

**В.С. Климин, А.А. Резван, Т.А. Зубова**

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ  
НАНОСТРУКТУР**

*Рассмотрены основные причины возникновения резкого изменения экологического состояния окружающей среды. Рассмотрено применение современных наноматериалов для решения задач создания требуемых систем мониторинга и контроля техногенного влияния человека на среду, применение плазменных технологий для формирования рабочей области, каркаса и диффузионного барьера сенсора. Так использование плазмы в процессах обработки и формирования позволили снизить общее время роста углеродных наноразмерных структур до 21 минуты. Для улучшения геометрических параметров углеродных структур было рассмотрено применение подслоев V, Cr и Al. По окончании данной экспериментальной работы был сформирован макет конструкции и была оформлена лабораторно-технологическая инструкция по изготовлению высокотехнологичного селективного анализатора газов с чувствительным элементом на основе массива углеродных наноструктур. Проанализированы отличительные особенности полученной модели высокотехнологичного газоанализатора. Для исследований работы устройства в нормальных условиях применялась специализированная испытательная камера при давлении 760 Торр и температуре камеры 300 К. По результатам экспериментального ряда исследований было получено, что сформированная полезная модель анализатора обладает характеристиками чувствительности к молекулам оксида азота и донорным молекулам аммиака, этанола и парам воды. Продемонстрированы соответствующие вольтамперные характеристики для различных газовых сред, а также зависимость тока разряда от различной концентрации газов. Было получено, что напряжение пробоя формируемого анализатора не превышает 10 В. Полученные результаты показали перспективность использования углеродных наноструктур в качестве основы для формирования газоанализатора с высокой степенью чувствительности и селективности к газовым смесям.*

*Экология; окружающая среда; нанотехнологии; наноструктуры; углеродные наноматериалы.*

**V.S. Klimin, A.A. Rezvan, T.A. Zubova**

**ENERGY EFFICIENT GAS ANALYZER FOR ENVIRONMENTAL  
MONITORING WITH A SENSITIVE ELEMENT BASED ON CARBON  
NANOSTRUCTURES**

*The main causes of a sharp change in the ecological state of the environment are considered herein. The use of modern nanomaterials to solve the problems of creating the required systems for monitoring and controlling the anthropogenic effect of humans on the environment, the use of plasma technologies for the formation of the working area, the frame and the diffusion barrier of the sensor are considered. So the use of plasma in the processes of processing and formation allowed reducing the total growth time of carbon nanoscale structures to 21 minutes. To improve the geometric parameters of carbon structures, the use of V, Cr, and Al sublayers was considered. At the end of this experimental work, the layout of the structure was formed and the laboratory and technological instruction for manufacturing a high-tech selective gas analyzer with a sensitive element based on an array of carbon nanostructures was issued. Analyzed are the distinctive features of the resulting model of high-tech gas analyzer. For testing the device under normal conditions, a specialized test chamber was used at a pressure of 760 Torr and a chamber temperature of 300 K. According to the results of an experimental series of studies, it was found that the generated utility model of the analyzer has characteristics of sensitivity to nitrogen oxide molecules and ammonia, ethanol and water vapor. Demonstrated are the corresponding current-voltage characteristics for various gas media, as well*

*as the dependence of the discharge current on different gas concentrations. It was obtained that the breakdown voltage of the analyzer being formed does not exceed 10 V. The obtained results have shown the prospects of using carbon nanostructures as the basis for the formation of a gas analyzer with a high degree of sensitivity and selectivity to gas mixtures.*

*Ecology; environment; nanotechnology; nanostructures; carbon nanomaterials.*

**Введение.** Начиная с середины 19 века во всем мире научно-технический комплекс начал развиваться бурными темпами. С этого времени было совершено огромное количество научных открытий, которые нашли своё активное применение как в промышленной сфере, так и в нашей повседневной жизни. Однако, активное внедрение научных разработок не всегда велось осознано, окружающая среда и среда обитания в целом были подвержены широкому ряду техносферных явлений, повлекших за собой существенные изменения экологии и климата. Одной из глобальных проблем является отсутствие возможности самостоятельной очистки планеты от отходов деятельности человека.

С конца XX века началось поэтапное изменение мировоззрения в отношении человека к окружающей среде и экологии, которое продолжается и в наши дни в условиях нарастающего кризиса этих отношений. В настоящий момент во всём мире наблюдается сложная ситуация в контроле, поддержании и защите экологического состояния среды, в рациональном использовании ресурсов, устойчивом развитии промышленности и т.д. Благодаря чему возникла острая необходимость формирования специальных систем мониторинга и анализа экологического состояния окружающей среды для изучения и оценивания негативного влияния техногенного воздействия человека. Данные системы должны отвечать жёстким требованиям к чувствительности, работоспособности и функциональности. Использование современных наноматериалов позволяет разработать и сформировать недорогие и высокочувствительные элементы газоанализатора. Одними из таковых являются углеродные наноструктуры (УНС), обладающие уникальными свойствами и стабильными характеристиками [1–4]. Благодаря тому, что УНС обладают устойчивостью к ионизирующим излучениям и гексагональной двумерной одноатомной кристаллической решёткой, которая позволяет определять малые концентрации адсорбированного газа, а их электропроводность сильно зависит от внешних факторов: наличия газов и жидкостей, температуры и электрического поля, данный материал является актуальным для применения в качестве основы для чувствительного элемента таких систем [5–7].

Анализ литературных источников в области применения современных углеродных нанотехнологий для создания устройств мониторинга и контроля экологического состояния окружающей среды, показывает, что качество и функционал технологических решений различен. Это связано с применением различных конфигураций параметров формирования массива УНС, а именно различных газовых смесей, температуры и времени роста и др.

Целью данной работы является экспериментальный и теоретический анализ параметров формирования чувствительного элемента газоанализатора на основе углеродных наноструктур и исследование его рабочих характеристик.

**Методическая часть.** В качестве материала подложки был выбран кремний с кристаллографической структурой (110). Поверхность подложки имела стандартные геометрические параметры после обработки жидкостной полировкой [8–12]. На поверхности методом осаждения из газовой фазы был сформирован диэлектрический слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Данный слой необходим для создания барьера, преграждающего процесс диффузии между подложкой и основным чувствительным элементом анализатора. Параметры получения данного слоя были использованы следующие: потоки газов моносилана  $\text{SiH}_4$  и азота  $\text{N}_2$ , соответственно равнялись 40 и

60 см<sup>3</sup>/мин, давление рабочей камеры Р – 70 Па, температура образца Т – 100°С и мощность источника ИСР плазмы равнялась 100 Вт, используя которые была достигнута скорость роста равная 11,5 нм/мин.

На сформированных слоях диэлектрика формировалась структура для получения наноразмерных углеродных структур [13–14]. Так, для предотвращения образования силицидов при формировании каталитических центров были получены подслои V, Сг и Al, толщины которых соответственно равны 20 нм, 40 нм и 500 нм. Метод магнетронного распыления был использован для формирования каталитического слоя никеля, размер которого в среднем для каждого из образцов был равен 10 нм. Распыление проводилось при давлении камеры 10 Па, подогреве образца до 250 °С, мощности источника плазмы 300 Вт. Процесс проводился в газовой среде, содержащей аргон с концентрацией 10 см<sup>3</sup>/мин. Метод плазмохимического осаждения из газовой фазы использовался для роста дополнительного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 5 мкм. Благодаря использованию сочетания нанолитографии и плазмохимического травления, была получена структура газоанализатора, форма которой варьируется в зависимости от заданных параметров [15–17]. Кроме этого, данная структура позволит сформировать нагреватель на оборотной стороне, последующие выходные и управляющие контакты. Нагреватель необходим для дегазации, восстановления чувствительного элемента и поддержания постоянной температуры процессов, протекающих на поверхности полупроводниковой структуры при хемосорбции газов. Травление проводилось во фторсодержащей плазме. Фторсодержащим газом являлся SF<sub>6</sub> со средней концентрацией 15 см<sup>3</sup>/мин. При этом давление реакционной камеры 2,25 Па, напряжение смещения 80 В и мощность источника индуцировано-связанной плазмы 300 Вт. Температура данного процесса составляла 27°С. Данные параметры помогают достигать скорости травления до 400 нм/мин.

В качестве углеродных наноструктур использовались углеродные нанотрубки, формирование которых проходило в несколько этапов [18–20]. Сформированные структуры в камере разогревались до высоких температур, в частности до 750 °С, в газовой среде, состоящей из аммиака N<sub>NH<sub>3</sub></sub> – 15 см<sup>3</sup>/мин и аргона N<sub>Ar</sub> – 70 см<sup>3</sup>/мин. Данная температура поддерживалась до конца формирования каталитических центров. Активация центров проводилась при температуре в диапазоне от 700 до 800°С, в течение этого периода никель восстанавливает свои металлические свойства. Процесс активации проводился при подаче в реакционную камеру аммиака N<sub>NH<sub>3</sub></sub> – 170 см<sup>3</sup>/мин при давлении камеры 4,5 Торр. В совокупности, время нагрева и активации составило в среднем 21 минуту. По окончании данных процессов метод плазмохимического осаждения из газовой фазы был использован для формирования углеродных нанотрубок. В качестве рабочего углеродсодержащего газа был использован ацетилен. Скорость подачи ацетилена в камеру составляла 70 см<sup>3</sup>/мин, также в данную газовую смесь входил аммиак со скоростью потока 210 см<sup>3</sup>/мин, а давление камеры составляло 4.5 Торр. Температура данного процесса составила 750 °С.

**Основные характеристики полученного макета.** Для проведения исследований газочувствительности макет чувствительного элемента анализатора помещался в специализированную камеру. Температура и давление, при которых проводились измерения, составляют 300 К и 760 Торр соответственно. В экспериментальных исследованиях использовались газы CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> чистотой 99,99 % и их смеси. Газ подавался в испытательную камеру способом замещения. Таким образом были сняты вольтамперные характеристики для таких смесей газов, как CH<sub>4</sub>+воздух и CO<sub>2</sub>+воздух.

Из полученных вольтамперных зависимостей следует, что значение начала пробоя для метана соответствует напряжению U<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 1,5 В, напряжение начального пробоя воздуха U<sub>AIR</sub> = 4,4 В, а для углекислого газа U<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 6,9 В и оставшейся

смеси газов  $U_{AIR} = 4,4$  В. Соотношение газов в данных смесях составляло 5:1. Таким образом, сформированный макет обладает способностью селективного отбора в исследуемых газовых смесях.

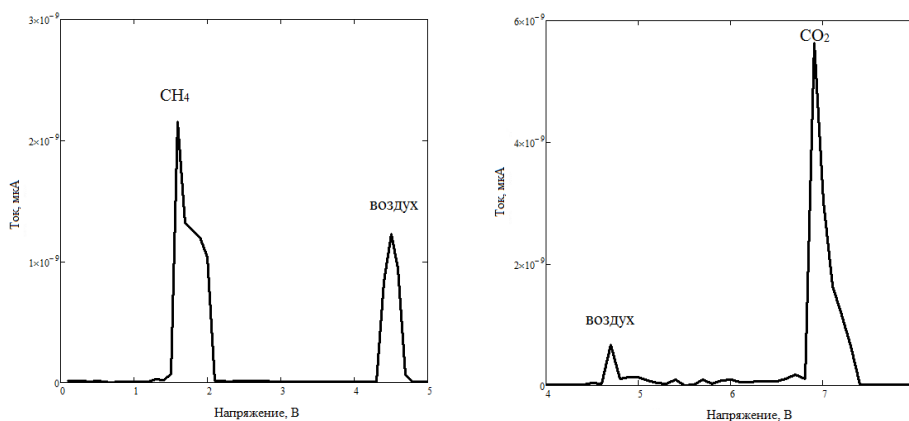


Рис. 1. Вольтамперные характеристики измеренные для  $CH_4$ +воздух (а) и  $CO_2$ +воздух (б)

Кроме этого, были установлены зависимости токов разрядов от начального напряжения пробоя для различных газов (рис. 2).

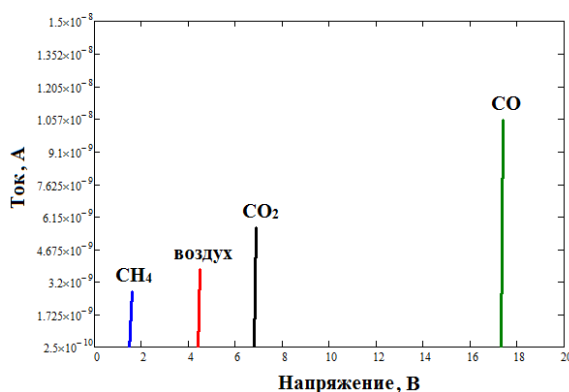


Рис. 2. Зависимости тока разряда от напряжения для различных газов

По данной зависимости можно сделать вывод о том, что изготовленный макет чувствительного элемента газоанализатора обладает напряжением пробоя для всех детектируемых газов, значение которого на два порядка меньше чем у аналогов. Напряжение пробоя на воздухе у которых составляет 245 В или 400 В. Это связано с уменьшением зазора структуры УНТ-катод до 50 мкм, а также вертикальность формируемого массива УНТ.

**Заключение.** По окончании экспериментальной сессии был сформирован макет конструкции и была оформлена лабораторно-технологическая инструкция по изготовлению высокотехнологичного селективного анализатора газов с чувствительным элементом на основе массива углеродных наноструктур.

Итоговым результатом является то, что изготовленный макет высокотехнологичного газоанализатора с чувствительным элементом, выполненным из углеродной наноструктуры обладает чувствительностью к акцепторным молекулам газа  $NO_2$  и

донорным молекулам газов  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ , парам  $\text{H}_2\text{O}$  с различной степенью коэффициента чувствительности зависящего от концентрации. Основываясь на данные проведенных экспериментов, было установлено, что для  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , при рабочей температуре 300 К и концентрации 0,01 моль/литр, чувствительность составила 63, 135, 5468. Кроме этого было получено, что у разработанного макета время срабатывания и время восстановления равняется 0,1 сек и 1,0 сек, соответственно.

Данная работа была выполнена при поддержке Южного федерального университета (ВнГр-07/2017-02). Исследования проведены в научно-образовательном центре «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резван А.А., Климин В.С. Исследование получения графеновых плёнок методом плазменного ХОГФ // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тезисы докладов Всероссийской конференции (Саратов, 5-7 сентября 2017). – Саратов, 2017. – С. 216.
2. Климин В.С., Резван А.А. Исследование формирования пленок графена на вертикально-ориентированных наноструктурах со сложным рельефом // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение: Тезисы докладов Международной конференции (Тамбов, 15-17 ноября 2017). – Тамбов, 2017. – С. 84-86.
3. Климин В.С., Резван А.А. Изготовление чувствительного элемента сенсора газов на основе вертикально-ориентированных углеродных наноструктур // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение: Тезисы докладов Международной конференции (Тамбов, 15-17 ноября 2017). – Тамбов, 2017. – С. 341-343.
4. Климин В.С., Резван А.А. Исследование автоэмиссионной ячейки на основе вертикально-ориентированной углеродной наноструктуры, полученной плазмохимическим методом // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение: Тезисы докладов Международной конференции (Тамбов, 15-17 ноября 2017). – Тамбов, 2017. – С. 344-346.
5. Klimin V.S., Rezvan A.A. and Ageev O.A. Study of the effect of carbon-containing gas pressure on the geometric parameters of an array of carbon nanostructures // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124, No. 1. – P. 022035.
6. Klimin V.S., Rezvan A.A. and Ageev O.A. Research of using plasma methods for formation field emitters based on carbon nanoscale structures // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124, No. 1. – P. 071020.
7. Резван А.А., Климин В.С. Ионизационный сенсор газа с чувствительным элементом на основе углеродных наноструктур с развитым рельефом // Физика А.СПб: Тезисы докладов Международной конференции (Санкт-Петербург, 23-25 октября 2018). – СПб., 2018. – С. 85-86.
8. Климин В.С., Резван А.А. Автоэмиссионные углеродные наноструктуры, полученные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы // Лазерные, плазменные исследования и технологии «Лаплаз-2018»: Тезисы докладов Международной конференции (Москва, 30 января – 01 февраля 2018). – М., 2018. – С. 89-90.
9. Климин В.С., Резван А.А. Особенности влияния материалов структуры при формировании вертикально-ориентированных углеродных наноструктур методом плазмохимического осаждения из газовой фазы // Лазерные, плазменные исследования и технологии «Лаплаз-2018»: Тезисы докладов Международной конференции (Москва, 30 января – 01 февраля 2018). – М., 2018. – С. 91-92.
10. Jeong H.E., Lee S.H., Kim P., Suh K.Y. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2008. – Vol. 313-314. – P. 359-364.
11. Qu L. and Dai L. Polymer-masking for controlled functionalization of carbon nanotubes // Advanced Materials. – 2007. – Vol. 19, No. 1. – P. 3844.
12. Majidi C., Groff R.E., Autumn K., Baek S., Bush B., Gravish N., Maboudian R., Maeno Y., Schubert B., Wilkinson M. and Fearing R.S. High friction from a sti polymer using micro ber arrays // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 97, No. 1. – P. 076103.

13. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., and Tsukanova O.G. Studying the Modes of Nanodimensional Surface Profiling of Gallium Arsenide Epitaxial Structures by Local Anodic Oxidation // *Nanotechnologies in Russia*. – 2015. – Vol. 10, No. 3-4. – P. 214-219.
14. Rouhrig M., Thiel M., Worgull M., Houlscher H. 3D Direct Laser Writing of Nano- and Microstructured Hierarchical Gecko-Mimicking Surfaces // *Small*. – 2012. – Vol. 8, No. 19. – P. 3009-3015.
15. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Lisitsyn S.A., Rezvan A.A., Balakirev S.V. Formation of nanoscale structures on the surface of gallium arsenide by local anodic oxidation and plasma chemical etching // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124, No. 1. – P. 041024.
16. Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N., Naidenko N.A. Investigation of the influence of parameters of nanoscale profiling of the surface of GaAs structures by a combination of local anodic oxidation and plasma chemical etching methods // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124, No. 1. – P. 071019.
17. Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N., Polyakova V.V., Vakulov Z.E., Ageev O.A. Masking coating formation by the focused ion beams method for plasma chemical treatment // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124, No. 1. – P. 081035.
18. Autumn K., Liang Y.A., Hsieh S.T., Zesch W., Chan W.P., Kenny Th.W., Fearing R., Full R.J. Adhesive force of a single gecko foot-hair // *Nature*. – 2000. – No. 405. – P. 681-685.
19. Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M. Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As<sub>2</sub> Molecules on GaAs Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 82, No. 24. – P. 4886-4889.
20. Murdick D.A., Wadley H.N.G. and Zhou X.W. Condensation Mechanisms of an Arsenic-Rich Vapor on GaAs (001) Surfaces // *Phys. Rev. B*. – Vol. 75, No. 1. – P. 125318.

#### REFERENCES

1. Rezvan A.A., Klimin V.S. Issledovanie polucheniya grafenovykh plenok metodom plazmennogo HOGF [Research of obtaining graphene films by plasma HOGF], *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika: tezisy dokladov Vserossiyskoy konferentsii (Saratov, 5-7 sentyabrya 2017)* [Nanoelectronics, nanophotonics and nonlinear physics: abstracts of the all-Russian conference (Saratov, September 5-7, 2017)]. Saratov, 2017, pp. 216.
2. Klimin V.S., Rezvan A.A. Issledovanie formirovaniya plenok grafena na vertikal'no-orientirovannykh nanostrukturakh so slozhnym rel'efom [Investigation of the formation of graphene films on vertically oriented nanostructures with complex relief], *Grafen i rodstvennyye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Tambov, 15-17 noyabrya 2017)* [Graphene and related structures: synthesis, production and application: Abstracts of the international conference (Tambov, November 15-17, 2017)]. Tambov, 2017, pp. 84-86.
3. Klimin V.S., Rezvan A.A. Izgotovlenie chuvstvitel'nogo elementa sensora gazov na osnove vertikal'no-orientirovannykh uglerodnykh nanostruktur [Fabrication of a gas sensor sensing element based on vertically oriented carbon nanostructures], *Grafen i rodstvennyye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Tambov, 15-17 noyabrya 2017)* [Graphene and related structures: synthesis, production and application: Abstracts of the international conference (Tambov, November 15-17, 2017)]. Tambov, 2017, pp. 341-343.
4. Klimin V.S., Rezvan A.A. Issledovanie avtoemissionnoy yacheyki na osnove vertikal'no-orientirovannoy uglerodnoy nanostruktury, poluchennoy plazmohimicheskim metodom [Study of the autoemission cell based on vertically oriented carbon nanostructure obtained by plasma chemical method], *Grafen i rodstvennyye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Tambov, 15-17 noyabrya 2017)* [Graphene and related structures: synthesis, production and application: Abstracts of the international conference (Tambov, November 15-17, 2017)]. Tambov, 2017, pp. 344-346.
5. Klimin V.S., Rezvan A.A. and Ageev O.A. Study of the effect of carbon-containing gas pressure on the geometric parameters of an array of carbon nanostructures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, No. 1, pp. 022035.
6. Klimin V.S., Rezvan A.A. and Ageev O.A. Research of using plasma methods for formation field emitters based on carbon nanoscale structures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, No. 1, pp. 071020.

7. *Rezvan A.A., Klimin V.S.* Ionizatsionnyy sensor gaza s chuvstvitel'nyim elementom na osnove uglerodnykh nanostruktur s razvitym rel'efom [Ionization gas sensor with sensing element based on carbon nanostructures with developed relief], *FizikaA.SPb: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 23-25 oktyabrya 2018)* [Physics.St. Petersburg: Abstracts of the international conference (St. Petersburg, October 23-25, 2018)]. Saint Petersburg, 2018, pp. 85-86.
8. *Klimin V.S., Rezvan A.A.* Avtoemissionnye uglerodnye nanostrukturny, poluchennyye metodom plazmohimicheskogo osazhdeniya iz gazovoy fazy [Autoemission carbon nanostructures obtained by plasma chemical deposition from the gas phase], *Lazernye, plazmennyye issledovaniya i tekhnologii «Laplaz-2018»: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Moskva, 30 yanvarya – 01 fevralya 2018)* [Laser, plasma studies and technologies" Laplace-2018": Abstracts Of the international conference (Moscow, January 30 – February 01, 2018)]. Moscow, 2018, pp. 89-90.
9. *Klimin V.S., Rezvan A.A.* Osobennosti vliyaniya materialov struktury pri formirovaniy vertikal'no-orientirovannykh uglerodnykh nanostruktur metodom plazmohimicheskogo osazhdeniya iz gazovoy fazy [Features of the influence of structure materials in the formation of vertically oriented carbon nanostructures by plasma chemical deposition from the gas phase], *Lazernye, plazmennyye issledovaniya i tekhnologii «Laplaz-2018»: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii (Moskva, 30 yanvarya – 01 fevralya 2018)* [Laser, plasma studies and technologies" Laplace-2018": Abstracts of the International conference (Moscow, January 30 – February 01, 2018)]. Moscow, 2018, pp. 91-92.
10. *Jeong H.E., Lee S.H., Kim P., Suh K.Y.* High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, Vol. 313-314, pp. 359-364.
11. *Qu L. and Dai L.* Polymer-masking for controlled functionalization of carbon nanotubes, *Advanced Materials*, 2007, Vol. 19, No. 1, pp. 3844.
12. *Majidi C., Groff R.E., Autumn K., Baek S., Bush B., Gravish N., Maboudian R., Maeno Y., Schubert B., Wilkinson M. and Fearing R.S.* High friction from a sti polymer using micro ber arrays, *Physical Review Letters*, 2006, Vol. 97, No. 1, pp. 076103.
13. *Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., and Tsukanova O.G.* Studying the Modes of Nanodimensional Surface Profiling of Gallium Arsenide Epitaxial Structures by Local Anodic Oxidation, *Nanotechnologies in Russia*, 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 214-219.
14. *Rouhrig M., Thiel M., Worgull M., Houlcher H.* 3D Direct Laser Writing of Nano- and Microstructured Hierarchical Gecko-Mimicking Surfaces, *Small*, 2012, Vol. 8, No. 19, pp. 3009-3015.
15. *Klimin V.S., Solodovnik M.S., Lisitsyn S.A., Rezvan A.A., Balakirev S.V.* Formation of nanoscale structures on the surface of gallium arsenide by local anodic oxidation and plasma chemical etching, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, No. 1, pp. 041024.
16. *Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N., Naidenko N.A.* Investigation of the influence of parameter rs of nanoscale profiling of the surface of GaAs structures by a combination of lo cal anodic oxidation a nd plasma chemical etching methods, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, No. 1, pp. 071019.
17. *Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N., Polyakova V.V., Vakulov Z.E., Ageev O.A.* Masking coating formation by the focused ion beams method for plasma chemical treatment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1124, No. 1, pp. 081035.
18. *Autumn K., Liang Y.A., Hsieh S.T., Zesch W., Chan W.P., Kenny Th.W., Fearing R., Full R.J.* Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature*, 2000, No. 405, pp. 681-685.
19. *Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M.* Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As<sub>2</sub> Molecules on GaAs Surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1999, Vol. 82, No. 24, pp. 4886-4889.
20. *Murdick D.A., Wadley H.N.G. and Zhou X.W.* Condensation Mechanisms of an Arsenic-Rich Vapor on GaAs (001) Surfaces, *Phys. Rev. B*, Vol. 75, No. 1, pp. 125318.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Б. Чернышев.

**Климин Виктор Сергеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 89508522719; кафедра нанотехнологий и микро-системной техники; к.т.н.; доцент.

**Резван Алексей Анатольевич** – e-mail: arezvan@sfnedu.ru; тел.: 89198943706; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Зубова Татьяна Андреевна** – Донской государственный технический университет; e-mail: zubova.tan59@gmail.com; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 89897218761; кафедра приборостроение и биомедицинская инженерия; студент.

**Klimin Victor Sergeevich** – Southern Federal University; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79508522719; the department of nanotechnologies and microsystems; assistant professor; cand. of eng. sc.

**Rezvan Alexey Anatolyevich** – e-mail: arezvan@sfnedu.ru; phone: +79198943706; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

**Zubova Tatyana Andreevna** – Don State Technical University; e-mail: zubova.tan59@gmail.com; 1, Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +79897218761; the department of instrument engineering and biomedical engineering; student.

УДК 658.51.011

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-145-152

**Н.Н. Чернов, А.В. Палий**

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА ДЛЯ ТЕПЛОТВОДА**

*Приводятся результаты численного исследования возможности использования тела оптимизированной формы с минимальной силой аэродинамического сопротивления в качестве тепловода в конвективном потоке газа. Аэродинамические характеристики и, в особенности, характер обтекания тел простейших форм представляют большой научный и практический интерес. Тела сложной формы всегда можно представить в виде совокупности более простых, для которых легко исследовать и рассчитывать траектории обтекания, на основе которых составляются аналитические методы расчета аэродинамических характеристик. Проведен вычислительный эксперимент в программном продукте Ansys Fluent. Условиями проведения эксперимента (сравнения тепловодящих тел) при численном моделировании являются сохранение постоянными: объема и формы рабочей зоны; расстояния от истоков, стоков и центров тел; скорости аэродинамического потока; массы сравниваемых тел; тепловой мощности источника и прочих параметров помимо именно формы поверхности. Полученная оптимизированная форма тела, совпадает с линиями тока, что и является основным достоинством, так как при обтекании отрывает потока от поверхности не наблюдается. Таким образом, вся площадь поверхности будет являться эффективной площадью поверхности тепловода в отличие от других известных форм тел, за счет чего температура теплонагруженного элемента, помещенного в центр тепловода снизится.*

*Численное моделирование; тепломассоперенос, аэродинамический поток; эквивалентные поверхности, аэродинамическое сопротивление; оптимизированная форма тепловода; вычислительный эксперимент.*

**N.N. Chernov, A.V. Palii**

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF POSSIBILITY OF THE AXISYMMETRIC BODY APPLICATION IN HEATING**

*This article presents the results of a numerical study of possibility of using an optimized body shape with minimal aerodynamic drag force as a heat sink in a convective gas flow. The aerodynamic characteristics and, in particular, the nature of the flow around the bodies of the simplest forms represent a great scientific and practical interest. Bodies of complex shape can always be represented as a set of simpler ones, for which it is easy to investigate and calculate flow paths, on the basis of which analytical methods for calculating aerodynamic characteristics*