

УДК 538.9

**РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ВАКУУМНОГО СТЕНДА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ  
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**Д.А. Ашихмин

Научный руководитель: доцент, к.т.н., Д.В. Сиделёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [daa39@tpu.ru](mailto:daa39@tpu.ru)**CALCULATION OF MAGNETIC SYSTEM OF VACUUM INSTALLATION FOR DEPOSITION  
OF PROTECTIVE COATINGS ON INNER WALLS OF CYLINDRICAL PRODUCTS**D.A. Ashikhmin

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD., D.V. Sidelev

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [daa39@tpu.ru](mailto:daa39@tpu.ru)

***Abstract.** In this study was performed the calculation of magnetic system of the cathode assembly of the vacuum installation for deposition of protective coatings on inner pipes surface. The results were compared with data measured using a teslameter. The possibility of creating an arched magnetic field using the studied magnetic system is shown.*

**Введение.** Изделия цилиндрической формы широко применяются в энергетике, химической и нефтегазовой промышленности для транспортировки различного рода веществ. Однако, поскольку транспортируемой средой в трубопроводных системах в основном являются жидкости и газы, существует большой риск коррозионного разрушения цилиндрических изделий изнутри. Один из вариантов защиты от коррозии - нанесение покрытий на их внутреннюю поверхность [1-3]. Крайне эффективно для этого показывают себя магнетронные распылительные системы, где задействованы скрещенные электрическое и магнитное поля, за счёт этого удаётся достичь низкого рабочего давления и высокой скорости осаждения покрытия [4]. Для поисковых и исследовательских работ по нанесению защитных покрытий на внутренние стенки цилиндрических изделий в Томском политехническом университете разрабатывается специальный вакуумный стенд. Ключевым элементом установки является катодный узел, внутри которого расположена магнитная система. Настоящая работа направлена на расчёт магнитной системы вакуумного стенда, сравнение результата моделирования с экспериментальными данными по измерению значения величины индукции магнитного поля натурального катодного узла.

**Экспериментальная часть.** Первоначально было выполнено моделирование магнитной системы вакуумного стенда в программном пакете Comsol Multiphysics (версия 6.1), позволяющем описывать физические процессы путём решения уравнений в частных производных методом конечных элементов [5]. Расчёты проводились на основании уравнения (1):

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  – вектор напряжённости магнитного поля,  $V_m$  – объём магнитопровода.

В данной работе использовались постоянные магниты NdFeB марки N35 с остаточной намагниченностью 1,21 Тл, материал магнитопровода – сталь ст3 с относительной магнитной проницаемостью около 300. В качестве среды моделирования использовался воздух. Геометрия магнитной системы определялась на этапе конструирования катодного узла вакуумного стенда. На втором этапе работы, после изготовления и сборки катодного узла, было выполнено измерение распределения вектора магнитной индукции с помощью тесламетра ТП2-2У. Далее проводился сравнительный анализ расчётов с экспериментальными данными.

**Результаты.** Для сравнения результатов моделирования с экспериментом построены графики зависимости величины индукции магнитного поля от расстояния (рис. 1). Эмпирические кривые имеют схожую тенденцию с расчётными, однако теоретическое значение незначительно отличается от замеренного тесламетром (самое большое отклонение - около 20 мТл). Различия экспериментальных и теоретических значений, вероятно, связаны с тем, что расчётная модель является идеализированной, а линия, вдоль которой велось измерение, могла отклоняться при проведении эксперимента.

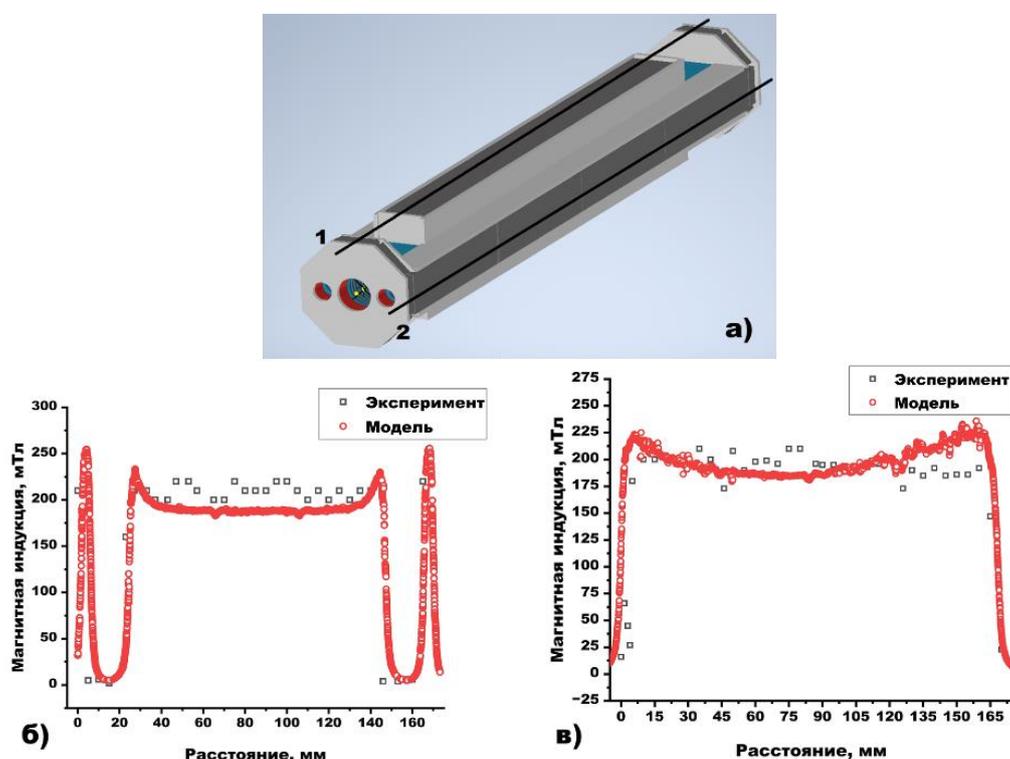


Рис. 1. 3D-модель магнитной системы (а) и сравнительные кривые расчёта и эксперимента (б – распределение магнитного поля вдоль линии 1 на 3D-модели, в – вдоль линии 2 на 3D-модели)

На рис. 2 показано распределение силовых линий магнитного поля в поперечных и продольных сечениях системы катодного узла. Расчётная модель показала, что исследуемая магнитная система позволяет создать арочное магнитное поле. Величина индукции магнитного поля вблизи поверхности магнитов во всех областях за исключением случая поперечного сечения в районе внешней грани магнитной системы не превысила 0,45 Тл. Эта величина достаточна для формирования магнитной ловушки для электронов в системах магнетронного распыления (обычно используется в диапазоне 0,1-0,4 Тл).

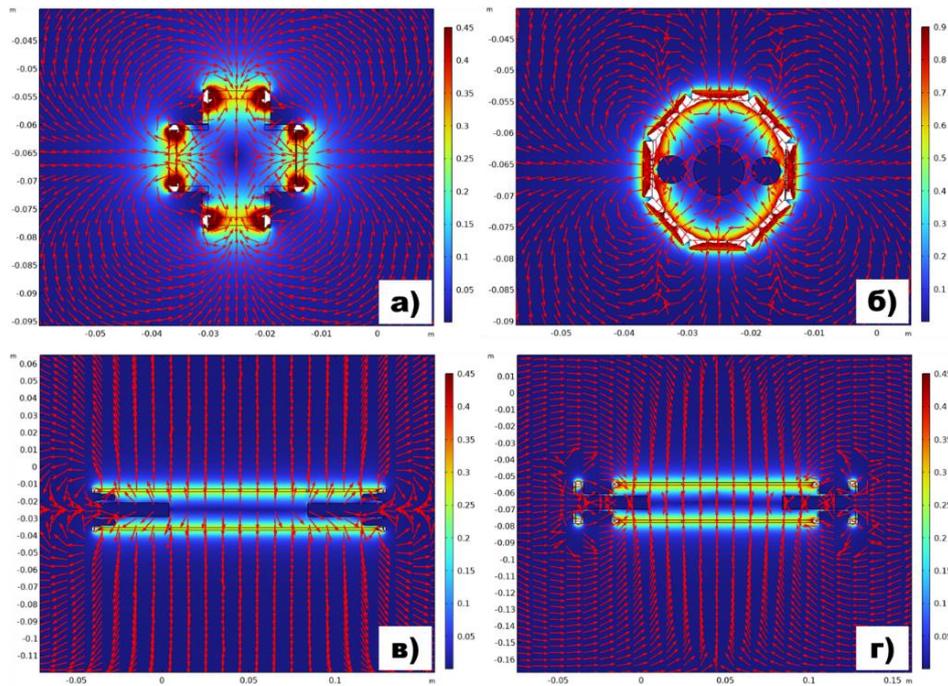


Рис 2. Распределения силовых линий магнитного поля в поперечном (а - в центре и б – вблизи внешней грани) и продольном сечениях (в – проходящем через линию 2, г - через линию 1).

**Заключение.** Выполнено сравнение результатов моделирования магнитной системы катодного узла вакуумного стенда, используемого для нанесения защитных покрытий на внутренние стенки цилиндрических изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Murmu P.P. et al. (2014). A novel radial anode layer ion source for inner wall pipe coating and materials modification—hydrogenated diamond-like carbon coatings from butane gas, Review of Scientific Instruments, V. 85, no. 8, pp. 085118.
2. Samantha de Fátima Magalhães Mariano, Mario Ueda, Rogério Moraes Oliveira, Elver Juan de Dios Mitma Pillaca, Nazir Monteiro dos Santos. (2017). Magnetic-field enhanced plasma immersion ion implantation and deposition (PIII&D) of diamond-like carbon films inside tubes, Surface and Coatings Technology, no. 312, 25, pp. 47-54.
3. Zhengyu Liu, Pingmei Yin, Xubing Wei, Qi Ding, Xueqian Cao, Guangan Zhang, Qunji Xue. (2022). Simultaneous deposition of DLC film on the internal surface of multiple pipes, Diamond and Related Materials, no. 127, pp. 109187.
4. Smita G. Rao, Rui Shu, Robert Boyd, Arnaud le Febvrier, Per Eklund. (2022). Plasma diagnostics and film growth of multicomponent nitride thin films with magnetic-field-assisted-dc magnetron sputtering, Vacuum, no. 204, pp. 111331.
5. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.