

ТЕРМОМЕТРИРОВАНИЕ ДВУХРОТОРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

А.А. Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев

АННОТАЦИЯ

Для разработки и совершенствования бесконтактных вакуумных насосов применяют математические модели, одной из составляющих которых является расчет теплообмена. Наиболее достоверные данные по температурам рабочих элементов можно получить в результате эксперимента. В качестве объекта исследования использовались ДВН различных размеров с роторами различного профиля. В ходе эксперимента изменялись: давление на входе, перепад давлений между выходом и входом, частота вращения роторов. Несмотря на различные формы роторов и размеры насосов результаты всех экспериментов довольно близки. Полученные данные были аппроксимированы уравнениями для определения температур роторов и корпуса в математической модели. Проведенные исследования позволяют расширить диапазон рабочих условий при определении температур рабочих элементов насоса и снижают погрешность при определении температур роторов и корпуса воздуходувки типа Рутс, работающих в вакуумном режиме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ДВН ТИПА РУТС, ТЕРМОМЕТРИРОВАНИЕ, ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

THERMOMETERING OF ROOTS VACUUM PUMP

A.A. Isaev, A.A. Raykov, A.V. Burmistrov, S.I. Salikeev

ABSTRACT

To develop and improve non-contact vacuum pumps mathematical models are used and calculation of heat exchange is one of their components. The most reliable data of working elements temperature can be obtained from experiment. Roots pumps with different dimensions and different rotor profiles were used as objects to be tested. Inlet pressure, pressure difference between pump outlet and inlet, rotary speed were varied in experiment. Results of all experiments were very much alike. The obtained data were approximated by relationships for temperature of rotors and the case in mathematical model. The research makes it possible to increase the range of working conditions when pump working elements temperature is obtained and to reduce the error when rotors and case temperature of Roots blower working in vacuum regime is obtained.

KEYWORDS

ROOTS VACUUM PUMP, THERMOMETING, THERMAL CALCULATION

ВВЕДЕНИЕ

К современным системам создания вакуума предъявляются все более жесткие требования по чистоте получаемой среды, производительности и энергоэффективности. В некоторых технологических процессах требуется полное отсутствие следов углеводородов, присутствующих в большинстве вакуумных насосов. Поэтому все чаще применение находят системы безмасляной («сухой») откачки [1]. Одним из основных претендентов на роль лидера в области создания «сухого» среднего вакуума в сочетании с

высокой производительностью и высоким уровнем энергоэффективности, является двухроторный вакуумный насос (ДВН) типа Рутс [2]. К сожалению, в качестве форвакуумного насоса (ФВН) к ДВН в России, как правило, использовались насосы с масляным уплотнением, что сводило на нет безмасляность насосов типа Рутс, вследствие обратного потока паров масла из ФВН. При этом замена ФВН в агрегатах с насосами типа Рутс на безмасляные насосы, например, спиральные, кулачково-зубчатые или винтовые, позволяет создать совершенное средство получения безмасляного среднего вакуума, сочетающее в себе высокую степень повышения давления и хорошие удельные характеристики [3].

Для модернизации и проектирования безмасляных бесконтактных вакуумных машин, включая ДВН типа Рутс, необходимо применение математического моделирования рабочих процессов, поскольку именно математическое моделирование позволяет прогнозировать откачные характеристики при различных профилях роторов, величинах зазоров, частотах вращения роторов, что, в свою очередь, дает возможность выбора оптимальных вариантов на этапе проектирования без дорогостоящего изготовления макетов изделия и проведения экспериментов.

Математическая модель ДВН, чаще всего, строится на дифференциальных уравнениях состояния системы с переменной массой [4, 5]. При расчете учитываются характер изменения рабочих объемов, величины перетеканий в роторном механизме, теплообмен газа с роторами и стенками насоса. Поэтому температуры элементов, контактирующих с газом, оказывают существенное влияние на параметры рабочего процесса. Кроме того, различие в температурах роторов и корпуса приводит к изменению величин зазоров в процессе работы насоса [6].

Наиболее достоверные данные по температурам рабочих поверхностей могут быть получены в результате экспериментального термометрирования ДВН. В одной из первых работ по экспериментальному исследованию двухроторной машины типа Рутс, работающей в режиме воздуходувки [7], проведены измерения температур газа на выходе из насоса, а также роторов и корпуса в различных точках. Измерения проводились в диапазоне отношения давлений от 0,4 до 0,8 при частоте вращения роторов 3000 об/мин.

В итоге для температуры корпуса было получено уравнение

$$T_K = 104 - 0,322\varphi + T_H(0,628 + 0,0012\varphi), \quad (1)$$

где φ – угловая координата на корпусе, T_H – температура газа на выходе.

Температура ротора

$$T_P = 0,798T_H + 60,6, \quad (2)$$

В работе [8] продолжено исследование температур ДВН в компрессорном режиме. Кроме температур внутренних и наружных стенок корпуса также проводилось измерение температур газа в рабочей полости.

В работах [9,10] температуры поверхности корпуса и роторов измерялись при помощи инфракрасной термографии в диапазоне отношений давления 1,6–1,2 и частот вращения роторов от 1000 до 2000 об/мин. Рабочие температуры также были получены численным путем при решении сопряженной задачи гидрогазодинамики и теплопроводности в CFD-пакетах. Максимальное расхождение составило 10 % [9].

Исследованию машины типа Рутс в вакуумном режиме посвящена работа [3]. Экспериментальные измерения температур ротора, корпуса и газа на выходе проведены в диапазоне частот от 2990 до 6000 об/мин при отношениях давлений от 6 до 59.

В работе [3] показано, что температура ротора описывается с максимальной погрешностью 4,4 % выражением

$$T_p = 1,7T_k - 217,6, \quad (3)$$

а температура корпуса

$$T_k = 281 + 0,0578 \Delta P + 0,35n, \quad (4)$$

где ΔP – разность давлений между входом и выходом, n частота вращения ротора, об/с
Температура газа на выходе находится в виде

$$T_{\text{вых}} = 292 + 0,0792 \Delta P + 0,23n - 1,2 \cdot 10^{-6} \Delta P^2 + 0,000264 \Delta P n - 0,00054n^2, \quad (5)$$

Недостатком исследований [7-10] является достаточно узкий диапазон давлений, в которых проводились измерения, а работа [11] охватывает лишь давления ниже 1000 Па. Поэтому задачей данной работы является расширение диапазонов и обобщение данных по температурам рабочих поверхностей насоса типа Рутс.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовались как серийный насос НВД-200 производства АО «Вакууммаш», имеющий геометрическую быстроту действия 98 л/с при 3000 об/мин, так и опытный ДВН, имеющий ротора с эллиптическим профилем, установленные в том же корпусе [12, 13] (рис.1). Экспериментальный стенд состоит из исследуемого ДВН, спирального насоса НВСП-35, используемого в качестве форвакуумного, вакуумметров и расходомеров (рис. 2).

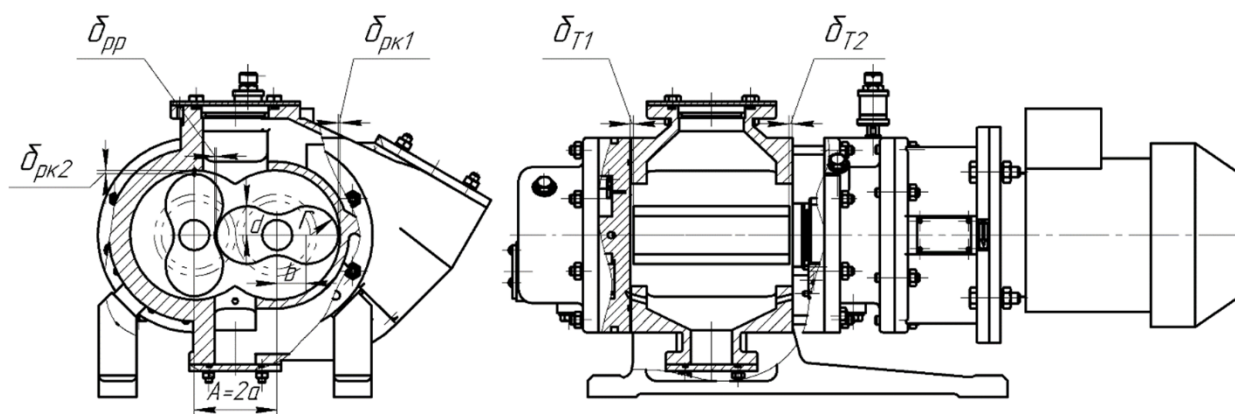


Рис. 1. Исследуемый ДВН с эллиптическим профилем роторов

Для измерения температуры корпуса в трех точках, установлены хромель-копелевые термопары (рис. 3).

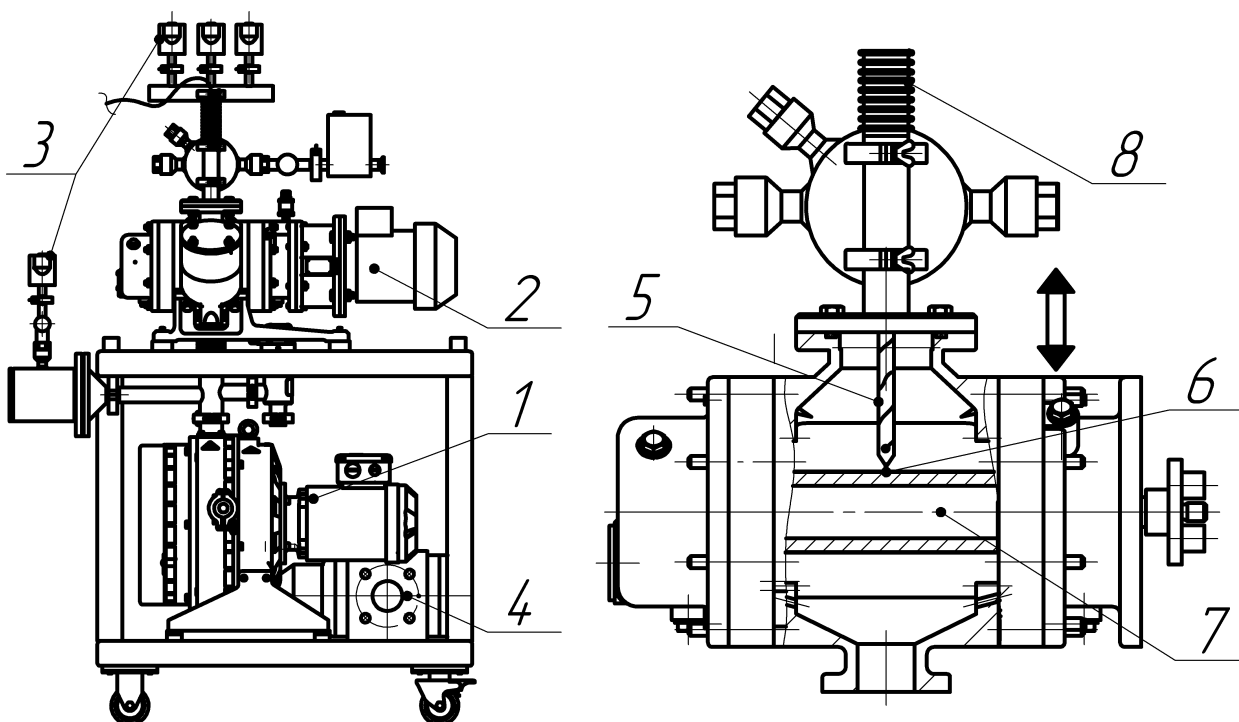


Рис. 2. Стенд термометрирования: 1 – НВСП-35; 2 – НВД-200 с эллиптическими роторами; 3 – мембранно-емкостные вакуумметры; 4 – счетчик газа ротационный; 5 – текстолитовый стержень; 6 – чувствительный элемент термопары; 7 – ротор; 8 – сильфон.

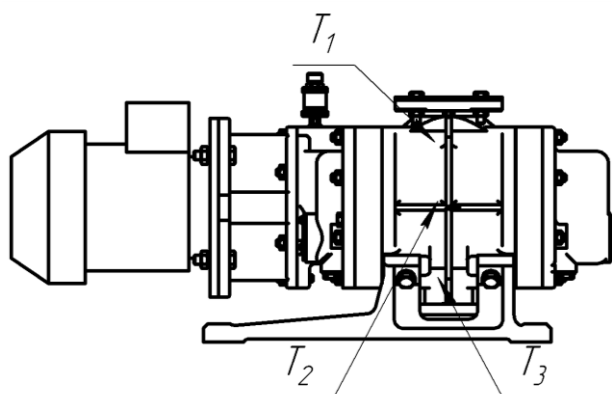


Рис. 3. Места крепления термопар на корпусе

Для измерения температуры роторов разработан сильфонный узел (рис. 4), при помощи которого термопара быстро прижималась к роторам после их остановки без разгерметизации системы.

Экспериментальное исследование температуры корпуса и роторов насоса проводилось на трех частотах: 2000 об/мин, 3000 об/мин и 6000 об/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости температуры ротора от температуры корпуса по данным из проведенных экспериментов и рассмотренных работ представлены на рис. 4. Несмотря на различные формы роторов результаты всех трех экспериментов довольно близки. Наибольший разброс в температурах ротора наблюдается в эксперименте данной работы из-за наиболее широкого диапазона рабочих параметров.

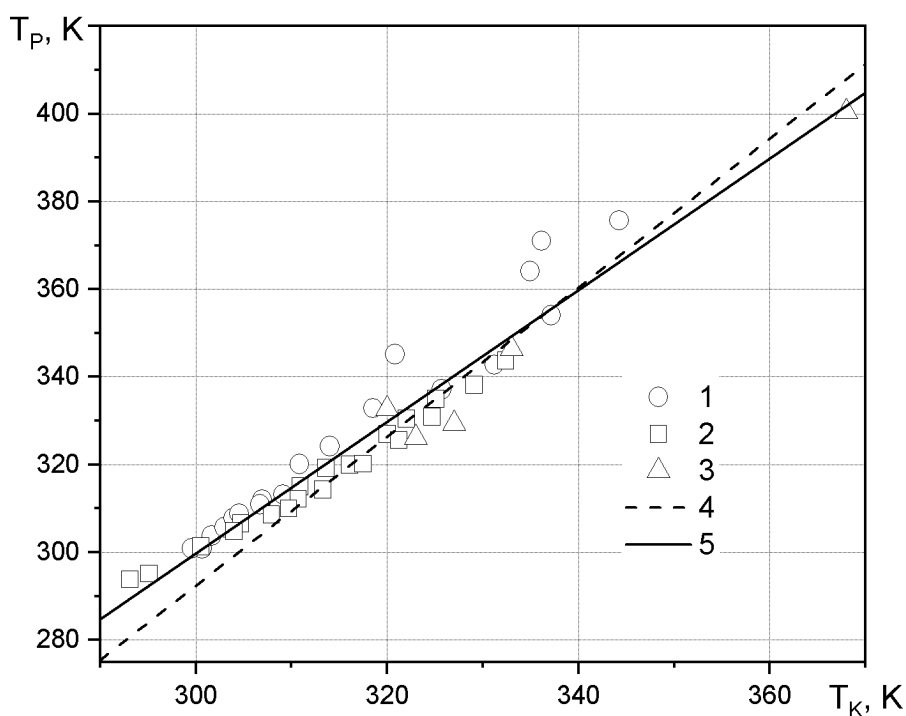


Рис. 4. Зависимости температуры ротора от температуры корпуса:
 1 – эксперимент данной работы; 2 – эксперимент [3]; 3 – эксперимент [9]; 4 – расчет по формуле (3); 5 – расчет по формуле (6)

Зависимость температуры роторов от температуры корпуса носит практически линейный характер и может быть описана уравнением

$$T_p = 1,502T_k - 150,94. \quad (6)$$

Средняя величина отклонения расчета по данной формуле от экспериментальных данных трех работ составляет 1,3%, максимальное отклонение – 4,6%. Для формулы (3) среднее и максимальное отклонение – 1,9% и 5%, для формулы (2) – 5,3% и 13% соответственно.

Также были измерены температуры корпуса при различных частотах вращения, входных и выходных давлениях. На рис. 5 представлен график зависимости температуры корпуса от перепада давлений.

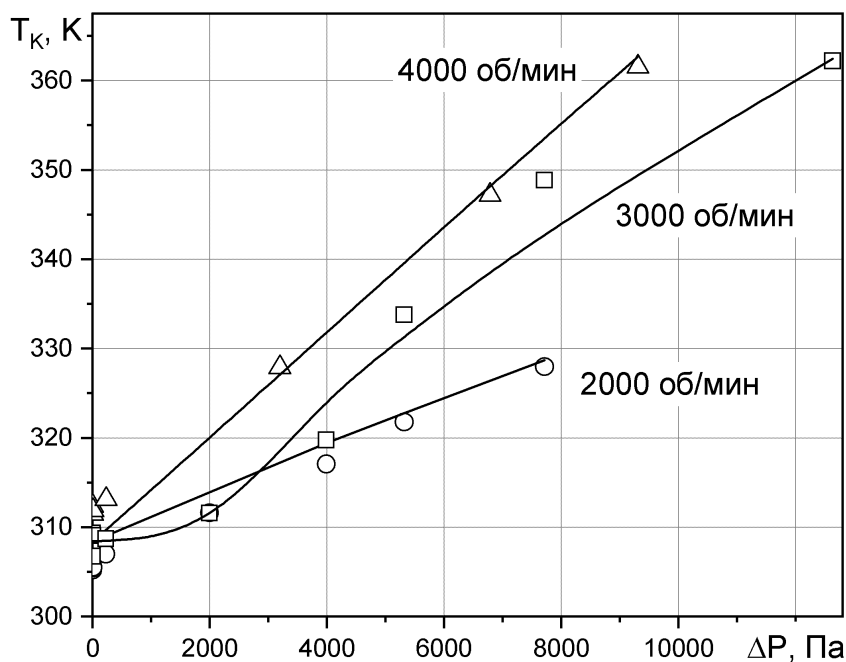


Рис. 5. Зависимость температуры корпуса от перепада давлений и частоты сращения роторов: точки – эксперимент, линии – расчет по формуле (8)

Форму выражения для определения температуры корпуса можно найти из уравнения сохранения энергии

$$W_{\text{ДВ}} + W_{\text{ВХ}} - W_{\text{ВЫХ}} - W_{\text{К}} = 0, \quad (7)$$

где $W_{\text{ДВ}} \approx (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}})V \cdot n$ – мощность потребляемая насосом, которую можно принять примерно равной индикаторной мощности изохорного процесса; V – объем, перемещаемый за 1 оборот ротора; $W_{\text{ВХ}} - W_{\text{ВЫХ}} = m c_p (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}})$ – разность энергий поступающего и выходящего из насоса газа; $m = P_{\text{ВХ}} V n / (RT_{\text{ВХ}})$ – массовый расход перекачиваемого газа; $W_{\text{К}} = \alpha F (T_{\text{К}} - T_{\text{ОКР}})$ – поток теплообмена с окружающей средой; α, F – коэффициент и площадь теплообмена; $T_{\text{ОКР}} \approx T_{\text{ВХ}} \approx 293 \text{ K}$ – температура окружающей среды.

Упростив выражение (7), получим

$$T_{\text{К}} = k_1 + n(k_2 P_{\text{ВЫХ}} - k_3 P_{\text{ВХ}}) / 10^5, \quad (8)$$

Путем анализа экспериментальных данных были получены коэффициенты этого выражения: $k_1 = 308,42$; $k_2 = 9,58$; $k_3 = 11,52$.

Среднее отклонение результатов расчета по формуле (8) от эксперимента составляет 0,7 %, максимальное – 1,6 %. Для результатов расчета по формуле (4): среднее отклонение – 2,4 %, максимальное – 4,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты позволяют расширить диапазоны определения температур рабочих элементов насоса. Полученные уравнения снижают погрешность при определении температур роторов и корпуса машин типа Рутс, работающих как в вакуумном, так и в компрессорном режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаблянян М.Х. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.2. Вакуумные насосы: учеб. пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. - 300 с.
2. Бурмистров А.В. Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.А. Исаев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. - 84 с.
3. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис...докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.
4. Ибраев, А. М. Повышение эффективности работы роторных нагнетателей внешнего сжатия на основе анализа влияния геометрических параметров на их характеристики: дис...канд.техн.наук / А. М. Ибраев; КХТИ. – Казань, 1987. - 208 с.
5. Райков, А.А. Всережимная математическая модель рабочего процесса спирального вакуумного насоса / А.А. Райков, Р.Р. Якупов, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн // Компрессорная техника и пневматика. - 2014, – № 1. - С.18-25.
6. Ибраев А.М., Чекушкин Г.Н. Расчет действительного профиля роторов нагнетателей внешнего сжатия // Известия вузов СССР. Машиностроение, 1985, №10. - С.61-66.
7. Ибраев, А. М. Повышение эффективности работы роторных нагнетателей внешнего сжатия на основе анализа влияния геометрических параметров на их характеристики: дис...канд.техн.наук / А. М. Ибраев; КХТИ. – Казань, 1987. - 208 с.
8. Шарапов, И. И. Разработка методики измерения и расчета параметров процесса теплообмена в шестеренчатом компрессоре с целью повышения точности расчета рабочего процесса: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.04.06: защищена 29.05.09: утв. 18.09.09 / Шарапов И. И. - Казанский химико-технологический ин-т им. С. М. Кирова. - 146 с.
9. Matuzovic M., Rane S., Patel B., Kovacevic A., Tukovic Z. Analysis of conjugate heat transfer in a roots blower and validation with infrared thermography // International Journal of Thermofluids vol.16, 2022.- 100234.
10. Patel B, Rane S, Kovacevic A Infrared-Thermography And Numerical Investigation Of Conjugate Heat Transfer In Roots Blower // 26th International Compressor Engineering Conference, 2022.
11. Patel B, Kovacevic A, Alam M, Charogiannis A Development of State-of-the-art Experimental Technique to Investigate Temperature Field in Leakage Flows of Positive Displacement Machines // International Compressor Engineering Conference, 2021.
12. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. - № 6. - С. 38-40.
13. Патент № 2730769 Российская федерация, МПК F04C 25/02 (2020.02); F04C 18/126 (2020.02). Двухроторная машина: №2020107745: заявл. 19.02.2020: опубл. 25.08.2020 / Исаев А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Райков А.А., Бронштейн М.Д., Капустин Е.Н.; заявитель и патентообладатель АО «Вакууммаш» Бюл. № 24 – 10 с. : ил. - Текст: непосредственный.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Исаев Александр Анатольевич (ORCID: 0000-0001-9068-8555) – аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: isaevaa050391@yandex.ru.

Райков Алексей Александрович (ORCID: 0000-0001-5495-7834) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: alraykov@kstu.ru.

Бурмистров Алексей Васильевич (ORCID: 0000-0001-8612-540X) – доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: burm@kstu.ru).

Саликеев Сергей Иванович (ORCID: 0000-0002-2007-4635) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: salikeev_s@mail.ru).