

# Основы вакуумной техники

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

*Курс лекций:*

## **Основы Вакуумной Техники**

**7 лекция**

**Основы процесса откачки.**

**Термины и определения.**



***Деулин Евгений Алексеевич***

Простейшая вакуумная система, показанная на рис. состоит из следующих элементов: 1 – насос  
2 – вакуумопровод; 3 – реципиент (откачиваемый объём).;

Символами обозначены

Принятые в вакуумной технике термины:

$P_1 - P_2$  – движущая разность давлений, Па;

$S_0 = dV_0/dt$  – быстрота откачки реципиента (объекта),  $m^3c^{-1}$ ;

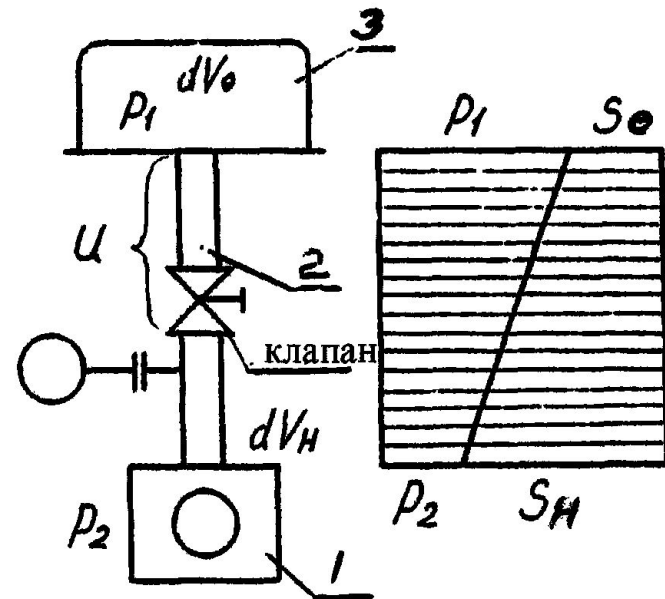
$S_H = dV_H/dt$  – быстрота действия насоса,  $m^3c^{-1}$ ;

$S = dV/dt$  – быстрота откачки (в рассматриваемом сечении трубопровода),  $m^3c^{-1}$ ;

$Q = d(PV)/dt$  – поток газа, количество газа проходящего через рассматриваемое сечение трубопровода в единицу времени,  $m^3Пас^{-1}$

$W = (P_1 - P_2)/Q$  – сопротивление трубопровода,  $см^{-3}$

$U = 1/W = Q/(P_1 - P_2)$  – проводимость трубопровода,  $m^3c^{-1}$ .



Этот термин более удобен для расчётов и поэтому только он используется на практике  
Когда мы имеем дело со стационарным (постоянным во времени) или квадистационарным потоком, то для любого сечения трубопровода можно записать:

$$Q = P_1 S_0 = P_2 S_H = PS$$

## Вывод **основного** уравнения вакуумной техники.

Для стационарного режима откачки реципиента можно записать равенство:

$$Q = S_0 P_1 = S_H P_2 = U(P_1 - P_2)$$

Это равенство может быть преобразовано в два выражения:

$$S_0 = \frac{U(P_1 - P_2)}{P_1} \qquad S_H = \frac{U(P_1 - P_2)}{P_2}$$

Рассмотрим обратные величины полученных выражений:

$$\frac{1}{S_H} = \frac{P_2}{U(P_1 - P_2)} \qquad \frac{1}{S_0} = \frac{P_1}{U(P_1 - P_2)}$$

Разница между первым и вторым выражением

$$\frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_H} = \frac{1}{U} \qquad \frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_H} = \frac{P_1 - P_2}{U(P_1 - P_2)}$$

даёт выражение называемое **основным уравнением вакуумной техники**, которое обычно записывается:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H} \qquad \text{или} \qquad S_0 \frac{S_H U}{S_H + U}$$

Это уравнение связывает параметры трёх основных компонентов вакуумной системы: быстроту действия насоса, проводимость трубопровода и быстроту откачки реципиента, поэтому оно называется **основным уравнением вакуумной техники**

## Расчёт времени откачки вакуумной системы ( без учёта газовыделения).

Рассмотрим процесс откачки простейшей вакуумной системы, показанной на рис. при этом  $V$  – объём реципиента (камеры);  $P$  – давление в откачиваемом объёме. За период времени  $dt$  количество откачиваемого через вакуумопровод газа составит:

$$dG_1 = S_0 P dt$$

То же самое количество газа  $dG_2 = dG_1$ , вышедшее из камеры приведёт к уменьшению в нём давления на величину  $dP$

$$dG_2 = -dPV$$

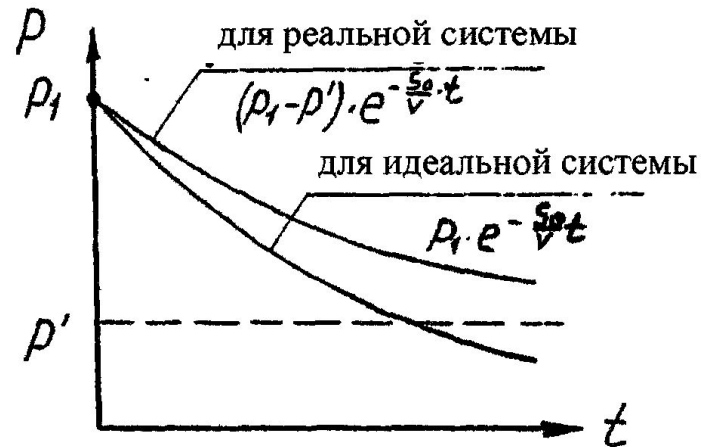
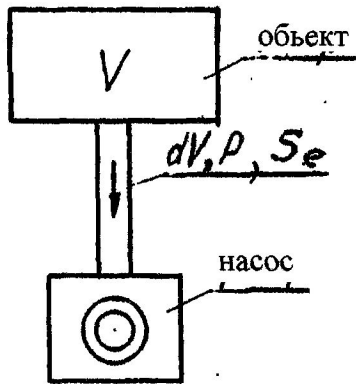
откуда следует:  $G_1 = G_2 = S_0 P dt = -dPV$

После разнесения переменных:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{S_0}{V} \cdot dt \quad (0)$$

В реальной вакуумной системе давление при откачки стремится не к нулю, а предельному давлению  $P^1$  (см. рис. справа), поэтому мы можем предыдущее выражение переписать.

$$\frac{dP}{P - P_1} = -\frac{S_0}{V} dt$$



## Расчёт времени откачки вакуумной системы.

При анализе процесса откачки высоко и сверх высоко вакуумной системы с учётом газовыделения стенок из-за процесса десорбции вместо простейшего уравнения :

$$\frac{dP}{P - P_1} = -\frac{S_0}{V} dt \quad (0)$$

Надо использовать уравнения вида:

$$\left( \frac{dp}{dt} \right)_{t=0} = -\frac{S_0 p_{нач}}{V} - \frac{\alpha V_1 A}{V} p_{нач} + \frac{Q_1 \theta A}{V t_s} \quad (01)$$

Учитывающие изменение процесса десорбции во времени ( см. слайды № 8,9 )

**уравнение для расчёта времени откачки объёма  $V$  от начального давления  $P_1$  до конечного давления  $P_2$ . (без учёта газовыделения)**

Для этого возьмём интеграл от полученного выражения в интервале от  $P_1$  до  $P_2$ :

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P_1 - P'} = \int_t -\frac{S_0}{V} dt$$

после интегрирования получаем выражение:

$$\left| \ln(P - P') \right|_{P_1}^{P_2} = -\frac{S_0}{V} t$$

которые в интервале от  $P_1$  до  $P_2$  может быть рассчитано как:

$$\ln(P_2 - P') - \ln(P_1 - P') = -\frac{S_0}{V} t$$

после преобразования

$$\ln \left| \frac{P_1 - P'}{P_2 - P'} \right| = \frac{S_0 t}{V}$$

откуда после замены натуральных логарифмов на десятичные:

$$t = 2,3 \frac{V}{S_0} \lg \frac{P_1 - P'}{P_2 - P'}$$

В последнем выражении  $P_1 \gg P'$ , поэтому числитель логарифма может быть упрощён. Окончательно, уравнение для расчёта времени откачки идеального вакуумного объёма  $V$  от начального давления  $P_1$  до давления  $P_2$  (без учёта десорбции и натекания газов) выглядит так: :

$$t = 2,3 \frac{V}{S_0} \lg \frac{P_1}{P_2 - P'}$$

Расчёт времени откачки объёма  $V$  от начального давления  $P_1$  до конечного давления  $P_2$  с учётом газовыделения, но без учёта десорбции газов со стенок)

График изменения давления во времени удобно представлять в логарифмической шкале,

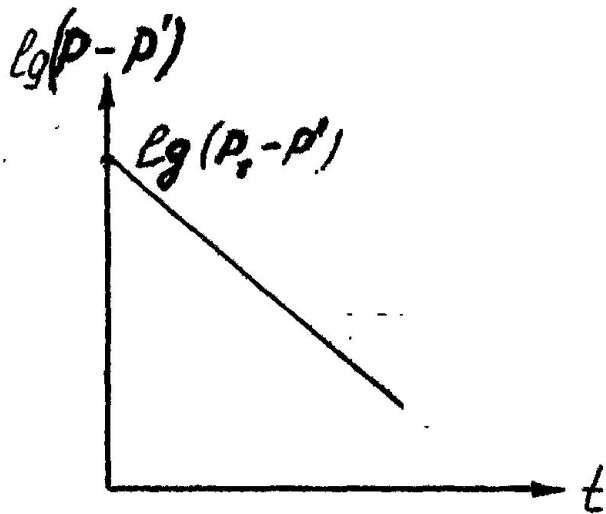
$$\lg P = \lg(P_1 - P') - t \frac{S_0}{2.3V}$$

как это показано на рисунке, где он описывается прямой линией. Если мы учтём суммарный поток газов

$$Q_{\Sigma}$$

, выделяющихся из вакуумной системы (поток газовыделения + поток натекания + обратный поток), то уравнение для расчёта времени откачки примет вид:

$$t = \frac{V}{S_0} \lg \frac{P_1}{P_2 + \frac{Q_{\Sigma}}{S_0}}$$



Расчёт времени откачки объёма  $V$  от начального давления  $P_1$  до конечного давления  $P_2$  для **квазистационавной** вакуумной системы

При рассмотрении процесса откачки вакуумной системы, показанной на слайде 5, количество газа, выходящее из камеры:  $dG_1$ , приводящее к уменьшению в ней давления на величину  $dP$  и равное количеству газа, вошедшему в вакуумопровод  $dG_2$  т.е.  $dG_2 = dG_1$ , Эти количества газа считаются постоянными (квазистационарными) для данного момента времени  $G_1 = G_2 = S_0 P dt = -dPV$ , поскольку не учитывают потоков газа, выделяющихся из вакуумной камеры:

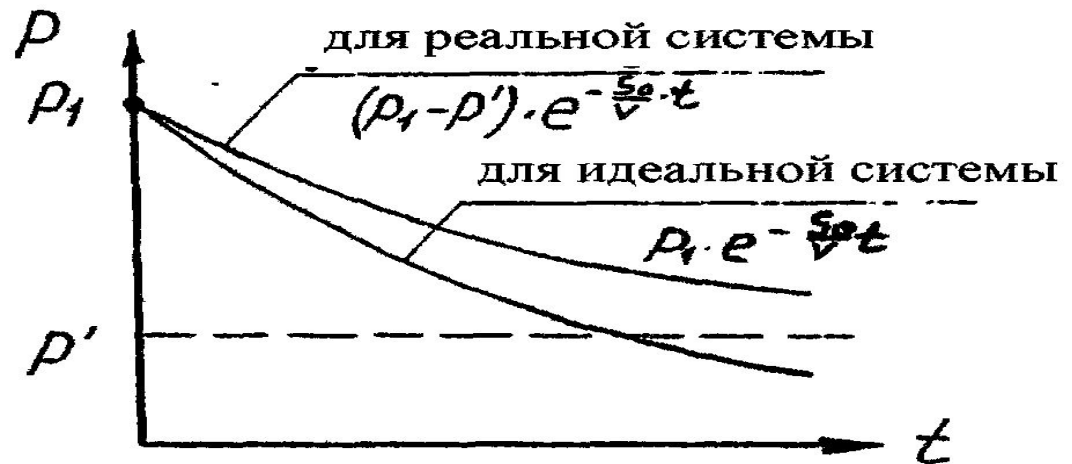
Уравнения: 
$$\lg P = \lg(P_1 - P') - t \frac{S_0}{2.3V}$$

$$t = \frac{V}{S_0} \lg \frac{P_1}{P_2 + \frac{Q_\Sigma}{S}}$$

даже при учёте суммарного потока газовой выделения  $Q_\Sigma$  из камеры определяют изменение давления при откачке в реальной вакуумной системе стремящимся к нулю или к «предельному» давлению вакуумной системы,

$$t = 2,3 \frac{V}{S_0} \lg \frac{P_1}{P_2 - P'}$$

которое определяется существованием **стационарного потока**  $Q_\Sigma = \text{const}$  (постоянного для данного момента времени, но **убывающего со временем при уменьшении давления**)





# Расчёт времени откачки объёма $V$ от начального давления $P_1$ до конечного давления $P_2$ с учётом десорбции газов со стенок сосуда

Расчет количества адсорбированного газа или заполнения поверхности при постоянном давлении в функции времени может быть осуществлен по уравнению которое приводится к виду 
$$\frac{d\theta}{\theta - \frac{K_1}{K_2}} = -K_2 dt \quad (1)$$

Где  $\theta$  - коэффициент покрытия  $K_2$  поверхности сорбатом  
Решение уравнения (1) имеет вид: 
$$\ln \left( \theta - \frac{K_1}{K_2} \right) = -K_2 t + \ln C \quad (2)$$

$$\theta - \frac{K_1}{K_2} = C e^{-K_2 t}$$

Или

где:

$$K_1 = \frac{\alpha N_u}{N_{1нов}} = \frac{\alpha p}{N_{1нов} \sqrt{2\pi m k T}};$$

$$K_2 = \frac{\alpha N_u}{N_{1нов}} + \frac{1}{t_s} = \frac{\alpha p}{N_{1нов} \sqrt{2\pi m k T}} + \frac{1}{\tau_0 e^{E_{ад}/R_0 T}};$$

**Примечание:** уравнения (1) и (2) могут быть решены как в системе “MathCAD”, так и графическим способом, как это показано в Методическом Пособии для выполнения ДЗ по ОВТ

**Решение уравнения (1) также имеет вид:**

$$\theta - \frac{K_1}{K_2} = Ce^{-K_2 t} \quad (3)$$

**Или:**

$$\ln \left( \theta - \frac{K_1}{K_2} \right) = -K_2 t + \ln C$$

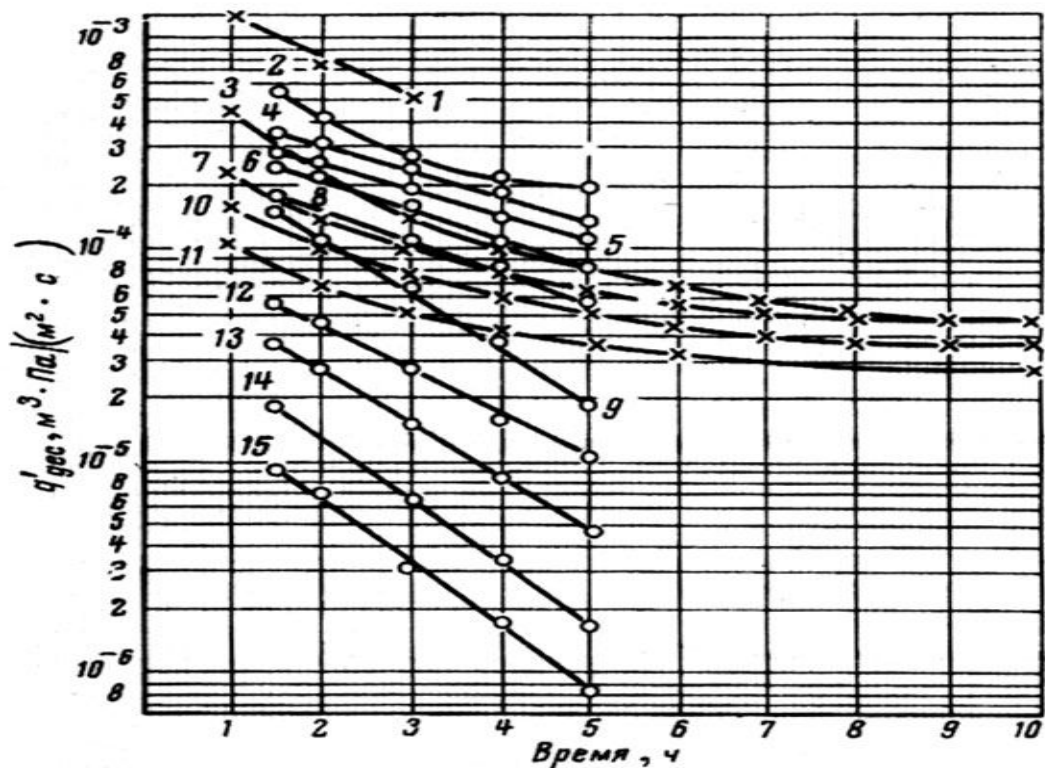
**Из уравнения (3) можно найти время, за которое достигается интересующая нас степень заполнения поверхности  $\theta$ :**

$$t = \frac{1}{K_2} \ln \frac{1}{1 - \frac{K_1}{K_2}} \quad (4)$$

# Расчет времени откачки до заданного давления с учётом десорбции графическим способом (см. мет. Пособие для выполнения ДЗ по курсу ОВТ)

На рис. представлены . Зависимости скоростей удельного газовыделения  $q'$  различных металлов от времени откачки при комнатной температуре:.

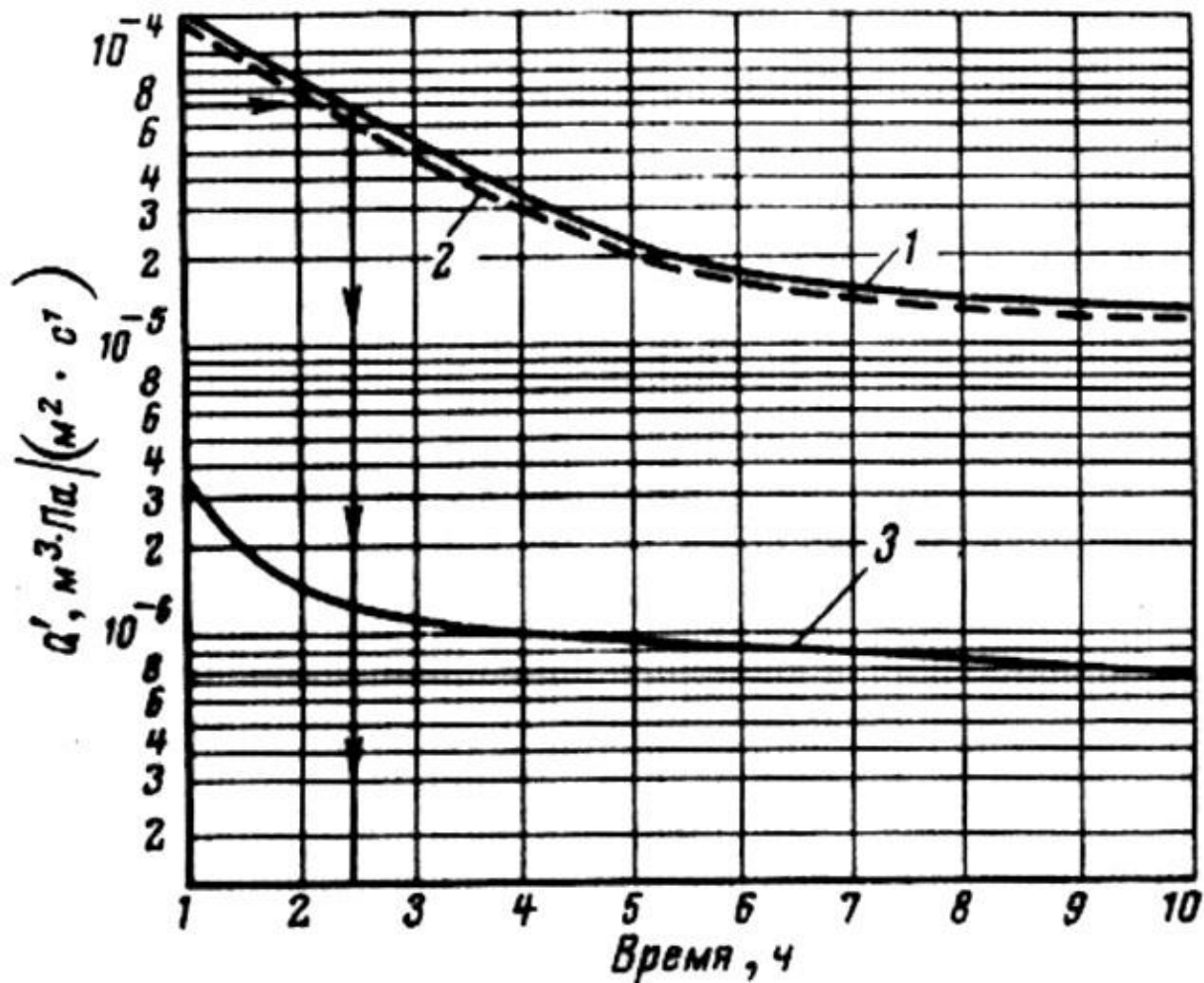
1 - алюминий; 2 - дюралюминий необработанный; 3 - мягкая сталь; 4-дюралюминий промытый бензолом и ацетоном; 5 - латунь необработанная; 6 - латунь, промытая бензолом и ацетоном; 7 - дюралюминий; 8 - медь необработанная; 9 - нержавеющая сталь необработанная; 10 - латунь; 11 - нержавеющая сталь; 12 - медь, промытая бензолом и ацетоном; 13 - дюралюминий протравленный, промытый бензолом и ацетоном; 14 - латунь протравлении промытая бензолом и ацетоном; 15 - медь протравленная, промытая бензолом и ацетоном.



## Расчет времени откачки до заданного давления с учётом десорбции графическим способом (см. мет. Пособие для выполнения ДЗ по курсу ОВТ)

На рис. представлено изменение потока газовыделения со стенок вакуумной камеры.

На графиках представлены: 1 - суммарное газовыделение с поверхностей стенок и уплотнителя; 2 - газовыделение с поверхностей стенок камеры; 3 - газовыделение с поверхности уплотнителя, изготовленного из фторопласта



# Пример расчет времени откачки при выполнении КП и ДЗ по курсу ОВТ)

На графике справа внизу представлен процесс изменения давления в рабочей камере при смене насосов (форвакуумный, высоковакуумный, сверхвысоковакуумный) и смене характера изменения давления (без и с учётом процесса десорбции):

