



АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ ЖИДКИХ РЕАГЕНТОВ НА ОСНОВЕ СОПЛА ЛАВАЛЯ HIGH PERFORMANCE AERODYNAMIC NEBULIZER FOR LIQUID REAGENTS BASED ON THE LAVAL NOZZLE

Р.В.Клейманов*, аспирант, (ORCID: 0000-0003-3485-7961), С.Е.Александров*, д.х.н., проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-0129-0479) / kleimanovrv@mail.ru

R.V.Kleymanov, Post-graduate, S.E.Alexandrov, Doct. of Sc. (Chemical), Chief Researcher

DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5.264.274

Получено: 23.06.2020 г.

Авторами статьи предлагается высокопроизводительное устройство для подачи жидкого реагента в установку для химического осаждения высокочистого кварца в пламени. Подача жидкого кремнийсодержащего реагента осуществляется путем преобразования его в аэрозоль при помощи аэродинамического распылителя с плоским соплом Лавалья с внутренним телом. Разработанная конструкция позволяет достичь больших расходов жидкого реагента путем изменения сечений сопла для регулировки скорости газа-распылителя. Предложенная конструкция отличается более высокой технологичностью и простотой изменения расхода реагента в широких пределах, в отличие от распространенных коаксиальных конструкций сопел.

The authors propose a high-performance device for supplying a liquid reagent for the chemical vapor deposition of high-purity quartz. The liquid silicon-containing reagent is supplied by converting it into an aerosol using an aerodynamic nebulizer with a flat Laval nozzle incorporating an internal body. The developed design allows of achieving a high flow rate of the liquid reagent by changing the nozzle cross-sections so as to adjust the speed of the nebulizer gas. The proposed design features higher manufacturability and simple adjustment of the reagent flow rate over a wide range, as distinct from the common coaxial nozzle designs.

ВВЕДЕНИЕ

Сущность процессов химического осаждения из газовой фазы, или CVD-процессов (как их принято называть в мировой литературе и практике) состоит в получении веществ в твердом состоянии за счет химических превращений реагентов, одновременно подаваемых в реакционный объем (реактор) в газообразном или плазменном состоянии. Очевидно, что в случае реагентов, находящихся при нормальных условиях в газообразном состоянии или характеризующихся высоким давлением насыщенного

пара при сравнительно низких температурах (до 100 °С), система подачи реагентов является достаточно простой. Однако в последние годы возрос интерес к применению относительно недорогих металлоорганических соединений, обладающих низкой летучестью, а для создания приемлемых с точки зрения производительности процесса парциальных давлений требуются температуры, превышающие 300 °С, что приводит к резкому усложнению испарительных устройств и нагреву всех транспортных магистралей для предотвращения конденсации.

* Проблемная научно-исследовательская лаборатория, Институт машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ Петра Великого / Problem Research Laboratory of Institute of Machinery, Materials and Transport of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.



Кроме того, существует ряд CVD-процессов, например химическое осаждение особо чистого кварцевого стекла в пламени водородной горелки, требующих значительных расходов кремнийсодержащего реагента (до 1 кг/ч), которое невозможно обеспечить, применяя обычные испарители барботажного или зеркального типа [1]. В этой связи для решения подобного рода задач широко применяется подача реагентов в реактор в виде аэрозолей, генерируемых с помощью различного типа небулайзеров, капли которых попадают в нагреваемую зону и быстро переходят в парообразное состояние [2, 3]. Ультразвуковые небулайзеры наиболее распространены в системах подачи реагентов для реализации CVD-процессов осаждения тонких пленок [4, 5], однако они характеризуются низкой производительностью и ограниченным периодом времени непрерывной работы. В случае CVD-процессов, предназначенных для получения синтезированного материала с большой скоростью и в значительных количествах, наибольший интерес представляют аэродинамические распылители [4].

В аэродинамических распылителях отрыв капель происходит при воздействии динамического (скоростного) напора газа, проходящего

через элементы проточной части, а измельчение капель происходит за счет турбулентных пульсаций. Аэродинамические распылители можно условно разделить на следующие группы: струйные, ударно-струйные, центробежные, центробежно-струйные и с соударением струй [4]. Струйные форсунки представляют собой насадки с отверстиями различной формы и расположения, через которые происходит истечение струй жидкости. В ударно-струйных форсунках распыление происходит за счет удара струи о расположенный напротив сопла отражатель. Центробежные форсунки имеют тангенциальные входные отверстия, завихритель (либо спиральный канал), подающий жидкость в виде пленки, которая вращается вокруг продольной оси. Центробежно-струйные форсунки отличаются от центробежных форсунок наличием двух вращающихся потоков, подаваемых в камеру смешения. Работа форсунок с соударением струй основана на столкновении нескольких струй, вытекающих из пересекающихся насадок. В зависимости от применяемого газа возможно как создание распылителей с малой и точно дозируемой подачей реагента, так и высокопроизводительных систем [3-5].

INTRODUCTION

The essence of the chemical vapor deposition processes, so called CVD-processes, is to prepare substances in a solid state as a result of chemical transformations of reagents supplied to the reactor volume simultaneously in gaseous or plasma state. Obviously, the system to supply the reagents is definitely simple in the case when reagents that are in gaseous state under normal conditions or are characterized by a high saturated vapor pressure at comparatively low temperatures (to 100 °C). However, interest to relatively inexpensive organometallic compounds with low volatility grew continuously for years. Still, in order to ensure the acceptable partial pressure process productivity,

it is necessary to obtain temperatures higher than 300 °C and manufacture complicated evaporating devices wherein all transport lines are heated to prevent condensation. Besides, there exist a number of CVD-processes, such as chemical deposition of ultrapure quartz glass in a hydrogen burner flame requiring significant expenditures of a silicon-containing reagent (up to 1 kg/h) which cannot be achieved using conventional bubble or mirror evaporators [1]. Hence, in order to solve similar problems wide use is made of the supply of reagents in kind of aerosols generated with nebulizers of different types wherein aerosol drops come to a heated zone and are transformed to a vapor state [2, 3]. Ultrasonic nebulizers are mostly used in the

reagent supplying systems to provide for CVD-processes of films deposition [4, 5], but they are characterized by low efficiency and limited period of continuous operation. The most interesting are the aerodynamic nebulizers [4] used in CVD-processes to synthesize materials at a high rate and in significant quantities.

Detachment of drops in aerodynamic nebulizers occurs due to the dynamic (high-speed) head of gas passing through the elements of the flow part and breaking of drops is a result of turbulent pulsations. Aerodynamic nebulizers can be divided into the following groups: jet, shock-jet, centrifugal, centrifugal-jet and impact jets [4]. Jet nozzles present tips with holes of various shapes and arrangement



Одним из вариантов исполнения струйной форсунки является сверхзвуковое сопло (сопло Лавалья), в котором истечение газа происходит со скоростями, превышающими скорость звука. Такие конструкции нашли широкое применение в разнообразных атомно-адсорбционных спектрометрах, причем преимущественно используются коаксиальные конструкции, образованные двумя встречными конусами с кольцевым зазором малой ширины, которые образуют проточную часть сопла [6]. К недостаткам коаксиальной конструкции можно отнести сложность в изменении геометрии проточной части при необходимости настройки сопла (требуется изготовление новых элементов, образующих до- и сверхзвуковой конфузур) и высокие требования к точности изготовления и сборки из-за малых зазоров. Плоские конструкции аэродинамических распылителей менее распространены, однако представляют интерес в связи с их относительной простотой, кроме того их изготовление возможно без применения трудоемких технологических операций.

Целью настоящей работы стала разработка конструкции аэродинамического распылителя на основе плоского сопла Лавалья с внутренним телом, обеспечивающего высокую производительность и возможность регулировки расхода распыляемой жидкости в широких пределах. Кроме того, для подтверждения конструкторских и проверочных расчетов планировалось экспериментальное испытание прототипа распылителя

для подачи с большим расходом (до 300 мл/ч) кремнийсодержащего вещества – декаметилциклопентасилоксана, являющегося перспективным реагентом для синтеза высококачественного кварцевого стекла в водород-кислородной горелке. Анализ литературных данных показывает, что обычно при использовании водород-кислородных горелок для синтеза кварцевого стекла из кремнийорганических реагентов применяются расходы газа в диапазоне 10–30 л/мин на каждую из горелок в зависимости от конструкции реактора. В этой связи при создании прототипа распылителя был задан расход газораспылителя до 20 л/мин, при этом обеспечивался расход реагента до 300 мл/ч.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЯ

На рис.1 представлены изображения разработанной конструкции распылителя, представляющего собой основание 1 с каналом, внутреннее тело 2, образующее вместе с прямоугольным каналом проточную часть сопла, переходную втулку 3 и фиксирующую гайку 4. Наличие внутреннего тела упрощает подвод реагента и позволяет изменять количество подающих отверстий путем перекрытия части из них при необходимости, что расширяет возможности регулировки расхода распыляемого реагента в широких пределах.

Плоский канал сопла образован стенками основания и выступами вставки, которые задают геометрию сужающейся и расширяющейся частей.

through which liquid flows pass. Spraying in shock-jets occurs due to impact of flow on the reflector placed in front of a nozzle. Centrifugal nozzles have tangential inlets and a swirler (or a spiral channel) supplying liquid as a film that rotates around the longitudinal axis. Centrifugal jet nozzles differ from centrifugal nozzles by two rotating flows supplied to the mixing camera. Operation of the impact-jet nozzles is based on collision of several flows coming from intersecting nozzles. Depending on the applied gas, it is possible to manufacture both nebulizers with a small and precisely metered

reagent supply or high-efficient supply systems [3-5].

One type of the jet nozzle is a supersonic nozzle (Laval nozzle) in which gas outflow exceeds a speed of sound. Such designs have a wide application in various atomic adsorption spectrometers, firstly, in coaxial systems formed by two opposite cones with a small annular gap of narrow width, which forms the flow path of the nozzle [6]. Coaxial design has a number of disadvantages such as complexity of changing the flow path geometry and necessity to adjust the nozzle (it is required to manufacture new elements for sub and

supersonic confusers) and high requirements to production and assembly due to small clearances. Flat designs of aerodynamic nebulizers are less used; however they find their application due to relative simplicity and a possibility to be manufactured without labour-intensive technological operations.

The aim of this work was to develop a design of an aerodynamic nebulizer based on a flat Laval nozzle with an inner body that ensures high productivity and a possibility to adjust the sprayed liquid flow in a wide range. In addition, to confirm the design and verification calculations, it

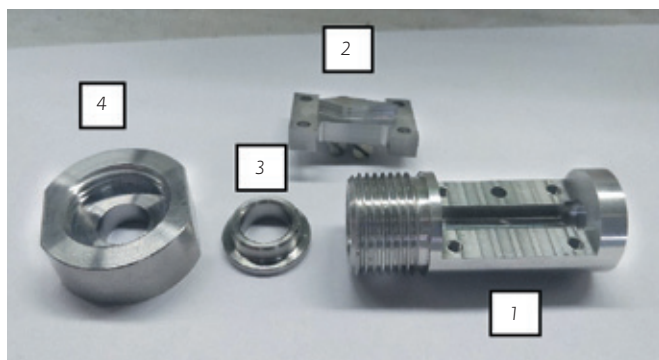


Рис.1. Общий вид распылителя с плоским соплом Лавала с внутренним телом

Fig.1. General view of a nebulizer with a flat Laval nozzle and the inner body

Конструкция допускает применение сменных проточных частей для регулирования расхода как несущего газа, так и реагента. В созданном лабораторном макете отсутствует внешний герметичный корпус, который необходим для устранения протечек жидкости через разъем в корпусе (на макете установлено уплотнение). При наличии внешнего корпуса возможно снижение точности изготовления без ущерба для работоспособности, так как вытекающая из-за негерметичности распылителя жидкость будет собираться в наружном корпусе и не будет влиять на работу устройства. Конструкция распылителя выполнена из нержавеющей стали 08X18H10 и допускает расположение в непосредственной близости

от реактора и горелок для подачи аэрозоля в реакционную зону или испарительные камеры горелок. Для улучшения устойчивости работы и однородности подачи реагента создается устойчивая и протяженная зона разрежения в проточной части сопла для поступления реагента, размеры которой оценивались с применением численного моделирования.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовалось численное моделирование методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics, включающее расчет течения вязкого сжимаемого газа с моделью турбулентности SST в низкорейнольдсовской стационарной постановке. Газ-распылитель (рабочая среда) – кислород с температурой на входе 300 К, давление на входе (избыточное) изменялось в диапазоне от 1 до 3 атм. Выбор кислорода обусловлен его большей молекулярной массой и плотностью по сравнению с водородом. Изменение свойств рабочей среды в зависимости от температуры и давления учитывалось с применением многопараметрического уравнения состояния Бенедикта – Вебба – Рубина. Данные задавались при помощи таблиц библиотеки Refprop NIST. При расчете течения жидкости через подающие отверстия свойства жидкости (местная скорость звука, вязкость, поверхностное натяжение, плотность) так же задавались из библиотеки Refprop NIST для учета

was planned to experimentally test a nebulizer prototype for supplying a silicon-containing substance at a high flow rate (up to 300 ml/hr) – decamethylcyclopentasiloxane, which is a promising reagent for synthesis of high-quality quartz glass in an oxygen-hydrogen burner. Analysis of literature data shows that usually, when using hydrogen-oxygen burners to synthesize silica glass from organosilicon reagents, the gas flow rates in the range of 10-30 l/min are used per each burner, depending on the design of the reactor. In this regard, when creating a prototype of the nebulizer, the

nebulizer gas flow rate was set to 20 l/min, while the reagent flow rate was up to 300 ml/h.

DESIGN OF THE NEBULIZER

Figure 1 presents images of the developed design of the nebulizer which consists of base 1 with a channel, internal body 2, which forms, together with a rectangular channel, the flow part of the nozzle, adapter sleeve 3, and fixing nut 4. Presence of the internal body simplifies supply of the reagent and allows of changing the number of supply holes by overlapping some of them if necessary, which expands the

possibilities of adjusting the flow rate of the sprayed reagent over a wide range. Base walls and sleeve protrusions form a flat channel preset geometry of the converging and diverging portions. The design allows of using changeable flow parts to control the flow rate both of the carrier gas and the reagent. The created laboratory model lacks an external sealed case, which is required to eliminate liquid leaks through the case connector (a seal is installed on the model). If the external case is used, it is possible to reduce the manufacturing accuracy without affecting

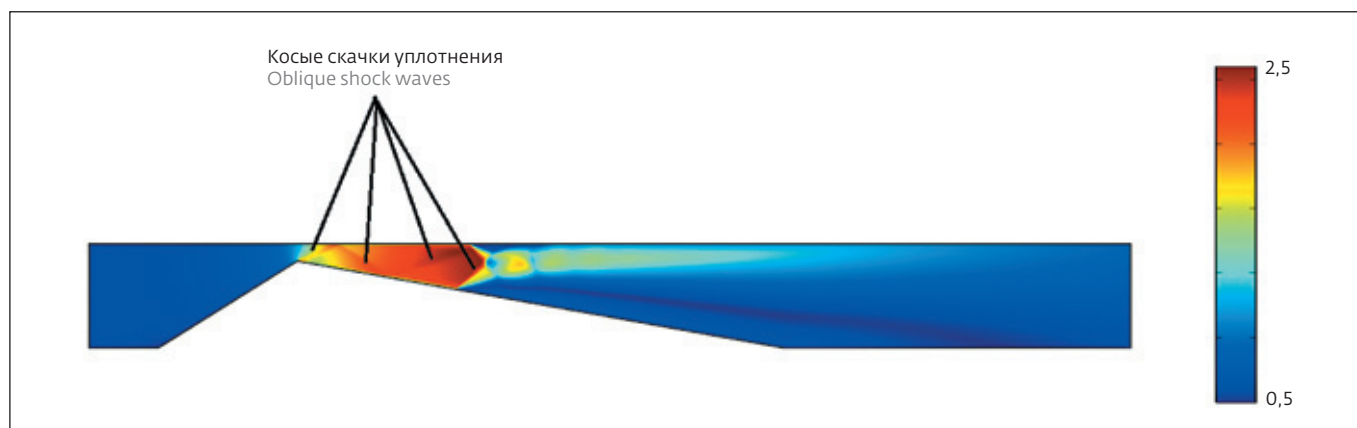


Рис.2. Распределение числа Маха в проточной части распылителя
Fig.2. Distribution of the Mach number in the flow path of the nebulizer

тепловых эффектов. Выбранный диапазон давления газа связан с необходимостью обеспечения сверхзвукового течения в каналах сопла, а также возможности работы при переменном давлении газа на входе. Геометрия канала подстраивается таким образом, чтобы в средней плоскости сечения канала добиться переотражения скачка уплотнения за критическим сечением сопла и добиться максимального увеличения зоны разрежения. Увеличение протяженности зоны разрежения необходимо для того, чтобы подводящие отверстия для распыляемой жидкости все время оставались в области низкого давления при пульсациях потока, и истечение реагента было более равномерным.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В ходе моделирования в качестве расчетной области была выбрана половина канала в связи с симметрией устройства. В сечении, куда выведены отверстия для распыляемой жидкости, проведена плоскость, на которой построены нижеследующие распределения параметров потока. В ходе расчетов производилось изменение угла до- и сверхзвукового конфузора для смещения скачка уплотнения за критическое сечение сопла (под критическим понимается сечение с минимальной площадью [6]).

Визуализация распределения числа Маха в проточной части сопла представлена на рис.2. Результаты расчетов указывают на наличие

the performance since the liquid leaks out of the nebulizer will be collected in the external case and will not affect the operation of the device. The nebulizer is made of stainless steel 08X18H10 and can be located in the immediate vicinity of the reactor and burners to supply aerosol to the reaction zone or evaporation chambers of the burners. To improve stability of operation and uniform supply of the reagent, a stable and extended rarefaction zone is created in the flow path of the nozzle for the reagent supply, the zone dimensions were estimated using numerical simulation.

CALCULATION METHODS AND EXPERIMENTAL RESEARCH

In this work we used a numerical simulation by the finite element method in the COMSOL Multiphysics package, which includes calculation of a viscous compressible gas flow with the SST turbulence model in a low Reynolds stationary setting. The spray gas (working medium) was oxygen with an inlet temperature of 300 K, the inlet pressure (excess) varied in the range from 1 to 3 atm. Oxygen was chosen due to its higher molecular weight and density as compared with hydrogen. Change in the properties of

the working medium, depending on temperature and pressure, was taken into account using the Benedict-Webb-Rubin multiparameter equation of state. The data was preset using the Refprop NIST library tables. When calculating the liquid flow through the feed holes, the properties of the liquid (local speed of sound, viscosity, surface tension, density) were also preset from the Refprop NIST library to take into account thermal effects. The selected range of gas pressure is associated with the need to ensure supersonic flow in the nozzle channels, as well as with the ability to

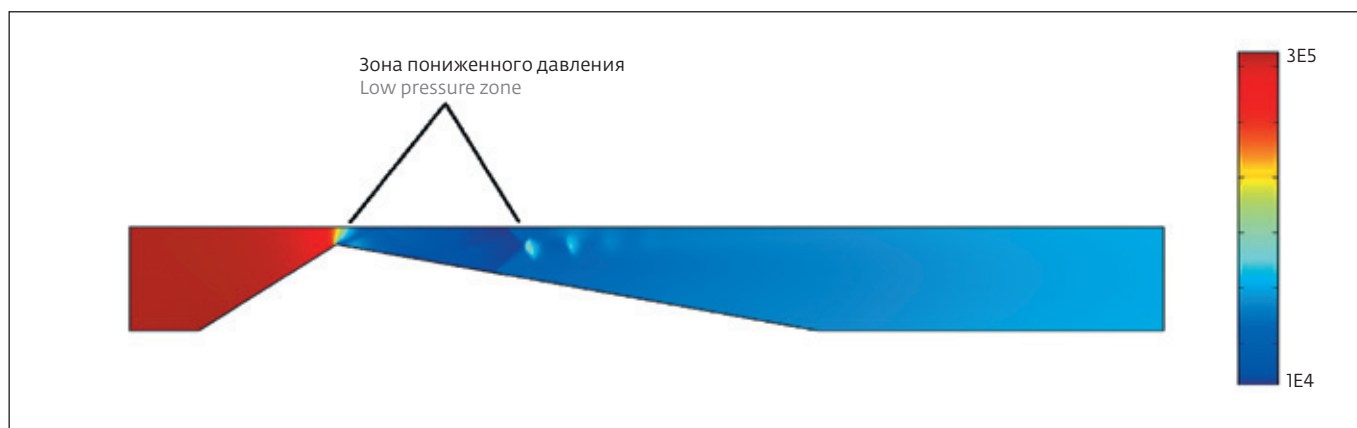


Рис.3. Распределение статического давления в проточной части распылителя
 Fig.3. Distribution of the static pressure in the flow part of the nebulizer

переотражения скачков уплотнения от стенок канала и растянутую зону разрежения, которая способствует стабильной подаче реагента, так как пульсации потока не будут приводить к выходу скачка за пределы зоны расположения подводящих отверстий. Сопло с перерасширением или переотражениями скачков уплотнения является менее эффективным с точки зрения аэродинамических потерь и конечной скорости потока на выходе [6], однако эти особенности улучшают степень распыления жидкости за счет наличия сильных местных градиентов давления в зонах скачков уплотнения, за счет чего улучшается дробление капель [1].

На распределении давления в проточной части распылителя можно отметить достаточно

протяженную зону разрежения (рис.3). Ускорение потока приводит к увеличению его кинетической энергии, и по закону сохранения механической энергии потока его статическое давление (потенциальная энергия) снижается. С точки зрения аэродинамики, наличие переотражения скачков уплотнения ведет к повышению аэродинамических потерь. Действительно, косые скачки уплотнения, отражаясь от стенок канала, смещаются вниз по потоку, растягивая зону трансзвукового перехода и увеличивая суммарное волновое сопротивление канала, однако, в отличие от прямого скачка, в этом случае происходит более плавное снижение давления и температуры потока, а также уменьшаются потери внутренней энергии

operate at variable gas inlet pressure. Geometry of the channel is adjusted in such a way that in the middle plane of the channel section the shock wave is reflected behind the throat section of the nozzle, therefore maximizing the discharge zone. The longer rarefaction zone is necessary so that the inlet holes for the sprayed liquid remain in the low pressure region at all times during flow pulsations, and the outflow of the reagent is more uniform.

RESULTS OF CALCULATIONS

During simulation, half of the channel was chosen as the

computational domain due to the symmetry of the device. In the section, where the holes for the sprayed liquid are brought out, a plane is drawn on which the following distributions of the flow parameters are plotted. In the course of the calculations, the angle of the sub- and supersonic confuser was changed to displace the shock wave beyond the critical section of the nozzle (the critical section is understood as the section with the minimum area [6]). Visualization of the Mach number distribution in the flow path of the nozzle is shown in Fig.2. The calculation results indicate the presence

of multiple reflection of the shock waves from the channel walls and an extended vacuum zone, which contributes to a stable supply of the reagent, since the flow pulsations will not lead to the shock going beyond the zone of the supply holes. A nozzle with overexpansion or re-reflections of shock waves is less efficient in terms of aerodynamic losses and final flow velocity at the outlet [6], however, these features improve the degree of liquid atomization due to presence of strong local pressure gradients in the shock zones, thereby improving droplet fragmentation [1]. A rather extended rarefaction

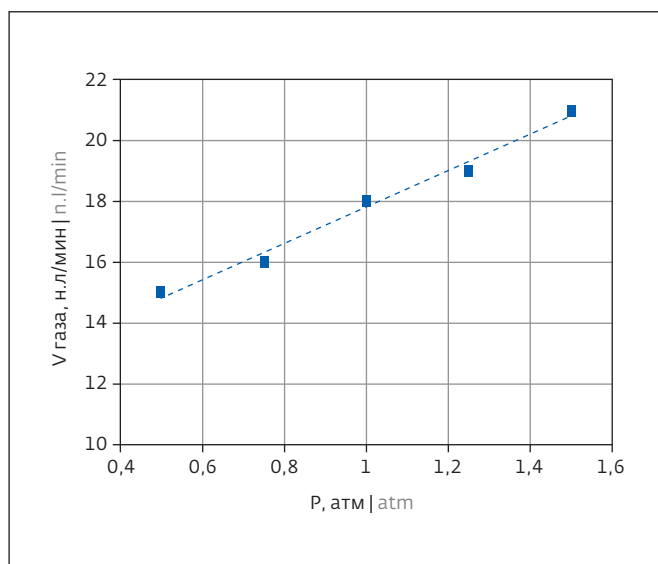


Рис.4. Расходная характеристика распылителя при перекрытии одного из каналов подачи газа

Fig.4. Discharge characteristic of the nebulizer when one of the gas supply channels is shut off

на преобразование в кинетическую энергию потока в каждом отдельном скачке. Таким образом, замена одиночного прямого скачка уплотнения на серию косых скачков не приведет к существенному возрастанию суммарного волнового сопротивления канала сопла.

В аэродинамических распылителях измельчение капель происходит под действием сил инерции в потоке. Увеличение степени турбулентности

и неоднородности потока с сильным его перемешиванием или скачками уплотнения увеличит воздействие сил инерции на поток капель жидкости и приведет к их измельчению. Увеличение зоны расширения за скачком приводит к тому, что отверстия для подачи реагента всегда будут в области пониженного давления, поэтому возникает необходимость в использовании устройства нагнетания жидкости в распылитель.

В ходе моделирования течения газа была определена величина разрежения в канале сопла, которая использовалась при расчете расхода реагента. При известных параметрах реагента (вязкость, плотность, поверхностное натяжение), доступных при различных режимах течения газа-носителя, перепадах давления и требуемой производительности, осуществлялся подбор диаметров отверстий, подающих распыляемую жидкость во внутреннем теле сопла Лавала. Отверстия расположены на боковой поверхности сопла в зоне пониженного давления (рис.3), подвод реагента к отверстиям осуществляется через канал, выполненный во внутреннем теле сопла.

При установленной высоте канала 4 мм и критическом сечении сопла Лавала 0,3 мм (параметры определялись исходя из расхода, давления и типа газа) подводящие отверстия представляют собой сверления на стенке внутреннего тела диаметром 0,25 мм в количестве 4 шт. (по 2 на каждую из симметричных сторон канала). Такая конфигурация распылителя позволяет обеспечить требуемые расходы жидкости и газа при минимальных

zone can be noted on the pressure distribution in the flow path of the nebulizer (Fig.3). Acceleration of the flow leads to an increase in its kinetic energy, and, according to the law of conservation of the mechanical energy of the flow, its static pressure (potential energy) decreases. From the aerodynamic point of view, presence of multiple reflection of shock waves leads to an increase in aerodynamic losses. Indeed, oblique shock waves, reflecting from the channel walls, move downstream, stretching the transonic transition zone and increasing the total wave resistance of the channel; however, in

contrast to the direct shock, in this case there is a smoother decrease in pressure and flow temperature, and losses also decrease internal energy for conversion into kinetic energy of the flow in each individual jump. Thus, replacing a single direct shock wave with a series of oblique shock waves will not lead to a significant increase in the total wave resistance of the nozzle channel.

In aerodynamic nebulizers, droplet breakdown occurs under the action of inertial forces in the flow. An increase in the degree of turbulence and inhomogeneity of the flow with its strong mixing

or shock waves will increase the effect of inertial forces on the flow of liquid droplets and lead to their breakdown. The increase in the expansion zone behind the shock leads to the fact that the reagent supply holes will always be in the area of reduced pressure, therefore, it becomes necessary to use a device for injecting liquid into the nebulizer.

During simulation of the gas flow, the vacuum value in the nozzle channel was determined and was used to calculate the reagent flow rate. With the known parameters of the reagent (viscosity, density, surface tension) available

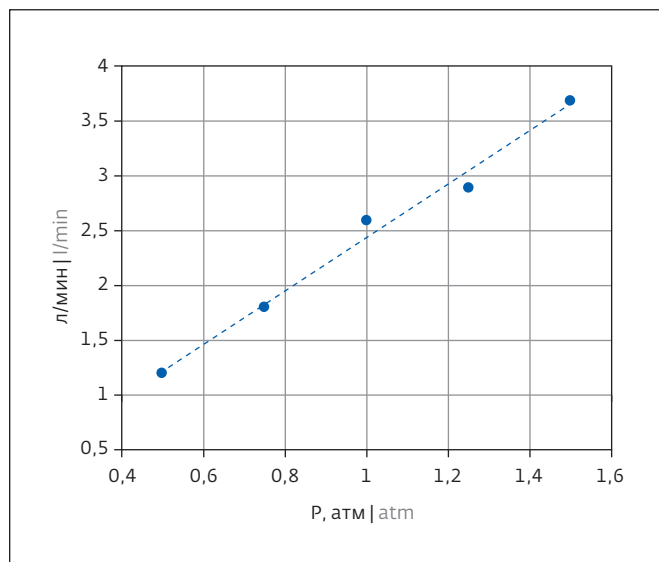


Рис.5. Расход воды через распылитель при работе с отключением одного канала подачи газа

Fig.5. Water flow through the nebulizer when working with one gas supply channel shut off

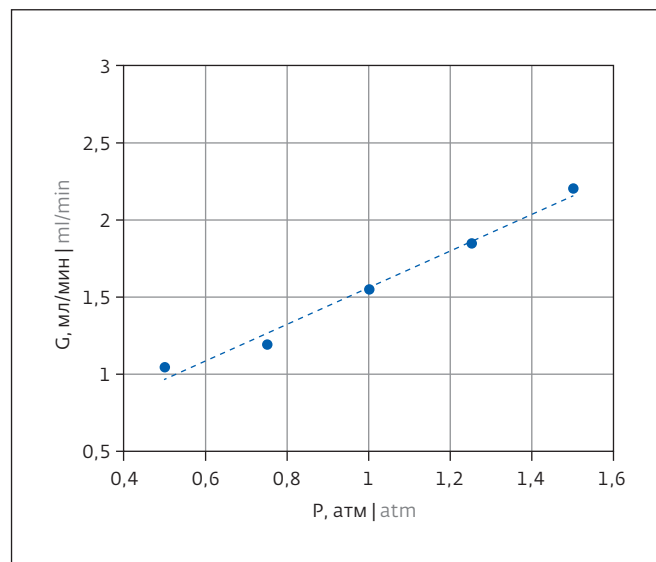


Рис.6. Расход декаметилциклопентасилоксана через распылитель при работе с отключением одного канала подачи газа

Fig.6. Dekamethylcyclopentasiloxane flow rate through the nebulizer when working with one gas supply channel shut off

габаритах и возможности изменения конфигурации проточной части, и, соответственно, обеспечить требуемый расход газа или жидкости без существенной переделки конструкции.

Поскольку моделирование процессов отрыва и измельчения капель при работе распылителя на различных уровнях давления и с применением различных жидкостей является довольно затратным в плане вычислительных ресурсов,

оценка эффективности распыления производилась в ходе экспериментального исследования прототипа распылителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку конструкция проточной части допускает изменение проходного сечения и частичное перекрытие канала, натурные испытания

at different modes of carrier gas flow, pressure drops and required productivity, the diameters of the holes supplying the sprayed liquid in the inner body of the Laval nozzle were selected. The holes are located on the side surface of the nozzle in the low pressure zone (Fig.3), the reagent is supplied to the holes through a channel made in the inner body of the nozzle.

At a channel height of 4 mm and a critical section of the Laval nozzle of 0.3 mm (the parameters were determined based on the flow rate, pressure and type of gas), the inlet holes present four 0.25 mm dia. drills in the wall of the inner body

(2 drills in each of the symmetrical sides of the channel). Such a configuration of the nebulizer provide for the required flow rates of liquid and gas at minimal dimensions and a possibility of changing the flow path configuration and, accordingly, the flow rate of gas or liquid without significant alteration of the structure. Since the simulation of the processes of detachment and breakdown of droplets during operation of the nebulizer at various pressure levels and use of various liquids is quite costly in terms of computing resources, evaluation of the atomization efficiency was carried out

during an experimental study of the nebulizer prototype.

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL RESEARCH

Since the design of the flow path allows a change in the passage area and partial blocking of the channel, full-scale tests of the nebulizer were carried out with various versions of its operation:

- with fully open gas supply channels and at maximum gas flow rate;
- when one of the two gas supply channels is closed and the flow rates of liquid and gas are reduced;

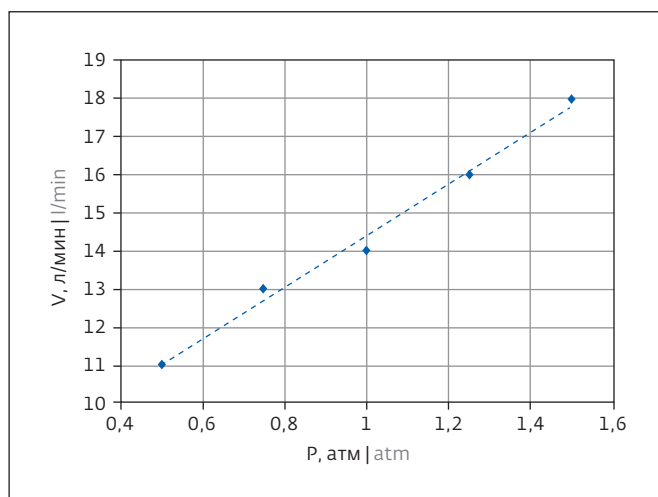


Рис.7. Расходная характеристика распылителя при двухсторонней подаче газа и уменьшенном критическом сечении сопла

Fig.7. Discharge characteristic of the nebulizer a two-way gas supply and a reduced critical section of the nozzle

распылителя проводились при различных вариантах его работы: при полностью открытых каналах подачи газа и при максимальном его расходе; при перекрытии одного из двух каналов подачи газа и уменьшенных расходах жидкости и газа; при уменьшении проходного сечения в обоих каналах подачи газа при максимальном расходе жидкости и уменьшении расхода газа.

В ходе экспериментального исследования измерялся расход газа на выходе из распылителя

и давление газа на входе в него при помощи расходомера ГСБ-400 класса точности 1,0 и манометра образцового МО-11202 (к.т. 0,4) соответственно. Расход реагента измерялся при помощи бюретки 1-1-2-50-0,1 (к.т. 2, цена деления 0,1 мл) и секундомера. В качестве газа-распылителя использовался сжатый воздух.

На первом этапе в качестве распыляемой жидкости использовалась дистиллированная вода. Распыление модельной жидкости происходило при перекрытии одного из двух каналов сопла для проверки работоспособности созданного распылителя на малых расходах газа-распылителя. Результаты экспериментов показали, что наблюдается практически линейный характер зависимости расхода газа от его давления, что существенно упрощает регулировку расхода газа (рис.4). На рис.5 представлена зависимость расхода распыляемой воды от давления газа-распылителя, которая также близка к линейной.

Кроме того, установлено, что из-за высокого поверхностного натяжения воды на выходе из распылителя образуются капли достаточно большого размера (до 1 мм), которые не могут быть разорваны относительно низкоскоростным потоком газа, однако можно ожидать, что при смене воды на реагент с меньшим поверхностным натяжением будет достигаться более качественное распыление при подобной конфигурации распылителя.

Для проверки этого предположения, а также опробования конструкции для распыления кремнийсодержащего реагента в прежних условиях

- with a decrease in the flow area in both gas supply channels at the maximum liquid flow rate and a decrease in gas flow rate.

In the course of the experimental study, the gas flow rate at the outlet of the nebulizer and the gas pressure at its inlet were measured using a GSB-400 flow meter of accuracy class 1.0 and a MO-11202 reference pressure gauge (accuracy class 0.4), respectively. Reagent consumption was measured using a 1-1-2-50-0.1 burette (grade 2, graduation 0.1 ml) and a stopwatch. Compressed air was used as a spray gas. At the first stage, distilled water was used as the sprayed

liquid. Spraying of the model liquid took place when one of the two nozzle channels was shut-off to test performance of the developed nebulizer at low spray gas flow rates. The experimental results showed that there is an almost linear nature of the dependence of the gas flow rate versus its pressure, which greatly simplifies the gas flow rate adjustment (Fig.4). Fig.5 shows the dependence of the flow rate of sprayed water versus the spray gas pressure, which is also close to linear. In addition, it was found that, due to the high surface tension of water at the outlet from the nebulizer, droplets of a

sufficiently large size (up to 1 mm) are formed, which cannot be broken by a relatively low-velocity gas flow; however, it can be expected that when changing water to a reagent of a lower surface tension the quality of the spray will be better at such spray configuration.

To verify this assumption, as well as to test the design for spraying a silicon-containing reagent under the same conditions (one of the gas channels was plugged), experiments on spraying decamethylcyclopentasiloxane were carried out. This liquid has a significantly lower surface tension, which influences is reflected in the

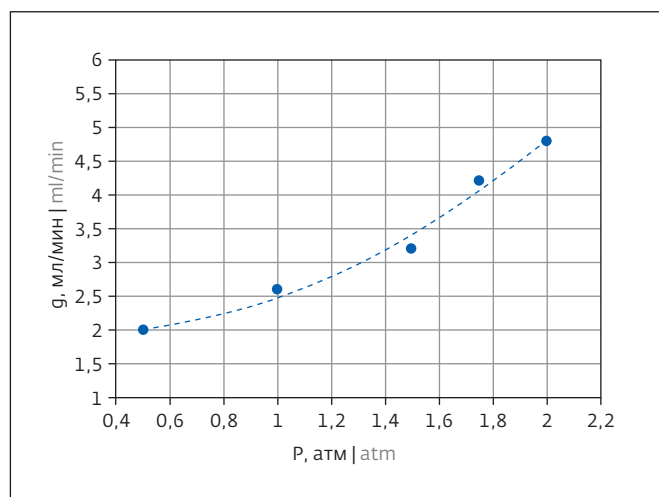


Рис.8. Расход декаметилциклопентасилоксана через распылитель при двухсторонней подаче газа и уменьшенном критическом сечении сопла

Fig.8. Decamethylcyclopentasiloxane flow rate through a nebulizer with a two-way gas supply and a reduced nozzle throat

(заглушен один из газовых каналов) были проведены эксперименты по распылению декаметилциклопентасилоксана. Эта жидкость обладает значительно меньшим поверхностным натяжением, что отразилось на качестве распыления: факел распыляемой жидкости не содержал крупных капель. Однако, большая вязкость реагента отразилась на снижении расхода жидкости при параметрах расхода и давления газа, аналогичных случаю с распылением воды (рис.6). При

малых давлениях воздуха расход реагента практически совпадает с расходом воды, а при увеличении перепада давления на распылителе из-за большей вязкости распыляемого реагента нарастание расхода жидкости происходит медленнее, чем для воды. В ходе эксперимента была произведена замена воды на декаметилциклопентасилоксан при сохранении настроек подачи газораспылителя, при этом распылитель продолжил работу, несмотря на значительное различие в свойствах жидкости (при комнатной температуре): поверхностное натяжение воды $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м, вязкость $0,894$ мПа·с, декаметилциклопентасилоксан при тех же условиях имеет поверхностное натяжение порядка $17 \cdot 10^{-3}$ Н/м и вязкость $1,7$ Па·с). В пределах диапазона давлений и расхода газораспылителя может быть произведена корректировка расхода газа для более качественного распыления жидкости, для чего в конструкции распылителя предусмотрено использование проставок, изменяющих критическое сечение сопла Лавала.

При необходимости производительность распыления может быть увеличена вдвое простым открытием заглушенного канала. Однако при этом возрастет вдвое и расход газораспылителя. В случае, если нужно обеспечить максимальный расход жидкости при ограниченном расходе газа, необходимо уменьшить проходное сечение обоих каналов (без полного перекрытия), это выполняется добавлением плоских тонколистовых прокладок между стенкой канала в основании сопла (п.1 рис.1) и вставкой с внутренним телом (п.2. рис.1).

atomization quality: the jet spray of the sprayed liquid did not contain large droplets. However, the high viscosity of the reagent influenced reflected in a decrease in the liquid flow rate at the parameters of the flow rate and gas pressure that were similar to the case with water spray (Fig.6). At low air pressures the flow rate of the reagent practically coincides with the flow rate of water, and with an increase in the pressure drop across the nebulizer, due to the higher viscosity of the sprayed reagent, the increase in the flow rate of the liquid occurs more slowly than for water. In the course of

the experiment, the water was replaced with decamethylcyclopentasiloxane while maintaining the settings for the spray gas supply, while the sprayer continued to work, despite a significant difference in the properties of the liquid (at room temperature): the surface tension of water $73 \cdot 10^{-3}$ N/m, viscosity 0.894 mPa·s, decamethylcyclopentasiloxane under the same conditions has a surface tension of about $17 \cdot 10^{-3}$ N/m and a viscosity of 1.7 Pa·s). Within the range of pressures and flow rates of the nebulizer gas, the gas flow rate can be adjusted for better liquid atomization for which the nebulizer

design provides for the use of spacers that change the critical section of the Laval nozzle.

If required, spraying performance can be doubled by simply opening the plugged port. However, in this case the spray gas consumption will also double. If it is necessary to ensure the maximum liquid flow rate at a limited gas flow rate, it is necessary to reduce the flow area of both channels (without complete shut-off); this is done by adding flat thin sheet gaskets between the channel wall at the base of the nozzle (item 1 of Fig.1) and an insert with an internal body (item 2, Fig.1). The



Главной задачей проведенных экспериментов была экспериментальная проверка возможности достижения требуемого расхода декаметилциклопентасилоксана при ограниченном расходе и давлении газа-распылителя. Работа распылителя с уменьшенным критическим сечением сопла Лавалья и при максимальной подаче декаметилциклопентасилоксана представлена на рис.7, 8.

Уменьшение критического сечения сопла позволило повысить разрежение в зоне подающих отверстий и тем самым увеличить количество реагента, поступающего в распылитель за счет перепада давлений. Как можно видеть из представленных данных, в пределах заданных диапазонов давлений и расхода газа-распылителя был достигнут требуемый расход реагента.

ВЫВОДЫ

Спроектированное, изготовленное и испытанное в ходе данной работы устройство подачи реагента позволяет проводить распыление вязких высококипящих реагентов для подачи в испарители или непосредственно камеры реакторов с расходами реагента до 300 мл/ч (при масштабировании устройства возможно увеличение подачи реагента до 500 мл/ч и более для крупногабаритных горелок). Универсальность устройства, достигаемая за счет легко адаптируемой геометрии проточной части под требуемый расход газа и реагента, позволяет производить распыление высококипящих вязких жидкостей

(на примере декаметилциклопентасилоксана) с обеспечением требуемых расходов газа и жидкости.

Распылитель на основе сопла Лавалья с внутренним телом обладает возможностью изменения критического сечения сопла без его переделки, а также отличается простотой ввода реагента в поток. Конструкция сопла с перерасширением обеспечивает достаточное измельчение капель в потоке за переотраженным скачком уплотнения.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.** Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1967. 848 с.
2. **Microelectronics processing. CVD [Электронный ресурс] / Department of Electrical Engineering.** – Technion: Israel Institute of Technology. – Режим доступа: <https://slideplayer.com/slide/5345746/> (13.07.2019)
3. **Bunshah R.** Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. – New York: Noyes Publications, 1993. 936 с.
4. **Логинов В.И.** Обезвоживание и обессоливание нефтей. – М.: Химия, 1979. 216 с.
5. **Ueha S.** et al. Mechanism of ultrasonic atomization using a multi-pinhole plate. *Acoust. Set of claims. Jpn. (E)* 6,1:21 (1985);
6. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1973. 848 с.

main task of the experiments was to experimentally verify a possibility of achieving the required flow rate of decamethylcyclotrisiloxane at a limited flow rate and pressure of the spray gas. Operation of the nebulizer with a reduced critical section of the Laval nozzle and at the maximum supply of decamethylcyclotrisiloxane is shown in Figs.7, 8.

A decrease in the critical section of the nozzle made it possible to increase the vacuum in the area of the feed openings and thereby increase the amount of reagent entering the nebulizer due to the pressure difference. As can

be seen from the data presented, the required reagent flow rate was achieved within the specified pressure and spray gas flow ranges.

CONCLUSIONS

The reagent supply device designed, manufactured and tested in the course of this work allows of atomization of viscous high-boiling reagents to be fed into the evaporators or directly into the reactor chambers at the reagent flow rates up to 300 ml/h (when scaling the device, it is possible to increase the reagent supply up to 500 ml/h and more for large burners). Versatility of the device,

achieved due to the easily adaptable geometry of the flow path for the required gas and reagent flow rate, allows atomization of high-boiling viscous liquids (for example, decamethylcyclotrisiloxane) while ensuring the required gas and liquid flow rates. A nebulizer based on a Laval nozzle with an internal body is able to change the throat section of the nozzle without reworking it, and is also distinguished by easy injection of the reagent into the flow. The over-expanded nozzle design provides for sufficient droplet breakdown in the flow behind the reflected shock wave. ■

20–22 октября 2020

Москва, КВЦ «Сокольники»



Единственная
в России выставка
вакуумной техники
и криогенного
оборудования



Вакуумное
оборудование

Криогенное
оборудование

Оборудование
для нанесения
функциональных
покрытий



ПОДРОБНЕЕ О ВЫСТАВКЕ
vacuumtechexpo.com

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+ 7 (495) 252 11 07
vacuumtechexpo@mvk.ru

При поддержке

