

В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомялков, К.В. Шаров

V.I. Vasenin, D.V. Vasenin, A.V. Bogomiagkov, K.V. Sharov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ*

INVESTIGATION INTO THE LOCAL RESISTANCES OF THE GATING SYSTEM

Получены формулы для подсчета коэффициентов местных сопротивлений по экспериментальным значениям скоростей и напоров жидкости. Определены коэффициенты сопротивлений поворота из стояка в коллектор и из коллектора в питатель в зависимости от отношения площадей их поперечных сечений до и после поворота потока.

Ключевые слова: литниковая система, стояк, коллектор, питатель, гидравлическое сопротивление, скорость потока, расход жидкости.

Formulas for the local resistances coefficients of the gating system has been obtained. Local resistance coefficients for the turn from the sprue into the collector, and from the collector into the feeder depending on their cross-section areas before and after the turn of the flow have been determined.

Keywords: gating system, sprue, collector, feeder, hydraulic resistance, flow speed, liquid flow rate.

Литниковые системы (ЛС) в настоящее время не рассчитываются, так как неизвестны величины двух главных сопротивлений – повороты из стояка в коллектор и из коллектора в питатель. Причем площадь стояка в нижнем сечении $S_{ст}$ может быть и больше, и равной, и меньше площади коллектора S_k . А сечение питателя $S_п$ всегда меньше S_k . Казалось бы, есть 672-страничный «Справочник по гидравлическим сопротивлениям» [1], однако в нем значения этих сопротивлений не приводятся. По-видимому, гидравликов такие сопротивления просто не интересуют. И данных о местных сопротивлениях для разных отношений $S_k/S_{ст}$ и $S_п/S_k$ нет. Но даже когда $S_{ст} = S_k$ или $S_k = S_п$, приводимые величины коэффициентов ζ сильно отличаются друг от друга. В книге [2, с. 90] говорится, что этот коэффициент местного

* В работе участвовали А.А. Константинов, В.А. Сафронов и М.Ю. Щелконогов.

сопротивления равен 1,10 при повороте потока на 90° в круглой трубе и 1,20 – в трубе прямоугольного сечения. По данным [3, с. 196] $\zeta=1,19$, по [1, с. 217] эта величина равна 1,15. А в книге [4, с. 209] выводится, что $\zeta=1,00$, правда, сделано при этом сильное допущение, что после поворота потока жидкости на 90° работает только половина сечения трубы – следовательно, это значение ζ завышено.

Для проведения исследований использовалась ЛС, показанная на рис. 1 и 2. Система состоит из чаши, стояка, коллектора и сменного модуля «коллектор – питатель». Этот модуль был спроектирован таким образом, чтобы его можно было применять при исследовании истечения из трубы большего диаметра в трубу меньшего диаметра (рис. 1) и из меньшего в больший (рис. 2).

Важно было использовать в опытах одно и то же устройство и исключить влияние механической обработки на размеры отверстий. При истечении из меньшего диаметра в больший (рис. 2) сток в атмосферу происходил из сечения $\delta-\delta$ из такого же (меньшего) диаметра. Диаметр чаши 272 мм, высота воды в чаше 103,5 мм. Внутренние диаметры стояка, коллектора и питателей окончательно доводились с помощью разверток. Диаметры стояка и коллектора: $d_{ст}=24,08$ мм, $d_{к}=16,03$ мм. Диаметры питателей $d_{п}$ были такими, мм: 2,53, 4,03, 6,03, 8,03, 9,03, 11,53, 13,03, 14,03, 15,03 и 16,03. Относительная длина питателей $l_{п}/d_{п}$ была равна 5.

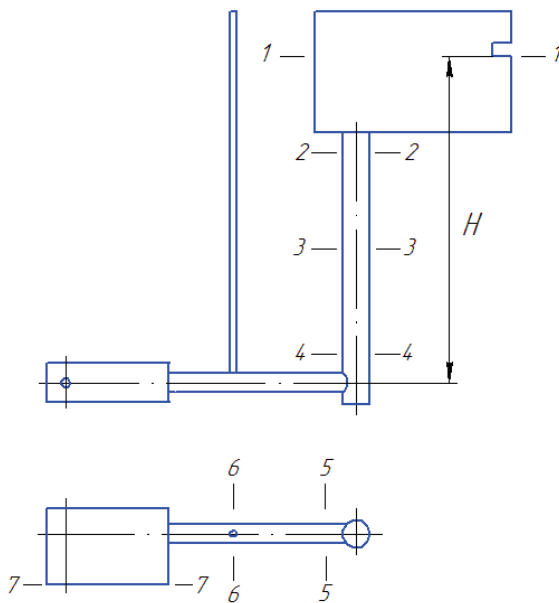


Рис. 1. Литниковая система ($S_{к} \geq S_{п}$)

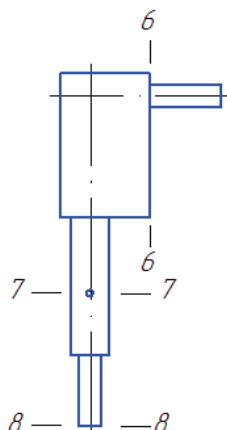


Рис. 2. Схема подсоединения сменного модуля «коллектор – питатель» для случая $S_k < S_n$

Уровень воды H – расстояние по вертикали от сечения $1-1$ в чаше до продольных осей коллектора и питателя – поддерживался постоянным путем непрерывного доливания воды в чашу и слива ее излишков через специальную щель в чаше: $H = 0,3630$ м.

В сечении $6-6$ на рис. 1 и в сечениях $6-6$ и $7-7$ на рис. 2 были установлены пьезометры – стеклянные трубочки длиной 400 мм и внутренним диаметром 4,5 мм. Время истечения жидкости из питателя составляло 30–380 с, а вес вылившейся из питателя воды – около 9 кг. Эти весовые и временные ограничения обеспечили отклонение скорости от среднего значения $\pm 0,005$ м/с, не более.

Выведем формулу для определения коэффициента местного сопротивления на поворот и изменение площадей сечений потока до и после поворота. Уравнение Бернулли для сечений $6-6$ и $7-7$ (см. рис. 1 и 2) запишется так:

$$\frac{p_6}{\gamma} + \alpha \frac{v_k^2}{2g} = \frac{p_7}{\gamma} + \alpha \frac{v_n^2}{2g} + h_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где p_6 и p_7 – давления в сечениях $6-6$ и $7-7$, Н/м²; γ – удельный вес жидкости, Н/м³; α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса), $\alpha = 1,1$ [3, с. 108]; v_k и v_n – скорости жидкости в сечениях $6-6$ коллектора и $7-7$ питателя, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{\text{пот}}$ – потери напора на трение в коллекторе и питателе и на поворот потока на 90°, м. Потери напора можно записать так:

$$h_{\text{пот}} = \lambda \frac{l_{6-\text{п}}}{d_{\text{к}}} \alpha \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \alpha \frac{v_{\text{п}}^2}{2g} + \zeta_{\text{к-п(п)}} \alpha \frac{v_{\text{п}}^2}{2g}. \quad (2)$$

И так:

$$h_{\text{пот}} = \lambda \frac{l_{6-\text{п}}}{d_{\text{к}}} \alpha \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \alpha \frac{v_{\text{п}}^2}{2g} + \zeta_{\text{к-п(к)}} \alpha \frac{v_{\text{к}}^2}{2g}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) λ – коэффициент потерь на трение, принимаем $\lambda = 0,03$ [5]; $l_{6-\text{п}}$ – длина коллектора от сечения 6–6 до продольной оси питателя, м; $\zeta_{\text{к-п(п)}}$ – коэффициент местного сопротивления на поворот из коллектора в питатель и изменение площадей сечений потока до и после поворота, приведенный к скорости жидкости в питателе $v_{\text{п}}$; $\zeta_{\text{к-п(к)}}$ – коэффициент местного сопротивления на поворот из коллектора в питатель и изменение площадей сечений потока до и после поворота, приведенный к скорости жидкости в коллекторе. Очевидно, что $v_{\text{к}} S_{\text{к}} = v_{\text{п}} S_{\text{п}}$. Если принять $v_{\text{к}} = v_{\text{п}} S_{\text{п}} / S_{\text{к}}$, то, учтя это и сделав преобразования зависимостей (1) и (2), получаем такое соотношение:

$$\zeta_{\text{к-п(п)}} = \frac{2g(p_6 - p_7)}{\alpha \gamma v_{\text{п}}^2} + \left(1 - \lambda \frac{l_{6-\text{п}}}{d_{\text{к}}}\right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}}\right)^2 - \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} - 1.$$

А если взять $v_{\text{п}} = v_{\text{к}} S_{\text{к}} / S_{\text{п}}$, то получится такая зависимость:

$$\zeta_{\text{к-п(к)}} = \frac{2g(p_6 - p_7)}{\alpha \gamma v_{\text{к}}^2} + 1 - \lambda \frac{l_{6-\text{п}}}{d_{\text{к}}} - \left(\lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1\right) \left(\frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{п}}}\right)^2.$$

В случае истечения из большего сечения в меньшее (рис. 1) диаметр коллектора $d_{\text{к}} = 16,03$ мм, расстояние $l_{6-\text{п}} = 0,0745$ м, $d_{\text{п}} = \text{var}$, $l_{\text{п}} = 5d_{\text{п}}$, а давление p_7 равно атмосферному давлению $p_{\text{а}}$. При входе потока из меньшего сечения 6–6 в большее 7–7 (см. рис. 2) $d_{\text{к}} = \text{var}$, $l_{6-\text{п}} = 5d_{\text{к}}$, $d_{\text{п}} = 16,03$ мм, $l_{\text{п}} = 0,0745$ м, $p_7 > p_{\text{а}}$, $p_8 = p_{\text{а}}$. На рис. 2 сечение 6–6 называем сечением коллектора, а 7–7 – сечением питателя, хотя 6–6 по площади меньше 7–7. Если приравнять правые части выражений (2) и (3) – понятно, что левые части равны, – то получатся следующие соотношения:

$$\zeta_{\text{к-п(п)}} = \zeta_{\text{к-п(к)}} \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}}\right)^2, \quad \zeta_{\text{к-п(к)}} = \zeta_{\text{к-п(п)}} \left(\frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{п}}}\right)^2.$$

Возникает вопрос: что за странная конструкция показана на рис. 2, у которой площадь питателя больше площади коллектора? На самом деле, это поворот из стояка в коллектор для случая, когда коллектор по площади больше стояка. Просто модуль с нижней проекции рис. 1 соответствующим образом развернут относительно коллектора. Дело в том, что при истечении из меньшего сечения в большее нужно поток замкнуть меньшим сечением. Иначе труба с большим сечением не будет заполнена жидкостью, в трубе образуется безнапорное течение, а давление в жидкости известно – оно равно атмосферному.

Следует располагать стояк и коллектор горизонтально. Если стояк установлен вертикально, то поперечные сечения плоскостей сравнения стояка и коллектора будут на разных уровнях под углом в 90° друг к другу, причем в горизонтальном сечении вертикального стояка по всей площади давление одинаковое, а в вертикальном сечении коллектора давление по высоте будет разным.

Уравнение Бернулли (после преобразований) для систем на рис. 1 и 2 выглядит так:

$$H = \alpha \frac{v_7^2}{2g} (1 + \zeta_{1-7(7)}), \quad H = \alpha \frac{v_8^2}{2g} (1 + \zeta_{1-8(8)}),$$

где $\zeta_{1-7(7)}$ – коэффициент сопротивления системы между сечениями 1–1 и 7–7, приведенный к скорости жидкости в сечении 7–7 (см. рис. 1); $\zeta_{1-8(8)}$ – коэффициент сопротивления системы между сечениями 1–1 и 8–8, приведенный к скорости жидкости в сечении 8–8 (см. рис. 2). Коэффициент

$$\zeta_{1-7(7)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{ст-к(к)}} + \lambda \frac{l_{\text{к}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{к-п(п)}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где $\zeta_{\text{ст}}$ – коэффициент местного сопротивления входа из чаши в стояк, $\zeta_{\text{ст}} = 0,10$ [1, с. 126], так как радиус скругления входной кромки стояка равен $0,10$ диаметра стояка; $l_{\text{ст}}$ и $l_{\text{к}}$ – длина стояка и коллектора, м, для схемы на рис. 1 $l_{\text{ст}} = 0,2675$ м, $l_{\text{к}} = 0,2560$ м; $\zeta_{\text{ст-к(к)}}$ – коэффициент местного сопротивления поворота из стояка в коллектор, приведенный к скорости жидкости в коллекторе. Коэффициент $\zeta_{1-8(8)}$ определяется по аналогичной (4) формуле, учитывающей дополнительно два резких сужения потока, еще один участок коллектора и один участок питателя. Приводить эту зависимость не будем. Коэффициент расхода ЛС от сечения 1–1 до сечения 7–7, приведенный к скорости в сечении 7–7, $\mu_{1-7(7)} = (1 + \zeta_{1-7(7)})^{-1/2}$, а $\mu_{1-8(8)} = (1 + \zeta_{1-8(8)})^{-1/2}$. Скорости:

$$v_7 = \mu_{1-7(7)} \sqrt{2gH/\alpha}, \quad v_8 = \mu_{1-8(8)} \sqrt{2gH/\alpha}. \quad \text{Расходы: } Q = Q_{\text{ст}} = Q_{\text{к}} = Q_{\text{п}} = \\ = \mu_{1-7(7)} S_{\text{п}} \sqrt{2gH/\alpha} \text{ и } Q = Q_{\text{ст}} = Q_{\text{к}} = Q_{\text{п}} = \mu_{1-8(8)} S_{\text{к}} \sqrt{2gH/\alpha}.$$

Коэффициенты поворота, сопротивлений и расхода системы, скорости и расходы приведены в табл. 1 и 2. Точность определения коэффициентов поворота даже при худшем варианте, когда $S_{\text{к}} = S_{\text{п}}$, составляет $\pm 0,005$, не более. Обработка экспериментальных данных табл. 1 о величине $\zeta_{\text{к-п(п)}}$ по методу наименьших квадратов дала следующую зависимость: $\zeta_{\text{к-п(п)}} = 0,557(S_{\text{п}}/S_{\text{к}})^2 + 0,066S_{\text{п}}/S_{\text{к}} + 0,257$. Это выражение действительно при изменении отношения $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ или $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}}$ от 0,251 до 1. Для интервала $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ или $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}} = 0,025 \dots 0,251$ получили следующее соотношение: $\zeta_{\text{к-п(п)}} = 0,280 + 0,115S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$. Когда площадь коллектора больше площади стояка в нижнем сечении ($S_{\text{к}} > S_{\text{ст}}$), то обработка экспериментальных данных табл. 2 о величине $\zeta_{\text{ст-к(к)}}$ дает такое выражение: $\zeta_{\text{ст-к(к)}} = 1,273(S_{\text{к}}/S_{\text{ст}})^2 - 0,746S_{\text{к}}/S_{\text{ст}} + 0,353$. Зависимость действительно при изменении $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}}$ от 1 до 3,985. Для интервала $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}} = 3,985 \dots 15,821$ установлено: $\zeta_{\text{ст-к(к)}} = 1,053(S_{\text{к}}/S_{\text{ст}})^2 - 0,658S_{\text{к}}/S_{\text{ст}} + 3,502$. Надо заметить, что в литейной практике ЛС с отношением $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}} > 3$ не используются. Полученные зависимости ζ от отношения площадей сечений после и до поворота потока на 90° охватывают все практические величины $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ и $S_{\text{к}}/S_{\text{ст}}$. А коэффициент сопротивления при равных площадях сечений до и после поворота на 90° составляет всего 0,885, значительно меньше 1, в отличие от литературных данных.

Таблица 1

Характеристики литниковой системы при $S_{\text{к}} \geq S_{\text{п}}$

$d_{\text{п}}$, мм	$S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$	$\zeta_{\text{к-п(п)}}/\zeta_{\text{к-п(к)}}$	$\zeta_{1-7(7)}$	$\mu_{1-7(7)}$	v_7 , м/с	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
2,53	0,025	0,283/456,49	0,402	0,844	2,141	10,76
4,03	0,063	0,293/73,403	0,480	0,822	2,093	26,70
6,03	0,142	0,303/15,151	0,497	0,817	2,073	59,20
8,03	0,251	0,309/4,912	0,538	0,806	2,040	103,33
9,03	0,317	0,330/3,277	0,593	0,792	2,002	128,23
11,53	0,517	0,462/1,727	0,878	0,730	1,837	191,84
13,03	0,661	0,544/1,246	1,124	0,686	1,727	230,26
14,03	0,766	0,636/1,083	1,359	0,651	1,643	254,02
15,03	0,879	0,763/0,987	1,665	0,613	1,533	272,02
16,03	1	0,885/0,885	1,975	0,580	1,458	294,16

Таблица 2

Характеристики литниковой системы при $S_k < S_n$

d_n , мм	$S_k/S_{ст}$	$\zeta_{ст-к(к)}/\zeta_{ст-к(ст)}$	$\zeta_{1-8(8)}$	$\mu_{1-8(8)}$	$v_6 = v_8$, м/с	v_7 , м/с	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
4,03	15,822	256,65/1,025	2,276	0,552	1,400	0,088	17,86
6,03	7,067	51,434/1,030	2,054	0,572	1,450	0,205	41,41
8,03	3,985	17,600/1,108	2,136	0,565	1,431	0,359	72,47
9,03	3,151	10,590/1,066	2,000	0,577	1,463	0,464	93,69
11,53	1,933	3,668/0,982	1,992	0,578	1,465	0,758	152,96
13,03	1,513	2,114/0,923	1,996	0,578	1,464	0,967	195,22
14,03	1,305	1,639/0,962	2,131	0,565	1,432	1,097	221,39
15,03	1,137	1,207/0,933	2,253	0,554	1,405	1,235	249,28

Вернемся к замечательной табл. 1, которая дает представление о том, что же такое литниковая система. Проанализируем то, что происходит в системе при изменении диаметра питателя с 16,03 до 2,53 мм. Диаметр становится меньше в 6,34 раза, а площадь – в 40,14 раза. Коэффициент поворота $\zeta_{к-п(п)}$ стал меньше в 3,13 раза (соответственно 0,885 и 0,283), а коэффициент сопротивления системы $\zeta_{1-7(7)}$ – в 4,91 раза, 1,975 и 0,402. Коэффициент расхода $\mu_{1-7(7)}$ увеличился с 0,580 до 0,844, а скорость воды в питателе возросла с 1,458 до 2,141 м/с, в 1,47 раза. Расход в системе уменьшился с $294,16 \cdot 10^{-6}$ до $10,76 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Как видно, расход упал только в 27,34 раза, а не в 40,14, как должно было бы быть, если исходить только из уменьшения площади поперечного сечения питателя. Это объясняется тем, что с уменьшением диаметра питателя снижается расход (и скорость) воды в коллекторе и стояке, становятся меньше потери напора и растет коэффициент расхода системы. Однако площадь сечения вытекающей из питателя струи жидкости снижается из-за уменьшения диаметра питателя. В результате и получаются такие впечатляющие параметры ЛС. Причем режимы истечения из меньшего сечения в большее и из большего в меньшее исследованы на одном и том же устройстве, а оба эти вида местных сопротивлений широко используются в литниковых системах.

Таким образом, в работе определены коэффициенты местных сопротивлений поворота из стояка в коллектор и из коллектора в питатель при разных величинах отношений площадей их поперечных сечений до и после поворота потока.

Список литературы

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
2. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 416 с.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: Бастет, 2008. – 672 с.
4. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 416 с.
5. Токарев Ж.В. К вопросу о гидравлическом сопротивлении отдельных элементов незамкнутых литниковых систем // Улучшение технологии изготовления отливок. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1966. – С. 32–40.

Получено 27.04.2012