.D. Vkhrevye apparaty / A.D.Suslov, S.V.Ivanov. - M. : Mashinostroenie, 1985. – 256 s.
11. Chelpanov, I.B. Skhvaty promyshlennykh robotov / I.B. Chelpanov, S.N. Kolpashnikov. – L. : Mashinostroenie, 1989. – 287 s.
12. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, April 2009, p. 816.
13. Chengming Gao Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, ISBN 90-386-2361-5, Technische Universiteit Eindhoven, 2005, r.159.
14. Ranque G.J., Method and Apparatus for Obtaining from Fluid Under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures, Patent US, no. 1.952.281, 1934.
15. Vödewadt, U. T. Die Drehströmung über festem Grund [Text] / U. Vödewadt // ZAMM № 20, 1940. – S. 241-253.