

Литература

1. Cançado, L.; Takai, K.; Enoki, T.; Endo, M.; Kim, Y.A.; Mizusaki, H.; Jorio, A.; Coelho, L.N.; Magalhães-Paniago, R.; Pimenta, M.A. Appl. Phys. Lett. 2006, 88, 163106, DOI: 10.1063/1.2196057.
2. Novoselov, K.S.; Geim, A.K.; Morozov, S.V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S.V.; Grigorieva, I.V.; Firsov, A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science 2004, 306, 666–669, DOI: 10.1126/science.1102896.
3. Woehrl, N.; Ochedowski, O.; Gottlieb, S.; Shibasaki, K.; Schulz, S. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of graphene on copper substrates. AIP Advances 2014, 4, 047128, DOI: 10.1063/1.4873157.
4. Lee, H.-C. Review of inductively coupled plasmas: nano-applications and bistable hysteresis physics. Appl. Phys. Rev. 2018, 5, 011108, DOI: 10.1063/1.5012001.
5. Muhl, S.; Méndez, J.M.A Review of the preparation of carbon nitride film. Diamond Relat. Mater. 1999, 8, 1809-1830.
6. Chakradhar, A.; Sivapragasam, N.; Nayakasinghe, M.T.; Burghaus, U. Support effects in the adsorption of water on CVD graphene: an ultra-high vacuum adsorption study. Chem. Commun. 2015, 51, 11463-11466, DOI: 10.1039/C5CC03827H.

## Современные инженеринговые инструменты разработки новых образцов вакуумного технологического оборудования

*Я.О. Желонкин, А.А. Бикташев, С.И. Саликеев, И.А. Сунгатуллин, О.В. Желонкин*  
Казань, ООО «ФЕРРИ ВАТТ», ул. А. Кутуя, д. 159, zhelonkin.ya@gmail.com

*Представлены используемые в компании средства и методы разработки новых образцов вакуумного технологического оборудования. Приведено описание используемых проектных инструментов и полученных результатов на примерах разработки вакуумного плавильного, высокочастотного (ВЧ) плазменного и вакуумного испытательного оборудования.*

*Modern engineering tools for the development of new samples of vacuum process equipment. Ya. Zhelonkin, A. Biktashev, S. Salikeev, I. Sungatullin, O. Zhelonkin. The tools and methods used in the company to develop new samples of vacuum process equipment are presented. A description of the design tools being used and the obtained results are given as the examples of the development of a vacuum melting, radio-frequency (RF) plasma and vacuum test equipment.*

### Введение

Развитие новых технологий требует новых современных подходов при разработке, изготовлении и вводе в эксплуатацию нестандартных образцов вакуумного технологического оборудования в короткие сроки. Современными инструментами для динамичного решения новых проектных задач выступают компьютерные средства разработки, такие как программные пакеты для САД проектирования и САЕ моделирования, так и экспериментальная апробация новых конструктивных и технологических решений, закладываемых при создании нового оборудования. Компания ООО «Ферри Ватт», в стремлении осваивать рынки нового оборудования и технологий, активно внедряет на всех стадиях разработки новых изделий использование программных пакетов для 3D проектирования, моделирования физических процессов, прототипирование и макетирование и экспериментальные исследования, некоторые из которых представлены в настоящей статье с описанием целевых проектов применения и полученных результатов.

### Описание проектов и задач

Ключевым проектом реализованным в 2018 г. компанией является разработка и изготовление Вакуумной плавильной печи ВАТТ-1300ВИП-С. Установка предназначена для получения в вакууме инновационных алюминиевых и магниевых сплавов в индукционной печи и последующим разливом в муфельной печи, с возможностью добавления в расплав наномодификаторов и ультразвуковой обработки расплава как в процессе плавки при легировании, так и перед застыванием при разливе в формы [1]. Помимо конструкторских решений в разработке узлов оборудования, на проектных этапах успешно решены новые для компании задачи, такие как расчет и выбор средств вакуумной откачки системы с потоком испарения паров металла, в том числе летучих элементов легирующих добавок (Zn, Mg и др.), прочностные расчеты теплонагруженной многослойной конструкции вакуумной камеры, разработка технологии подготовки ввода наномодификаторов в вакуум с равномерным размешиванием в расплаве. Проект успешно реализован и внедрен в опытную эксплуатацию на предприятии Заказчика.

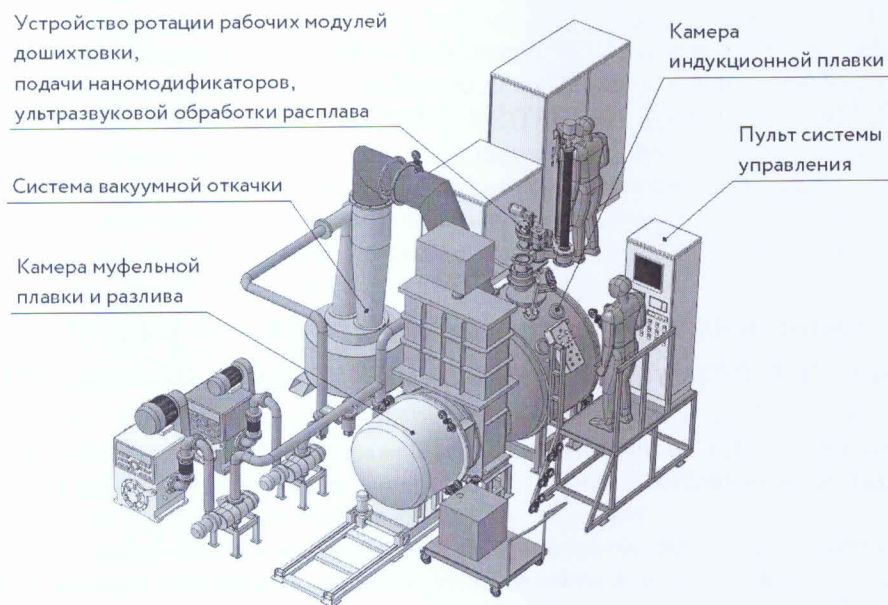


Рис. 1. Вакуумная индукционная плавильная печь ВАТТ-1300ВИП-С.

Проект исследования обработки материалов в ИСР источниках пониженного давления. При реализации проекта ставились задачи сходимости результатов моделирования газодинамических потоков ламинарного режима течения в вакуумной камере с экспериментом и отработка методик измерения параметров индукционной высокочастотной плазмы, а именно концентрации и энергии электронов, измеренных и рассчитанных с использованием радиационно-столкновительной модели оптического эмиссионного спектрального анализа. Исследования проводились совместно с ФГБОУ ВО «КНИТУ» и ООО «ПИ ВИ ЭС». Схемы экспериментальных ИСР источников представлены на рисунках 2а и 2б, соответственно. Цилиндрический ИСР источник представляет собой кварцевую водоохлаждаемую трубку внутренним диаметром 27 мм и длиной 250 мм с индуктором, внутренний диаметр и высота которого 60 мм, 2,5 витка. Плоская ИСР схема выполнена с использованием колбы из силикатного стекла внутренним диаметром 150 мм с размещенным снаружи со стороны дна плоской катушки внешним диаметром 80 мм, 2,5 витка. Электропитание ВЧ плазматронов осуществляется от ВЧ генератора мощностью до 3 кВт, частотой 13,56 МГц. Экспериментальные исследования проведены на базе установок УВН-71 и RFPTPM600, средства откачки – вакуумный агрегат АВР-150, состоящий из форвакуумного насоса АВЗ-20Д и бустерного ДВН-150, вакуумметрия – датчик мембранный емкостной MKS 627В, подача рабочего газа, аргона, осуществляется через регулятор массового расхода PPG-10-360. Диапазон рабочих давлений в эксперименте 1-20 Па.

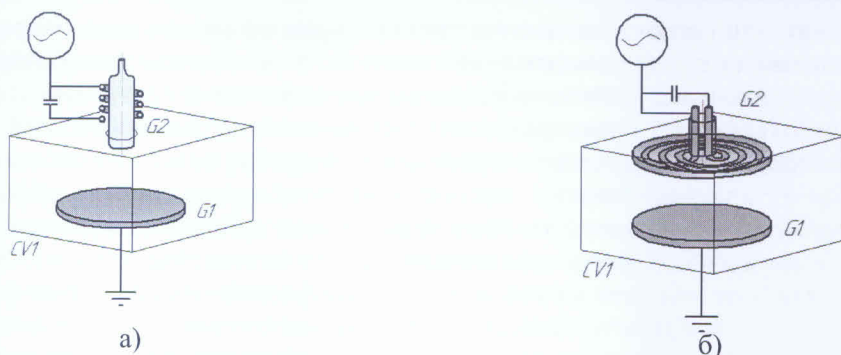


Рис. 2. Схемы цилиндрического ИСП источника (а) и плоского ИСП источника (б).  
CV1 – вакуумная камера, G1 – земляной электрод/держатель образцов, G2 – ИСП источник.

Проект Системы теплозащиты термобарокамеры (рис. 3) для проведения вакуумных тепловых испытаний перспективных авиационных комплексов предполагает модернизацию установки на базе установки КТВВ-8000 с дополнительными алюминиевыми отсеками суммарного объема 25 м<sup>3</sup>. При реализации проекта решалась задача теплового нестационарного расчета толщин теплоизоляции для обеспечения установленного цикла нагрева испытуемого изделия в остаточных парах газовой среды до 700 °С.

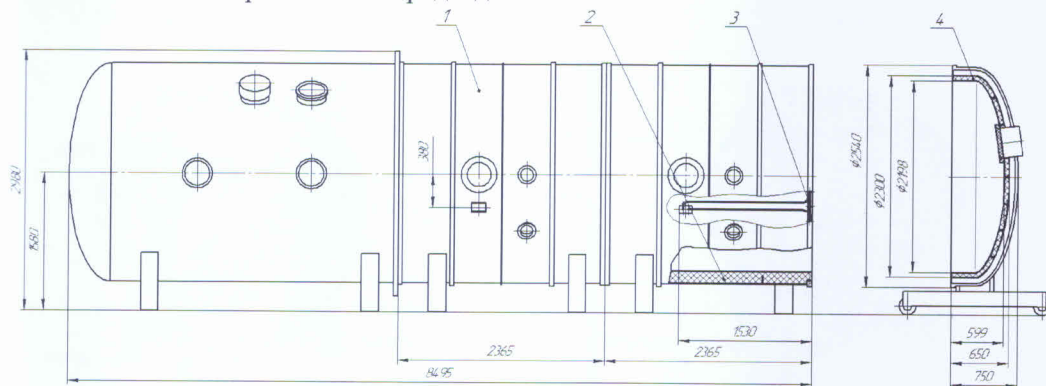


Рис. 3. Система теплоизоляции ТБК.

1 - стенд проведения тепловых испытаний, 2 – теплоизоляция дополнительных отсеков камеры, 3 - устройство охлаждения фланца, 4 – теплоизоляция крышки камеры.

### Инструменты и методики решения проектных задач

Для решения проектных задач, представленных в настоящей работе, используются компьютерные средства автоматического проектирования (САПР) различного уровня и назначения. При проектировании конструкций деталей и узлов применяется отечественный САД пакет Компас 3D. Для эскизной проработки конструкторских решений оборудования проводятся проектные расчеты, позволяющие первично определять формы и характеристики деталей и узлов. Проектные расчеты, как правило, проводятся с использованием аналитических методик или эмпирических рекомендаций, в зависимости от специфики физического процесса и задачи. Так, при первичном выборе средств вакуумной откачки в компании разработана и внедрена апробированная методика расчета требуемых значений эффективной быстроты откачки и автоматического выбора рекомендуемых насосов. После эскизной проработки конструкций проводятся поверочные расчеты путем моделирования физических процессов с использованием мультифизического САЕ пакета Comsol.

При исследованиях оптических спектров излучения плазмы (OES) использован спектрометр Ocean Optics USB4000-VIS-NIR с коллиматорной оптикой Plasus PL-25-12-00 в диапазоне 345 - 1041 нм и разрешающей способностью 1,5 нм. В OES параметры плазмы извлекаются из спектра излучения, для низкотемпературной плазмы используется, так называемая, радиационно-столкновительная модель (CRM, англ. collisional-radiativemodel), которая состоит из набора кинетических уравнений, описывающих баланс населения и

процессов депопуляции возбужденных электронных уровней атомов плазмаобразующего газа. Из CRM, интенсивности спектральных линий могут быть рассчитаны как функции параметров плазмы, которые затем могут быть определены численно по спектру путем сопоставления расчетных значений с измеренными значениями интенсивностей. Методика, последовательность построения модели и результаты подробно описаны в работах [2-4].

При проектировании нового нестандартного оборудования и разработке систем автоматического управления нашей компанией реализован принцип унификации форм отчетов о работе оборудования и форм ввода параметров для автоматического управления. Таким образом, при отработке режимов в ручном управлении формируются отчетные файлы, которые затем могут быть исходными данными для автоматического повторения полученного эталонного цикла. Такой подход позволяет делать оборудование универсальным с точки зрения управления различными режимами обработки изделий различной номенклатуры и сокращать цикл от настройки технологических режимов до целевого производственного процесса.

#### Результаты

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов механической прочности камеры Вакуумной плавильной печи ВАТТ-1300ВИП-С. Проектирование конструкции с использованием проектно-проверочных расчетов позволило оптимизировать толщины стенок и конечную массу камеры. Расчетные результаты подтверждены надежностью изготовленного оборудования.

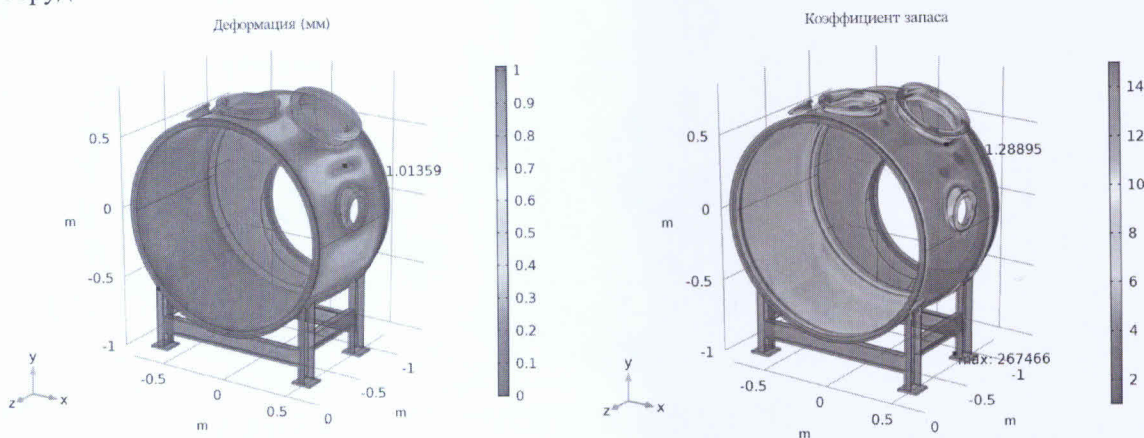


Рис. 4. Результаты проверочных расчетов механической прочности вакуумной камеры.

Результат проверочных расчетов и моделирования свободномолекулярного режима течения на примере плавильной установки представлен на рис. 5. При испытаниях оборудования значения рабочего давления подтверждается с учетом допустимой погрешности.

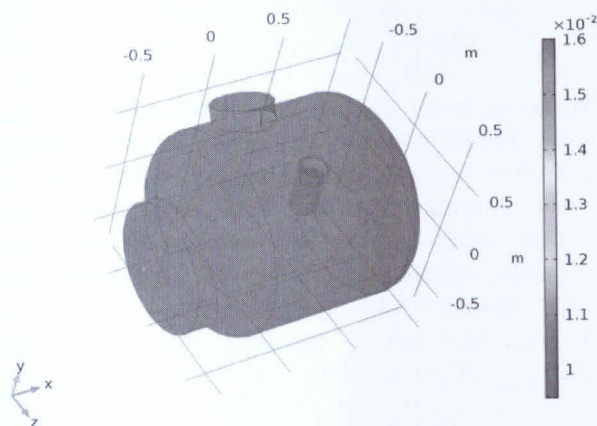


Рис. 5. Результат расчета распределения давления (Па) в вакуумной камере в динамическом режиме работы откачной системы и газового потока испаренных паров алюминия при плавке.

Результаты моделирования ламинарного режима течения на примере установок ВЧ плазменной обработки и сравнение с результатами эксперимента, представленные на рисунке 6, с высокой точностью аппроксимируются прямой. Тангенс угла наклона экспериментальных и расчетных линий отличается, что вызывает рост погрешности при увеличении давления в системе, однако погрешность расчетов в рассматриваемом интервале давлений 1-100 Па не превышает 15%, что является приемлемым при проектировании и прогнозировании технологических процессов. Причины расхождений можно объяснить наличием местных сопротивлений магистрали, значительно снижающих проводимость, которая зависит от диаметра в третьей степени. Результаты расчета с использованием математической модели свободномолекулярного режима течения приведены для того, чтобы визуально показать её неприменимость при указанных давлениях [5].

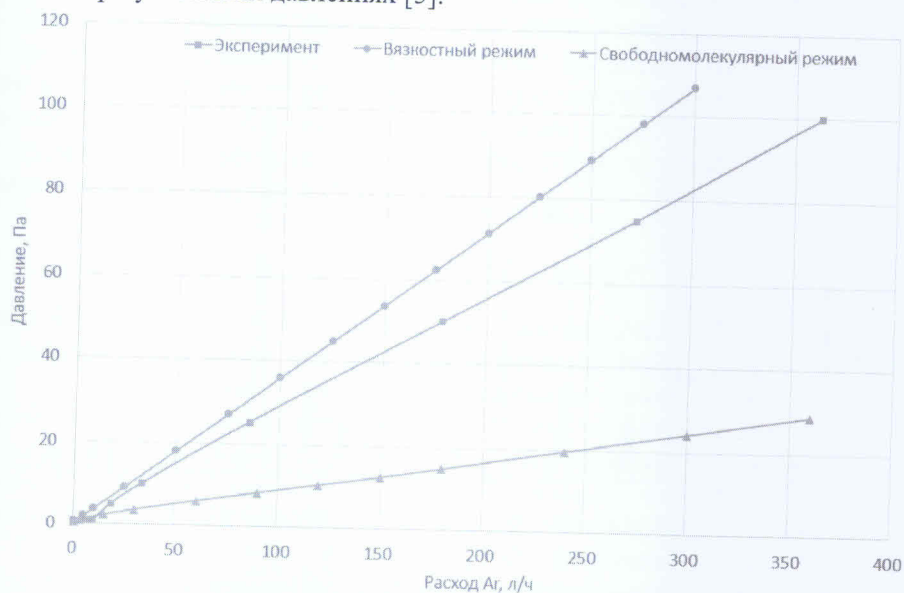


Рис. 6. График зависимости давления в камере от расхода Аргона в диапазоне 1-100 Па (ламинарный режим течения).

Результаты примера расчета нестационарной задачи теплопередачи в вакуумной камере ТБК представлены на рис. 7. Расчет проводился с целью определения оптимальной толщины теплоизоляции, при которой на внешней поверхности камеры температура не превысит 80 °С в течении заданного времени цикла испытаний.

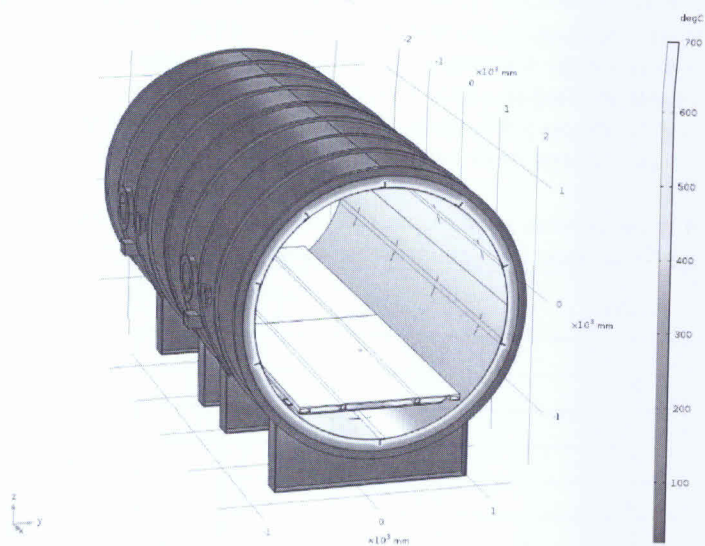


Рис. 7. Распределение температуры в конструкции вакуумного стенда ТБК.

Качественные результаты спектральных исследований плоского и цилиндрического источников ИСР разряда в виде нормированных спектров представлены на рис. 8. Анализ спектров показал, что цилиндрический ИСР обладает более высокой энергией электронов, что объясняется более высокими значениями индукции магнитных полей в геометрически более плотной индукционной катушке по сравнению с плоской схемой, а также более высокими значениями локального давления в проточном плазматроне. В то же время, плоский ИСР источник позволяет создавать более плотную плазму, что объясняется большими габаритами пространства для горения разряда, соответственно фактор диффузии и гибели заряженных частиц на стенках камеры значительно ниже. Полученные результаты для различных способов возбуждения индукционного разряда позволяют учитывать особенности той или иной схемы исполнения при их применимости в различных технологических задачах.

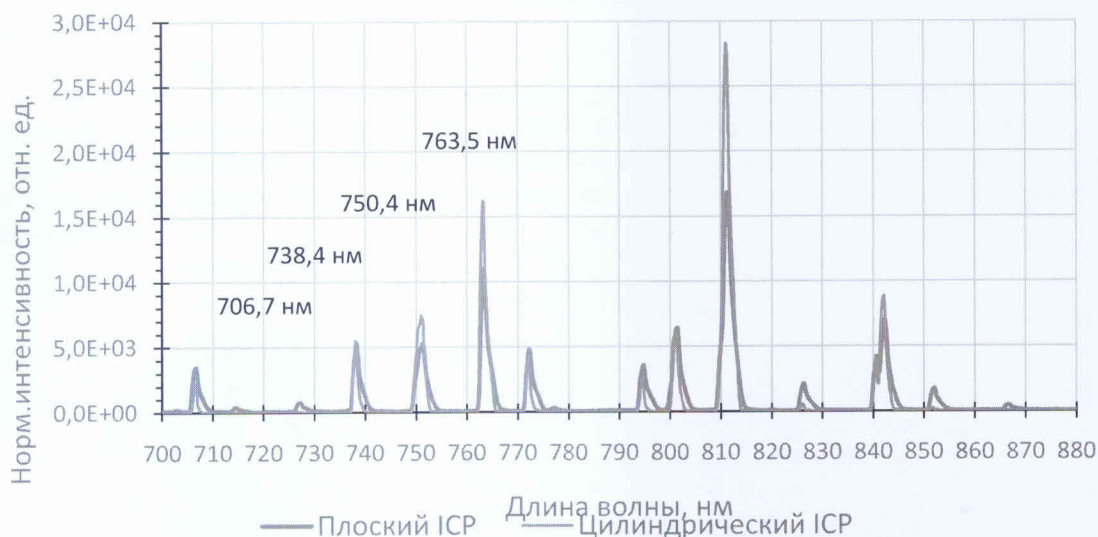


Рис.8. Нормированные оптические спектры излучения плоского и цилиндрического ИСР разряда Ar при давлении 10 Па, мощности ВЧ 100 Вт.

В таблице 1 представлены численные результаты определения температуры и плотности электронов в плазме плоского ИСР источника на основе минимизации разности относительных интенсивностей спектральных линий Ag, заданных экспериментом и рассчитанных по CRM. Методика удобна отсутствием необходимости ручной обработки как входных, так и выходных данных, но требует написания сложного расчётного кода и больших вычислительных мощностей. Сравнение параметров плазмы OES с результатами двойной зондовой диагностики показали, что концентрация электронов, определенная оптическим методом, в среднем ниже на 24%, чем плотность, определяемая зондом. Оба метода дают аналогичные значения электронной температуры с максимальной разницей, не превышающей 10%.

Таблица 1 – Результаты расчёта характеристик плазмы с помощью CRM и измерения, полученные с зонда Ленгмюра (R – расстояние от оси кварцевой колбы)

Давление, Па	R, см	$T_e^{OES}$ , эВ	$T_e^{probe}$ , эВ	$n_e^{OES}$ , $m^{-3}$	$n_e^{probe}$ , $m^{-3}$
1	0	4.1	3.9	$3 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{15}$
1	5	3.9	3.9	$1.6 \cdot 10^{15}$	$1.1 \cdot 10^{15}$
5	0	4.0	4.0	$5.2 \cdot 10^{15}$	$4.1 \cdot 10^{15}$
5	5	3.8	3.9	$2.8 \cdot 10^{15}$	$2.3 \cdot 10^{15}$
20	0	3.7	3.8	$6.0 \cdot 10^{16}$	$5.7 \cdot 10^{16}$
20	5	3.7	3.8	$3.5 \cdot 10^{16}$	$2.1 \cdot 10^{16}$

### **Заключение**

Представленный опыт использования современных средств инжиниринга при создании нестандартного вакуумного технологического оборудования позволяет существенно сократить время цикла вывода нового оборудования от разработки до ввода в эксплуатацию и получать заданные функциональные и технологические требования с минимальными производственными и проектными издержками. Универсальность представленных инструментов проектирования наряду с богатым многолетним опытом команды разработчиков ООО «ФЕРРИ ВАТТ» позволяет выполнять НИОКРы по разработке нестандартного вакуумного технологического оборудования в различных областях вакуумной техники, таких как вакуумное напыление (PVD, CVD, ALD, газотермическое плазменное напыление), RFPT (от англ. RadioFrequencyPlasmaTreatment) технологии обработки в высокочастотной плазме (процессы травления, процессы плазмохимии и плазмофизики), вакуумное оборудование пропитки (формование композитных материалов, пропитка трансформаторов, изделий порошковой и литейной металлургии), специальное оборудование плавки (зонная плавка монокристаллов, литейное оборудование), вакуумные печи, испытательное оборудование (имитация космического пространства, испытания ЭРД), а также других новых задач отечественной и мировой индустрии.

### **Литература**

1. Желонкин Я.О., Муртазин Р.Н., Саликеев С.И., Бикташев А.А., Пальцев А.В., Сунгатуллин И.А. Разработка технологии изготовления высокопрочных отливок из алюминиевых сплавов с повышенными физико-механическими свойствами с использованием нанопорошков для корпусов автоматики и систем управления перспективных изделий ракетно-космической техники // *Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»)*. Ч. 2. – Казань, 2017, - С. 31-34.
2. Азамат Р. Гиззатуллин, Я.О. Желонкин, Э.Ф. Вознесенский, Азат Р. Гиззатуллин. Применение столкновительно-излучательной модели плазмы аргона для исследования индукционного ВЧ разряда / *X Юбилейная международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» 5-8 ноября 2018 года, г. Казань, Сборник трудов.*
3. S.L. Siepa, *Global Collisional-Radiative Model for Optical Emission Spectroscopy of Argon and Argon-Containing Plasmas*, Dissertation for a doctorate degree, Ruhr-Universität Bochum, 2017
4. D. L. Crintea, U. Czarnetzki, S. Iordanova, I. Koleva, and D. Luggenhoelscher. Plasma diagnostics by optical emission spectroscopy on argon and comparison with Thomson scattering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 045208, 2009.
5. АзатР. Гиззатуллин, Я.О. Желонкин, Э.Ф. Вознесенский, АзаматР. Гиззатуллин. Исследование газодинамических режимов течения в RFPT технологических процессах / *X Юбилейная международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» 5-8 ноября 2018 года, г. Казань, Сборник трудов.*