

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))

Кафедра «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте»

Автор: Кузьминский Р. А., кандидат военных наук, профессор

Решения задач размещены
на сайте zadachi24.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

«ГИДРОГАЗОДИНАМИКА»

Направление/специальность: 20.03.01 Техносферная безопасность
(код, наименование специальности /направления)

Профиль/специализация: Безопасность жизнедеятельности в техносфере

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Форма обучения: заочная

Москва

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа нацелены на повышение эффективности и практической направленности обучения студентов. Выполнение курсовой работы содержит элементы исследования и способствует выработке навыков в принятии обоснованных технических решений.

Тема курсовой работы: «Расчет гидродинамических параметров потока жидкости (газа) при течении в трубах (каналах)».

В задании на курсовую работу дано десять вариантов исходных данных. Номер варианта выбирается по последней цифре учебного шифра.

В методических указаниях по разработке курсовой работы даются рекомендации по выполнению основных расчетов.

Выполнению курсовой работы должно предшествовать изучение теоретических основ соответствующего раздела курса с использованием рекомендуемой литературы.

Курсовая работа может быть оформлена либо письменно на бумажном носителе, либо в электронно-цифровой форме на диске (CD). При представлении для рецензирования курсовой работы на электронном носителе (диске) студент обязан распечатать на бумажном носителе курсовую работу с титульным листом установленной формы и приложить к ней диск с содержанием работы. Титульный лист подписывается студентом, на нем производится регистрация работы. На титульном листе преподавателем проставляется отметка о допуске к защите и приводится рецензия курсовой работы.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие условия:

Страницы рукописи должны быть пронумерованы. Текст задания следует приводить полностью. Работу следует писать от руки чернилами или печатать на одной стороне листа.

Решения должны быть краткими, но исчерпывающими, вести их необходимо поэтапно, с пояснением каждого хода решения.

При вычислении искомых величин необходимо написать расчетную формулу в буквенном выражении, подставить численные значения всех входящих в формулу параметров и привести окончательный ответ.

В приводимых расчетных формулах поясняют все входящие в них параметры.

Обозначения величин и терминология должны соответствовать принятым в учебниках.

У всех размерных величин должна быть проставлена размерность.

При решении задач следует строго следить за соблюдением единства размерностей величин, входящих в ту или иную расчетную зависимость.

Значение всех коэффициентов следует обосновать ссылкой на литературу с указанием автора, названия источника и номера страницы.

При оформлении работы обязательно выполнение необходимого иллюстрационного материала (графики, схемы потоков и т.д.).

Чертежи к работе, как правило, следует выполнять на миллиметровой бумаге и клеивать или вшивать в работу.

При построении расчетных графиков нужно указать величины, откладываемые по осям графика, с обозначением их размерностей.

В конце работы привести список литературы, которой пользовался студент в процессе выполнения работы, с указанием автора, названия, места и года издания.

Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа.

К экзамену студент допускается только после получения зачета как по курсовой работе.

1. ЗАДАНИЯ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Задача № 1

Провести гидравлический расчет элементов сложного трубопровода системы водоснабжения при параллельно-разветвленном соединении труб с насосной установкой, а также рассчитать параметры гидравлического удара в трубопроводе.

Задача № 2

Выполнить газодинамический расчёт сопла Лавалья и определить параметры потока после прямого скачка уплотнения при течении воздуха по трубе.

Варианты заданий на курсовую работу

Задача № 1

Исходные данные:

1.1. Горизонтальный трубопровод из стальных труб, схема которого представлена на рис. 1.1, имеет участок с параллельным соединением труб, состоящих из двух линий длиной L_1 и L_2 и диаметром d_1 и d_2 . В точках B , C и D заданы расходы воды Q_B , Q_C и Q_D .

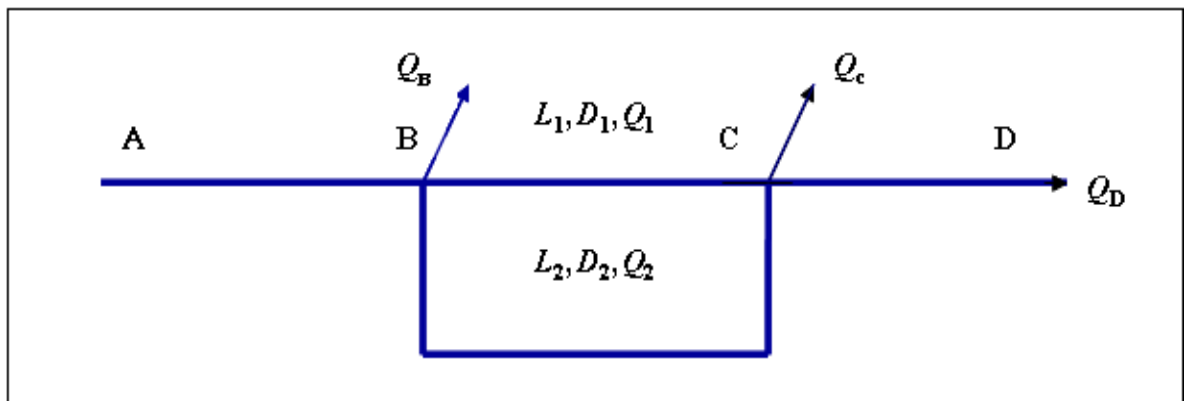


Рис. 1.1

Требуется:

Установить диаметры труб на участках AB и CD по предельным расходам.

Определить распределение расходов по первой и второй линиям параллельного соединения трубопроводов.

Определить необходимый напор в точке A для обеспечения заданных расходов Q_B , Q_C и Q_D при заданном свободном напоре в конце трубопровода $H_{св}$.

Построить пьезометрическую линию по длине трубопровода.

Задачу решить для следующих значений величин:

Варианты заданий

Исходные Данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L_{BC1} , м	300	500	200	600	400	200	300	800	600	150
L_{BC2} , м	400	800	500	900	1000	600	400	1000	700	300
L_{AB} , м	600	1000	500	1200	400	500	300	900	1200	500
L_{CD} , м	600	1200	600	900	500	200	400	800	600	600
D_1 , мм	100	150	150	125	150	125	150	100	125	150
D_2 , мм	100	125	100	75	100	100	125	50	125	100
Q_B , л/с	7	5	20	14	11	30	15	14	10	8
Q_C , л/с	20	46	36	20	43	24	40	14	40	50
Q_D , л/с	5	9	6	10	17	6	16	4	8	9
$H_{св}$, м	30	34	38	42	46	30	34	38	42	46

1.2. Вода при температуре t из водоприемного колодца (рис. 1.2) насосом перекачивается в трубопровод с расходом Q (принимается равным Q_{AB} по рис. 1.1). Диаметр всасывающей линии насоса - $d_{вс}$, длина - $L_{вс}$. Ось насоса расположена выше уровня воды в водоприемном колодце на величину H .

Требуется:

Рассчитать величину вакуума во всасывающей линии водяного насоса, подающего воду в систему трубопровода (Рис. 1.2).

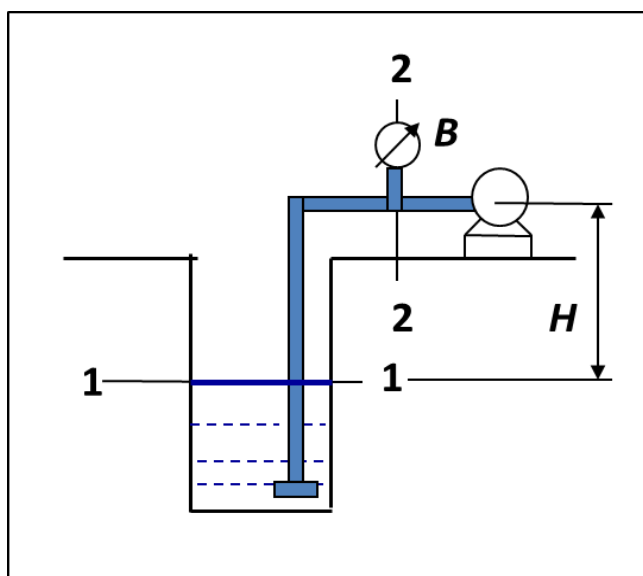


Рис. 1.2

Задачу решить для следующих значений величин:

Варианты заданий

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L_{BC} , м	10	15	20	10	25	30	20	15	10	12
d_{BC} , мм	50	75	100	150	200	250	200	150	100	75
H , м	1,5	2,5	2,0	3,0	2,6	2,4	2,2	1,5	1,8	1,0
t , °C	10	15	20	10	15	20	10	15	20	25

1.3. По стальному трубопроводу длиной L , диаметром d и толщиной стенок δ перекачивается вода с расходом Q (рис. 1.3).

Требуется:

1. Определить повышение давления в трубопроводе, если время закрывания задвижки равно T_3 .

2. Найти максимально допустимое давление для данного трубопровода, если допустимое напряжение стенок на разрыв $\sigma_{\text{доп}}=50$ МПа.

3. Исходя из максимально допустимого повышения давления, определить минимально допустимое время закрытия задвижки.

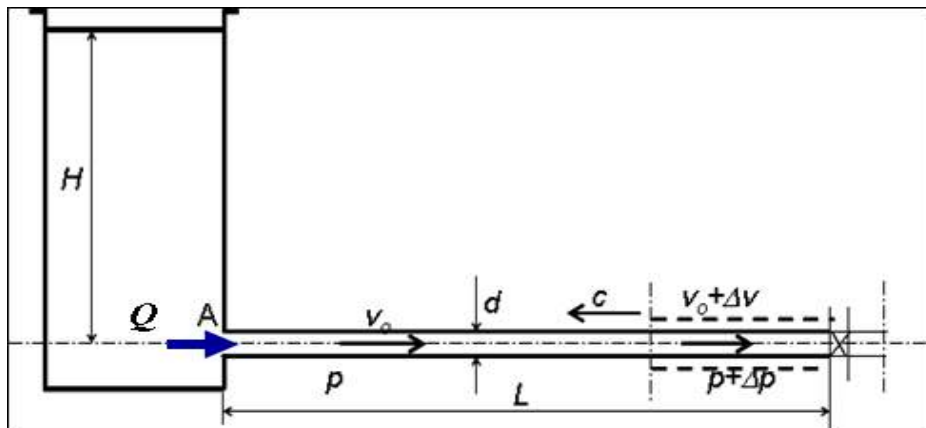


Рис. 1.3

Задачу решить для следующих значений величин:

Варианты заданий

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	50	100	125	150	200	250	300	350	400	450
δ , мм	3,5	4,0	4,5	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	10,0
Q , л/с	4	10	20	30	40	70	100	140	180	230
L , м	250	500	600	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
T_3 , с	1	2	2,5	3	3,5	3	2,5	2	1	1,5

Задача № 2

2.1. Выполнить газодинамический расчёт сопла Лавалья.

Исходные данные:

Провести газодинамический расчёт сопла Лавалья (Рис. 1.4), обеспечивающего в расчётном режиме массовый расход кислорода G . Параметры торможения: P_0 ; T_0 . Скорость входа газа $w_{\text{вх}}$, показатель адиабаты $k=1,41$. Углы раствора сопла: дозвуковой части $\alpha=80^\circ$; сверхзвуковой части $\beta=65^\circ$. Давление на срезе сопла p_2 .

Требуется:

Определить, параметры газа в основных (входного, критического и выходного) и дополнительных сечениях 1, 2, 3, 4 и построить графики зависимости P , T , W , a , ρ по длине сопла.

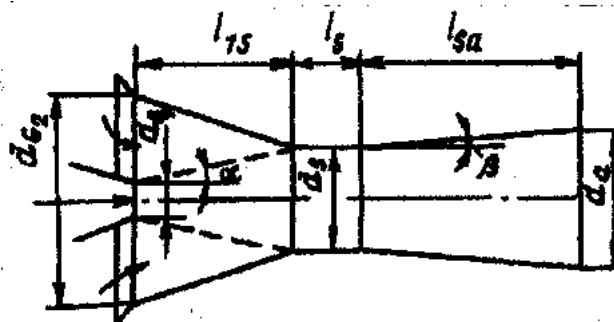


Рис. 1.4

Задачу решить для следующих значений величин:

Варианты заданий

Величина	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G , кг/с	7,5	10,0	12,5	15,0	7,5	10,0	12,5	15,0	7,5	10,0
P_0 , МПа	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
T_0 , °К	700	725	750	775	800	700	725	750	775	800
$w_{\text{вх}}$, м/с	125	150	175	200	225	125	150	175	200	225
p_2 , МПа	0,0001	0,0002	0,0004	0,0008	0,0012	0,0001	0,0002	0,0004	0,0008	0,0012

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Методические указания к решению задачи № 1

1.1. Гидравлический расчет элементов сложного трубопровода системы водоснабжения при параллельно-разветвленном соединении труб рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Определяем расчётные расходы на участках:

$$\begin{aligned} Q_{CD} &= Q_D; \\ Q_{BC} &= Q_1 + Q_2 = Q_D + Q_C; \\ Q_{AB} &= Q_B + Q_C + Q_D. \end{aligned}$$

2. Выбираем диаметры труб D_{AB} и D_{CD} , используя приложение 1.

3. Определяем потери напора:

3.1. Потери напора h_{CD} на участке CD .

Величину h можно определить по формуле

$$h = 1,1 S_0 Q^2 L = 1,1 Q^2 L / K^2,$$

где S_0 - удельное сопротивление трубы; K - расходная характеристика (модуль расхода) труб.

Величины S_0 и K для каждого участка можно определить с помощью приложений 2 и 3.

3.2. Потери напора h_{1BC} , h_{2BC} на участке BC .

Для избегания перетечек из L_1 в L_2 в точке C , необходимо чтобы

$$h_{1BC} = h_{2BC} = h_{BC}, \text{ т.е. } S_{01} Q_1^2 L_1 = S_{02} Q_2^2 L_2.$$

Отсюда

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 = \frac{S_{02} L_2}{S_{01} L_1}; Q_1 = \sqrt{\frac{S_{02} L_2}{S_{01} L_1}} Q_2,$$

Тогда,

$$Q_{BC} = Q_1 + Q_2, Q_{BC} = \sqrt{\frac{S_{02} L_2}{S_{01} L_1}} Q_2 + Q_2.$$

Откуда определяем Q_2 , а затем Q_1 и рассчитываем потери напора h_{1BC} , h_{2BC} .

3.2. Потери напора h_{AB} на участке AB .

4. Определяем необходимый напор в точке A

$$H_A = H_D + h_{AB} + h_{AC} + h_{CD}.$$

5. Строим пьезометрическую линию по длине трубопровода с учетом того, что:

Напор в точке A будет равен H_A ;

Напор в точке B $H_B = H_A - h_{AB}$;

Напор в точке C $H_C = H_B - h_{BC}$;

Напор в точке D $H_D = H_C - h_{CD}$.

Пример построения пьезометрической линии по длине трубопровода представлен на рис. 2.1.

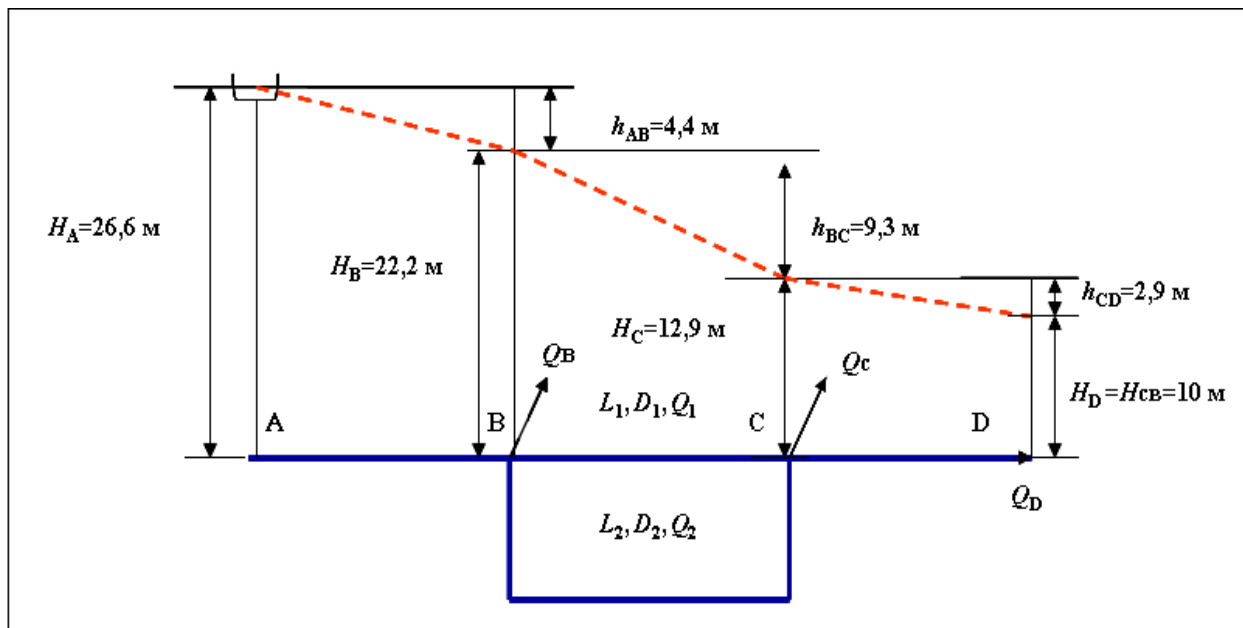


Рис. 2.1

1.2. Гидравлический расчет всасывающей линии насоса рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

Искомую величину вакуума при входе в насос определяем из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1-1 и 2-2

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}.$$

Принимая за горизонтальную плоскость сравнения сечение 1-1, т.е. $Z_1=0$, $Z_2=H$ и считая $v_1=0$, а также учитывая, что давление в сечении 1-1 равно атмосферному ($P_1=P_{AT}$), имеем расчетный вид уравнения

$$\frac{p_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2} \text{ или } \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}.$$

Скорость течения, потери напора по длине трубопровода и на местных сопротивлениях определяем по представленным выше формулам.

Величину вакуума в сечении 2-2 определяем из выражения

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{p_{atm} - p_2}{\gamma} = H + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}.$$

При определении потерь напора во всасывающей линии насоса коэффициент местного сопротивления приемного клапана с сеткой взять по приложению 4, а колена - принять $\zeta=0,2$.

Потери напора по длине могут быть определены по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_l = \lambda \frac{L}{d} \times \frac{v^2}{2g}.$$

где λ - коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); L - длина самотечной трубы; d - диаметр трубы; v - скорость течения в трубе.

Коэффициент трения может быть определен по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

где k_s – эквивалентная шероховатость стенок трубопровода (принять равной $k_s=1$ мм); Re - число Рейнольдса, которое определяется по формуле

$$Re = \frac{vd}{\nu}.$$

Здесь ν - кинематический коэффициент вязкости ν (принять по приложению 5).

Скорость течения v в трубе вычисляем по формуле

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}.$$

1.3. Гидравлический расчет параметров гидравлического удара на участке сложного трубопровода рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

Величину T определяют по формуле

$$T = \frac{2L}{c},$$

где L – длина трубопровода; c - скорость распространения ударной волны, которая для случая движения воды в стальном трубопроводе вычисляется по формуле

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + 0,01 \frac{d}{\delta}}}.$$

Здесь d – диаметр трубопровода; δ - толщина стенок трубы.

Повышение давления в трубопроводе определяют по формулам:

при прямом ударе

$$\Delta p = \rho v c;$$

при непрямом ударе

$$\Delta p = \rho v c \frac{T}{T_3}.$$

Здесь ρ - плотность жидкости; v - скорость движения потока до его остановки; c - скорость распространения ударной волны; T - фаза ударной волны; T_3 - время закрывания задвижки.

Максимально допустимое давление для данного трубопровода определяется с учетом допустимого напряжения стенок на разрыв $\sigma_{\text{доп}}$.

Разрывающее усилие, испытываемое стенками трубопровода под влиянием давления p , определяется по формуле

$$F = pdL.$$

Это усилие воспринимается площадью сечения стенок трубопровода

$$S = 2\delta L,$$

а растягивающее напряжение

$$\sigma = F / S = pd / 2\delta.$$

Отсюда искомое максимально допустимое давление для заданного трубопровода определяется по формуле

$$P_{\text{макс}} = \frac{2\delta\sigma_{\text{доп}}}{d}.$$

Минимально допустимое время закрывания задвижки определяем по формуле

$$T_{\text{з.мин}} = \frac{\rho v c T}{P_{\text{макс}}}.$$

Методические указания к решению задачи № 2

2.1. По мере движения газа по соплу (рис.1.4), его абсолютная температура T и давление p снижаются, а скорость w возрастает (рис. 2.2).

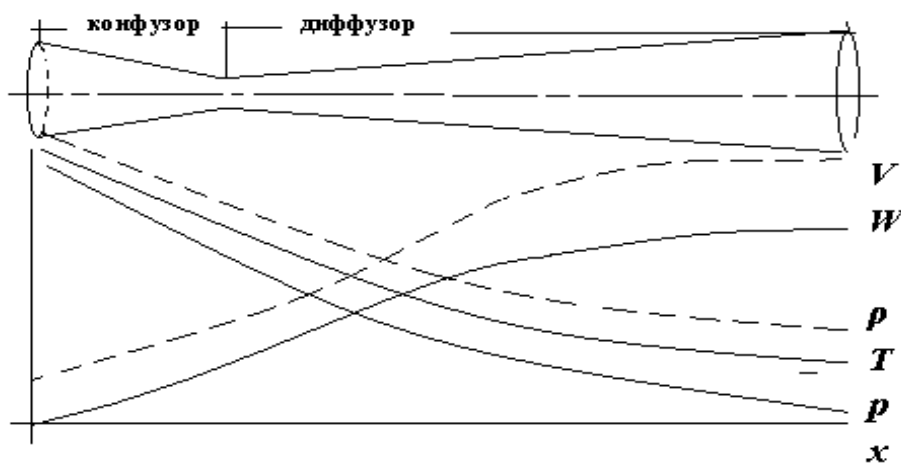


Рис. 2.2.

Скорость газа в узком сечении определяется по уравнению

$$w_{кр} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_{кр}}{\rho_{кр}} RT_0},$$

а на выходе из сопла по уравнению

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

в котором $p_2 = p_n$.

Максимальная скорость на выходе из сопла Лаваля достигается при истечении в абсолютный вакуум, когда $p_n/p_2 = 0$.

Массовый расход газа G через сопло Лаваля определяется по уравнению

$$G = \omega \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

При этом принимаются параметры либо в критическом (узком) сечении, либо в выходном сечении сопла. При определении G по параметрам узкого сечения принимаются $\omega = \omega_{кр}$, $p = p_{кр} = p_0 \beta_{кр}$, а параметрам выходного сечения $\omega = \omega_2$, $p = p_2 = p_n$ (здесь p_n – давление на срезе сопла).

Максимальный расход газа ограничивается узким сечением сопла, когда скорость в нем равна скорости звука и $\beta = \beta_{кр}$, ($p/p_0 = p_{кр}/p_0$).

Так как при $\beta < \beta_{кр}$ в узком сечении $p/p_0 = p_{кр}/p_0 = \text{const}$, то и массовый расход газа остается неизменным, равным максимальному.

Решение задачи рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Расчёт параметров газа в критическом сечении.

Находим газовую постоянную для кислорода:

$$R = \frac{R_0}{\mu}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

где R_0 - универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса кислорода.

Из уравнения Менделеева - Клапейрона находим плотность газа при полной остановке:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}, \text{ кг/м}^3.$$

Находим скорость звука при полной остановке газа:

$$a_0 = \sqrt{kRT_0}, \text{ м/с},$$

где k – показатель адиабаты, равный 1,41 для двухатомного газа.

Определим скорость звука в критическом сечении:

$$a_{кр} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}}, \text{ м/с}.$$

Максимальную скорость газового потока находим по формуле:

$$w_{\max} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k-1}}, \text{ м/с}.$$

При расчёте будем пользоваться следующими газодинамическими функциями:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau}{\tau_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2;$$

$$\pi(\lambda) = \frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

В критическом сечении коэффициент скорости $w_{кр}$ и число Маха $M_{кр}$ равны единице:

$\lambda_{кр} = \frac{w_{кр}}{a_{кр}} = 1$, откуда находим скорость газового потока в критическом сечении:

$$w_{кр} = a_{кр}, \text{ м/с}; M_{кр} = 1.$$

Используя газодинамическую функцию $\tau(\lambda)$, находим температуру газа в критическом сечении:

$$T_{кр} = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2\right), \text{ К};$$

Рассчитаем давление газа в критическом сечении, используя газодинамическую функцию $\pi(\lambda)$:

$$P_{кр} = P_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2\right)^{\frac{k}{k-1}}, \text{ Па};$$

Найдём плотность газа в критическом сечении, используя газодинамическую функцию $\varepsilon(\lambda)$:

$$\rho_{кр} = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{кр}^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \text{ кг/м}^3;$$

Из уравнения неразрывности потока находим площадь критического сечения:

$$F_{кр} = \frac{G}{\rho_{кр} \cdot w_{кр}}, \text{ м}^2;$$

Находим диаметр критического сечения:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{кр}}{\pi}}, \text{ м};$$

2. Расчёт параметров газа во входном сечении.

Находим коэффициент скорости во входном сечении:

$$\lambda_{вх} = \frac{W_{вх}}{a_{кр}};$$

Используя газодинамическую функцию $\tau(\lambda)$, находим температуру газа во входном сечении:

$$T_{\text{вх}} = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{\text{вх}}^2 \right), \text{ К};$$

Рассчитаем давление газа во входном сечении, используя газодинамическую функцию $\pi(\lambda)$:

$$P_{\text{вх}} = P_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{\text{вх}}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}, \text{ Па};$$

Найдём плотность газа во входном сечении, используя газодинамическую функцию $\varepsilon(\lambda)$:

$$\rho_{\text{вх}} = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{\text{вх}}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}, \text{ кг/м}^3;$$

Из уравнения неразрывности потока находим площадь входного сечения:

$$F_{\text{вх}} = \frac{G}{\rho_{\text{вх}} \cdot W_{\text{вх}}}, \text{ м}^2;$$

Находим диаметр входного сечения:

$$d_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{вх}}}{\pi}}, \text{ м};$$

Вычисляем скорость звука во входном сечении:

$$a_{\text{вх}} = \sqrt{kRT_{\text{вх}}}, \text{ м/с};$$

Определяем число Маха во входном сечении:

$$M_{\text{вх}} = \frac{W_{\text{вх}}}{a_{\text{вх}}};$$

3. Расчёт параметров газа в выходном сечении.

Давление газа в выходном сечении $P_{\text{вых}}$ равно давлению на срезе сопла $P_{\text{ср}}$, т. е. p_2 , $P_{\text{вых}} = P_{\text{ср}} = p_2$, МПа.

Используя газодинамическую функцию $\pi(\lambda)$, находим коэффициент скорости в выходном сечении:

$$\lambda_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)};$$

Используя газодинамическую функцию $\tau(\lambda)$, находим температуру газа в выходном сечении:

$$T_{\text{вых}} = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{\text{вых}}^2 \right), \text{ К};$$

Найдём плотность газа в выходном сечении, используя газодинамическую функцию $\varepsilon(\lambda)$:

$$\rho_{\text{вых}} = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_{\text{вых}}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}, \text{ кг/м}^3;$$

Определим скорость газового потока в выходном сечении:

$$w_{\text{вых}} = \lambda \cdot a_{\text{кр}}, \text{ м/с};$$

Из уравнения неразрывности потока находим площадь выходного сечения:

$$F_{\text{вых}} = \frac{G}{\rho_{\text{вых}} \cdot w_{\text{вых}}}, \text{ м}^2;$$

Находим диаметр выходного сечения:

$$d_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{вых}}}{\pi}}, \text{ м};$$

Вычисляем скорость звука в выходном сечении:

$$a_{\text{вых}} = \sqrt{kRT_{\text{вых}}}, \text{ м/с};$$

Определяем число Маха в выходном сечении:

$$M_{\text{вых}} = \frac{w_{\text{вых}}}{a_{\text{вых}}};$$

4. Геометрический профиль сопла.

Определяем длину суживающейся (дозвуковой) части сопла:

$$l_1 = \frac{d_{\text{ex}} - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \text{tg } \alpha/2}, \text{ м};$$

Находим длину расширяющейся (сверхзвуковой) части сопла:

$$l_2 = \frac{d_{\text{вых}} - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \text{tg } \beta/2}, \text{ м};$$

Вычисляем общую длину сопла:

$$l = l_1 + l_2, \text{ м};$$

Геометрический профиль сопла показан на рис. 1.3.

5. Расчёт дополнительных сечений.

Для расчета принимаются два дополнительных сечения в промежутке между входным и критическим сечениями и два дополнительных сечения в промежутке между критическим и выходным сечениями.

Используя значения скорости во входном, критическом и выходном сечениях, устанавливаем скорость газа в принятом дополнительном сечении, например, в сечении 1 - w_1 .

Далее расчет ведем в следующей последовательности:

Находим коэффициент скорости в выбранном сечении 1

$$\lambda_1 = \frac{w_1}{a_{\text{кр}}}.$$

Используя газодинамическую функцию $\tau(\lambda)$, находим температуру газа в сечении 1:

$$T_1 = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2 \right), \text{ К}$$

Рассчитаем давление газа в сечении 1, используя газодинамическую функцию $\pi(\lambda)$:

$$P_1 = P_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ Па}$$

Найдём плотность газа в сечении 1, используя газодинамическую функцию $\varepsilon(\lambda)$:

$$\rho_1 = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \text{ кг/м}^3$$

Из уравнения неразрывности потока находим площадь сечения 1:

$$F_1 = \frac{G}{\rho_1 \cdot W_1} \text{ м}^2$$

Находим диаметр сечения 1:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}} \text{ м}$$

Расстояние между сечением 1 и критическим сечением:

$$l_1 = \frac{d_1 - d_{кр}}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2} \text{ м}$$

Вычисляем скорость звука в сечении 1:

$$a_1 = \sqrt{kRT_1} \text{ м/с};$$

Определяем число Маха в сечении 1:

$$M_1 = \frac{w_1}{a_1}$$

Аналогично рассчитываем параметры в сечениях 2, 3 и 4.

Данные расчета параметров для основных (входного, критического и выходного) и дополнительных сечений 1, 2, 3, 4 заносим в таблицу 2.1.

Параметры сечения	$P \cdot 10^{-6}$, Па	λ	ρ , кг/м ³	w , м/с	F , м ²	T , К	a , м/с	M
входное								
1 доп.								
2 доп.								
критическое								
3 доп.								
4 доп.								
выходное								

С помощью данных таблицы параметров в основных (входного, критического и выходного) и дополнительных сечениях 1, 2, 3, 4 строим графики зависимости P , T , w , a , ρ по длине сопла (см. рис. 2.3).

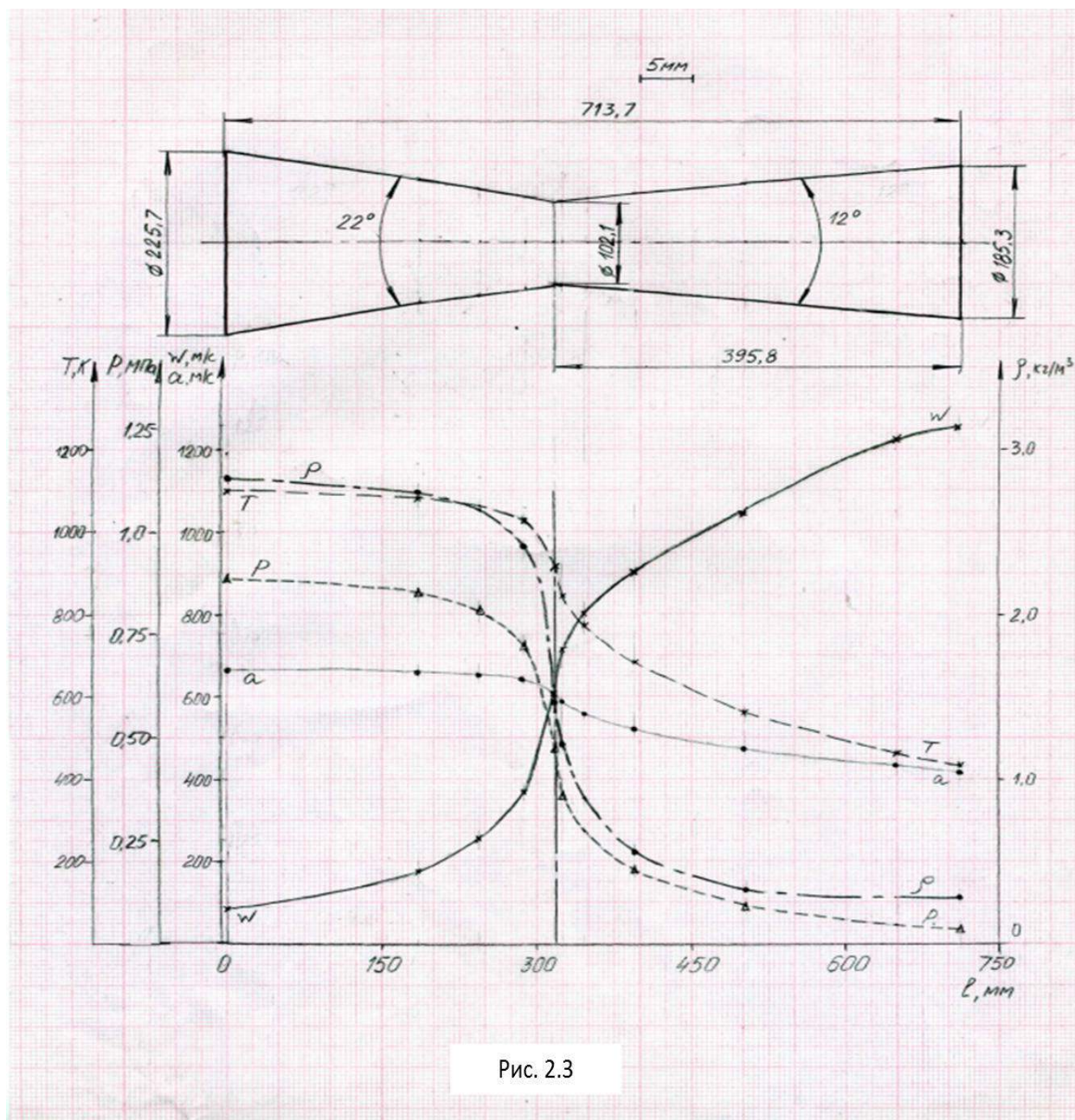


Рис. 2.3

2.2. Прямой скачок уплотнения возникает только в сверхзвуковом потоке ($\lambda_1 > 1$), при этом за скачком поток всегда становится дозвуковым ($\lambda_2 < 1$). Изменение параметров газа при переходе через скачок имеет вид:

Нужно знать, что всегда скорости газа до и после скачка связаны соотношением

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1.$$

Изменения параметров газа при переходе через скачок имеют вид:

$$\Delta w = w_1 - w_2 = w_1 \left(1 - 1/\lambda_1^2\right);$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_1 w_1^2 \left(1 - 1/\lambda_1^2\right);$$

$$\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2 = \rho_1 \left(\lambda_1^2 - 1\right);$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 = w_1^2 \left(1 - 1/\lambda_1^4\right) (k-1) / (2kR).$$

где $\lambda_1 = w_1/a_{кр}$.

Критическая скорость звука может быть определена из отношения

$$a_{кр} = 20,1 \sqrt{T_1}.$$

Используя приведенные зависимости, определяют скорость течения газа w_2 .

Параметры заторможенного потока находим, используя зависимости:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_1^2; \quad \frac{P_1}{P_0} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}; \quad \frac{\rho_1}{\rho_0} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_1^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}.$$

Литература

Основная литература:

1. Штеренлихт А.Б. Гидравлика. Учебник. - М.: Колосс, 2009.
2. Кузьминский Р.А. Гидрогазодинамика. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2011.
3. Давидсон В.Е. Основы гидрогазодинамики в примерах и задачах. Учебное пособие. - М.: Издательский центр «Академия», 2008.

Дополнительная литература:

1. Бекнев В.С. и др. Сборник задач и упражнений по газовой динамике. - М.: Машиностроение, 1992.
2. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1987.
3. Бондарев Е.Н. и др. Аэрогидродинамика. - М.: Машиностроение, 1993.
4. Давидсон В.Е. Основы газовой динамики в задачах. - М.: Высшая школа, 1987.
5. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. - М.: Машиностроение, 1990.
6. Большаков В.А., Константинов Ю. М. и др. Справочник по гидравлике. - Киев: Вища школа, 1977.
7. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. - М.: Стройиздат, 1987.
8. Журнал. Водоснабжение и санитарная техника.

Приложение 1

Предельные расходы Q , л/с и скорости v , м/с в водопроводных трубах

Диаметр условного прохода D (мм)	Трубы			
	Стальные		Чугунные	
	Q	v	Q	v
100	11,7	1,15	9,4	1,15
125	16,6	1,19	15,0	1,18
150	21,8	1,12	25,3	1,40
175	29,2	1,30	-	-
200	46,0	1,34	45,8	1,42
250	71,0	1,34	73,5	1,46
300	103	1,35	108	1,48
350	140	1,35	149	1,53
400	184	1,36	197	1,56

Приложение 2

Удельные сопротивления S_0 , с²/м⁶ и расходные характеристики K , м³/с для бывших в эксплуатации водопроводных труб при скорости $v \geq 1,2$ м/с

Диаметр условного прохода D (мм)	Трубы			
	Стальные		Чугунные	
	$S_{0кв}$	$K_{кв}$	$S_{0кв}$	$K_{кв}$
100	173	0,076	312	0,0565
125	76,4	0,114	96,7	0,102
150	30,65	0,181	37,1	0,164
175	20,8	0,219	-	-
200	6,96	0,379	8,09	0,352
250	2,19	0,675	2,53	0,628
300	0,85	1,085	0,95	1,097
350	0,373	1,637	0,437	1,512
400	0,191	2,288	0,219	2,14

Приложение 3

Значение коэффициента K_1 в зависимости от средней скорости v

$v, \text{ м/с}$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
K_1	1,41	1,33	1,28	1,24	1,20	1,175	1,15	1,13	1,115
$v, \text{ м/с}$	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,20
K_1	1,10	1,085	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,015	1,00

Приложение 4

Коэффициент сопротивления всасывающих клапанов с сеткой

$d, \text{ мм}$	50	75	100	150	200	250
$\xi_{кл}$	10	8,5	7	6	5,2	4,4

Приложение 5

Значения кинематического коэффициента вязкости воды в зависимости от температуры

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	ν $\text{см}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	ν $\text{см}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	ν $\text{см}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	ν $\text{см}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	ν $\text{см}^2/\text{с}$
10	0.0131	14	0.0118	18	0.0106	22	0.0099	26	0.0088
11	0.0127	15	0.0115	19	0.0104	23	0.0094	27	0.0086
12	0.0124	16	0.0112	20	0.0101	24	0.0092	28	0.0084
13	0.0121	17	0.0109	21	0.0100	25	0.0090	29	0.0082

Приложение 6

Плотность и вязкость газов (0 °С, 760 мм. рт. ст., 101325 Па)

Вещество	Плотность, ρ , кг/м^3	Динамический коэффициент вязкости, μ , 10^{-5} кг/(м*с)
Азот	1,250	1,67
Аммиак	0,771	0,93
Водород	0,090	0,84
Воздух	1,293	1,72
Хлор	3,164	1,29
Кислород	1,429	1,92
Метан	0,717	1,04
Углекислый газ	1,977	1,40
Гелий	0,178	1,89

Таблица газодинамических функций

M	λ	p/p_0	ρ/ρ_0	T/T_0	$F_{кр}/F$
0	0	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,2	0,218	0,9725	0,9803	0,9921	0,3374
0,4	0,431	0,8956	0,9243	0,9690	0,6288
0,6	0,635	0,7840	0,8405	0,9328	0,8416
0,8	0,825	0,6560	0,7400	0,8865	0,9632
1,0	1,000	0,5283	0,6339	0,8333	1,0000
1,2	1,159	0,4124	0,5311	0,7764	0,9705
1,4	1,300	0,3142	0,4374	0,7184	0,8969
1,6	1,425	0,2353	0,3557	0,6614	0,7999
1,8	1,535	0,1740	0,2868	0,6068	0,6949
2,0	1,633	0,1278	0,2301	0,5556	0,5925
2,2	1,718	0,0935	0,1841	0,5081	0,4988
2,4	1,793	0,0684	0,1472	0,4647	0,4161
2,6	1,858	0,0501	0,1179	0,4252	0,3453
2,8	1,914	0,0368	0,0946	0,3894	0,2857
3,0	1,964	0,0272	0,0762	0,3571	0,2362
3,2	2,008	0,0202	0,0616	0,3281	0,1953
3,4	2,047	0,0151	0,0500	0,3019	0,1617
3,6	2,081	0,0114	0,0409	0,2784	0,1342
3,8	2,112	0,0086	0,0335	0,2572	0,1113
4,0	2,138	0,0066	0,0276	0,2381	0,0933