

Модель бокового патрубка пожарного трехходового разветвления для определения его коэффициента гидравлического сопротивления

С.О. Куртов¹, В.П. Малый¹, Я.В. Гребнев², А.Ю.Трояк.¹

¹Сибирская пожарно-спасательная академия, Железногорск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: В статье разработана аналитическая гидравлическая модель бокового патрубка трехходового пожарного разветвления с номинальным (условным) диаметром DN80. Модель основана на поэлементном расчете местных гидравлических сопротивлений, возникающих на участках с изменением геометрии потока: четырех поворотах (три под 45° и один под 90°), прямооточном вентиле, а также участках внезапного расширения и сужения. Вклад линейных потерь напора, как и в случае с центральным патрубком, был принят незначительным (6% от местных потерь), что подтверждает доминирующую роль местных сопротивлений в общей потере напора. Достоверность модели проверена путем сравнения с данными экспериментальных исследований по определению гидравлических сопротивлений каждого патрубка трехходового разветвления. Расхождение между теоретически рассчитанным значением потерь напора (6,86 м) и экспериментальным (6,97 м) составило всего 1,6 %. Ключевым результатом работы является расчет общего коэффициента местных сопротивлений бокового патрубка пожарного разветвления, который составил $\zeta = 3,4$.

Ключевые слова: модель, пожарное трехходовое разветвление, гидравлическое сопротивление, напор, давление, расход.

Введение

Подача огнетушащих веществ от передвижной пожарной техники по-прежнему осуществляется преимущественно по напорным пожарным рукавам [1]. Значительный объем мировых исследований посвящен потерям напора в пожарных рукавах [2, 3], тогда как гидравлическим потерям в других элементах насосно-рукавных систем уделено заметно меньше внимания [4-6].

Для одновременной подачи нескольких приборов тушения от одной магистральной линии применяются трехходовые пожарные разветвления (далее – РТ). Коэффициенты гидравлического сопротивления РТ напрямую влияют на потери напора в насосно-рукавной системе, что необходимо учитывать для эффективной подачи воды при тушении пожара. В работе [7] представлена модель центрального патрубка РТ, предназначенная для

аналитического расчета его коэффициента гидравлического сопротивления и оценки потерь напора в нем при различных значениях расхода воды.

Целью данной работы является разработка и верификация гидравлической модели бокового патрубка (далее – БП) РТ на основе экспериментальных данных по определению его гидравлического сопротивления [5].

В соответствии с теорией гидродинамики, полная потеря напора в БП РТ-80 складывается из двух составляющих [8, 9]:

1. Линейные потери, связанные с преодолением сил трения соседних слоёв жидкости и трения о шероховатую внутреннюю поверхность устройства;
2. Местные потери, обусловленные преодолением локальных гидравлических сопротивлений в местах изменения геометрии и направления потока, таких как отводы, внезапные сужения и расширения, а также элементы запорной арматуры.

Аналитический расчет гидравлической модели [7] показал, что вклад линейных потерь напора в центральном патрубке РТ не превышает 6%, вследствие чего основными в боковом патрубке являются местные потери, обусловленные наличием отводов, расширений, сужений и прямого вентильного участка.

Для визуального восприятия на рис.1. представлен первый участок гидравлической модели БП РТ-80 с основными геометрическими параметрами и углом отклонения (45°) потока жидкости для определения коэффициента местного гидравлического сопротивления на представленном участке.

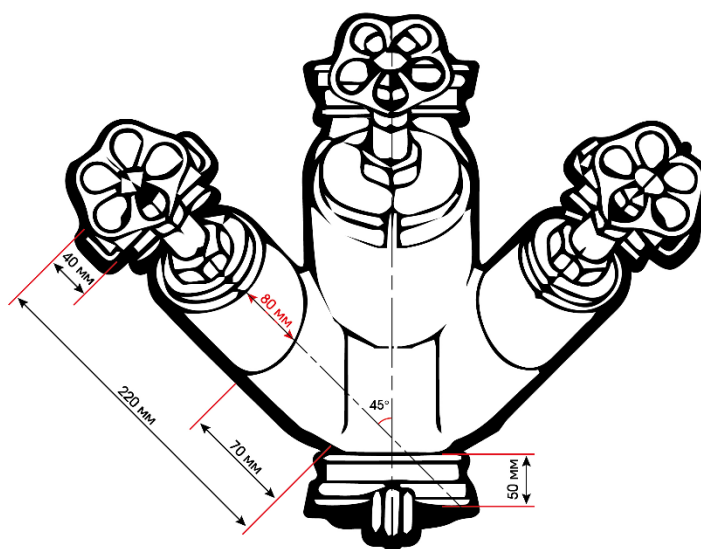


Рис. 1. – Первый участок гидравлической модели БП РТ-80
с основными геометрическими параметрами и углом отклонения
потока жидкости

Далее представлена гидравлическая модель второго участка БП РТ-80 (рис.2) в виде трех колен с указанием изменений направлений движения жидкости в полости (в градусах), а также геометрические размеры других частей рассматриваемого пожарного оборудования.

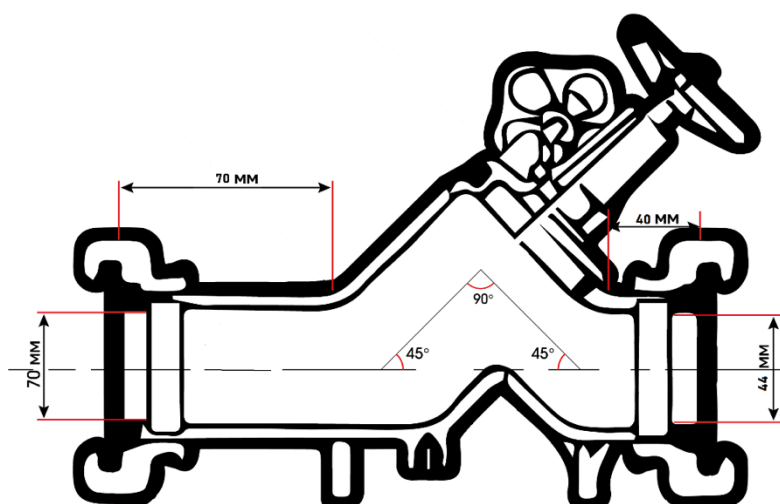


Рис. 2. – Второй участок гидравлической модели БП РТ-80
с указанием основных геометрических размеров и углов изменения
направления потока жидкости (в градусах)

Конфигурация полости БП РТ, представленная на рис. 1 и 2, обуславливает четыре поворота потока жидкости, из которых три имеют угол 45° и один – 90° . При этом расчеты подтверждают, что в таких системах при подаче воды от пожарной техники устанавливается развитый турбулентный режим течения [7].

Коэффициенты местного сопротивления колен $\zeta_{\text{колена}}$, загнутых на 45° и 90° , для турбулентного режима течения жидкости были определены на основе данных таблицы 1 [7, 10].

Таблица № 1

Градусы	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta_{\text{колена}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

$$\zeta_{\text{колена}}^{\text{Табл.1}}(45^\circ) \cong 0,35;$$

$$\zeta_{\text{колена}}^{\text{Табл.1}}(90^\circ) \cong 1,10.$$

Суммарный коэффициент местных сопротивлений, состоящий из трёх колен под 45° и одного под 90° , соединённых последовательно, был рассчитан как арифметическая сумма их коэффициентов:

$$\zeta_{\text{сумма колена}}^{\text{Табл.1}} = 3 \times 0,35 + 1,10 = 2,15.$$

Для турбулентного режима течения коэффициент местного сопротивления прямооточного вентиля DN 40 БП РТ $\zeta_{\text{вентиля}}^{\text{Табл.2}}$ был определен по данным таблицы 2 с использованием метода линейной интерполяции [7].

Таблица № 2

DN	25	38	50	65	76	100	150
$\zeta_{\text{вентиля}}$	1,04	0,85	0,79	0,65	0,60	0,50	0,42

$$\zeta_{\text{вентиля}}^{\text{DN40 Табл.2}} = 0,84.$$

Коэффициент местного сопротивления ζ_{BP} , обусловленный внезапным расширением потока при переходе из муфтовой головки диаметром 70 мм (рис.2) в общую полость перед распределением по трем патрубкам, определили по следующей формуле [10, стр. 168]:

$$\zeta_{BP} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,00385}{0,00503}\right)^2 = 0,055,$$

ω_1 – площадь живого сечения потока жидкости муфтовой головки (рис.2) диаметром 70 мм, м²;

ω_2 – площадь живого сечения потока жидкости в общей полости РТ-80 (полость перед дальнейшим распределением потока жидкости по трем патрубкам, принимаем диаметром 80 мм), м².

Коэффициент местного сопротивления ζ_{BC} , возникающего в результате внезапного сужения полости БП, определили по следующей формуле [10, стр. 168]:

$$\zeta_{BC} = 0,5 \times \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) = 0,5 \times \left(1 - \frac{0,00196}{0,00503}\right) = 0,31,$$

ω_1 – площадь живого сечения потока жидкости в общей полости РТ-80 (полость перед дальнейшим распределением потока жидкости по трем патрубкам, принимаем диаметром 80 мм), м²;

ω_2 – площадь живого сечения потока жидкости в полости бокового патрубка РТ-80 (принимаем диаметром 50 мм, рис.2), м².

Суммарный коэффициент местных сопротивлений, учитывающий четыре колена, прямооточный вентиль, а также участки с резким расширением и сужением, был определен как сумма соответствующих коэффициентов:

$$\zeta_{\text{сумма}}^{\text{мест}} = \zeta_{\text{сумма}}^{\text{Табл.1}} + \zeta_{\text{Табл.2}}^{\text{DN40}} + \zeta_{\text{вентиля}} + \zeta_{BP} + \zeta_{BC};$$

$$\zeta_{\text{сумма}}^{\text{мест}} = 2,15 + 0,84 + 0,055 + 0,31 = 3,36.$$

Далее рассчитали значения средней по поперечному сечению скорости воды на каждом рассматриваемом участке сложной гидравлической системы:

1. Участок с внезапным расширением:

$$V_{BP} = \frac{Q}{\omega_{мин}^{BP}} = \frac{0,0102 \text{ м}^3/\text{с}}{0,00385 \text{ м}^2} = 2,65 \text{ (м/с)}.$$

Q – объемный расход (табличное значение пропускной способности) напорного пожарного рукава диаметром 51 мм, м³/с;

$\omega_{мин}^{BP}$ – минимальная площадь сечения потока жидкости на рассматриваемом участке (принимается диаметр 70 мм) рис.2, м².

2. Участок с внезапным сужением и первым углом поворота в 45°:

$$V_{BC+1 \text{ пов}} = \frac{Q}{\omega_{мин}^{BC}} = \frac{0,0102 \text{ м}^3/\text{с}}{0,00196 \text{ м}^2} = 5,2 \text{ (м/с)}.$$

$\omega_{мин}^{BC}$ – минимальная площадь сечения потока жидкости на рассматриваемом участке (принимается диаметр 50 мм), м².

3. Третий участок содержит два поворота под 45°, один отвод 90° и прямооточный вентиль:

$$V_{Третий} = \frac{Q}{\omega_{мин}^{Третий}} = \frac{0,0102 \text{ м}^3/\text{с}}{0,00159 \text{ м}^2} = 6,42 \text{ (м/с)}.$$

$\omega_{мин}^{Третий}$ – площадь живого сечения в третьем участке БП РТ (принимается среднее арифметическое значение трех диаметров: (50+40+44)/3=45 мм), м².

Далее определили потери напора в каждом рассмотренном участке в зависимости от коэффициентов местных гидравлических сопротивлений по формуле [10]:

$$h_{BP}^{мест} = \zeta_{BP} \times \frac{V_{BP}^2}{2g} = 0,055 \times \frac{(2,65)^2}{2 \times 9,8150} = 0,020 \text{ (м)}.$$

$$h_{BC,1 \text{ пов}}^{мест} = \zeta_{BC+пов} \times \frac{V_{BC+1 \text{ пов}}^2}{2g} = 0,66 \times \frac{(5,2)^2}{2 \times 9,8150} = 0,91 \text{ (м)}.$$

$$h_{Третий}^{мест} = \zeta_{Третий} \times \frac{V_{Третий}^2}{2g} = 2,64 \times \frac{(6,42)^2}{2 \times 9,8150} = 5,54 \text{ (м)}.$$

Общие потери напора от местных сопротивлений в БП РТ рассчитаны как сумма потерь напора на всех участках:

$$h_{\text{Общие}}^{\text{мест}} = h_{\text{ВР}}^{\text{мест}} + h_{\text{ВС,1 пов}}^{\text{мест}} + h_{\text{Третий}}^{\text{мест}} = 0,02 + 0,91 + 5,54 = 6,47 \text{ (м)}.$$

К общим потерям напора в результате местных сопротивлений добавим линейные потери (примем 6 % от $h_{\text{Общие}}^{\text{мест}}$ [7]).

$$h_{\text{лин}} = 6,47 \times 0,06 = 0,39 \text{ (м)}.$$

Общие потери напора по разработанной авторами модели БП РТ-80 составили:

$$h_{\text{Общие}}^{\text{БП}} = h_{\text{Общие}}^{\text{мест}} + h_{\text{лин}} = 6,47 + 0,39 = 6,86 \text{ (м)}.$$

Общие потери напора в боковом патрубке РТ-80 рассчитали по формуле для насосно-рукавных систем при турбулентном режиме течения на основе экспериментальных значений гидравлического сопротивления $S_{\text{РТ-80}}^{\text{БП}}$ [5]:

$$\Delta h_{\text{РТ}}^{\text{экс}} = S_{\text{РТ-80}}^{\text{БП}} \times Q^2 = 0,067 \times 10,2^2 = 6,97 \text{ (м)}.$$

$S_{\text{РТ-80}}^{\text{БП}}$ – среднее значение гидравлического сопротивления бокового патрубка РТ-80, $((\text{с/л})^2 \times \text{м})$, полученных в результате экспериментальных исследований, представленных в работе [5];

Q – объёмный расход огнетушащего вещества, проходящего через рассматриваемый патрубок РТ-80, 10,2 л/с.

Сравнительный анализ показывает, что относительное расхождение между теоретическим $h_{\text{Общие}}^{\text{БП}}$ и экспериментальным $\Delta h_{\text{РТ}}^{\text{экс}}$ значением потерь напора в боковом патрубке при расходе 10,2 л/с составляет:

$$\delta = \frac{|\Delta h_{\text{РТ}}^{\text{экс}} - h_{\text{Общие}}^{\text{БП}}|}{(\Delta h_{\text{РТ}}^{\text{экс}} + h_{\text{Общие}}^{\text{БП}})/2} \times 100\% = \frac{|6,97 - 6,86|}{(6,97 + 6,86)/2} \times 100\% = 1,6 \text{ \%}.$$

Расхождение между теоретически рассчитанным значением потерь напора (6,86 м) и экспериментальным (6,97 м) составило всего 1,6 %. Такое незначительное отклонение свидетельствует о достоверности и адекватности предложенной гидравлической модели.

Заключение

1. Разработана гидравлическая модель для определения потерь напора в боковом патрубке трехходового пожарного разветвления РТ-80.
2. Аналитическим способом получен общий коэффициент местных сопротивлений бокового патрубка РТ-80, который составил $\zeta_{\text{общ}}^{\text{мест}} = 3,4$.
3. Достоверность модели проверена путем сравнения с данными экспериментальных исследований по определению гидравлических сопротивлений каждого патрубка трехходового разветвления. Расхождение между теоретически рассчитанным значением потерь напора (6,86 м) и экспериментальным (6,97 м) составило всего 1,6 %.
4. Настоящее исследование, в совокупности с предыдущими работами авторов, завершает создание гидравлической модели трехходового разветвления РТ-80: впервые определены коэффициенты сопротивления для всех его патрубков. Это позволяет перейти к принципиально новому уровню точности тактических расчетов.

Литература

1. Полозов, А. А., Самохвалов Ю.П. Определение относительных частот использования пожарного оборудования на пожарах. Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15. № 4. С. 62-65.
2. Se-Hong M., Yong-Joon K. A study on the friction loss reduction in fire hoses used at a fire scene. Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2013. Т. 27. №. 3. С. 52-59.
3. Benfer M. E., Forssell E., Scheffey J. Determination of fire hose friction loss characteristics. Fire technology. 2017. Т. 53. №. 3. С. 1059-1075.
4. Куртов С.О. Малый В.П., Макаров В.М. Аналитическое обоснование необходимости экспериментального определения гидравлических сопротивлений пожарных трехходовых разветвлений и

переходных соединительных головок различных диаметров Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2024. № 1. С. 10-13.

5. Куртов С.О., Малый В.П. Результаты экспериментальных исследований значений гидравлических сопротивлений патрубков пожарных трехходовых разветвлений. Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2. С. 153-162.

6. Бубнов В.Б. Разработка рекомендаций по совершенствованию методик расчета насосно-рукавных систем. Пожарная и аварийная безопасность. 2020. № 2. С. 5-10.

7. Куртов С.О., Малый В.П. Сравнительный анализ расчетно-теоретических и экспериментальных значений гидравлического сопротивления центрального патрубка пожарного трехходового разветвления Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1. С. 46-54.

8. Ефремова Т.В., Ашмарина Н.Н., Душкин В.В. Исследование потерь давления в сетях газораспределения при установке седловых отводов // Инженерный вестник Дона, 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5497.

9. Ефремова Т. В., Соломатин А.В., Шустов Н.А. Исследование потерь давления в стальных и полиэтиленовых фитингах, применяемых в системах газоснабжения // Инженерный вестник Дона, 2022, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7462.

10. Абросимов Ю. Г., Жучков В.В., Болдырев Е.Н. и др. Гидравлика: учебник / М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. 321 с.

References

1. Polozov A.A., Samoxvalov Yu.P. Pozharovzry`vobezopasnost`. 2006. V. 15. № 4. pp. 62-65.

2. Se-Hong M., Yong-Joon K. Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2013. V. 27. № 3. P. 52-59.

3. Benfer M. E., Forssell E., Scheffey J. Fire technology. 2017. V. 53. № 3. pp. 1059-1075.
4. Kurtov S.O., Maly V.P., Makarov V.M. Aktual'ny'e problemy bezopasnosti v texnosfere. 2024. № 1. pp.10-13.
5. Kurtov S.O. Maly V.P. Problemy upravleniya riskami v texnosfere. 2025. № 2(74). pp.153-162.
6. Bubnov, V. B. Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'. 2020. № 2(17). pp. 5-10.
7. Kurtov S.O., Maly V.P. Sovremenny'e problemy grazhdanskoj zashhity. 2025. № 1(54). pp. 46-54.
8. Efremova T.V., Ashmarina N.N, Dushkin V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5497.
9. Efremova, T.V., Solomatin A.V., Shustov N.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7462.
10. Abrosimov Yu. G., Zhuchkov V.V., Boldy'rev E.N. i dr. Gidravlika [Hydraulics]: uchebnik. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2017. 321 p.

Дата поступления: 12.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025