

УДК 629.7.064.2: 621.51: 621.521

А. В. Чернышев, К. Е. Демихов,
С. Р. Насибуллин, А. С. Пугачук

РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОГО И ПНЕВМО- ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Рассмотрен новый подход к разработке образцов вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования, позволяющий значительно сократить время и финансовые затраты на этапе разработки и тем самым значительно повысить их конкурентоспособность. Данный подход позволяет интегрировать возможности математического моделирования рабочих процессов, численного эксперимента, 3D-моделирования, технологии быстрого прототипирования и физического эксперимента.

E-mail: av_chernyshev@yandex.ru

Ключевые слова: вакуумное оборудование, разработка, моделирование, технология прототипирования.

Перед разработчиками новой техники в условиях рыночной экономики стоит важная и крайне сложная для реализации задача — сокращение сроков и стоимости разработки конструкций и технологической подготовки их производства. Для успешного функционирования на рынке современной продукции производители должны стремиться к минимизации времени создания новых образцов техники. Поставленной цели можно достичь при наличии опыта создания данной техники, финансового, кадрового и технологического обеспечения и соответствующих производственных мощностей. Значительная доля временных и финансовых затрат в общем объеме приходится на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Поэтому именно на этом этапе создания новой техники требуются интенсификация работы, новые методы исследования и новейшие технологии. Необходимо владение знаниями и навыками математического моделирования рабочих процессов, протекающих в создаваемом оборудовании, и численного эксперимента, поскольку это позволяет значительно сократить сроки отработки нового изделия. Но все же полностью отказаться от экспериментальных исследований невозможно — именно на этапе разработки и изготовления макетных и опытных образцов изделий затрачиваются значительные средства и, что очень важно, время.

Опыт разработки новых изделий вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования [1–3] показал, что эффективность разработки может быть значительно повышена, если методы математического

моделирования и численного эксперимента комбинировать с технологией быстрого прототипирования (RP – rapid prototyping). На рис. 1 показана блок-схема алгоритма проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с этапами применения методов математического моделирования рабочих процессов, численного эксперимента и этапом реализации технологии быстрого прототипирования. Как следует из приведенной блок-схемы, на этапе НИР предусмотрены циклические (в некоторых случаях многократно повторяющиеся) режимы доработки конструктивной схемы по результатам численного эксперимента. При этом корректировке подлежат расчетная схема,

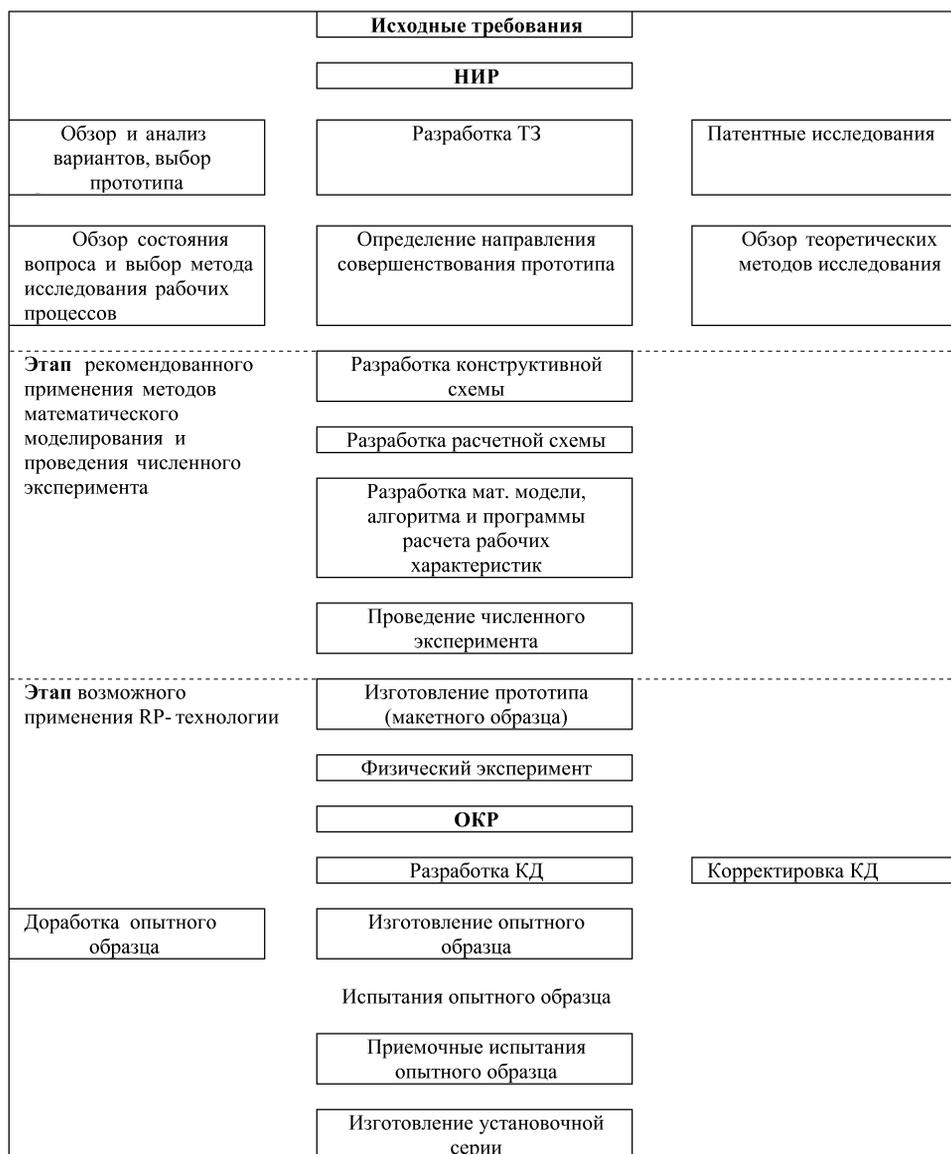


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проведения НИОКР

математическая модель, алгоритм и программа расчета рабочих процессов. Несмотря на возможные затраты как материальных, так и временных ресурсов на данном этапе разработки нового изделия, это все же значительно эффективнее, чем применение метода проб и ошибок, предусматривающего циклические режимы совершенствования конструктивной схемы по результатам испытаний и доработки макетных и опытных образцов. Подобные возвратные циклы корректировки конструкторской документации и доработки опытного образца по результатам его испытаний присущи и этапу опытно-конструкторской работы, что неизбежно приводит к увеличению расходов средств и времени разработки. Создатели новой техники знают, что особую организационную сложность представляет изготовление единичных изделий макетных и опытных образцов и их многократные доработки. Существенную экономию средств и повышение эффективности разработки нового изделия может обеспечить применение методов 3D-моделирования в совокупности с технологией быстрого прототипирования (RP-технологий).

Быстрое прототипирование относится к одному из самых современных, динамично развивающихся направлений в технологии создания изделий различного назначения. Такая технология используется на этапе отработки новых изделий и широко применяется в различных областях техники. Современные методы 3D-проектирования в сочетании с RP-технологиями, базирующимися на сквозном использовании компьютерных технологий и интеграции с методологией САПР, способны значительно сократить сроки подготовки производства и практически полностью исключить длительный и трудоемкий этап изготовления как опытного образца в целом, так и его отдельных деталей и узлов.

Современный прототип позволяет: провести визуализацию, оценить эргономику и дизайн изделия; выполнить функциональную оценку проектируемого изделия (проверить сборочную способность сложных изделий); исследовать рабочие процессы в элементах изделий, а также рабочие характеристики проектируемого изделия; использовать в качестве модели для дальнейшего применения в производстве (в качестве литейной формы, электроэрозионного инструмента и др.).

Начиная с 1980-х гг. интенсивно развиваются технологии формирования трехмерных объектов не классическим способом — удалением материала, изменением формы заготовки или приданием материалу формы литейной оснастки, — а путем постепенного наращивания материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства.

Сегодня основное распространение получили следующие методы RP-технологии [4]:

- STL (Stereolithography) – стереолитография;
- SGC (Solid Ground Curing) – отверждение на твердом основании;
- FDM (Fused Deposition Modeling) – нанесение термопластов;
- BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – распыление термопластов;
- SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание;
- LOM (Laminated Object Modeling) – моделирование объекта ламинированием (послойная склейка);
- MJM (Multi Jet Modeling) – струйная технология многосоплового моделирования.

Все названные RP-технологии предполагают наличие трехмерной компьютерной модели детали. Независимо от выбранной технологии и оборудования необходимо, применяя соответствующую систему автоматизированного проектирования (САПР), разработать 3D-модель создаваемого объекта и сформировать STL-файл.

Сам формат STL и его спецификация разработаны компанией Albert Consulting group. Твердотельная модель в формате STL с помощью специализированной программы разбивается на тонкие слои в поперечном сечении. Толщина слоя определяется разрешающей способностью оборудования. Построение детали происходит послойно до получения прототипа. На изготовление прототипа затрачивается от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от числа слоев. При этом определяющим фактором является объем детали.

Применение RP-технологии позволяет существенно снизить себестоимость создаваемой продукции, поскольку на нее значительным образом влияет стоимость макетных образцов, и процесса отработки изделий, что особенно ощутимо в мелкосерийном производстве. Вследствие снижения себестоимости и времени отработки изделия повышается конкурентоспособность продукции предприятия.

К недостаткам RP-технологий можно отнести относительно высокую цену установок и расходных материалов, относительно низкую прочность моделей и ограниченные размеры деталей (обычно $250 \times 250 \times 250$ мм).

Точность изготовления прототипа в разных методах и на различных установках изменяется в диапазоне от 0,05 мм до 0,2 мм по каждой координате. При уменьшении толщины слоя точность улучшается, но снижается скорость изготовления, и, следовательно, повышается его стоимость. Стоимость прототипа зависит, в первую очередь, от его объема. По состоянию на 2010 г. цена одного кубического сантиметра модели составляла ориентировочно 25...60 р. в ценах 2011 г. в зависимости от используемой технологии.

Следует отметить, что особое место RP-технология должна занять в образовательном процессе для ознакомления студентов с новейшими

технологиями, обеспечив студентам доступ к физическим моделям изготавливаемых ими в учебном процессе изделий.

Данный подход был опробован в процессе разработки и подготовки целого ряда новых изделий. В качестве примера в настоящей статье приведен процесс разработки мембранного микровакуумного насоса и термовакуумной лабораторной испарительной установки.

Необходимо спроектировать мембранный вакуумный насос, обеспечивающий следующие параметры: давление всасывания $p_{вс}=4,5$ кПа; давление нагнетания $p_n = 103$ кПа; быстрота действия $S = 6,67 \times 10^{-5}$ м³/с; рабочий газ – воздух; температура всасывания $T = 273$ °С.

Расчет рабочих процессов и определение основных функциональных и конструктивных параметров проводятся по известной методике [5], включая следующие этапы:

- расчет распределения давлений по ступеням;
- определение коэффициента откачки;
- определение основных размеров и параметров ступеней;
- подбор электродвигателя (в нашем случае выбран коллекторный двигатель постоянного тока QX-RS-755);
- пересчет и проверка параметров с учетом выбранных размеров.

Основным и наиболее сложным в проектировании и производстве элементом данного типа насоса является эластичная мембрана. Проектирование мембраны начинается с анализа возможного варианта исполнения и выбора типа конструкции, определяющего мертвый объем полости сжатия, надежность и долговечность насоса в целом. Известны три основных типа эластичных мембран: плоские (листовые), литые и комбинированные [6]. В результате проведенного анализа выбрана литая мембрана со сферической центральной частью (рис. 2). Такая геометрия позволит уменьшить мертвый объем, образующийся из-за сложного движения мембраны.

Для получения минимального мертвого объема также необходимо знать форму деформированной мембраны в верхней мертвой точке (ВМТ). Профилирование мембраны проводится с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Поскольку относительные деформации мембраны невелики, применена модель гиперупругого тела Муни–Ривлина [7, 8]. Основой этой модели является задание функции плотности энергии деформации:

$$W = A (I_1 - 3) + B (I_2 - 3) + X \left(\frac{1}{I_3} - 1 \right) + Y (I_3 - 1)^2 + C (I_1 - 3) (I_2 - 3) + D (I_1 - 3)^2 + E (I_2 - 3)^2 + F (I_1 - 3)^3,$$

где I_1, I_2, I_3 – инвариантные значения правого тензора деформации Коши–Грина (в виде коэффициентов основного растяжения);

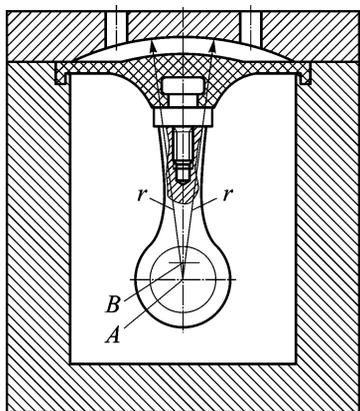


Рис. 2. Конструктивная схема мембранного вакуумного насоса с литой мембраной:

r — радиус сферической поверхности мембраны и крышки камеры сжатия; A, B — центры сферической поверхности мембраны и крышки камеры сжатия соответственно

Получив форму деформированной мембраны, профилирование камеры сжатия выполняют так, чтобы мертвый объем был минимален. Поскольку профиль деформированной мембраны — это сложная кривая, то она заменяется тремя дугами, которые в точках соединения имеют равный дифференциал (рис. 6).

Для проверки результата аппроксимации профиля камеры сжатия тремя дугами пересчитываем заново форму деформированной мембраны. На рис. 7 приведена схема закрепления мембраны, крышки камеры сжатия и нижней крышки, а на рис. 8 — схема приложения нагрузок.

Для решения контактной задачи при деформировании мембраны расчетная сетка конечных элементов построена таким образом, что размер элементов уменьшается в зоне соприкосновения поверхностей (рис. 9). Результаты расчетных исследований деформированной мембраны (поля распределения напряжения, перемещения и деформации материала для ВМТ) с учетом полученного профиля камеры сжатия приведены на рис. 10–12. Максимальное напряжение составляет 2,45 МПа, а максимальная относительная деформация материала мембраны — 5,45 %. Такие показатели позволяют обеспечить достаточно большой ресурс работы мембраны.

После пересчета параметров насоса по результатам профилирования камеры сжатия и динамического расчета выполняется проектирование двухступенчатого мембранного насоса на основе 3D-моделирования. На рис. 13 приведена САД-модель созданного насоса.

A, B, C, D, E и F — постоянные Мунеу, отражающие механические свойства материала.

В качестве материала мембраны может быть использована масло- и бензостойкая смесь ИРП-1078, рекомендуемая для изготовления резиноталлических деталей подвижных и неподвижных соединений, работающих при статических и динамических деформациях. Зарубежным аналогом резины такой марки является литьевая резина NBR.

В результате исследования получена расчетная форма деформированной мембраны, поля распределения напряжения, перемещения и деформации материала которой (для ВМТ) приведены на рис. 3, 4 и 5 (см. 3-ю полосу обложки).

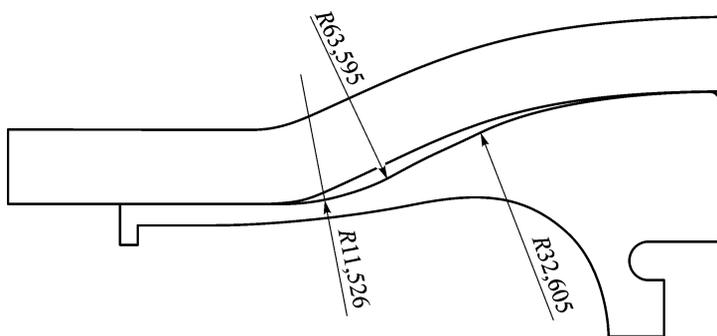


Рис. 6. Профилирование камеры сжатия

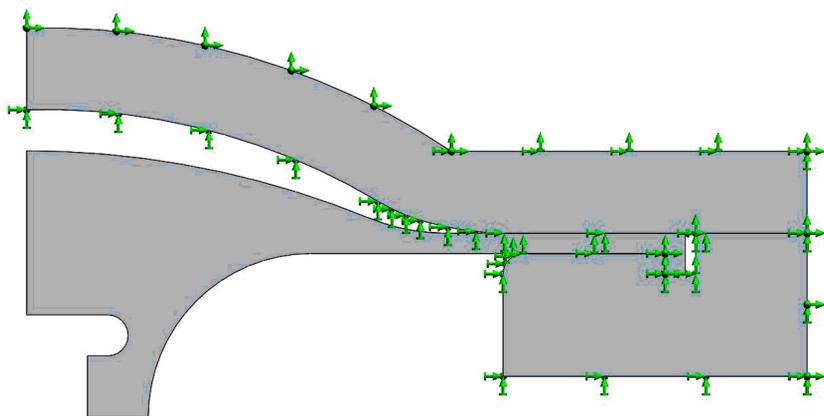


Рис. 7. Схема закрепления мембраны

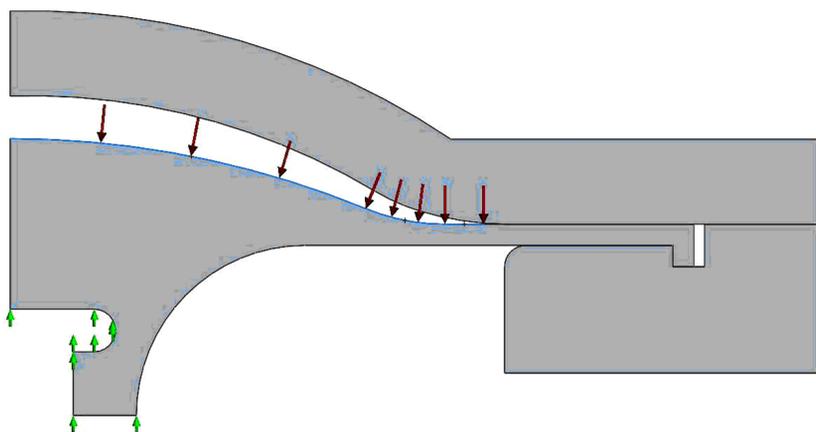


Рис. 8. Схема приложения нагрузок

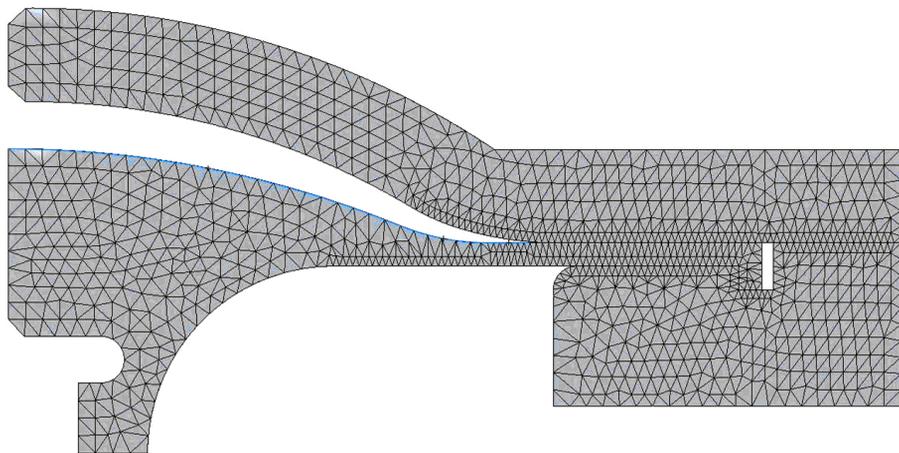


Рис. 9. Расчетная сетка конечных элементов

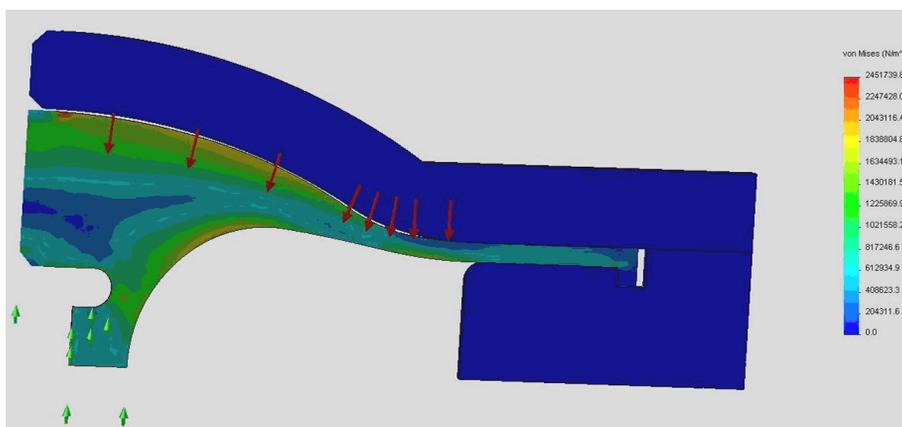


Рис. 10. Поле распределения напряжения материала мембраны

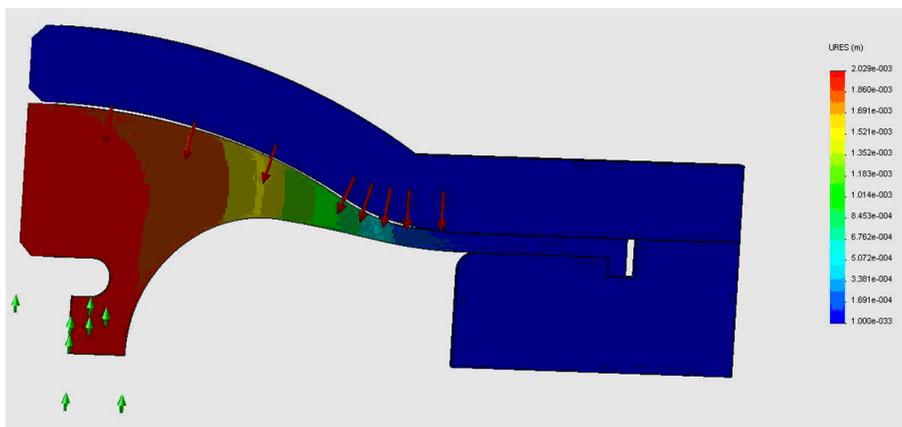


Рис. 11. Поле распределения перемещения материала мембраны

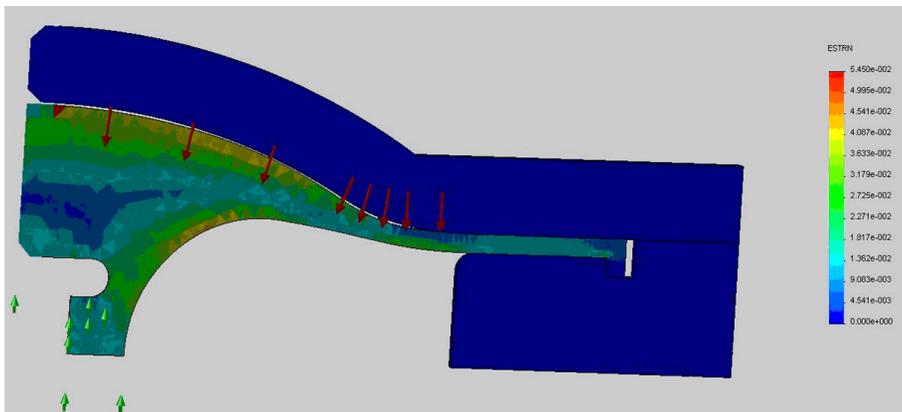


Рис. 12. Поле распределения деформации материала мембраны

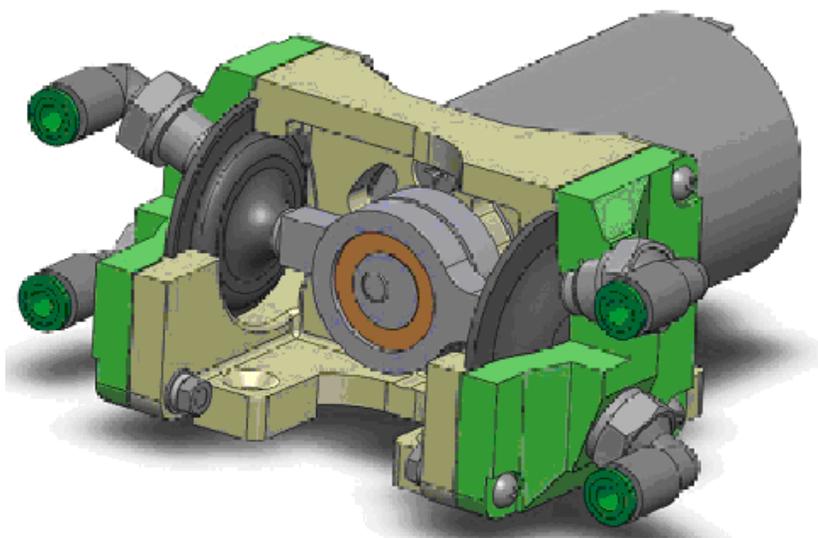


Рис. 13. CAD-модель разработанного мембранного насоса

Макетный образец мембранного насоса изготовлен с применением RP-технологии. Прежде чем изготовить опытный образец, необходимо провести расчет на прочность основных элементов конструкции, которые должны быть выполнены методом 3D-печати из высококачественного композиционного материала на основе гипса с пропиткой из цианоакрилата. Прочностной расчет проведен на базе конечного анализа с применением МКЭ. По полученной 3D-модели корпуса построена расчетная сетка КЭ (рис. 14). В силовой расчет заложено условие, что корпус крепится винтами с коническими головками (фиксация во всех направлениях) и по поверхности крепления двигателя. Нагрузка со стороны мембраны (газовая сила и сила упругой деформации резины) — силы, направленные по нормали к опорной поверхности мембраны. В процессе расчета определены поля распределения на-

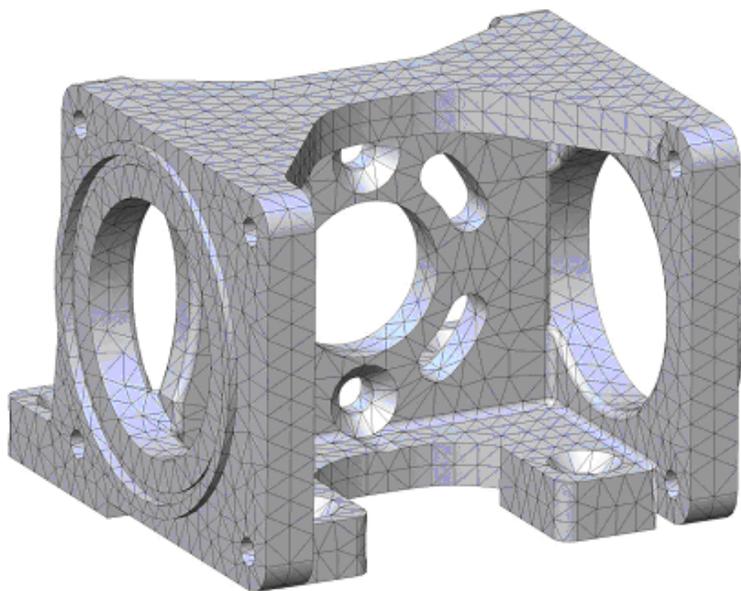


Рис. 14. Расчетная сетка конечных элементов

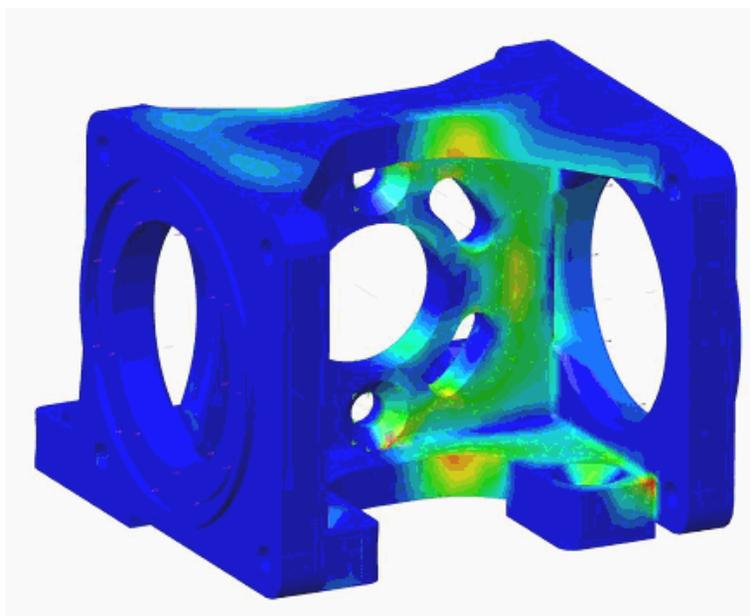


Рис. 15. Поле распределения напряжения материала корпуса насоса

пряжения материала (рис. 15), относительной деформации материала (рис. 16) и запаса прочности материала (рис. 17).

Прочностной расчет показал, что максимальное нормальное напряжение материала корпуса составляет 3,35 МПа, что соответствует максимальной относительной деформации материала 0,28 % и коэффициенту запаса прочности 1,4. Таким образом, корпус мембранного

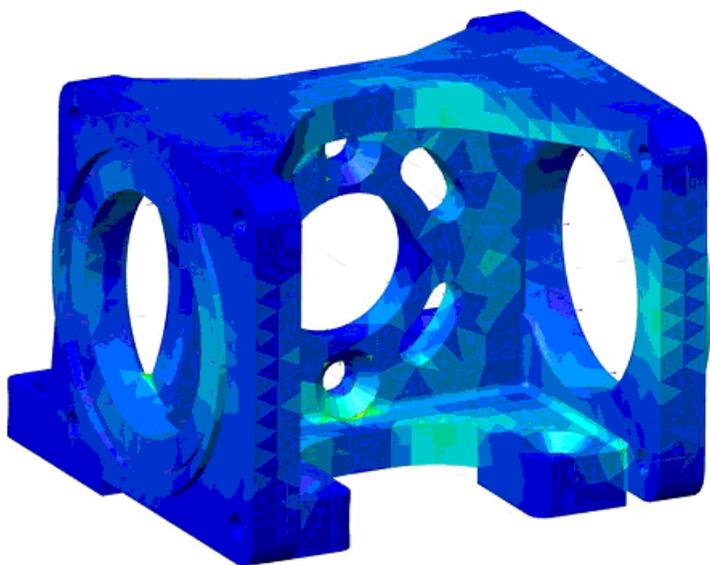


Рис. 16. Поле распределения относительных деформаций материала корпуса насоса

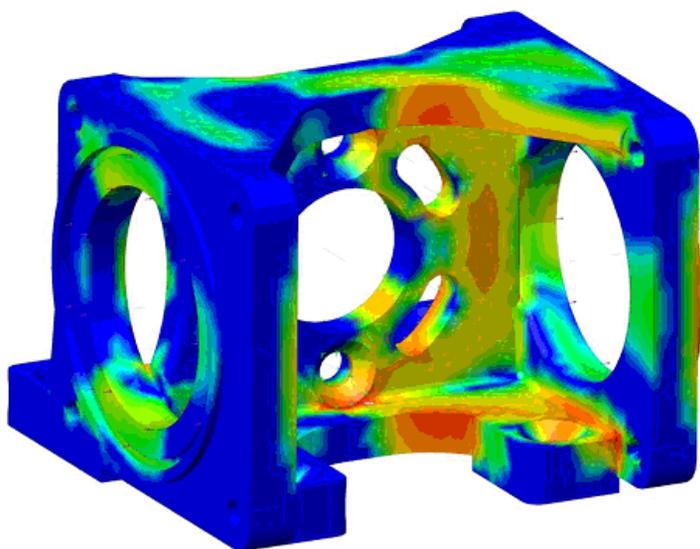


Рис. 17. Поле распределения запаса прочности материала корпуса насоса

вакуумного насоса, изготовленный методом 3D-печати, удовлетворяет критериям прочности и может быть использован в составе макетного образца изделия при проведении его испытаний. Аналогичные результаты получены и для крышек мембранного вакуумного насоса.

На рис. 18 приведен общий вид мембранного вакуумного насоса, изготовленного с применением RP-технологии.

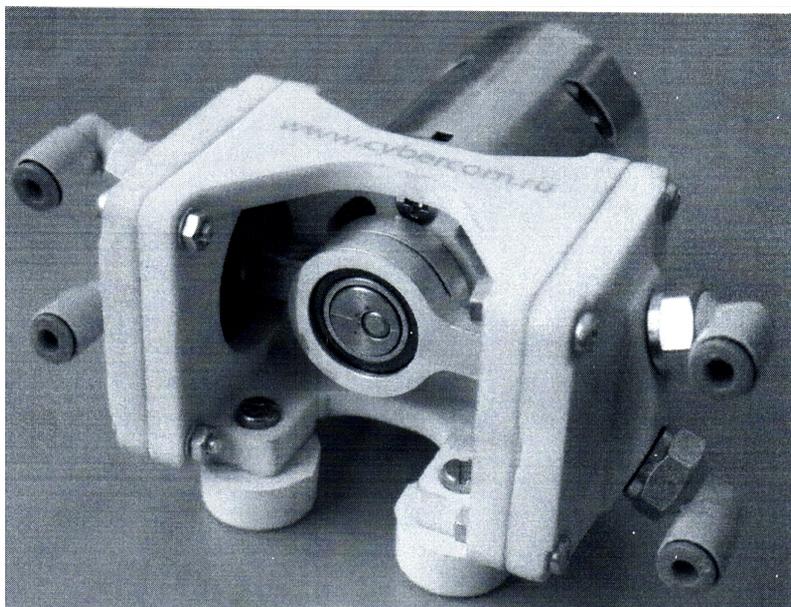


Рис. 18. Внешний вид мембранного вакуумного насоса

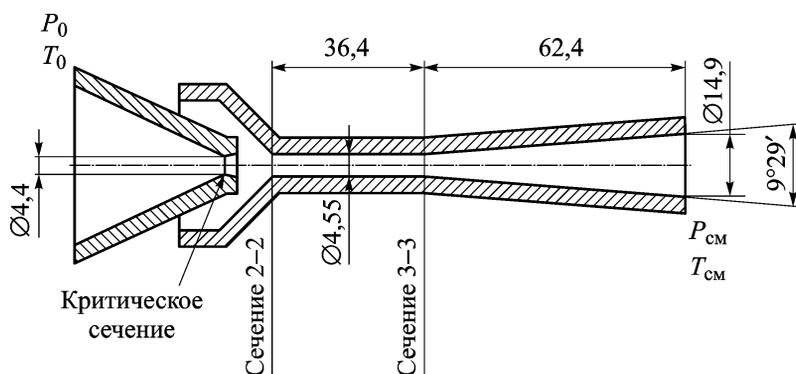


Рис. 19. Расчетная схема газоструйного вакуумного насоса

По такому же алгоритму разработана термовакuumная лабораторная испарительная установка на основе газоструйного вакуумного насоса. Установка предназначена для выпаривания буферного раствора из стандартных пластиковых микропробирок объемом 1,5 мл, в которых находится раствор реакционной смеси. Установка создана на базе серийного термостата “Циклотемп-303”, который обеспечивает нагрев микропробирок с реакционной смесью и стабилизацию температуры в диапазоне 30... 80 °С. Одновременно в термостате размещается до 32 микропробирок. В результате выполненного расчета вакуумной установки определены параметры и конструктивные размеры газоструйного вакуумного насоса, расчетная схема которого приведена на рис. 19. Действующий макетный образец термовакuumной лаборатор-

ной испарительной установки на основе газоструйного вакуумного насоса разработан и изготовлен с применением RP-технологии. Созданные 3D-модели были подвергнуты конечному анализу, по результатам которого изготовлены прототипы основных деталей установки. На рис. 20 (см. 4-ю полосу обложки) приведен продольный разрез (3D-модели) газоструйного вакуумного насоса. Общий вид прототипа термовакуумной лабораторной испарительной установки на базе термостата “Циклотемп-303” показан на рис. 21 (см. 4-ю полосу обложки).

Выводы. 1. Опыт разработки новых изделий вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования показал, что эффективность разработки может быть значительно повышена, а сроки подготовки производства снижены, если методы математического моделирования и численного эксперимента комбинировать с технологией быстрого прототипирования.

2. Прототипы образцов деталей позволяют провести визуализацию и оценить эргономику и дизайн изделия, выполнить функциональную оценку проектируемого изделия, исследовать рабочие процессы в элементах изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А. В., Крутиков А. А. Моделирование рабочих процессов в элементах пневматических устройств с учетом распределенных параметров // Конверсия в машиностроении. – 2007. – № 4, 5. – С. 94–98.
2. Чернышев А. В. Расчет и конструирование агрегатов пневматических и пневмогидравлических систем. Пневмосистемы. Источники сжатого газа : Учеб. пособие по курсу “Пневматические системы и их элементы” / А.В. Чернышев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 50 с.
3. Расчетные исследования пневматической системы стабилизации температуры / А.А. Крутиков, К.Е. Демихов, А.В. Чернышев, и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2007. – № 4. – С. 23–32.
4. <http://www.espotec.ru>
5. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.
6. Водяник В. И. Эластичные мембраны. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
7. Wadhwa Gagnon M., Hubert P., Paidoussis M. P., Semler C., Lavoie D. Hyperelastic modeling of rubber in commercial finite element software (ANSYS) // 51st SAMPE International Symposium, Long Beach, CA, April 30-May 4, 2006.
8. Bergstrom J. S. Constitutive modeling of elastomers — accuracy of predictions and numerical efficiency. http://polymerfem.com/polymer_files/Elastomer_Modeling_Comparison.pdf

Статья поступила в редакцию 25.06.2011



Андрей Владимирович Чернышев родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Вакуумная и компрессорная техника физических установок” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 научных работ, авторских свидетельств и патентов на изобретения в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневмомеханического оборудования различного назначения.

A.V. Chernyshev (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. D. Sc. (Eng.), professor of

“Vacuum and Compressor Equipment of Physical Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 publications, author’s certificates and patents for inventions in the field of mathematical simulation and study of working processes, development and designing of vacuum and electropneumatic equipment of general purpose.



Константин Евгеньевич Демихов родился в 1942 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, профессор, советник ректора, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника физических установок” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области вакуумной и компрессорной техники.

K.Ye. Demikhov (b. 1942) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor, rector’s adviser, head of “Vacuum and Compressor Equipment of Physical Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of vacuum and compressor technology.



Станислав Радикович Насибуллин родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Ведущий инженер ЗАО “Аврора”. Автор двух научных работ в области испытаний пневмогидросистем, 3D-моделирования и расчета рабочих процессов в вакуумных механических насосах.

S.R. Nasibullin (b. 1987) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2010. Leading engineer of private company “Aurora”. Author of 2 publications in the field of testing of pneumatic hydrosystems, 3D simulation and calculation of working processes in vacuum mechanical pumps.



Александр Сергеевич Пугачук родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Автор одной научной работы в области математического моделирования процессов в вакуумной и компрессорной технике.

A.S. Pugachuk (b. 1988) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2011. Author of 1 publication in the field of testing of mathematical simulation of processes in vacuum and compressor equipment.