

04, апрель 2016

УДК 62-52

Сравнительные характеристики расходомерных устройств «Мерная шайба и труба Вентури»

Куцыбала А. И., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

Табанова Д. А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

Научный руководитель: Пильгунов В. Н., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

bauman@bmstu.ru

Испытательное оборудование: Стенд гидравлический универсальный ТМЖ 2

Общий вид гидравлического стенда представлен на фото рис.1.[2]

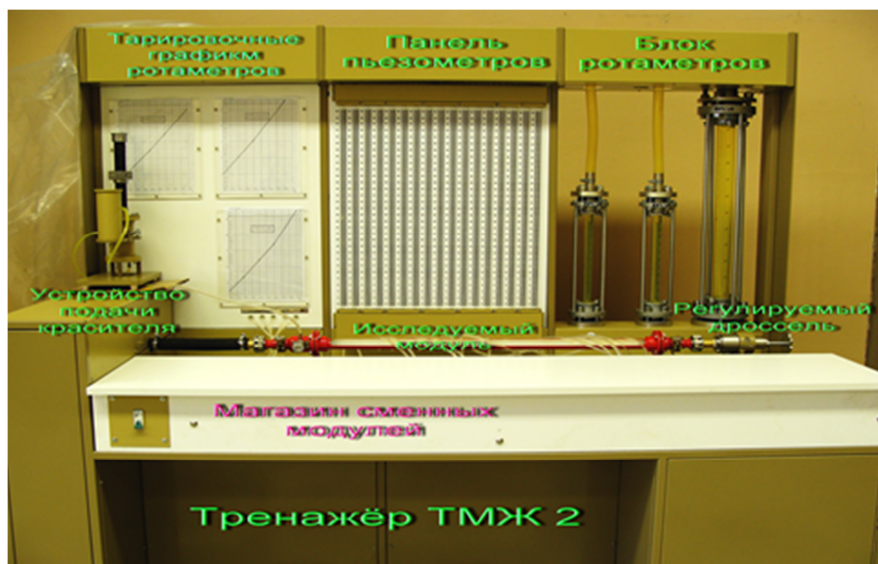


Рис. 1 Общий вид гидравлического стенда ТМЖ 2

Мерная шайба. Продольное сечение сменного модуля «Расходомерная диафрагма» представлено на рис. 2.

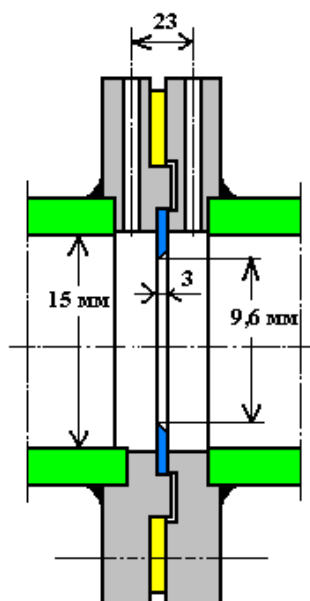


Рис. 2. Продольное сечение сменного модуля «Расходомерная диафрагма»

Расположение контрольных сечений для подключения пьезометров вдоль оси сменного модуля «Расходомерная диафрагма» представлено на рис.3.

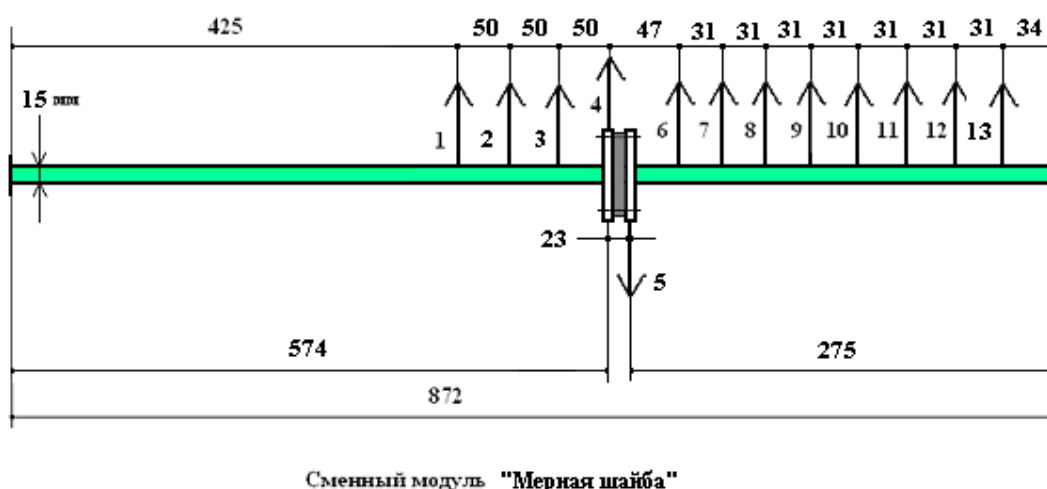


Рис. 3. Расположение контрольных сечений

Пьезометрические линии магистрали со встроенной в неё расходомерной диафрагмой, полученные из эксперимента для трех режимов, представлены на рис.4.

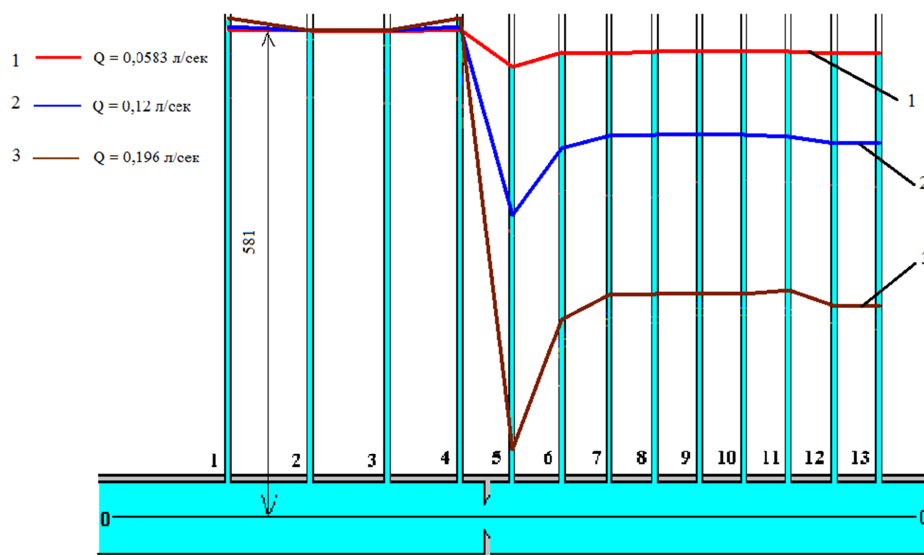


Рис. 4. Пьезометрические линии сменного модуля «Расхомерная диафрагма»

Если обозначить через V_4 осреднённую скорость потока в сечении перед сужающим устройством $S_4=0,785d_1^2$, а через V_5 - скорость в сжатом сечении $S_5 = \varepsilon S_{\text{отв}}$, где ε - коэффициент относительной площади, $S_{\text{отв}} = 0,785d_2^2$, то уравнение Бернулли, записанное для сечений 4 и 5, устанавливает связь между разностью пьезометрических напоров и скоростью в сжатом сечении $\Delta H = \frac{(p_4 - p_5)}{\rho g}$, $\Delta H = \frac{[1 - (n)^2 + \zeta_{\text{отв.}}]v_5^2}{2g}$, или $V_5 = \frac{\sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{1 - (n)^2 + \zeta_{\text{отв.}}}}$, где $n = \varepsilon S_{\text{отв.}} / S_4$ - степень сужения потока в расходомерной диафрагме.

Переходя к уравнению расхода в сжатом сечении $Q = \frac{S_5 \sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{1 - (n)^2 + \zeta_{\text{отв.}}}}$ и вводя понятие *проводимость расходомера* $G = \varepsilon S_{\text{отв.}} \sqrt{\frac{2g}{1 - (n)^2 + \zeta_{\text{отв.}}}}$, получим расходно-перепадную характеристику расходомера $Q = G \sqrt{\Delta H}$.

$\zeta_{\text{отв.}} = 0,05$ - коэффициент сопротивления отверстия с острой кромкой [3]. Коэффициент относительной площади определяется по формуле Альтшуля $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - m^2}$ [4],[5].

Стандартная нормальная расходомерная диафрагма имеет нижеследующие соотношения характерных размеров [6]:

-модуль диафрагмы $m = d_{\text{отв}}/d_{\text{трубы}}$ (для исследуемого расходомера $d_{\text{отв}} = 9,6\text{мм}$, $d_{\text{трубы}} = 15\text{ мм}$ и $m = 0,64$);

-толщина стенки диафрагмы $\delta \leq 0,1d_{\text{трубы}}$;

-ширина притупления острой кромки $\gamma \leq 0,02d_{\text{трубы}}$;

-угол фаски со стороны тыльной плоскости диафрагмы $\beta \geq 30^\circ$;

Расчетное значение проводимости диафрагмы $G = 0,204 \times 10^{-3}$.

Экспериментальное значение проводимости равно $G = 0,27 \times 10^{-3}$.

Анализ пьезометрической линии рис. 3 показывает, что влияние отверстия с острой кромкой начинается в сечении S_4 и заканчивается в сечении S_9 , таким образом, суммарная потеря напора при прохождении потока через расходомерную диафрагму определяется выражением $h_{\text{диаф}} = \frac{\zeta_{\text{отв.}} V_{\text{сж}}^2}{2g} + \frac{(V_{\text{сж}} - V_9)^2}{2g}$, где $V_{\text{сж}}$ - скорость потока в сжатом сечении.

Приводя выражение потерь к скорости в трубе V_9 , получим зависимость потерь от скоростного напора в трубе, $h_{\text{диаф}} = \left(1 + \frac{\zeta_{\text{отв.}}}{n^2} + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n}\right) \frac{V_9^2}{2g} = \zeta_{\text{диаф.расч.}} \frac{V_9^2}{2g}$, где $\zeta_{\text{диаф.расч.}} = \left(1 + \frac{\zeta_{\text{отв.}}}{n^2} + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n}\right)$ - расчётное значение суммарного коэффициента сопротивления расходомера, выполненного на базе диафрагмы.

Расчетное значение $\zeta_{\text{диаф.расч.}} = 8,93$.

Экспериментальное значение суммарного коэффициента сопротивления расходомера, выполненного на базе диафрагмы, определим из соотношения $\zeta_{\text{диаф.эксп.}} = \frac{2g(h_4 - h_9)}{V_9^2}$. Экспериментальное значение равно 5,1.

Погрешность полученной математической модели, обусловленная рассмотрением процесса расширения потока как квазивнезапного, без учёта взаимного влияния близко расположенных местных сопротивлений и воздействия местного сопротивления на структуру потока перед собой и после себя, компенсируем введением в выражение потери напора коэффициента коррекции:

$h_{\text{диаф}} = K_{\text{диаф}} \cdot \zeta_{\text{диаф.расч.}} \frac{V_9^2}{2g}$, а само значение коэффициента коррекции получим

как отношение экспериментального значения коэффициента расхода к расчётному:

$$K_{\text{диаф}} = \frac{\zeta_{\text{диаф.эксп.}}}{\zeta_{\text{диаф.расч.}}}$$

Труба Вентури. Продольное сечение сменного модуля представлено на рис.5.

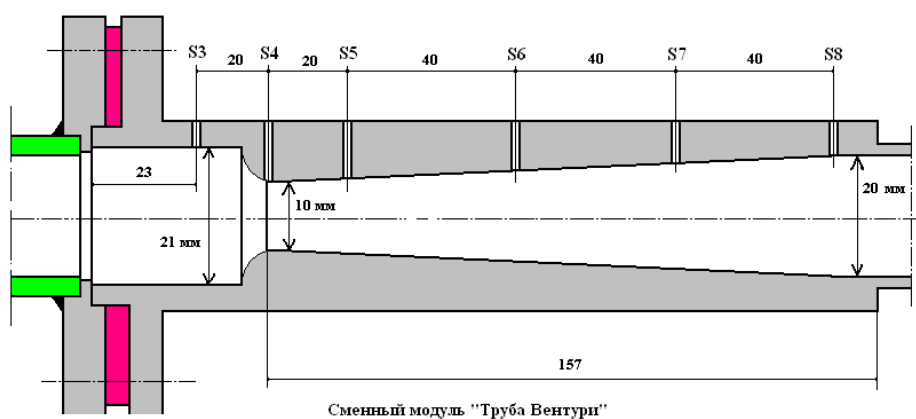


Рис. 5. Продольное сечение сменного модуля Труба Вентури

Расположение контрольных сечений представлено на рис. 6.

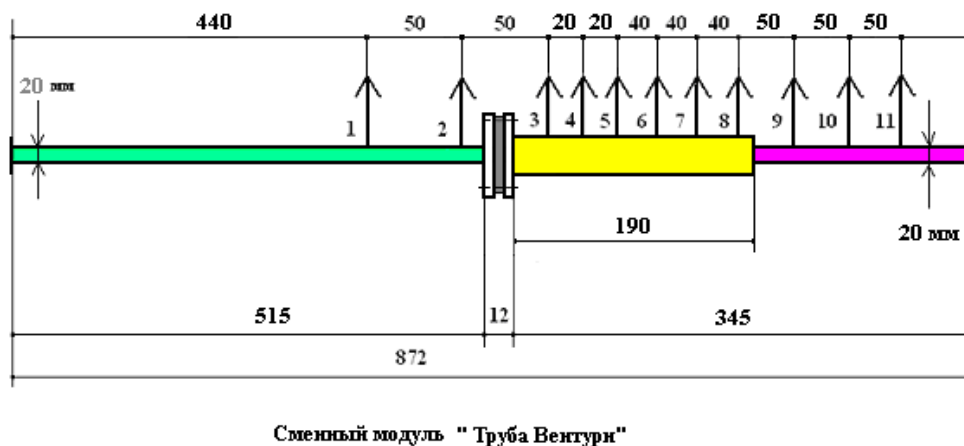


Рис. 6. Расположение контрольных сечений трубы Вентури

Пьезометрические линии сменного модуля «Труба Вентури», полученные из эксперимента для трех режимов представлены на рис. 7.

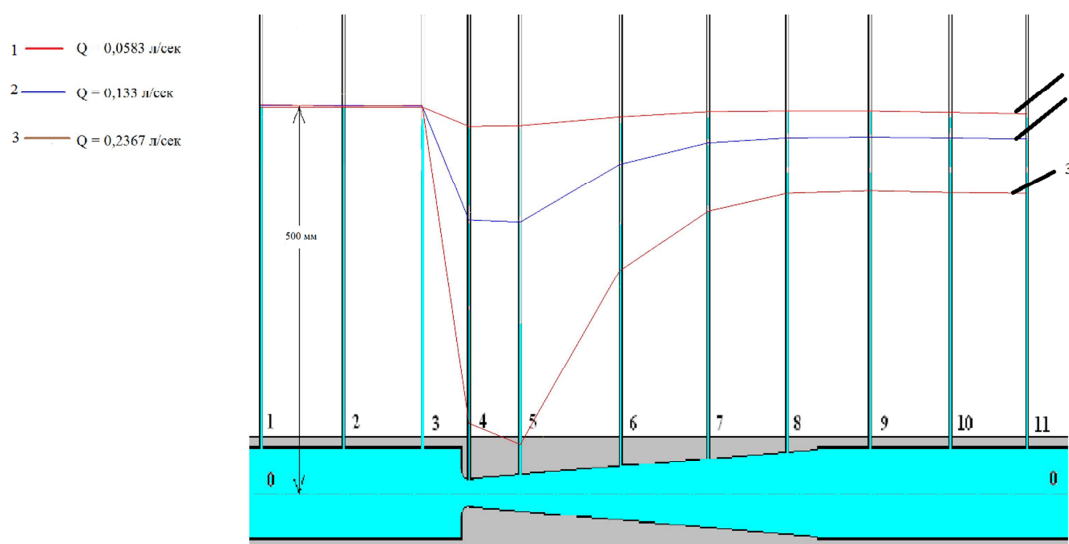


Рис. 7. Пьезометрические линии сменного модуля «Труба Вентури»

Уравнение Бернулли, записанное для сечений 3 и 4 (рис. 7) имеет вид $\frac{p_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} +$

$$\frac{V_3^2}{2g} = \frac{p_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + \zeta_{\text{к.н.}} \frac{V_4^2}{2g}.$$

Приведём полученное уравнение к скорости V_4 с учётом уравнения неразрывности $v_3 = mv_4$, где $m = S_4/S_3 < 1$ – коэффициент относительной площади в коноидальном насадке, S_3 и S_4 – площади сечений: $\frac{p_3}{\rho g} + \frac{V_4^2 m^2}{2g} - \frac{p_4}{\rho g} - \frac{V_4^2}{2g} - \zeta_{\text{к.н.}} \frac{V_4^2}{2g} = 0$. Средняя скорость потока и объёмный расход в коноидальном насадке принимают значение

$$V_4 = \sqrt{\frac{2g(\frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_4}{\rho g})}{1 + \zeta_{\text{к.н.}} - (m)^2}};$$

$$Q = V_4 S_4 = S_4 \sqrt{\frac{2g(\frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_4}{\rho g})}{1 + \zeta_{\text{к.н.}} - (m)^2}} = G \sqrt{\frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_4}{\rho g}},$$

где $G = S_4 \sqrt{\frac{2g}{1 + \zeta_{\text{к.н.}} - (m)^2}}$ – значение проводимости расходомера «Труба Вентури».

Расчетное значение составило $0,353 \times 10^{-4}$.

Экспериментальное значение проводимости: $0,36 \times 10^{-4}$.

Для определения полного гидравлического сопротивления расходомера «Труба Вентури» запишем уравнение Бернулли для сечений 3 и 8 (рис.7):

$$\frac{p_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} = \frac{p_8}{\rho g} + \frac{V_8^2}{2g} + \zeta_{\text{к.н.}} \frac{V_4^2}{2g} + \zeta_{\text{диф.}} \frac{V_4^2}{2g},$$

где $\zeta_{\text{диф.}} = \lambda \frac{(1-\frac{1}{n^2})}{8\sin\frac{\alpha}{2}} + k(1-\frac{1}{n})^2$ - коэффициент полного сопротивления диффузора [4],

приведённый к скорости в *сжатом сечении*, зависящий от его угла раскрытия α . После преобразования уравнения Бернулли с учётом равенства скоростей $V_3 = V_8$, получим выражение для определения экспериментального значения коэффициента полного

$$\text{сопротивления трубы Вентури } \zeta_{\text{вент.эксп.}} = \frac{2g(\frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_8}{\rho g})}{V_4^2} = \frac{2g(h_3 - h_8)}{V_4^2}.$$

Расчётное значение коэффициента полного гидравлического сопротивления расходомера «Труба Вентури», приведённого к скорости в сжатом сечении, будем определять как сумму $\zeta_{\text{вент.расч.}} = (\zeta_{\text{к.н.}} + \zeta_{\text{диф.}})[7]$.

Для исследуемого диффузора угол раскрытия $\alpha = 5^\circ$ и его коэффициент полного сопротивления $\zeta_{\text{диф.}} = 0,16$. Таким образом, расчётное значение коэффициента гидравлического сопротивления трубы Вентури может быть оценено величиной. $\zeta_{\text{вент.расч.}} = 0,16 + 0,03 = 0,19$.

Экспериментальное значение равно 0,23.

Погрешность полученной математической модели, обусловленная рассмотрением процесса без учёта взаимного влияния близко расположенных местных сопротивлений и воздействия местного сопротивления на структуру потока перед собой и после себя, компенсируем коэффициентом коррекции коэффициента полного гидравлического сопротивления расходомера «Труба Вентури»: $K_{\text{вент.}} = \frac{\zeta_{\text{вент.эксп.}}}{\zeta_{\text{вент.расч.}}}$.

Сравнение. Расход в сжатом сечении: $Q = \mu A_{\text{отв}} \sqrt{2g\Delta H}$. Введем понятие идеальной скорости: $V_{\text{ид}} = \sqrt{2g\Delta H}$. Тогда $V_{\text{отв}} = \frac{Q}{A_{\text{отв}}} = \mu V_{\text{ид}}$. На рис. 8,9 представлены сравнительные характеристики исследуемых элементов.

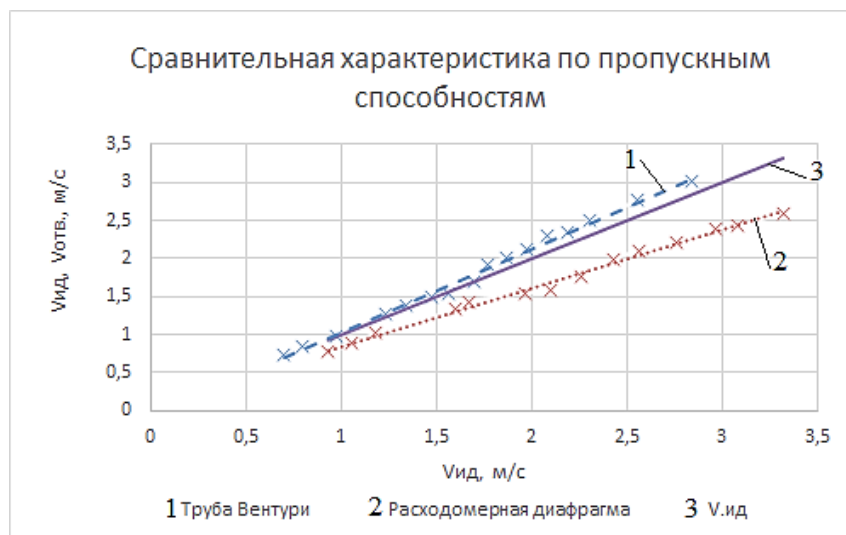


Рис. 8. Сравнительная характеристика расходомеров по пропускным способностям

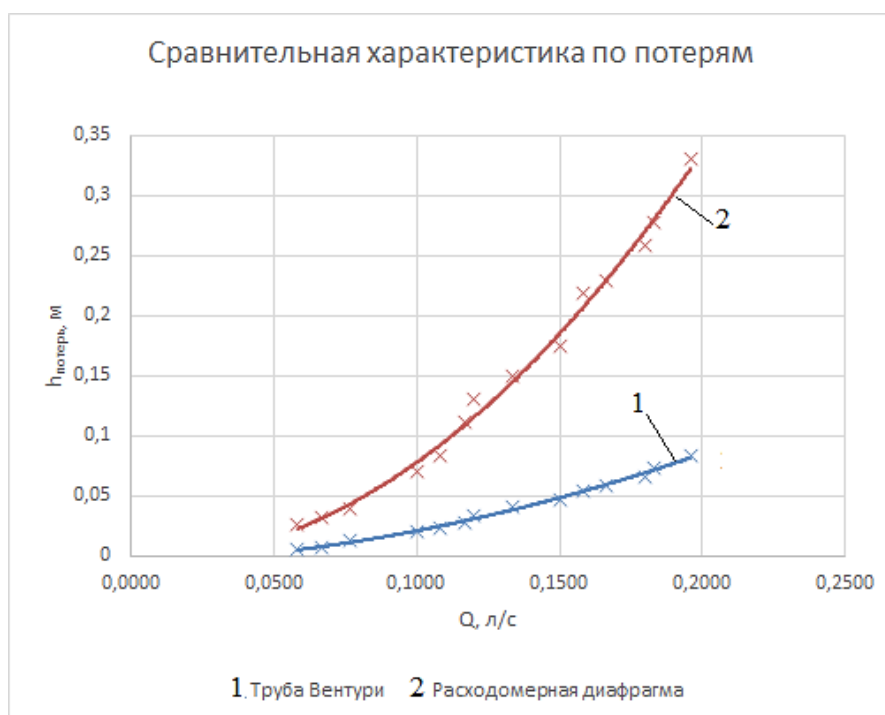


Рис. 9. Сравнительная характеристика расходомеров по потерям

Результаты экспериментов. Анализ, проведенных экспериментов и построение на основе графиков, позволяет сделать следующий вывод:

Хотя диафрагма и является наиболее простым прибором, она имеет наибольшее гидравлическое сопротивление и вызывает значительные потери напора. Наиболее совершенной в отношении гидравлического сопротивления является труба Вентури.

Список литературы

- [1] Руднев С.С., Подвидз Л.Г. Лабораторный курс гидравлики насосов и гидروпередат. М.: Машиностроение, 1974. 412 с.
- [2] Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Гидравлический стенд для верификации математических моделей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 10. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/643050.html> (дата обращения 20.03.2015).
- [3] Пильгунов В.Н., Маргулис М.А. Свечение и электризация при течении диэлектрических жидкостей в узком канале // Журнал физической химии. Т. 83, № 8. 2009. С. 1585-1590.
- [4] Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- [5] Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Машиностроение, 1982. 224 с.
- [6] Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Верификация математических моделей типовых местных сопротивлений // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/645605.html> (дата обращения 23.03.2015).
- [7] Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Особенности истечения жидкости через отверстия некруглой формы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/758817.html> (дата обращения 23.03.2015).