

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ ДЕТАЛИ ПРОЕКТА ИТЭР**

А.И. Беликов, О.Э. Алиханов, Р.И. Зайнуллин, А.Р. Мишкинис

## **АННОТАЦИЯ**

Представлена методика выбора оптимальной компоновки технологической системы вакуумной установки магнетронного нанесения покрытий на изделия сложной формы. Для расчета скорости осаждения на участки поверхности изделия и оценки равномерности толщины покрытия на деталях использовалась разработанная авторами программа моделирования процесса магнетронного нанесения покрытий «TFDepositionR». В качестве примера приведены результаты моделирования для деталей с внешней и внутренней резьбовой поверхностью. Выбор оптимальной компоновки осуществлялся на основе таких критериев, как обеспечение требуемых скорости осаждения и равномерности покрытия.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МАГНЕТРОННОЕ НАНЕСЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ

## **SIMULATION OF THE COATING DEPOSITION PROCESS ON A VARIOUS PARTS OF THE ITER PROJECT**

A.I. Belikov, O.E. Alihanov, R.I. Zainullin, A.R. Mishkinis

## **ABSTRACT**

A method for calculating the optimal geometric parameters of a vacuum technological system for the coatings magnetron deposition of products of complex shape is presented. To calculate the deposition rates and coating thickness uniformity on parts, was used the “TFDepositionR” program for simulating the magnetron coating process developed by the authors. Simulation results are presented for parts with external and internal threaded surfaces. The selection of the optimal layout was carried out based on criteria such as ensuring the required deposition rate and thickness uniformity.

## **KEYWORDS**

COMPUTER SIMULATION, MAGNETRON SPUTTERING, COATING

## **ВВЕДЕНИЕ**

Магнетронное нанесение покрытий широко применяется в различных областях промышленности, номенклатура изделий расширяется, возникают задачи, требующие создания технологических систем под новые объекты сложной формы. В условиях нарастающей конкуренции разрабатывать новое оборудование и внедрять новые технологические решения за счет модернизации внутрикамерных компоновок оборудования магнетронного нанесения покрытий необходимо в кратчайшие сроки. Использование предварительного компьютерного моделирования при разработке технологической системы установок магнетронного нанесения позволяет ускорить процесс выбора оптимального компоновочного решения.

В рамках решения такого рода задач, для магнетронного нанесения покрытий на детали сложной геометрической конфигурации, в рамках работ по реализации

международного проекта ИТЭР, возникла необходимость оперативной разработки технологической системы оборудования. Система нанесения покрытий должна обеспечивать требуемые толщину и равномерность покрытия, а также необходимую для получения качественного покрытия скорость осаждения. Кроме того, немаловажным фактором являлось обеспечение высокой производительности оборудования при учете широкой номенклатуры изделий и объема выпуска, соответствующего критерию мелкосерийного производства.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предварительно, с учетом имеющегося опыта эксплуатации оборудования и наличия ограничений в части формы и размеров технологической камеры, прорабатывались варианты размещения деталей и магнетронных распылительных систем (МРС) внутри камеры. Далее, в диапазонах возможного варьирования размеров и углов взаимного расположения деталей и МРС проводился расчет скорости осаждения покрытия на поверхности детали. В расчетах использовалась авторская программа «TFDepositionR», обеспечивающая моделирование процесса осаждения при распылении мишени на поверхность 3D-объекта. [1]

Например, для детали типа «болт», интерфейс моделирования к схеме процесса осаждения покрытия из двух МРС, которые представлены кольцевыми областями распыления мишеней, расположенными под углом к оси детали, выглядит так, как показано на рис.1а. На рис.1б приведены результаты расчета в виде цветовой карты распределения толщины на поверхности витков резьбы. Варьируя углами наклона мишеней МРС и расстоянием между ними и деталью, можно получить набор вариантов с распределением толщин покрытия и, на их основе, значения равномерности толщины и скорости осаждения для разных геометрических компоновок.

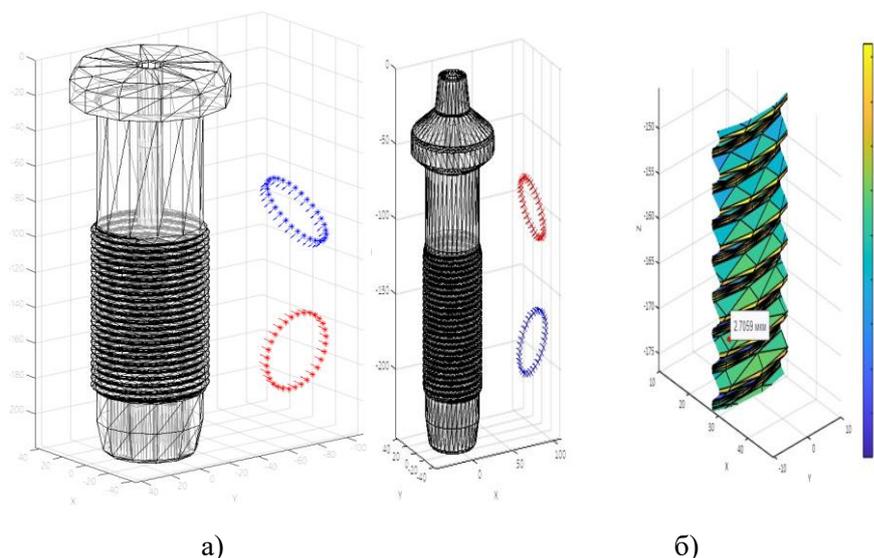


Рис. 1. Элементы интерфейса программы «TFDepositionR»: расчетная 3D-модель (а) и цветовая карта распределения толщины покрытия на поверхности резьбы болта (б)

Алгоритм выполнения расчетов включал в себя следующие этапы:

1. Создание 3D-модели объекта моделирования (детали) с помощью САД-системы и представление объекта в полигональном виде для загрузки в программу.

2. Задание параметров распыления мишени МРС. Функционал программы «TFDepositionR» позволяет задать материал мишени, ее плотность, коэффициент распыления, площадь и дискретность зоны эрозии, рабочий газ, ток и напряжение разряда (рис. 2).
3. Указание координат взаимного расположения мишеней и детали в пространстве. Есть возможность использования нескольких позиций мишеней для симуляции вращения изделия с задаваемой дискретностью (рис. 3)
4. Вывод результатов расчета в виде цветовой карты распределения толщины покрытия по поверхности объекта моделирования, а также статистических данных по толщине и параметрам осаждения (рис. 4).
5. Формирование итоговой таблицы с результатами расчета для последующего анализа, сравнения и выбора оптимальной компоновки, из соображений требуемых равномерности и скорости осаждения покрытия.

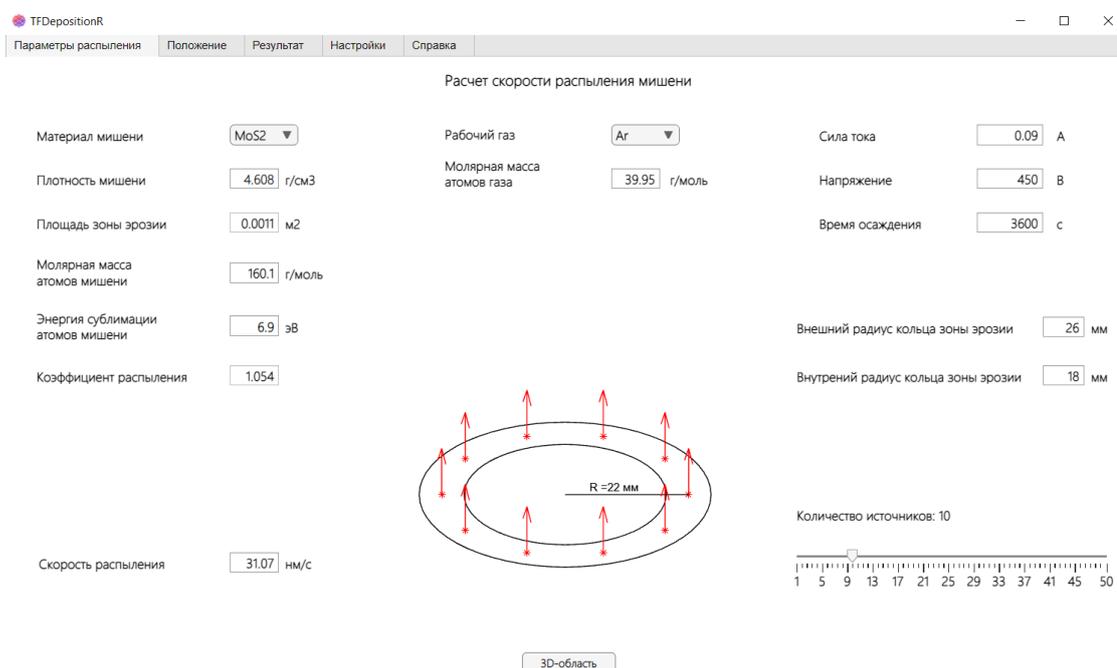


Рис. 2. Окно программы для задания параметров распыления мишени

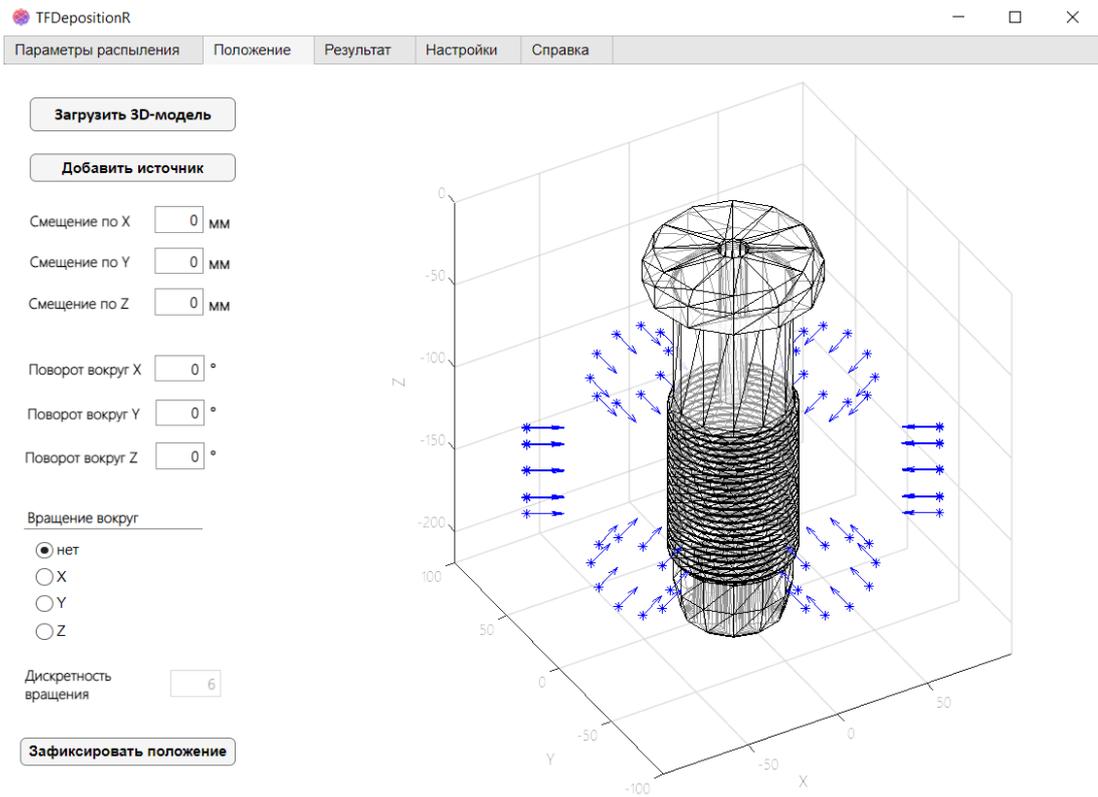


Рис. 3. Окно интерфейса для указания расположения мишеней МРС для тел вращения

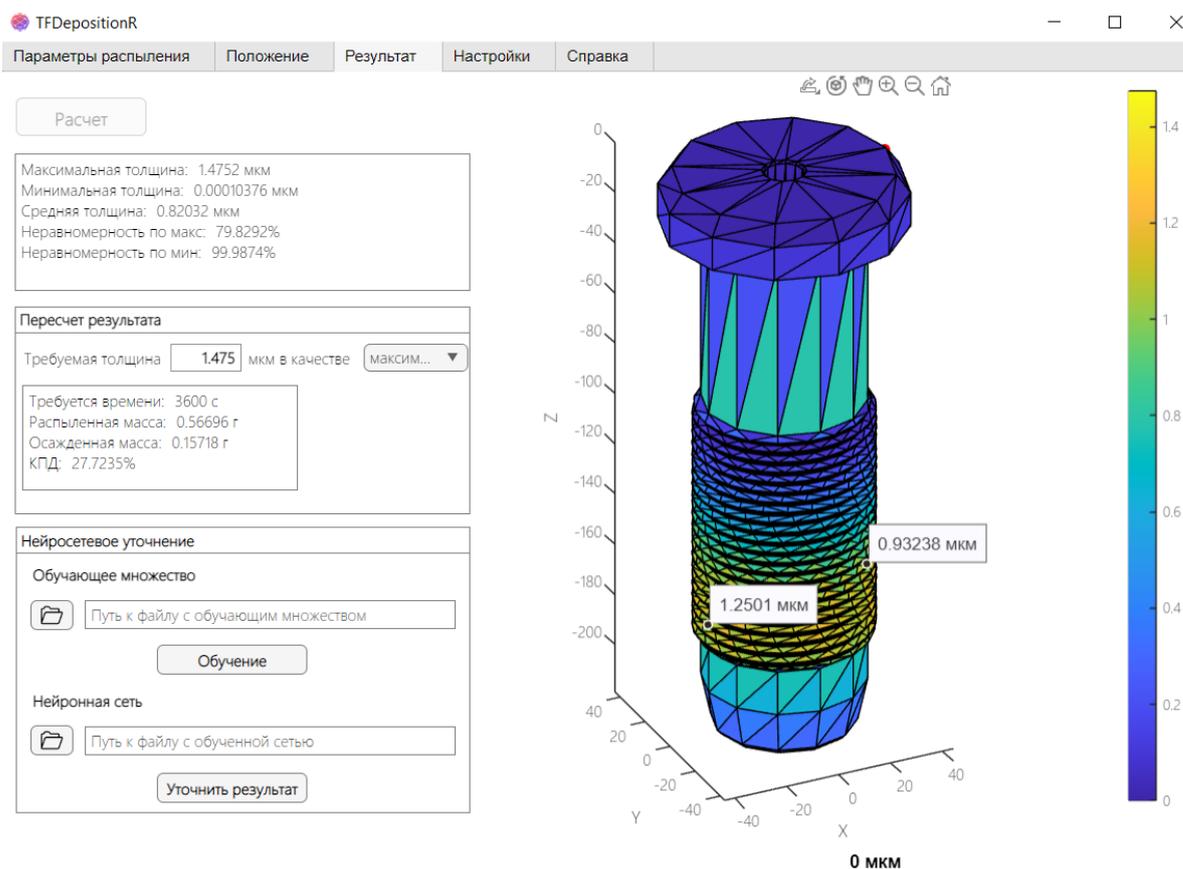


Рис. 4. Окно с результатами моделирования

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве одного из объектов моделирования использовалась деталь – крупногабаритный болт с внешней резьбой М64. Основной задачей расчета являлось определение оптимальной геометрической компоновки, в которой два магнетрона могут быть расположены на некотором расстоянии от детали, а также наклонены по отношению к оси изделия. Это связано с необходимостью нанесения покрытия, как на резьбовую поверхность, так и на опорную поверхность под шляпкой болта. Ввиду специфики используемых мишеней в системе могут использоваться МРС с планарной дисковой мишенью. Расчетная модель представлена на рисунке 5. Варьируемыми параметрами для расчетов выступали расстояния от мишеней МРС до детали по горизонтальной и вертикальной координатам ( $l$  и  $h$ ), а также угол поворота магнетронов вокруг горизонтальной оси ( $\alpha$ ). Очевидно, что с увеличением расстояния  $l$  будет наблюдаться снижение скорости осаждения и возможное повышение равномерности покрытия.

В результате моделирования и выполнения расчетов с варьированием расстояния  $l$  до мишени и угла поворота магнетронов  $\alpha$ , при фиксированном параметре  $h$  и расстоянии между магнетронами  $2 \times h_m$  были получены следующие зависимости для средней скорости осаждения и неравномерности покрытия (рис. 6). На основании полученных результатов было выявлено, что для расстояния  $l = 90-95$  мм и угле  $\alpha \sim 60-75^\circ$  наблюдается наилучшее соотношение скорости осаждения и равномерности покрытия на поверхностях болта.

Другим случаем, когда невозможно решить задачу аналитически, и необходимо применять компьютерное моделирование, является задача выбора геометрических

параметров компоновки для схемы «магнетрон - гайка». В расчетной модели осаждения покрытия на внутреннюю резьбу гайки М64 (рис. 7) используется расположенная внутри отверстия цилиндрическая вставка, которая необходима для обеспечения процесса нанесения покрытия. В этой схеме магнетрон и гайка соосны, варьируемыми параметрами выступали расстояние от мишени до гайки ( $l$ ) и диаметр цилиндрической вставки ( $d$ ).

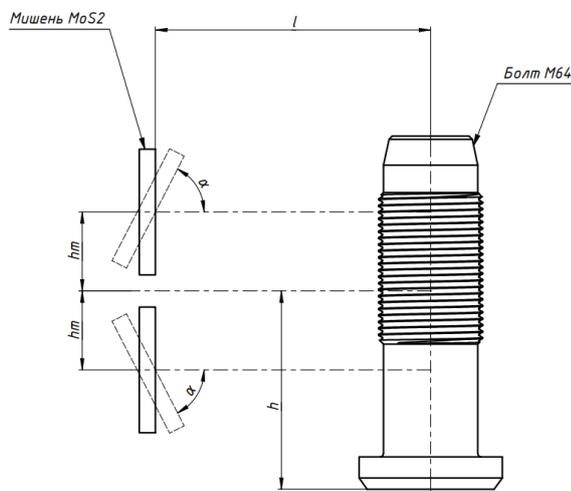
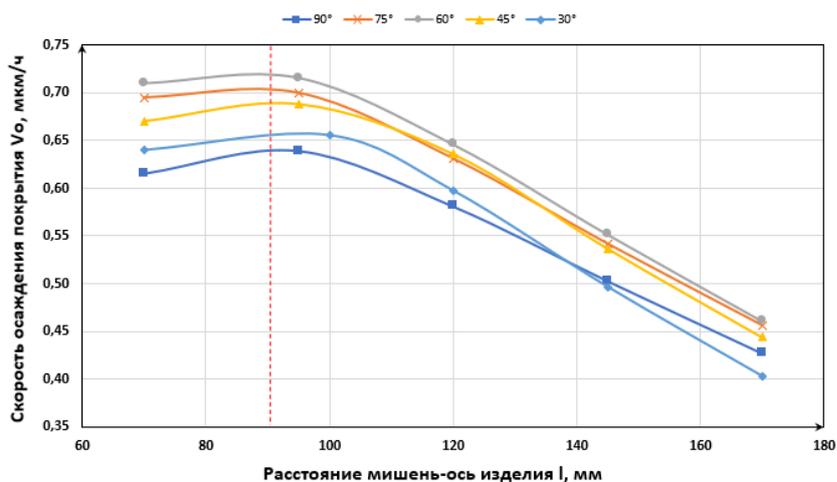
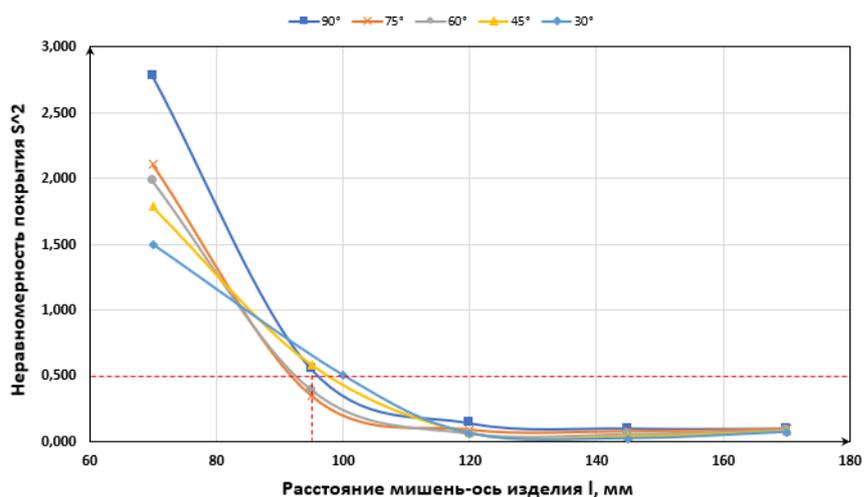


Рис. 5. Эскиз расчетной модели «два магнетрона - болт»



а)



б)

Рис. 6. Зависимость скорости осаждения (а) и неравномерности покрытия (б) от расстояния  $l$  и угла поворота  $\alpha$  при фиксированном значении  $h$

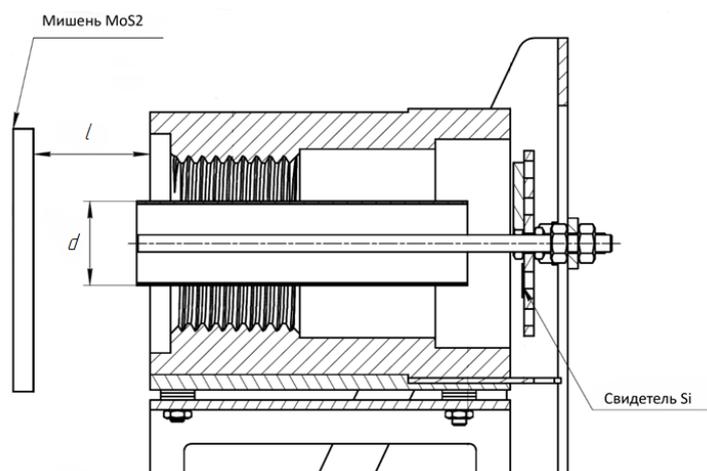
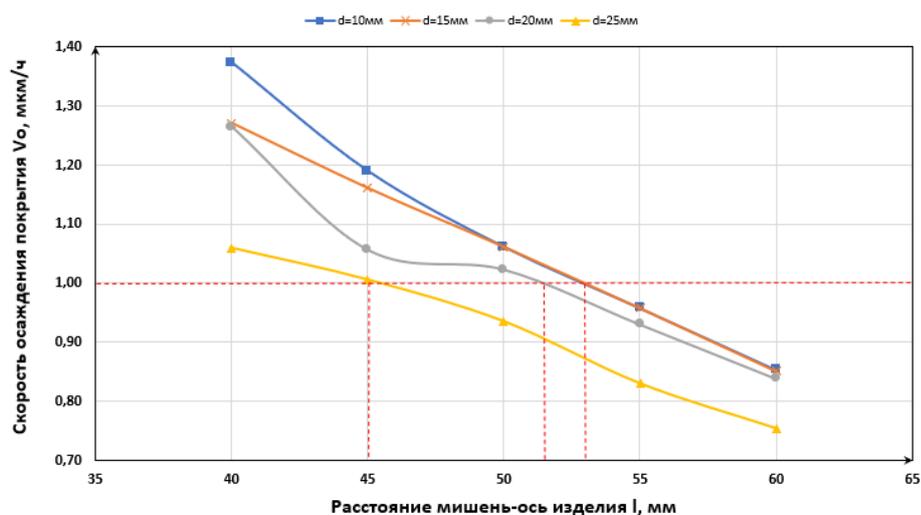
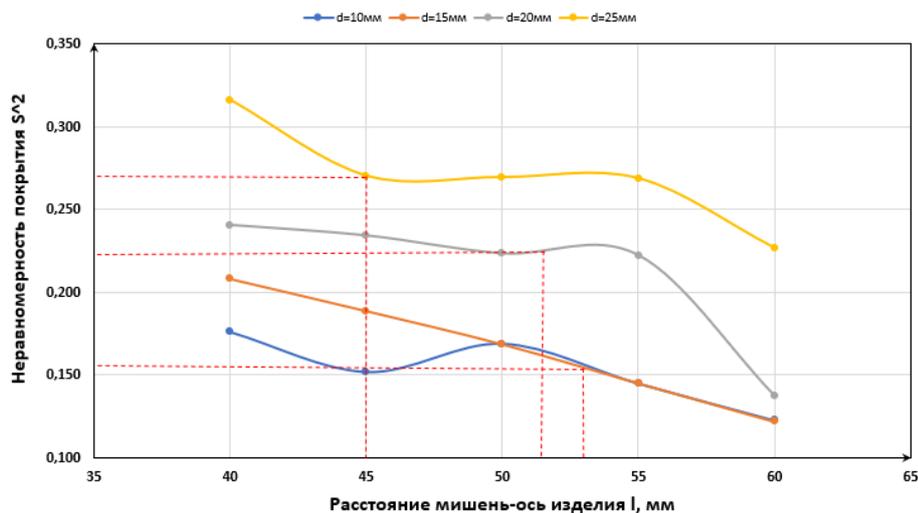


Рис. 7. Эскиз расчетной модели «магнетрон - гайка»



а)



б)

Рис. 8. Зависимость скорости осаждения (а) и неравномерности покрытия (б) от расстояния  $l$  и диаметра  $d$

С использованием результатов моделирования были получены зависимости средней скорости осаждения и неравномерности покрытия (на поверхности заданной части профиля витка резьбы) от варьируемых параметров  $l$  и  $d$  (рис. 8).

Результаты свидетельствуют о том, что вставки диаметром более 15 мм существенно ограничивают скорость осаждения покрытия. А для диаметров вставки 15 мм и менее, практически, нивелируется их влияние на скорость осаждения при расстояниях  $l$  более 50 мм. Таким образом, для обеспечения оптимальных и заданных параметров покрытия при нанесении на гайку, следует выдерживать расстояние  $l$  в диапазоне 53-55 мм от магнетрона, а диаметр цилиндрической вставки выбрать равным 15 мм. Также следует отметить, что для данной схемы зависимость неравномерности покрытия от расстояния  $l$  имеет существенно нелинейный характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в работе подход с использованием компьютерного моделирования обеспечивает оперативное решение задач по разработке и выбору оптимальных компоновок технологических систем установок магнетронного нанесения покрытий на изделия сложной геометрической формы, когда использование аналитических подходов невозможно, а компоновочное решение не очевидно.

Разработанные компоновки легли в основу промышленного решения и были применены при создании технологической системы установки AlfaM-200. На этапе отработки процессов нанесения на представленные изделия, в ходе подготовки к промышленному внедрению системы, была проведена экспериментальная апробация, которая подтвердила результаты моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свидетельство 2022685121. Программа моделирования магнетронного нанесения тонких пленок на детали сложной геометрии «TFDepositionR»: программа для ЭВМ / А.И. Беликов, О.Э.Алиханов (RU). № 2022684191; заявл. 06.12.22; опубл. 21.12.2022.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Беликов Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0003-1036-9058). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: belikov@bmstu.ru

Алиханов Орхан Эльдар Оглы – магистр (ORCID: 0000-0002-3218-4962). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: orhan.alihanov@gmail.com

Зайнуллин Рустам Ильшатovich – магистр (ORCID: 0009-0009-3022-1369). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: rustam.zainullin@bk.ru

Мишкинис Андрей Романович – бакалавр (ORCID: 0009-0005-1663-0482). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: andreimishkinis@yandex.ru