

Блохин Егор Владимирович, студент

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ахлестин Алексей Олегович,

генеральный директор ООО «Лейфикон»

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ОТКАЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Аннотация: Результаты расчета откачной кривой вакуумной системы является одним из основным критериев при выборе решения для реализации поставленной задачи в условиях вакуума. Широкое применение вакуумных технологий в различных областях науки и техники ведет к необходимости наличия достоверной методики, а в условиях современных тенденций программного комплекса, который позволит быстро и эффективно решать задачи получения характеристик вакуумных систем. В данной статье будет показана математическая модель предлагаемой методики, и алгоритм расчета, а также дана ссылка на программный комплекс (свободный доступ).

Ключевые слова: расчет вакуумной системы, насос, быстрота действия, кривая откачки, откачные характеристики, области низкого среднего высокого вакуума.

Abstract: The calculation results of the evacuation curve of the vacuum system is one of the main criteria when choosing a solution for realizing the task in a vacuum. The widespread use of vacuum technologies in various fields of science and technology leads to the need for a reliable method, and in the current trends, a software package that will quickly and efficiently solve the problems of characterizing vacuum systems. This article will show the mathematical model of the

proposed methodology, and the calculation algorithm, as well as a link to the software package (free access).

Keywords: calculation of the vacuum system, pump, speed of action, pumpdown curve, pumping characteristics, low medium high vacuum range.

1. Введение

В настоящее время вакуумные системы находят широкое применение в различных областях науки и техники. Использование вакуумных технологий в электроэнергетике, металлургии, машиностроении, микробиологии, медицине не только необходимо согласно сегодняшнему развитию техники, но и создает технические задачи перед специалистами вакуумных технологий побуждая их к развитию новых решений [1; 2; 3].

2. Актуальность

Отмечая особенность инжиниринговых компаний, специализирующихся на проектировании и производстве оборудования с использованием вакуумных технологических процессов, нельзя не отметить закономерную зависимость между уровнем квалификации технических специалистов в вакуумной технике и качеством разрабатываемых технологических решений. Основные параметры технологических процессов напрямую зависят от откачной характеристики вакуумной системы.

Задача инженера (проектировщика) в каждом конкретном случае выбирать необходимые и достаточные параметры вакуумной системы, которая с одной стороны обеспечит необходимую эффективную быстроту действия при заданном давлении процесса (с учетом запаса 10-15%), а с другой стороны не будет нести чрезмерных капитальных затрат.

3. Обзор существующих решений

Большинство технических специалистов, понимая высокую цену ошибки неверного подбора оборудования, вынуждены использовать наиболее распространенный способ — метод подобия. Субъективно выбирается

наиболее близкая технологическая задачи и после сравнения имеющейся системы и проектируемой определяется коэффициент подобия.

Проблемой данного метода является наличие нескольких ключевых параметров и нелинейная зависимость между входными параметрами и кривой откачки.

В результате чаще всего специалист вынужден выбирать систему чрезмерных размеров, так как ситуация недостижения заявленных параметров вакуума не допустима и повлечет за собой репутационные потери.

Другой характерной особенностью выбора вакуумной системы является игнорирование особенностей эксплуатации системы. Частыми являются ситуации, когда через непродолжительное время эксплуатации приходится менять основные элементы вакуумной системы по причине полного несоответствия средства откачки технологическому процессу.

Часть производителей оборудования, отдает задачу выбора вакуумной системы, поставщикам оборудования, которые и выполняют для них квалифицированный расчет вакуумной системы. Данный подбор оборудования требует как уверенного использования программных продуктов (расчетные программы), четкое знание особенностей различных типов вакуумного оборудования, так и опыт реализации проектов (сравнение расчетных данных с реальными измерениями).

Говоря о программных расчетных пакетах, можно говорить о следующих вариантах:

- ПО Vaccad [6].
- ПО VacTran [7].
- онлайн ПО Pascal [4].
- внутреннее ПО компании.

Для проведения расчетов с помощью ПО необходимо понимание основ вакуумной техники, особенностей конкретных моделей вакуумных насосов, а также понимание границ применения математической модели ПО. Основной

вопрос после получения результатов — достоверность полученных данных с целью их применения.

Современные программные пакеты не обладают удобным пользовательским интерфейсом и не позволяют провести комплексный расчет откачной характеристики известной вакуумной системы.

Именно отсутствие стандартизованного, общепринятого способа расчета вакуумных систем и делает задачу получения откачной характеристики актуальной.

4. Научная новизна

Новизной данной работы является реализация алгоритма по моделированию процесса создания вакуума внутри вакуумной камеры данной вакуумной системой. Так в литературе не представлено методик по расчету вакуумных систем — авторы ограничиваются упоминанием уравнений откачки и влиянием различных факторов в зависимости от глубины вакуума.

В данном методике выделяются важные факторы, учет которых позволяет получать более точные результаты. Можно выделить следующие ключевые моменты алгоритма:

- детальное описание функции быстроты действия вакуумной системы
- описание потока натекания и газовыделения материалов камеры как функции времени
- описание математических моделей вакуумной откачки в области низкого, среднего и высокого вакуума.

5. Цель исследования.

В процессе разработки и исследования алгоритма расчета откачной характеристики вакуумной системы необходимо было оценить влияние различных факторов на результат. Говоря о допустимом результате имеются ввиду следующие характерные моменты:

- минимальное количество входных параметров вакуумной системы.

В результате необходимо было получить алгоритм, позволяющий с помощью минимального количества параметров получать достоверные результаты.

6. Задачи

В процессе разработки алгоритма расчета откачной характеристики вакуумной системы необходимо было решить ряд задач:

- разработка математической модели процесса форвакуумной откачки.
- разработка математической модели процесса высоковакуумной откачки.
- анализ кривых быстроты откачки различных типов вакуумных насосов, для рассмотрения возможности использования упрощенной формы быстроты откачки.
- оценка влияния методов определения проводимости трубопровода на откачную характеристику.
- проведение ряда опытов с целью снятия откачных характеристик с реальных вакуумных камер.
- оценка влияния физических параметров вакуумной камеры (материал камеры, материал уплотнений) на откачную характеристику.

Также данный алгоритм мы рассматривали как общедоступный сервис, следовательно, необходимо было исключить технические параметры вакуумной системы, которые не могут быть известны непрофильным специалистам, но которые необходимы для проведения расчетов. Данным параметрам в расчете присваиваются значения для наиболее распространенных применений. Например, не требуется вводить значения включения насосов II и III ступеней — эти значения в расчете присваиваются согласно рекомендациям.

7. Описание методов, мат модели, расчетной схемы.

Вернемся к описанию математической модели, на которой основан данный алгоритм. Рассмотрим процессы форвакуумной и высоковакуумной откачки с точки зрения определения зависимости давления к камере по времени $p(t)$.

Таблица 1. Определения зависимости давления в камере по времени $p(t)$.

	Форвакуумная откачка	Высоковакуумная откачка
Диапазон рабочих давлений, Па	$10^5 — 0,1$ Па	$0,1 — 10^{-5}$ Па
Режим течения	Ламинарный/ переходный	Молекулярный
Быстрота действия вакуумного насоса	Нелинейная функция давления	Линейная функция давления
Поток газовой выделенной материала камеры	Постоянный	Функция от времени
Поток газовой выделенной материала уплотнений	Постоянный	Функция от времени
Поток притоков (герметичности системы)	Постоянный	Постоянный

Исходя из анализа факторов общее уравнение откачки $-V \cdot dp = S(p) p dt - Q dt$ (3.40) Изменение количества газа в объекте за время dt , [1]) может быть представлено как $-V \cdot dp = S(p) p dt - (Q_{\text{нат}} + Q_{\text{г.в.мет.}} + Q_{\text{г.в.упл.}}) dt$ для форвакуумной откачки и $-V \cdot dp = S(p) p dt - (Q_{\text{нат}}(t) + Q_{\text{г.в.мет.}}(t) + Q_{\text{г.в.упл.}}(t)) dt$ [3] для высоковакуумной, где

V – объем вакуумной камеры,

$S(p)$ – функция быстрота действия вакуумной системы,

p – давление в вакуумной камере,

$Q_{\text{нат}}$, $Q_{\text{нат}}(t)$ — поток притока в вакуумную камеру извне,

$Q_{\text{г.в.мет.}}$, $Q_{\text{г.в.мет.}}(t)$ — поток газовой выделенной материала камеры,

$Q_{\text{г.в.упл.}}$, $Q_{\text{г.в.упл.}}(t)$ — поток газовой выделенной материала уплотнений,

t – время процесса откачки.

Для представления потока газовой выделенной материала вакуумной камеры и материала уплотнений необходимо воспользоваться результатами наблюдений за процессами газовой выделенной в процессе снижения давления.

Для большинства случаев допустимо опускать зависимость потока газовой выделенной от давления и рассматривать только зависимость от времени вакуумирования — это можно считать справедливым для давлений в области высокого вакуума.

$$Q_{г.в.мет.}(t) = q_{г.в.мет.} \cdot F_{кам} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right), [3] \text{ где}$$

$Q_{г.в.мет.}$ — газовыделение материала камеры, [Па·м³/с].

$q_{г.в.мет.}$ — удельная плотность газовыделения материала вакуумной камеры, [Па·м³/(с·м²)].

$F_{кам}$ — площадь внутренней поверхности вакуумной камеры, [м²].

t — время вакуумирования.

$$Q_{г.в.упл.}(t) = q_{г.в.упл.} \cdot F_{упл.} \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t}}, [3] \text{ где}$$

$Q_{г.в.упл.}$ — газовыделение материала уплотнений, [Па·м³/с].

$q_{г.в.упл.}$ — удельная плотность газовыделения материала уплотнений, [Па·м³/(с·м²)].

$F_{упл.}$ — площадь поверхности уплотнений, [м²].

t — время вакуумирования.

Выбор данных допущений с одной стороны позволяет решить задачу определения зависимости давления в ВК от времени, с другой стороны имеет достаточную точность по сравнению с реальным процессом откачки.

Получение рабочей математической модели невозможно без проведения качественного и количественного анализа модели — был проведен ряд экспериментов по снятию зависимости давления в вакуумной камере от времени, для сравнения с результатами численного эксперимента.

Получение зависимости $p(t)$ в результате численного эксперимента — определение, так называемой, откачной характеристики вакуумной системы.

9. Результаты

Критерием проверки алгоритма было соответствие полученных результатов реальным экспериментальным данным. Речь идет об оценке относительных величин давления при определенном времени и времени достижения определенного давления.

Было определено, что наибольшее влияние на правильность получаемых значений (для большинства задач) идет от отличия реальной и расчетной

кривой быстроты действия вакуумных насосов, при правильной оценке прочих параметров (натекание, газовыделение, геометрия трубопровода).

На рисунке 1 показаны сравнение кривых откачки данной вакуумной системы: 1 — эксперимент, 2 — расчет.

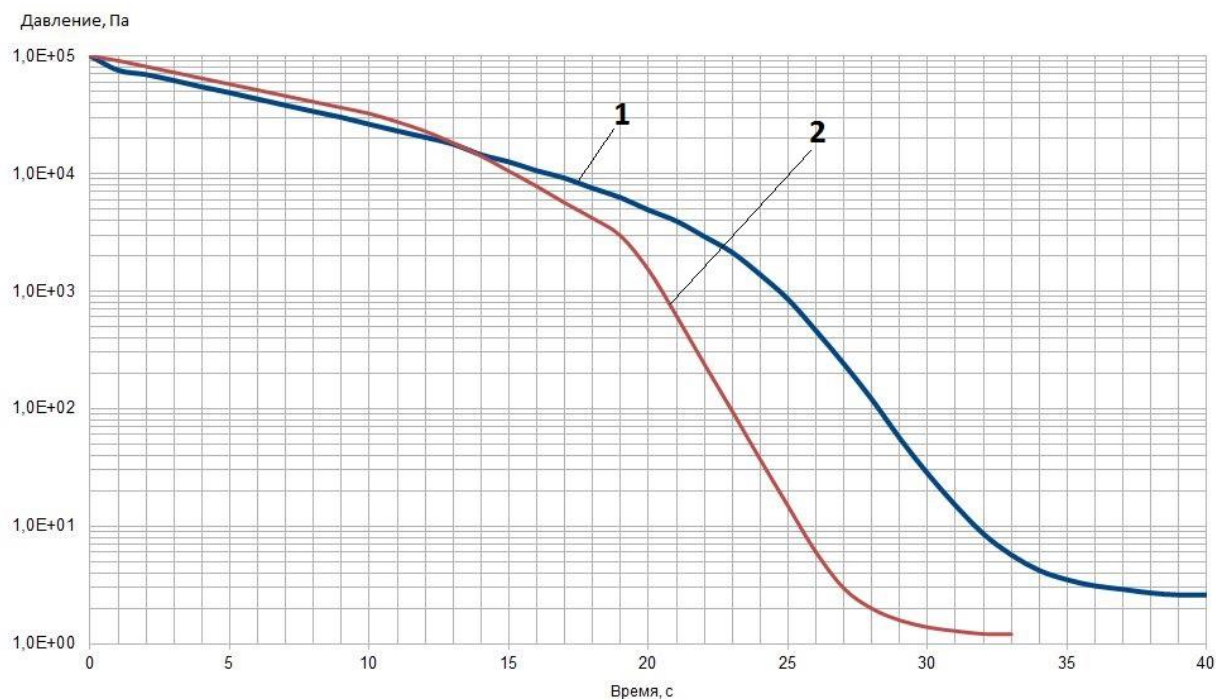


Рис. 1 Кривые откачки вакуумной системы.

9. Выводы

Несмотря на ряд ограничений в применении алгоритма, можно говорить о его адекватности для решения большинства задач по расчету вакуумных систем.

Алгоритм (программный пакет в свободном доступе) доступен по ссылке [5].

Библиографический список:

1. Hoffman D. M., Singh B., Thomas J. H. (Eds). Handbook of Vacuum Science and Technology // Academic Press, 1997. San Diego, London, New York, Tokyo, Toronto. XXII, 839 p. ISBN 0-12-352065-7.

2. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. И др.; Вакуумная техника: справочник. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил. ISBN 978-5-94275-436-5.
3. Wutz M., Adam H., Walcher W., Theory and Practice of Vacuum Technology// Friedr. Vieweg&Sohn. 1989 Cologne, 665p. ISBN 3-528-08908-3.
4. Leybold Vacuum Calculations//Leybold GmbH url: <https://calc.leybold.com/en/lp>.
5. Алгоритм расчета откачной кривой вакуумной системы// ООО Лейфикон Вакуум Сервис. Url: <https://leybold.ru/rascam.html>.
6. В.М.Чутко Программа VacCAD1.0 для анализа и моделирования высоковакуумных систем// VECOR, 101 Duranzo Aisle, Irvine, CA 92606, USA E-mail: info@vecorus.com.
7. VacTran Vacuum Technology Software <http://www.vactran.com>.