

01;03;12

Модель динамики давления в вакуумной системе при вакуумировании летучей жидкости

© Р.А. Невшупа, Л.С. Синев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
e-mail: nevshupa@bmstu.ru

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2005 г.)

Исследована динамика поведения общего и парциальных давлений в вакуумной системе при вакуумировании летучей жидкости. На основе совместного решения уравнений баланса потоков газов и паров разработана математическая модель процесса. Определена степень влияния параметров вакуумной системы и свойств жидкости на динамику давления. Проведены численные расчеты равновесного давления и длительности откачки при различных значениях параметров.

Введение

В ряде технологических процессов требуется откачивать вакуумную камеру, в которой располагается источник летучей жидкости. Например, при течейскании пузырьковым методом, который применяется при испытаниях отдельных элементов вакуумных систем или приборов в случаях, когда не требуется высокая чувствительность, объект исследования заполняется воздухом или пробным газом под избыточным давлением и погружается в жидкость. Наличие течи определяется по пузырькам, появляющимся на наружной поверхности объекта. Поток газа пропорционален количеству пузырьков, появляющихся в единицу времени, и их объему, а количество пузырьков в свою очередь пропорционально разности давлений внутри испытываемого объекта и снаружи. Для повышения чувствительности метода используется вакуумирование жидкости до давления $10^3 - 5 \cdot 10^4$ Па, а также выбираются пробный газ с малой молярной массой и жидкость с малым поверхностным натяжением, в основном этанол. При проектировании вакуумных систем для реализации метода пузырькового течейскания необходимо определить динамику давления в вакуумной системе при откачке паров над поверхностью жидкости. Поскольку в процессе откачки поток испарения жидкости изменяется во времени, общепринятые методики расчета вакуумных систем в этом случае непригодны [1]. В данной работе разработана модель, позволяющая рассчитывать предельное давление в вакуумной системе и строить кривые откачки паров вещества над поверхностью жидкой фазы во времени с учетом откачки остаточных атмосферных газов.

Построение модели и расчет параметров

Модель. За основу модели взято уравнение баланса газовых потоков в идеальной вакуумной системе (рис. 1), имеющей камеру объемом V , которая откачивается насосом с эффективной быстротой откачки S .

Для рассматриваемых интервала давлений $10^5 - 10^4$ Па и диапазона длительностей откачки 1–10 min изменением во времени потока десорбции газов со стенок и потока газовой выделения из материалов можно пренебречь и принять сумму указанных потоков Q_g — постоянной. Кроме указанных потоков имеются также: 1) поток испаряющихся с поверхности молекул Q_{ev} и 2) поток конденсирующихся молекул Q_{con} . Для простоты модели в первом приближении адсорбцией молекул жидкости на поверхностях вакуумной системы и их десорбцией также пренебрегается.

Для описанной схемы баланс газовых потоков в камере представляет собой систему двух дифференциальных уравнений, описывающих баланс потоков паров жидкости и баланс потоков прочих газов соответственно,

$$\frac{dp_c(t)}{dt}V = Q_{ev} - Q_{con} - p_c(t)S, \quad (1)$$

$$\frac{dp_s(t)}{dt}V = Q_g - p_s(t)S \quad (2)$$

(условные обозначения приведены в табл. 1).

В обоих уравнениях левая часть определяет скорость изменения количества газов или паров в вакуумной камере, а слагаемое pS — быстроту откачки газов или паров насосом. Потоки испаряющихся и конденсирующихся молекул жидкости определяются по следующим

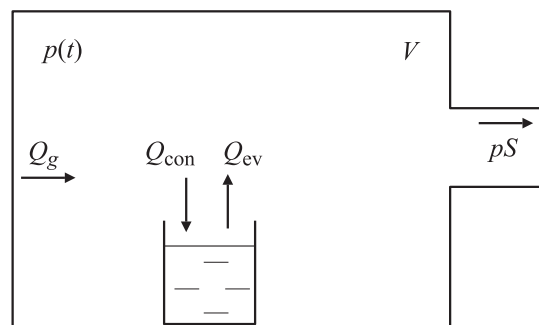


Рис. 1. Схема газовых потоков в системе.

формулам (модель Ленгмюра):

$$Q_{ev} = q_d \cdot A \cdot k \cdot T, \quad (3)$$

$$Q_{con} = q_a \cdot A \cdot k \cdot T, \quad (4)$$

а удельные потоки десорбции и адсорбции молекул жидкости соответственно

$$q_d = n_m / \tau_0 \exp(-E_d / RT), \quad (5)$$

$$q_a = \frac{N_a \cdot p_c}{\sqrt{2\pi MRT}}. \quad (6)$$

Полный поток молекул с поверхности жидкости, равный разности потоков испарения и конденсации, увеличивается с уменьшением давления, поскольку поток

Таблица 1.

Обозначение	Описание	Единицы измерения
A	Площадь поверхности жидкости, обращенной в вакуум	m^2
E_d	Теплота испарения жидкости	J/mol
M	Молярная масса жидкости	kg/mol
n_m	Число молекул на единице поверхности в одном слое	$1/m^2$
p_c	Парциальное давление паров жидкости	Pa
p_{c0}	Парциальное давление паров жидкости при $t = 0$	Pa
p_s	Парциальное давление паров других веществ	Pa
p_{s0}	Парциальное давление паров других веществ при $t = 0$	Pa
p_{atm}	Атмосферное давление	Pa
p_{sat}	Давление насыщенных паров жидкости	Pa
q_d	Удельный поток десорбции жидкости	$1/(cm^2 \cdot s)$
q_a	Удельный поток адсорбции жидкости	$1/(cm^2 \cdot s)$
Q_g	Поток газовой выделенной со стенок камеры	$m^3 \cdot Pa/s$
Q_{ev}	Поток испаряющихся молекул жидкости	$m^3 \cdot Pa/s$
Q_{con}	Поток конденсирующихся молекул жидкости	$m^3 \cdot Pa/s$
S	Эффективная быстрота откачки камеры	m^3/s
t	Время	s
τ_0	Средний период колебаний молекулы в адсорбированном состоянии	s
T	Температура	K
V	Объем камеры	m^3
k	Постоянная Больцмана	J/K
R	Универсальная газовая постоянная	J/(mol · K)
N_a	Число Авогадро	mol^{-1}

Таблица 2. Характеристики жидкостей и результаты расчета расхода

Вид жидкости	M , kg/mol [2]	E_d , kJ/mol [2]	Расход, mg
Метанол (CH_3OH)	0.032	38.74	255
Этанол (C_2H_5OH)	0.046	35.27	106
Пропанол (C_3H_7OH)	0.06	40.48	77

испарения не зависит от давления, а поток конденсации прямо пропорционален давлению паров.

Начальные условия. Поскольку откачка производится от атмосферного давления, начальное условие для уравнения (2) в момент начала откачки имеет вид $p_{s0} = p_{atm} - p_{c0}$, а значение p_{c0} определяется скоростью испарения и продолжительностью нахождения жидкости в камере до начала откачки. Для нахождения величины p_{c0} предположим, что до начала течеискания, т.е. до вноса емкости с жидкостей в камеру, давление паров жидкости в камеру равнялось нулю. Тогда давление паров в момент времени t после закрытия камеры и без откачки определяется из баланса потоков десорбции и конденсации на поверхности жидкости. Зависимость давления паров от времени имеет вид

$$p_c(t) = \frac{1}{N_a} q_d \cdot A \cdot k \cdot T \sqrt{2\pi MRT} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{N_a \cdot A \cdot k \cdot T}{V \cdot \sqrt{2\pi MRT}} t\right) \right]. \quad (7)$$

Расчет по формуле (7) для этилового спирта при $T = 293$ K, $V = 4.33 \cdot 10^{-3} m^3$, $A = 30 cm^2$ и значениях прочих параметров, указанных в табл. 2 и 3, показал, что давление насыщенных паров (с точностью до 0.1%) достигается за 1.1 s, из чего был сделан вывод, что в реальных расчетах с достаточной точностью можно принять

$$p_{c0} = p_{sat} = \frac{q_d \cdot \sqrt{2\pi MRT}}{N_a}. \quad (8)$$

Тогда с учетом (8) зависимости $p_c(t)$ и $p_s(t)$ принимают вид

$$p_c(t) = \frac{q_d \cdot A \cdot k \cdot T \sqrt{2\pi MRT}}{N_a \cdot A \cdot k \cdot T + S \sqrt{2\pi MRT}} \times \left[1 - \exp\left(-\left[\frac{N_a \cdot A \cdot k \cdot T}{V \cdot \sqrt{2\pi MRT}} + \frac{S}{V}\right] \cdot t\right) \right] + p_{c0} \cdot \exp\left(-\left[\frac{N_a \cdot A \cdot k \cdot T}{V \cdot \sqrt{2\pi MRT}} + \frac{S}{V}\right] \cdot t\right), \quad (9)$$

$$p_s(t) = \frac{Q_g}{S} \left[1 - \exp\left(-\frac{S}{V} t\right) \right] + p_{s0} \cdot \exp\left[1 - \exp\left(-\frac{S}{V} t\right) \right]. \quad (10)$$

Таблица 3. Значения параметров и констант, использованных в расчетах

Q_g	A	S	V	T	n_m	τ_0	k	R	N_a
$1.37 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4.33 \cdot 10^{-3}$	293	$3 \cdot 10^{19}$	$2.76 \cdot 10^{-14}$	$1.38 \cdot 10^{-23}$	8.31	$6.02 \cdot 10^{23}$

Полное мгновенное давление в вакуумной камере определяется как сумма p_c и p_s

$$p(t) = \frac{q_d \cdot A \cdot k \cdot T \sqrt{2\pi MRT}}{N_a \cdot A \cdot k \cdot T + S \sqrt{2\pi MRT}} \times \left[1 - \exp\left(-\left[\frac{N_a \cdot A \cdot k \cdot T}{V \cdot \sqrt{2\pi MRT}} + \frac{S}{V}\right]t\right) \right] + p_{c0} \exp\left(-\left[\frac{N_a \cdot A \cdot k \cdot T}{V \cdot \sqrt{2\pi MRT}} + \frac{S}{V}\right]t\right) + \frac{Q_g}{S} \left(1 - \exp\left(-\frac{S}{V}t\right)\right) + p_{s0} \exp\left(-\frac{S}{V}t\right). \quad (11)$$

Расчет параметров и анализ зависимостей. Расчет по формуле (11) был выполнен для трех видов спирта: метилового, этилового и изопропилового. В расчетах использовались значения параметров и констант, приведенные в табл. 2 и 3, если не оговорено иное.

Рассмотрим влияние различных параметров, входящих в уравнение (11), на давление в вакуумной камере и время откачки. Поскольку кривая $p(t)$ асимптотически стремится к равновесному давлению p_∞ , в технических расчетах за время откачки удобно принять продолжительность откачки от атмосферного давления до момента, когда давление достигает заданной величины α от равновесного давления, например $\alpha = 0.999$. Равновесное давление определяется по формуле

$$p_\infty = \frac{q_d \cdot A \cdot k \cdot T \sqrt{2\pi MRT}}{N_a \cdot A \cdot k \cdot T + S \sqrt{2\pi MRT}} + \frac{Q_g}{S}, \quad (12)$$

а время откачки T_{pump} находится из решения уравнения

$$p(t) = \alpha p_\infty. \quad (13)$$

Поскольку уравнение (13) не имеет аналитического решения, время откачки определялось численно или графически. На рис. 2 показаны кривые откачки системы при различных значениях быстроты откачки. Хорошо видно, что параметр S значительно влияет как на величину равновесного давления, так и на время откачки, что связано с тем, что он входит в показатель экспоненты в формуле (11). Время откачки изменяется при варьировании быстроты откачки по закону, близкому к пропорциональному, при указанных условиях.

Площадь поверхности жидкости A незначительно влияет на время откачки вакуумной камеры. Как видно на рис. 3, лишь при снижении A ниже 30 cm^2 происходит уменьшение предельного давления в вакуумной камере при условиях, указанных в табл. 2 и 3.

Увеличение температуры спирта T приводит к значительному увеличению предельного давления и некоторому увеличению времени откачки за счет увеличения давления насыщенных паров спирта и скорости испарения (рис. 4). Вид спирта также оказывает значительное влияние на предельное давление и время откачки через параметры M и E_d за счет того, что при повышении молярной массы спирта увеличивается теплота испарения и понижается давление насыщенных паров (рис. 5).

При разработке техпроцесса также необходимо определять массовый расход жидкости за среднее время цикла одного исследования $t = 4 \text{ min}$ для разных видов

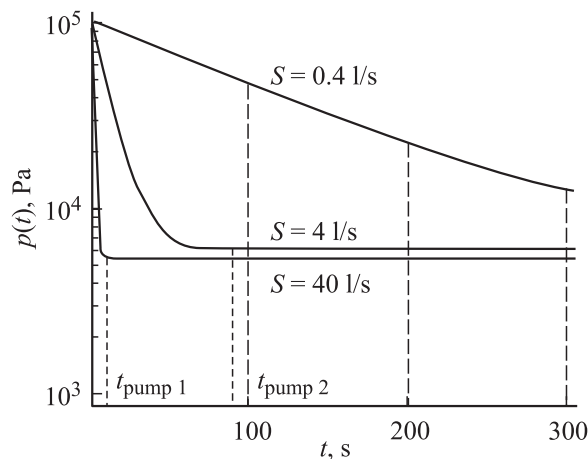


Рис. 2. Зависимость полного давления в вакуумной камере от времени при различных значениях эффективной быстроты откачки S .

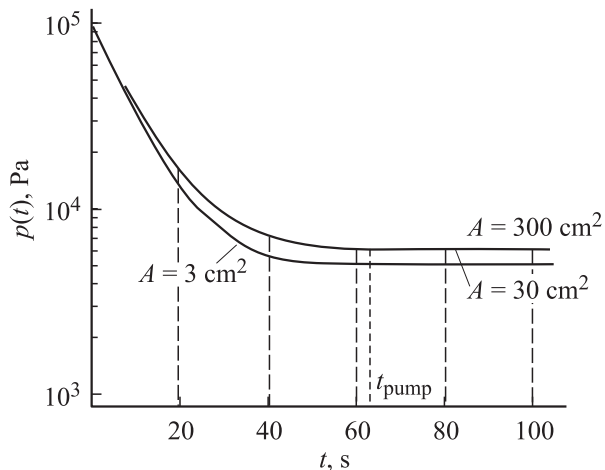


Рис. 3. Зависимость полного давления в вакуумной камере от времени при различных величинах площади поверхности жидкости A .

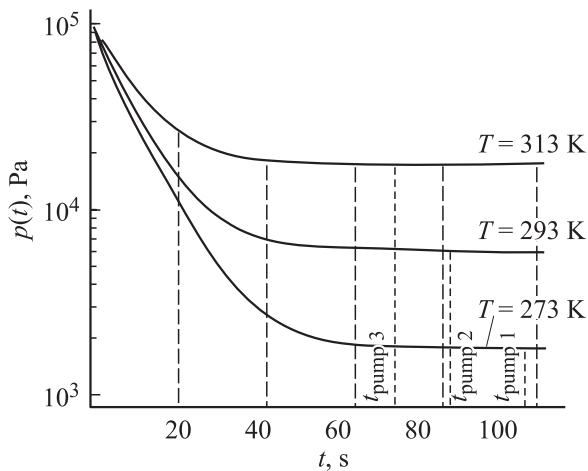


Рис. 4. Зависимость полного давления в вакуумной камере от времени при различных значениях температуры T .

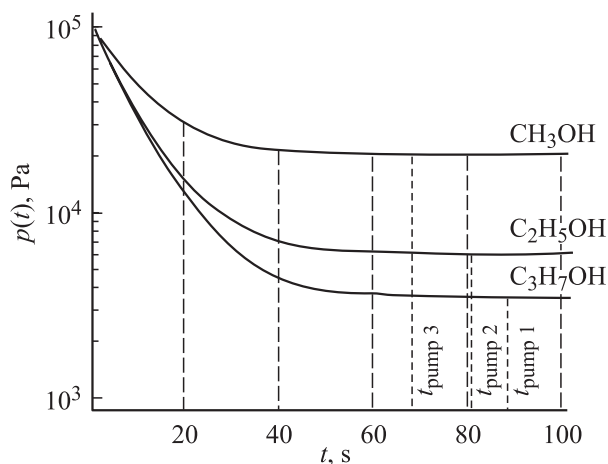


Рис. 5. Зависимость полного давления в вакуумной камере от времени для различных спиртов.

жидкостей. Массовый расход жидкости пропорционален интегралу парциального давления паров за время эксперимента и скорости откачки. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Выводы

В данной работе разработана математическая модель динамики давления вакуумной системы, содержащей источник легкоиспаряющейся жидкости. В отличие от традиционных методов расчета в данной модели учитывается изменение величины потока газовой выделения, включая испарение, при изменении давления, а также с течением времени. На основе расчетов и анализа полученных зависимостей установлено, что факторами, оказывающими наибольшее влияние на длительность откачки и равновесное давление, являются быстрота откачки, температура и вид жидкости, в то время как площадь поверхности жидкости, обращенной в вакуум,

незначительно влияет на длительность откачки и равновесное давление. Полученная модель позволяет управлять процессом течеискания и значительно повышает точность количественной оценки величины течи. Разработанная модель также позволяет инженеру на стадии проектирования оптимизировать конструкцию установки и технологический процесс.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS (YSF 2002-164D), гранта президента РФ для поддержки молодых российских ученых и научных школ (МК-763.2003.08), а также гранта Министерства образования и науки РФ по программе „Развитие научного потенциала высшей школы“ 2005 г. Работа выполнена в рамках курсового проекта „Основы вакуумной техники“.

Список литературы

- [1] Деулин Е.А. Расчет вакуумных систем технологического оборудования. Методические указания для выполнения домашнего задания по курсу „Основы вакуумной технологии“. М.: МГТУ, 2003. 43 с.
- [2] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Майлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.