

УДК 621.793.184

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-3-48-26-30

*А. С. Соколов, А. Д. Будная, А. М. Юрицына, И. Ю. Голованов***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НАТЕКАТЕЛЯ ГАЗА
ДЛЯ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ****Московский политехнический университет, Москва, Россия**

sasghm@mail.ru, budnayaad@mail.ru, nastyaoffender@mail.ru, igol95@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

В статье рассмотрена одна из современных конструкций натекателя газа для установки вакуумного напыления. Отмечены недостатки данной конструкции. В частности, наблюдается значительная деформация капиллярной трубки, обеспечивающей непрерывную подачу инертного газа в вакуумную камеру установки. С использованием компьютерного моделирования определена величина деформации капиллярной трубки, отмечена возможность ее пластической деформации (смятия), что приведет к затруднению или исключению движения инертного газа в трубке. Также отмечено отсутствие контроля непрерывности подачи инертного газа в вакуумную камеру. На основании проведенного анализа натекателя газа даны предложения по совершенствованию его конструкции. Поперечное сечение капиллярной трубки в новой конструкции натекателя выполнено в форме геометрической фигуры – кардиоиды. С использованием компьютерного моделирования получены результаты, показывающие уменьшение деформации трубки такого сечения и снижение возможности ее пластической деформации в сравнении с капиллярной трубкой круглого сечения. При этом трубки с сечением в форме кардиоиды не увеличивают затраты материала и не усложняют конструкцию натекателя. Предложенная конструкция натекателя газа для установки вакуумного напыления запатентована, что подтверждает новизну и практическую значимость предложенных решений.

Ключевые слова: аппаратурное оформление, эксплуатационная надежность, вакуумное напыление, конструкция, деформация, компьютерное моделирование

*A. S. Sokolov, A. D. Budnaya, A. M. Iuritsyna, I. Yu. Golovanov***DEVELOPMENT OF A GAS FEEDER OF A VACUUM DEPOSITION INSTALLATION****Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia**

The article presents one of the modern designs of a gas feeder of a vacuum deposition installation. The disadvantages of the design are noted. There is a deformation of the capillary tube, which provides a continuous supply of inert gas to the vacuum chamber of the installation. The amount of deformation of the capillary tube was determined using computer modeling. The possibility of plastic deformation of the capillary tube (crumpling) is noted, which will lead to difficulty or exclusion of the movement of the inert gas into the vacuum chamber. It was also noted that there was no control over the continuity of the inert gas supply to the vacuum chamber. Based on the analysis of the gas feeder, suggestions for improving the design are presented. The cross section of the capillary tube in the new design has the shape of a geometric figure – a cardioid. Using computer modeling, a decrease in the deformation of the cardioid capillary tube is shown. A decrease in the possibility of plastic deformation of the cardioid capillary tube (in comparison with a round capillary tube) is shown. At the same time, cardioid tubes do not increase material costs and do not complicate the design of the feeder. The new design of the gas feeder of a vacuum deposition installation has been patented, which confirms the novelty and practical significance of the proposed solutions.

Keywords: installation by devices, reliability of operation, vacuum deposition, construction, deformation, computer modeling

Процесс ионно-плазменного вакуумного напыления позволяет получать тонкие пленки материала на поверхностях изделия путем его распыления с помощью газоразрядной плазмы в вакуумной камере. Давление в вакуумной камере регулируется в диапазоне от $1,33 \cdot 10^{-3}$ до $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па, после чего ее заполняют инертным газом, к примеру аргоном, давление которого регулируется в диапазоне от $1,33 \cdot 10^{-1}$ до

13,3 Па. При подаче высокого напряжения к электродам внутри вакуумной камеры возникает электрическое поле, ионизирующее инертный газ. При достаточной энергии положительные ионы инертного газа распыляют катод. Распыленные частицы, двигаясь по направлению к поверхности изделия, оседают на ней и образуют пленку. С использованием процесса вакуумного напыления возможно на-

несение различных металлов, сплавов, химических соединений, а также многослойных структур из различных материалов [1; 2]. Совершенствование аппаратного оформления установок вакуумного напыления является актуальной задачей.

Одним из основных устройств является натекаль газа, обеспечивающий непрерывную подачу инертного газа в вакуумную камеру установки. Рассмотрим одну из запатентованных конструкций натекаль газа для установки вакуумного напыления (рис. 1) [3].

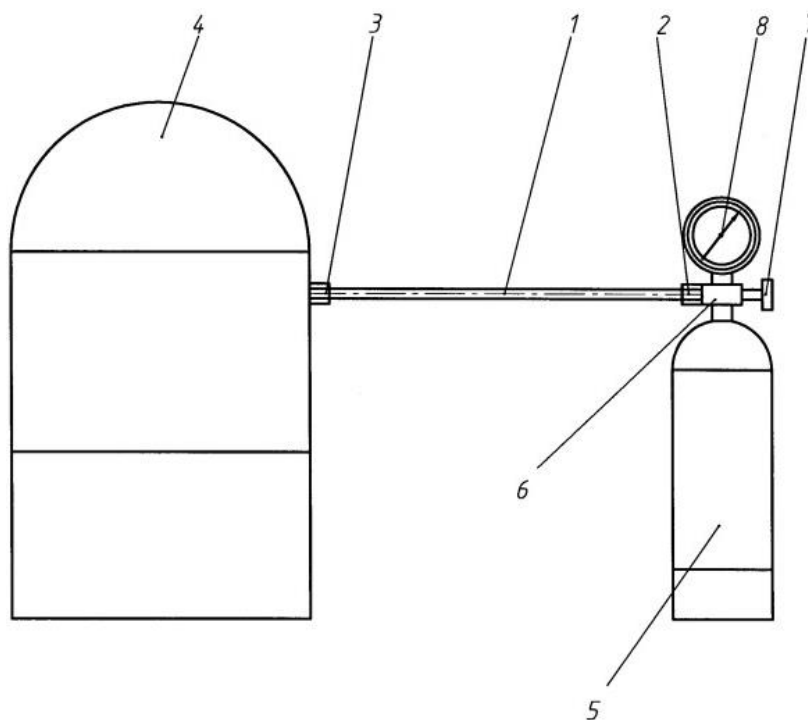


Рис. 1. Натекаль газа для установки вакуумного напыления по патенту [3]:
1 – капиллярная трубка; 2, 3 – штуцеры; 4 – вакуумная камера установки ионно-плазменного напыления; 5 – газовый баллон высокого давления; 6 – редуктор подачи газа из баллона в вакуумную камеру; 7 – кран редуктора подачи газа; 8 – манометр редуктора подачи газа

Данный натекаль газа отличается простотой конструкции и изготовления. Малое количество и отсутствие подвижных элементов положительно влияют на эксплуатационную надежность натекаль. Среди особенностей конструкции стоит отметить капиллярную трубку, внутренний диаметр которой от 0,1 мм до 1,0 мм и длина от 0,5 м до 2,0 м. Количество подаваемого в вакуумную камеру газового потока регулируется редуктором, а также выбором внутреннего диаметра и длины капиллярной трубки.

При столь малом диаметре трубка имеет значительную длину, что может приводить к ее

провисанию под собственным весом и влиять на подачу газа в вакуумную камеру.

Проанализируем величину деформации капиллярных трубок, полученную с использованием компьютерного моделирования при длине 0,5 м и 2 м. По нормативному документу [4] принимаем медные трубки группы А (для общих целей) с плотностью меди 8,9 кг/м³ с учетом заданного в конструкции натекаль диапазона диаметра капиллярной трубки (см. таблицу). Для удобства дальнейшего отображения результатов моделирования трубкам присвоим буквенные обозначения.

Характеристики медных капиллярных трубок

Обозначение трубки	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
Наружный диаметр трубки, мм	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	2,0	2,5
Внутренний диаметр трубки, мм	0,2	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,75	0,8
Толщина стенки трубки, мм	0,5	0,425	0,4	0,375	0,35	0,325	0,3	0,625	0,85
Масса трубки длиной 0,5 м, г	4,9	4,6	4,5	4,3	4,2	4,0	3,8	12,1	19,7
Масса трубки длиной 2,0 м, г	19,7	18,5	18,0	17,4	16,7	16,0	15,2	48,3	78,8

Моделирование деформации трубок проведем с использованием программного комплекса «SolidWorks». При моделировании коэффици-

ент Пуассона для меди принимаем равным 0,345. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2.

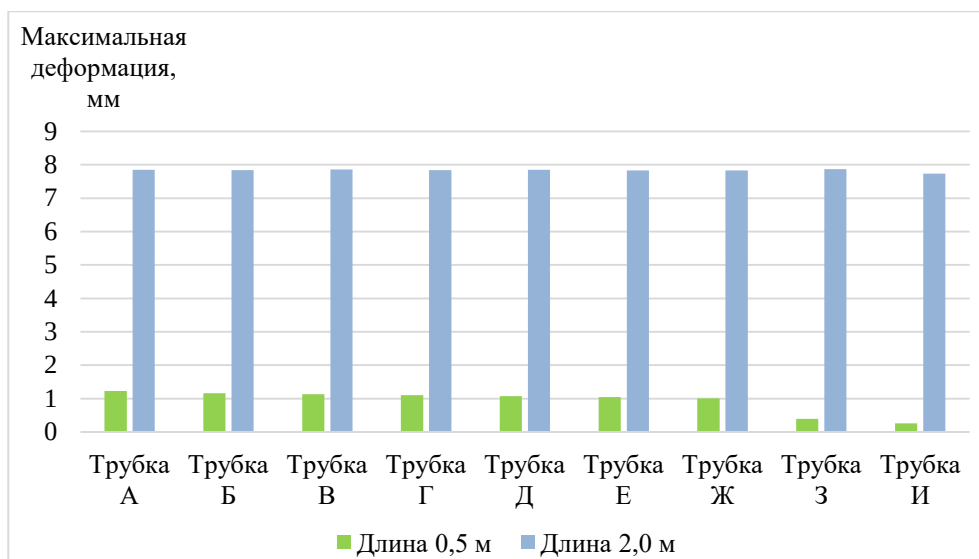


Рис. 2. Гистограмма деформации капиллярных трубок круглого сечения

По результатам компьютерного моделирования можно сделать вывод о значительной деформации капиллярных трубок. При длине трубки 0,5 м наблюдается деформация в диапазоне 10,5–102,2 % от ее наружного диаметра; при длине 2,0 м – в диапазоне 309,3–652,1 %. Столь сильное провисание капиллярной трубки под собственным весом может привести к ее пластической деформации. В свою очередь, пластическая деформация может привести к затруднению или исключению подачи газа в вакуумную камеру. При этом средства визуального контроля за процессом подачи инертного газа в натекателе газа, за исключением манометра, отсутствуют. Определить уменьшение или отсутствие подачи газа в случае пластической деформации трубки по манометру невозможно, так как он показывает давление на выходе из баллона высокого давления.

Снабжение натекателя газа расходомером позволит усовершенствовать его конструкцию без значительного усложнения. Расходомер позволяет контролировать процесс подачи газа в вакуумную камеру и более точно его регулировать. Уменьшения деформации капиллярной трубки можно добиться за счет изменения формы ее поперечного сечения.

Рассмотрим капиллярную трубку с поперечным сечением в форме кардиоиды и определим ее деформацию с использованием компьютерного моделирования. Впишем кардиоид

ду в окружность круглых трубок из таблицы при равенстве толщины их стенок, тогда массы круглых трубок и трубок-кардиоид будут равны. Внутреннее сечение трубок-кардиоид будет меньше на 11,4–12,4 % в сравнении с круглыми трубками. Для уменьшения деформации трубок ребро жесткости – касп кардиоиды должно быть расположено сбоку. Поперечное сечение трубки-кардиоиды представлено на рис. 3.

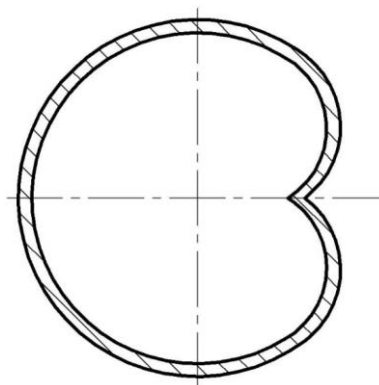


Рис. 3. Поперечное сечение капиллярной трубки-кардиоиды

Полученные результаты показывают, что при равенстве геометрических параметров и массы исключается возможность пластической деформации – смятия трубок-кардиоид, что обеспечивает непрерывность подачи газа в вакуумную камеру. Также наблюдается уменьшение

деформации трубок-кардиоид более чем на 3 % в сравнении с трубками круглого сечения.

Таким образом, предлагаемые решения позволяют усовершенствовать конструкцию натекателя газа для установки вакуумного напыления. Уменьшение деформации капиллярной трубки достигается за счет изменения формы ее поперечного сечения. При этом масса трубок, а следовательно, и материалоемкость натекателя газа не изменятся. Наличие ребра жесткости у капиллярной трубки (каспа

кардиоиды) исключает ее пластическую деформацию (смятие).

Использование редуктора с расходомером позволяет более точно регулировать подачу газа в вакуумную камеру, а также производить визуальный контроль за процессом.

Новизна и практическая значимость полученных результатов подтверждены патентом на полезную модель [5]. На рис. 4 представлена запатентованная конструкция натекателя газа для установки вакуумного напыления.

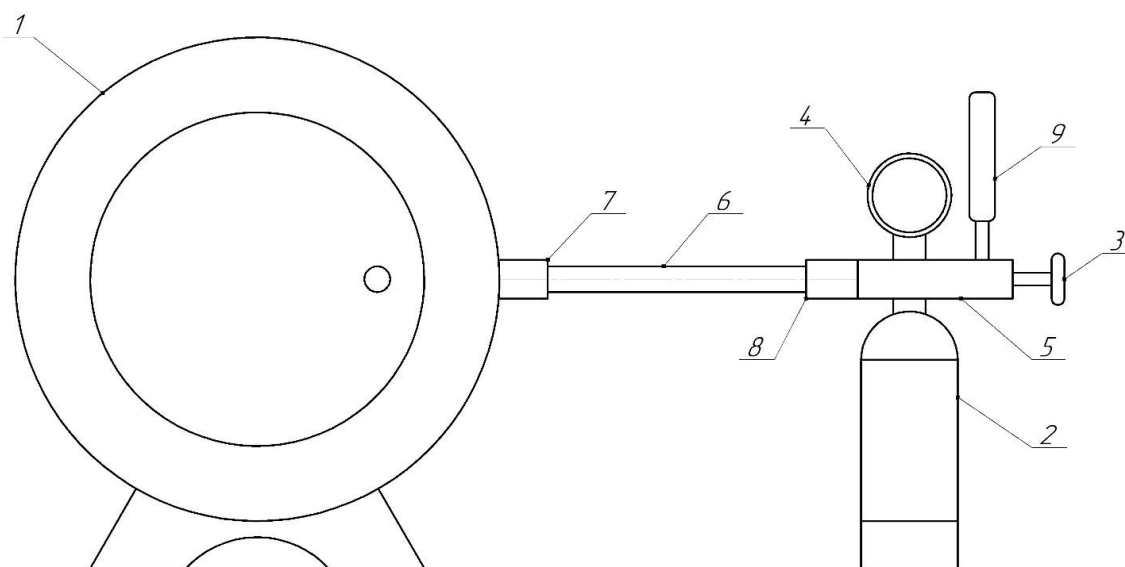


Рис. 4. Натекатель газа для установки вакуумного напыления по патенту [5]:
1 – вакуумная камера установки ионно-плазменного напыления; 2 – газовый баллон высокого давления; 3 – кран редуктора подачи газа; 4 – манометр редуктора подачи газа; 5 – редуктор подачи газа из баллона в вакуумную камеру; 6 – капиллярная трубка; 7, 8 – штуцеры; 9 – расходомер редуктора подачи газа

Стоит отметить, что предложенное техническое решение по замене труб круглого сечения на трубы с сечением в форме эллипсоида (или ее частного случая – кардиоиды) может найти свое применение не только в установках ионно-плазменного напыления, но и в других аппаратах химической, нефтехимической и пищевой промышленности. К примеру, в емкостных криоконцентраторах [6–8] для интенсификации процесса намораживания льда.

Кардиоиды запатентованы в качестве элемента массообменной насадки [9]. Такая форма позволяет получать как насыпные, так и регулярные насадки и интенсифицирует процесс массообмена (в частности абсорбции) в насадочном аппарате в сравнении с насадками из элементов схожей формы (кольца Рашига, кольца Лессинга, кольца с крестообразной перегородкой).

Теплообменные трубы в форме эллипсоида с четырьмя каспами представлены в патенте на кожухотрубчатый теплообменный аппарат

[10]. Такая форма теплообменных труб позволяет интенсифицировать теплообмен между теплоносителями за счет увеличения площади поверхности теплопередачи и турбулизации потока теплоносителя в межтрубном пространстве в сравнении с типовой конструкцией аппарата.

Техническое решение по выполнению фильтрующего элемента с поперечным сечением в форме эллипсоида с количеством каспов не менее четырех, описанное в патенте [11], позволяет повысить производительность устройств для разделения суспензий.

Таким образом, в результате проведенного исследования показана значительная деформация одного из основных элементов конструкции натекателя газа для установки вакуумного напыления – капиллярной трубки, обеспечивающей непрерывную подачу инертного газа в вакуумную камеру. Анализ проводился на основании компьютерного моделирования стандартных медных капиллярных трубок.

С учетом большой длины (от 0,5 м до 2,0 м) и малого внутреннего диаметра (от 0,1 мм до 1,0 мм) возможна пластическая деформация трубки в процессе эксплуатации. Деформация приведет к затруднению или исключению подачи газа в вакуумную камеру, что негативно сказывается на эксплуатационной надежности установки в целом.

Предложенные в данной статье решения позволяют усовершенствовать конструкцию натекаателя газа для установки вакуумного напыления без ухудшения его основного достоинства – простоты конструкции и изготовления.

По результатам компьютерного моделирования было показано, что капиллярные трубки с поперечным сечением в форме кардиоиды меньше деформируются под собственным весом в сравнении с трубками круглого сечения (при равной массе трубок). При этом ребро жесткости – касп кардиоиды исключает пластическую деформацию трубок, обеспечивая непрерывность работы натекаателя газа.

Снабжение натекаателя газа редуктором с расходомером позволяет более точно регулировать и контролировать процесс подачи инертного газа в вакуумную камеру, обеспечивая стабильность работы всей установки вакуумного напыления.

Усовершенствованная конструкция натекаателя газа для установки вакуумного напыления защищена патентом на полезную модель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Майссел, Л. Технология тонких пленок: справочник. Т. 1 / Л. Майссел, Р. Глэнг. – пер. с англ. – Москва : Советское радио, 1977. – 662 с.
2. Достанко, А. П. Плазменная металлизация в вакууме / А. П. Достанко, С. В. Грушецкий, Л. И. Киселевский и др. – Минск : Наука и техника, 1983. – 279 с.
3. Патент РФ на полезную модель № 141916, МПК C23C 14/56. Натекатель газа для установки вакуумного напыления / Д. Д. Соболев, Ю. Ф. Корнев, Г. Г. Костылев. Оpubл. 20.06.2014. Бюл. № 17.
4. ГОСТ 2624-2016 Трубки медные и латунные капиллярные. Технические условия. Введ. 01.04.2017. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 11 с.
5. Патент РФ на полезную модель № 222169, МПК C23C 14/56. Натекатель газа для установки вакуумного напыления / А. Д. Будная, И. Ю. Голованов. Оpubл. 13.12.2023. Бюл. № 35.
6. Ugolnikova, M. A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators / M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – P. 561–566.
7. Sapozhnikov, V. B. Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59. – P. 134–138.
8. Патент РФ на полезную модель № 219187, МПК B01D 9/04. Емкостной криоконцентратор / М. А. Угольникова, В. Б. Сапожников, В. В. Чернявская, И. Ю. Голованов. Оpubл. 04.07.2023. Бюл. № 19.
9. Патент РФ на полезную модель № 222955, МПК B01D 19/30. Элемент насадки для насадочных аппаратов / Г. А. Бусыгин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 24.01.2024. Бюл. № 3.
10. Патент РФ на полезную модель № 225555, МПК F28D 7/16, F28F 1/06. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат / А. М. Сехина, И. Ю. Голованов. Оpubл. 24.04.2024. Бюл. № 12.
11. Патент РФ на изобретение № 2817866, МПК B01D 17/0217, B01D 33/11. Устройство для разделения суспензий / А. В. Козлов, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 22.04.2024. Бюл. № 12.