

В.И. Васенин, А.В. Богомяков, К.В. Шаров
V.I. Vasenin, A.V. Bogomyakov, K.V. Sharov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ИССЛЕДОВАНИЯ L-ОБРАЗНЫХ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

INVESTIGATIONS INTO A L-TYPE GATING SYSTEMS

Приведено описание лабораторных L-образных литниковых систем. Изложены результаты теоретического и экспериментального определения скоростей и расходов жидкости в зависимости от отношения площади питателя к площади коллектора и количества одновременно работающих питателей.

Ключевые слова: литниковая система, стояк, коллектор, питатель, коэффициент сопротивления, скорость потока, расход жидкости.

A laboratory L-type gating systems are described. Results of theoretical and experimental determination of liquid flow speed and rates depending on the relation area the feeder to area the collector and on the number of working feeders at the same time are given.

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

Теоретические и экспериментальные исследования L-образной литниковой системы (ЛС) подробно изложены в статье [1]. Настоящая работа является продолжением изучения работы таких систем.

Лабораторная система (рис. 1) состоит из литниковой чаши, стояка, коллектора и 6 одинаковых питателей I–VI [2]. Внутренний диаметр чаши 272 мм, высота воды в чаше 103,5 мм. Продольные оси коллектора и питателей находятся в одной горизонтальной плоскости. Уровень жидкости H – расстояние по вертикали от сечения 1–1 в чаше до продольных осей коллектора и питателей – поддерживался постоянным путем непрерывного доливания воды в чашу и слива ее излишек через специальную щель в чаше, $H = 0,3630$ м. Жидкость выливается сверху из питателей в форму. В сечениях коллектора 5–5, 6–6, 7–7, 8–8, 9–9, 10–10 и 11–11 установлены для измерения напора пьезометры – стеклянные трубочки длиной 400 мм и внутренним диаметром 4,5 мм. В сечениях стояка 2–2, 3–3 и 4–4 были размещены изогнутые на 90° пьезометры (на рис. 1 не показаны). Время истечения жидкости из каждого питателя составляло 70–200 с – в зависимости от количества одно-

временно работающих питателей, а вес вылившейся из питателя воды – около 9 кг. Эти временные и весовые ограничения обеспечили отклонение от среднего значения скорости не более $\pm 0,005$ м/с. Расход жидкости из каждого питателя определялся не менее 6 раз.

Когда работает только один питатель, например, питатель VI, коэффициент сопротивления системы от сечения 1–1 и 17–17, приведенный к скорости жидкости в сечении 17–17,

$$\zeta_{1-17(17)}^{(1)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{к}} + \lambda \frac{5l + l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $\zeta_{\text{ст}}$, $\zeta_{\text{к}}$ и $\zeta_{\text{п}}$ – коэффициенты местных сопротивлений входа металла из чаши в стояк, поворота из стояка в коллектор и поворота из коллектора в питатель VI; $S_{\text{ст}}$, $S_{\text{к}}$, $S_{\text{п}}$ – площади сечений стояка, коллектора и питателя, м²; λ – коэффициент потерь на трение; $l_{\text{ст}}$ – длина (высота) стояка, м; $d_{\text{ст}}$, $d_{\text{к}}$ и $d_{\text{п}}$ – гидравлические диаметры стояка, коллектора и питателя VI, м; l – расстояние между питателями, м; l_0 – расстояние от стояка до первого питателя, м; $l_{\text{п}}$ – длина питателя, м.

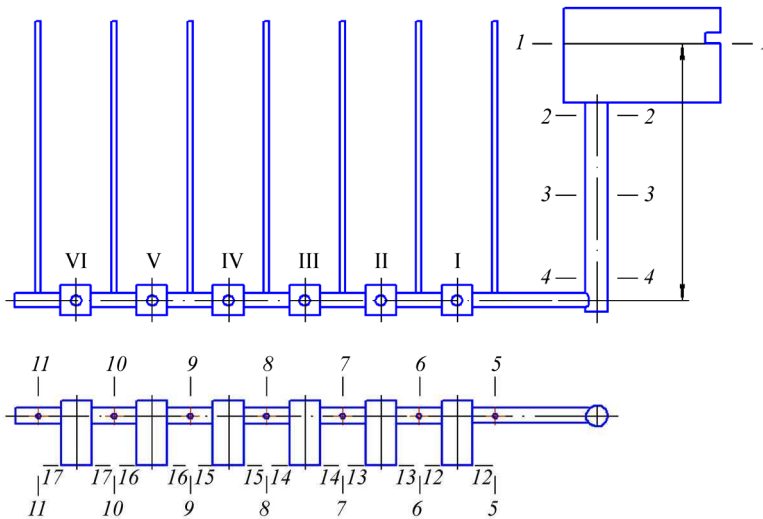


Рис. 1. Литниковая система

Коэффициент расхода системы от сечения 1–1 до сечения 17–17, приведенный к скорости v_{17} ,

$$\mu_{1-17(17)}^{(1)} = \left(1 + \zeta_{1-17(17)}^{(1)} \right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Скорость

$$v_{17} = \mu_{1-17(17)}^{(1)} \sqrt{2gH/\alpha}, \quad (3)$$

где α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса), принимаем $\alpha = 1,1$ [3, с. 108]; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Расход жидкости в системе

$$Q = v_{17} S_{\Pi}. \quad (4)$$

Для данной ЛС $l_{\text{ст}} = 0,2675$ м, $l_{\Pi} = 0,0495$ м, $l = 0,1190$ м, $l_0 = 0,1220$ м, $d_{\Pi} = 0,00903$ м, $d_{\text{к}} = d_5 = \dots = d_{11} = 0,01603$ м, $d_{\text{ст}} = 0,02408$ м. Принимаем, как и в работе [4], что коэффициент потерь на трение $\lambda = 0,03$. Коэффициент местного сопротивления входа из чаши в стояк в зависимости от радиуса скругления входной кромки определяем по справочнику [5, с. 126]: $\zeta_{\text{ст}} = 0,12$. Коэффициент местного сопротивления поворота из стояка в коллектор на 90° и изменения площадей сечений потока $\zeta_{\text{к}} = 0,396$ [6]. Коэффициент местного сопротивления поворота из коллектора в питатель на 90° (с изменением площадей сечений) $\zeta_{\Pi} = 0,334$ [6]. Результаты расчетов по соотношениям (1)–(4): $\zeta_{1-17(17)}^{(1)} = 0,682413$, $\mu_{1-17(17)}^{(1)} = 0,770963$, $v_{17}^{(1)} = 1,961734$ м/с, $Q^{(1)} = Q_{17}^{(1)} = 125,633538 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Экспериментальные данные: $v_{17(9)}^{(1)} = 1,940$ м/с, $Q_9^{(1)} = Q_{17(9)}^{(1)} = 124,24 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Расчетные значения скорости v_{17} и расхода Q_{17} превышают их экспериментальные величины всего на 1,12 %.

Как видно, в расчетах, основанных на уравнении Бернулли (УБ), используются коэффициенты $\lambda = 0,03$, $\zeta_{\text{ст}} = 0,10$, $\zeta_{\text{к}} = 0,396$, $\zeta_{\Pi} = 0,334$, найденные опытным путем, причем коэффициенты $\zeta_{\text{к}}$ и ζ_{Π} определены для данной ЛС. Соответствие опытных и расчетных данных вполне объяснимо, и даже напрашивается мысль о «порочном круге». Однако «порочного круга» нет, так как коэффициенты λ и ζ определяются только опытным путем, а УБ фактически является расчетно-экспериментальной формулой.

Найдем расход металла в ЛС при работе питателей V и VI. Составим УБ для сечений 9–9 и 17–17:

$$\frac{P_9}{\gamma} + \alpha \frac{v_9^2}{2g} = \left(\zeta_{10} + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_{10}^2}{2g} + \left(\zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} + \frac{P_{17}}{\gamma}, \quad (5)$$

и для сечений 9–9 и 16–16:

$$\frac{p_9}{\gamma} + \alpha \frac{v_9^2}{2g} = \left(\zeta_{16} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{16}^2}{2g} + \frac{p_{16}}{\gamma}, \quad (6)$$

где p_9 , p_{16} , p_{17} – давления в сечениях 9–9, 16–16 и 17–17 (давления p_{16} и p_{17} равны атмосферному p_a), Н/м²; v_9 , v_{10} , v_{16} , v_{17} – скорости металла в сечениях 9–9, 10–10, 16–16 и 17–17, м/с; ζ_{10} – коэффициент сопротивления на проход жидкости из сечения 9–9 в сечение 10–10 при ответвлении части потока в питатель V с выходным сечением 16–16; ζ_{16} – коэффициент сопротивления на ответвление потока в питатель V с выходным сечением 16–16. Решая (5) и (6) совместно и заменяя v_{10} на $v_{17}S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$, имеем

$$v_{16} = v_{17} \sqrt{\frac{(\zeta_{10} + \lambda l/d_{\text{к}})(S_{\text{п}}/S_{\text{к}})^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda l_{\text{п}}/d_{\text{п}} + 1}{\zeta_{16} + \lambda l_{\text{п}}/d_{\text{п}} + 1}}. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) известные величины, получаем

$$v_{16} = v_{17} \sqrt{\frac{0,100697\zeta_{10} + 1,520878}{\zeta_{16} + 1,164452}}. \quad (8)$$

В этом выражении неизвестны коэффициенты ζ_{10} и ζ_{16} , зависящие от отношения скоростей v_{10}/v_9 и v_{16}/v_9 , которые тоже неизвестны. Коэффициенты сопротивлений, обусловленных отделением потока из коллектора в питатель, будем подсчитывать по формулам для тройников [7, с. 112–115]. Коэффициент сопротивления на проход в коллекторе при ответвлении части потока в питатель

$$\zeta_{\text{пр}} = 0,4 \left(1 - v_{\text{пр}}/v_{\text{к}} \right)^2 / \left(v_{\text{пр}}/v_{\text{к}} \right)^2, \quad (9)$$

а коэффициент сопротивления на ответвление части потока в питатель

$$\zeta_{\text{отв}} = \left[1 + \tau \left(v_{\text{п}}/v_{\text{к}} \right)^2 \right] / \left(v_{\text{п}}/v_{\text{к}} \right)^2, \quad (10)$$

где $v_{\text{к}}$ и $v_{\text{пр}}$ – скорости металла в коллекторе до и после ответвления части потока в питатель, м/с; $v_{\text{п}}$ – скорость жидкости в питателе, м/с; τ – коэффициент, $\tau = 0,45$ при $v_{\text{п}}/v_{\text{к}} < 1,5$ и $\tau = 0,60$, если $v_{\text{п}}/v_{\text{к}} \geq 1,5$ [7]. Коэффициент $\zeta_{\text{пр}}$ получается приведенным к скорости проходящего потока $v_{\text{пр}}$, а $\zeta_{\text{отв}}$ – к скорости в питателе $v_{\text{п}}$. Надо иметь в виду, что коэффициенты $\zeta_{\text{пр}}$ и $\zeta_{\text{отв}}$ учитывают третий вид потерь напора – потери на изменение напора при раз-

даче потока. Первые два вида потерь напора – это потери на трение и в местных сопротивлениях.

Уравнение неразрывности потока для работы двух питателей примет вид

$$Q = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = v_9 S_{\text{к}} = v_{10} S_{\text{к}} + v_{16} S_{\text{п}} = v_{17} S_{\text{п}} + v_{16} S_{\text{п}} = (v_{17} + v_{16}) S_{\text{п}}. \quad (11)$$

Допустим, что скорость в питателе V равна x скорости в питателе VI: $v_{16} = xv_{17}$. Тогда из (11) имеем

$$Q = v_9 S_{\text{к}} = v_{17} (1 + x) S_{\text{п}}.$$

Назовем величину $(1 + x) S_{\text{п}}$ приведенной – к скорости v_{17} – площадью питателей $S_{\text{пр(17)}}^{(2)}$ (для двух работающих питателей). Расход в системе

$$Q = v_{17} S_{\text{пр(17)}}^{(2)}.$$

Предположим, что при работе двух питателей $x = 0,95$, т.е. $v_{16} = 0,95v_{17}$. Тогда $S_{\text{пр(17)}}^{(2)} = 1,95S_{\text{п}}$, $Q = 1,95S_{\text{п}}v_{17} = v_9 S_{\text{к}}$, $v_{17} = v_9 S_{\text{к}} / 1,95S_{\text{п}}$, $v_{16} = 0,95v_{17} = 1,535255v_9$, а $v_{16}/v_9 = 1,535255$ – это и есть отношение $v_{\text{п}}/v_{\text{к}}$ в зависимости (10). $\frac{v_{10}}{v_9} = \frac{v_{10} S_{\text{к}}}{v_9 S_{\text{к}}} = \frac{v_{17} S_{\text{п}}}{1,95v_{17} S_{\text{п}}} = 0,512821$ – это $v_{\text{пр}}/v_{\text{к}}$ в формуле (9). По соотношению (9) находим, что $\zeta_{10} = 0,360999$, по (10) $\zeta_{16} = 1,024267$ при $\tau = 0,60$. Подставляем найденные значения ζ_{10} и ζ_{16} в выражение (8) и находим $v_{16} = 0,843493v_{17}$. А мы задавались $v_{16} = 0,95v_{17}$. Делаем следующее приближение: $v_{16} = 0,843493v_{17}$. Тогда $v_{10}/v_9 = 0,542448$, $\zeta_{10} = 0,284593$, $v_{16}/v_9 = 1,441888$, $\zeta_{16} = 0,930991$ ($\tau = 0,45$), $v_{16} = 0,859930v_{17}$. Путем подобных приближений при заданном $v_{16} = 0,862672$ получаем $v_{16} = 0,8626722v_{17}$. На этом расчет отношения v_{16}/v_{17} можно закончить, так как получившееся значение отличается от заданного всего на 0,0000002. Принимаем $v_{16} = 0,862672v_{17}$. Приведенная (к скорости v_{17}) площадь питателей при работе двух питателей $S_{\text{пр(17)}}^{(2)} = 1,862672S_{\text{п}}$, $v_{10}/v_9 = 0,536863$, $\zeta_{10} = 0,297681$, $v_{16}/v_9 = 1,459489$, $\zeta_{16} = 0,919460$. А $v_{\text{ст}} = v_{17} S_{\text{пр(17)}}^{(2)} / S_{\text{ст}}$, $v_9 = v_{17} S_{\text{пр(17)}}^{(2)} / S_{\text{к}}$.

Коэффициент сопротивления ЛС от сечения I–I до сечения 17–17, приведенный к скорости металла в сечении 17–17 (учитывающий, разумеется, работу обоих питателей),

$$\zeta_{1-17(17)}^{(2)} = \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_{np(17)}^{(2)}}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta_{к} + \lambda \frac{4l + l_0}{d_{к}} \right) \left(\frac{S_{np(17)}^{(2)}}{S_{к}} \right)^2 + \left(\zeta_{10} + \lambda \frac{l}{d_{к}} \right) \left(\frac{S_n}{S_{к}} \right)^2 + \zeta_{п} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}}. \quad (12)$$

Находим по соотношениям (12), (2)–(4), что $\zeta_{1-17(17)}^{(2)} = 1,111306$, $\mu_{1-17(17)}^{(2)} = 0,688215$, $v_{17}^{(2)} = 1,751179$ м/с, $v_{16}^{(2)} = 1,510693$ м/с, $Q_{17}^{(2)} = 112,149150 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $Q_{16}^{(2)} = 96,747917 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $Q^{(2)} = Q_{17}^{(2)} + Q_{16}^{(2)} = 208,897070 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Экспериментальные данные: $v_{17(э)}^{(2)} = 1,691$ м/с, $v_{16(э)}^{(2)} = 1,609$ м/с, $Q_3^{(2)} = 211,38 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $v_{16(э)} = 0,95 v_{17(э)}$. Расчетная скорость $v_{16} = 0,862672 v_{17}$. Как видно, расчетное значение отношения v_{16}/v_{17} значительно меньше экспериментального, хотя разница между $v_{17}^{(2)}$ и $v_{17(э)}^{(2)}$ составляет всего 3,56 %, между $v_{16}^{(2)}$ и $v_{16(э)}^{(2)}$ – 6,11 %, а между $Q^{(2)}$ и $Q_3^{(2)}$ – 1,17 %.

В монографии [7] коэффициент $\tau = 0,45$ при $v_{п}/v_{к} < 1,5$ и $\tau = 0,60$, если $v_{п}/v_{к} \geq 1,5$. Даже не привлекая своих экспериментальных данных, можно сказать, что в этих рекомендациях о величине τ содержится ошибка. Дело в том, что роста отношения $v_{п}/v_{к}$ можно добиться, увеличивая диаметр коллектора $d_{к}$ при неизменном диаметре питателя $d_{п}$. А чем больше диаметр коллектора $d_{к}$ – при прочих равных условиях (диаметр стояка $d_{ст}$ и напор H), тем меньше в нем скорость движения жидкости и меньше разница в скоростях жидкости в питателях. Понятно, что при определенном диаметре коллектора (и не таком уж большом) скорости истечения жидкости из всех питателей будут одинаковыми. Поэтому, если принять $\tau = 0,45$ для $v_{п}/v_{к} < 1,5$, то при $v_{п}/v_{к} \geq 1,5$ этот коэффициент должен быть меньше 0,45, а не равным 0,60, поскольку потери на отделение потока должно уменьшаться, а не увеличиваться, см. формулу (10). И непонятно, почему число 1,5 стало вдруг критерием истечения жидкости.

Рассчитаем характеристики ЛС при разных значениях τ : 0,01, 0,10, 0,15, 0,30, 0,45, 0,60, 1,00 (см. табл. 1 и рис. 2). Как видно, при увеличении τ в 100 раз, с 0,01 до 1,00, расход в системе при работе 6 питателей изменился (уменьшился) всего на 4,5 %, скорость в питателе VI выросла с 1,244 до 1,351 м/с (на 8,6 %), v_{16} уменьшилась с 1,237 до 1,020 м/с (на 17,5 %), v_{15} – с 1,065 до 0,932 м/с (14,2 %), v_{14} – с 0,890 до 0,839 м/с (6 %). Скорость v_{13} в питателе

II увеличилась с 0,753 м/с при $\tau=0,01$ до 0,764 м/с при $\tau=0,45$, равна 0,764 м/с при $\tau=0,60$ и уменьшается до 0,758 м/с при $\tau=1,00$. А скорость v_{12} в питателе I с ростом τ все время увеличивается – с 0,676 м/с до 0,700 м/с (на 3,6 %).

Таблица 1

Характеристики литниковой системы
($d_{II} = 9,03$ мм, $d_K = 16,03$ мм, $d_{CT} = 24,08$ мм)

Работающие питатели (эксперимент)	v_{17} , м/с	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
VI	1,948						124,77
V, VI	1,691	$\frac{1,609}{0,951}$					211,38
IV–VI	1,497	$\frac{1,441}{0,963}$	$\frac{1,285}{0,859}$				270,40
III–VI	1,370	$\frac{1,303}{0,951}$	$\frac{1,180}{0,861}$	$\frac{1,013}{0,739}$			311,64
II–VI	1,279	$\frac{1,225}{0,958}$	$\frac{1,116}{0,873}$	$\frac{0,959}{0,750}$	$\frac{0,831}{0,650}$		346,48
I–VI	1,241	$\frac{1,167}{0,940}$	$\frac{1,055}{0,850}$	$\frac{0,911}{0,734}$	$\frac{0,802}{0,645}$	$\frac{0,717}{0,577}$	377,33
I–VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	1,244	$\frac{1,237}{0,994}$	$\frac{1,065}{0,856}$	$\frac{0,890}{0,715}$	$\frac{0,753}{0,605}$	$\frac{0,676}{0,543}$	375,60
$\tau = 0,10$	1,256	$\frac{1,208}{0,962}$	$\frac{1,050}{0,836}$	$\frac{0,887}{0,707}$	$\frac{0,757}{0,603}$	$\frac{0,681}{0,542}$	374,00
$\tau = 0,15$	1,262	$\frac{1,194}{0,946}$	$\frac{1,042}{0,826}$	$\frac{0,886}{0,702}$	$\frac{0,759}{0,601}$	$\frac{0,683}{0,541}$	373,12
$\tau = 0,30$	1,280	$\frac{1,154}{0,901}$	$\frac{1,019}{0,796}$	$\frac{0,879}{0,686}$	$\frac{0,762}{0,595}$	$\frac{0,690}{0,539}$	370,46
$\tau = 0,45$	1,297	$\frac{1,119}{0,863}$	$\frac{0,998}{0,769}$	$\frac{0,871}{0,671}$	$\frac{0,764}{0,589}$	$\frac{0,694}{0,535}$	367,83
$\tau = 0,60$	1,313	$\frac{1,088}{0,829}$	$\frac{0,978}{0,745}$	$\frac{0,862}{0,657}$	$\frac{0,764}{0,581}$	$\frac{0,697}{0,531}$	365,24
$\tau = 1,00$	1,351	$\frac{1,020}{0,755}$	$\frac{0,932}{0,690}$	$\frac{0,839}{0,621}$	$\frac{0,758}{0,561}$	$\frac{0,700}{0,518}$	358,39

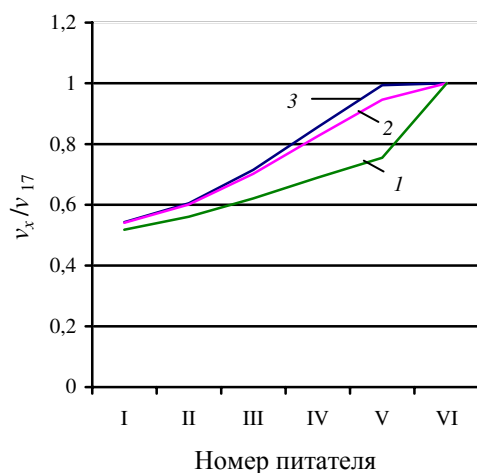


Рис. 2. Зависимость отношения скоростей v_x/v_{17} от коэффициента τ : 1 – $\tau=1,00$; 2 – $\tau=0,15$; 3 – $\tau=0,01$

Отношение v_{16}/v_{17} при этом изменяется с 0,994 до 0,755 – на 24 %. Отношение v_{12}/v_{17} изменяется незначительно – с 0,543 до 0,518, на 4,6 %. Благодаря такому неожиданному изменению скоростей в питателях с ростом τ суммарный расход жидкости из питателей падает, хотя при этом скорости v_{17} и v_{12} в питателях VI и I растут.

Как видно, значение $\tau=0,15$ обеспечивает хорошее совпадение расчетного и экспериментального значений v_{16}/v_{17} , скоростей и расходов в системе. И это значение $\tau=0,15$ значительно меньше рекомендуемого в монографии [7] $\tau=0,45$, не говоря уже о $\tau=0,60$.

Были изготовлены новые литниковые системы. Диаметр питателя во всех системах был один и тот же: $d_{\text{п}}=9,03$ мм. А диаметры коллектора $d_{\text{к}}$ и стояка $d_{\text{ст}}$ были такими (мм): 9,03, 12,03, 13,03, 14,03, 15,03, 16,03, 20,08, 24,08 и 30,08. Результаты исследований представлены в табл. 2–7 и на рис. 3. При $d_{\text{п}}=d_{\text{к}}=9,03$ мм отношение $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}=1$, а если $d_{\text{п}}=9,03$ мм, $d_{\text{к}}=30,08$ мм, то $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}=0,09$ – с такими отношениями $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ литниковые системы не используются. И следовательно, в опытах охвачен весь ряд значений $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$.

Таблица 2

Характеристики литниковой системы
 $(d_{II} = 9,03 \text{ мм}, d_K = 9,03 \text{ мм}, d_{CT} = 24,08 \text{ мм})$

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$
VI	1,13						72,25
V, VI	0,83	$\frac{0,55}{0,66}$					88,24
IV-VI	0,73	$\frac{0,49}{0,67}$	$\frac{0,26}{0,35}$				94,53
III-VI	0,68	$\frac{0,44}{0,65}$	$\frac{0,25}{0,36}$	$\frac{0,23}{0,33}$			102,26
II-VI	0,64	$\frac{0,43}{0,67}$	$\frac{0,23}{0,36}$	$\frac{0,21}{0,33}$	$\frac{0,25}{0,39}$		112,57
I-VI	0,60	$\frac{0,41}{0,68}$	$\frac{0,21}{0,36}$	$\frac{0,21}{0,35}$	$\frac{0,23}{0,39}$	$\frac{0,30}{0,50}$	125,47
I-VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	0,639	$\frac{0,320}{0,500}$	$\frac{0,211}{0,330}$	$\frac{0,218}{0,341}$	$\frac{0,253}{0,396}$	$\frac{0,299}{0,468}$	124,17
$\tau = 0,15$	0,642	$\frac{0,315}{0,491}$	$\frac{0,212}{0,331}$	$\frac{0,218}{0,339}$	$\frac{0,253}{0,394}$	$\frac{0,298}{0,462}$	124,06
$\tau = 1,00$	0,657	$\frac{0,293}{0,447}$	$\frac{0,217}{0,331}$	$\frac{0,218}{0,332}$	$\frac{0,249}{0,379}$	$\frac{0,292}{0,445}$	123,39

Таблица 3

Характеристики литниковой системы
 $(d_{II} = 9,03 \text{ мм}, d_K = 12,03 \text{ мм}, d_{CT} = 24,08 \text{ мм})$

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$
VI	1,63						104,55
V, VI	1,27	$\frac{1,07}{0,85}$					149,54
IV-VI	1,07	$\frac{0,93}{0,87}$	$\frac{0,69}{0,64}$				172,54

Окончание табл. 3

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
III–VI	0,99	$\frac{0,86}{0,87}$	$\frac{0,65}{0,65}$	$\frac{0,42}{0,43}$			186,91
II–VI	0,91	$\frac{0,74}{0,81}$	$\frac{0,61}{0,67}$	$\frac{0,42}{0,46}$	$\frac{0,36}{0,39}$		195,43
I–VI	0,83	$\frac{0,71}{0,86}$	$\frac{0,58}{0,70}$	$\frac{0,41}{0,50}$	$\frac{0,38}{0,45}$	$\frac{0,35}{0,42}$	214,55
I–VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	0,945	$\frac{0,770}{0,815}$	$\frac{0,536}{0,567}$	$\frac{0,410}{0,434}$	$\frac{0,389}{0,412}$	$\frac{0,299}{0,468}$	222,17
$\tau = 0,15$	0,945	$\frac{0,770}{0,815}$	$\frac{0,536}{0,567}$	$\frac{0,410}{0,434}$	$\frac{0,389}{0,412}$	$\frac{0,299}{0,468}$	221,75
$\tau = 1,00$	1,000	$\frac{0,655}{0,655}$	$\frac{0,521}{0,521}$	$\frac{0,431}{0,431}$	$\frac{0,401}{0,401}$	$\frac{0,416}{0,416}$	219,20

Таблица 4

Характеристики литниковой системы
($d_n = 9,03$ мм, $d_k = 20,08$ мм, $d_{ct} = 24,08$ мм)

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
VI	2,05						131,29
V, VI	1,89	$\frac{1,84}{0,98}$					238,83
IV–VI	1,73	$\frac{1,69}{0,98}$	$\frac{1,61}{0,93}$				322,29
III–VI	1,60	$\frac{1,56}{0,97}$	$\frac{1,49}{0,93}$	$\frac{1,38}{0,86}$			386,81
II–VI	1,50	$\frac{1,47}{0,98}$	$\frac{1,40}{0,93}$	$\frac{1,30}{0,86}$	$\frac{1,23}{0,82}$		441,29
I–VI	1,42	$\frac{1,39}{0,98}$	$\frac{1,31}{0,93}$	$\frac{1,23}{0,87}$	$\frac{1,16}{0,82}$	$\frac{1,06}{0,75}$	485,81

Окончание табл. 4

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$
I–VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	1,440	$\frac{1,519}{1,055}$	$\frac{1,423}{0,989}$	$\frac{1,307}{0,908}$	$\frac{1,187}{0,825}$	$\frac{1,078}{0,749}$	509,42
$\tau = 0,15$	1,465	$\frac{1,465}{1}$	$\frac{1,381}{0,942}$	$\frac{1,279}{0,873}$	$\frac{1,172}{0,800}$	$\frac{1,074}{0,733}$	501,79
$\tau = 1,00$	1,576	$\frac{1,241}{0,787}$	$\frac{1,193}{0,757}$	$\frac{1,136}{0,721}$	$\frac{1,076}{0,682}$	$\frac{1,018}{0,646}$	463,62

Таблица 5

Характеристики литниковой системы
 $(d_n = 9,03 \text{ мм}, d_k = 24,08 \text{ мм}, d_{\text{ст}} = 24,08 \text{ мм})$

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$
VI	2,05						131,29
V, VI	1,95	$\frac{1,91}{0,98}$					247,71
IV–VI	1,84	$\frac{1,81}{0,98}$	$\frac{1,79}{0,97}$				348,77
III–VI	1,73	$\frac{1,70}{0,99}$	$\frac{1,69}{0,98}$	$\frac{1,64}{0,95}$			433,29
II–VI	1,62	$\frac{1,61}{0,99}$	$\frac{1,59}{0,98}$	$\frac{1,57}{0,97}$	$\frac{1,48}{0,91}$		504,32
I–VI	1,51	$\frac{1,51}{1}$	$\frac{1,52}{1}$	$\frac{1,46}{0,97}$	$\frac{1,39}{0,92}$	$\frac{1,27}{0,84}$	553,93
I–VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	1,538	$\frac{1,671}{1,086}$	$\frac{1,618}{1,051}$	$\frac{1,549}{1,007}$	$\frac{1,471}{0,956}$	$\frac{1,389}{0,903}$	591,43
$\tau = 0,15$	1,566	$\frac{1,610}{1,028}$	$\frac{1,563}{0,998}$	$\frac{1,503}{0,960}$	$\frac{1,435}{0,916}$	$\frac{1,363}{0,870}$	578,95
$\tau = 1,00$	1,682	$\frac{1,354}{0,805}$	$\frac{1,328}{0,789}$	$\frac{1,295}{0,770}$	$\frac{1,257}{0,748}$	$\frac{1,218}{0,724}$	520,86

Таблица 6

Характеристики литниковой системы
 ($d_n = 9,03$ мм, $d_k = 30,08$ мм, $d_{ct} = 30,08$ мм)

Работающие питатели	v_{17}	$\frac{v_{16}}{v_{16}/v_{17}}$	$\frac{v_{15}}{v_{15}/v_{17}}$	$\frac{v_{14}}{v_{14}/v_{17}}$	$\frac{v_{13}}{v_{13}/v_{17}}$	$\frac{v_{12}}{v_{12}/v_{17}}$	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
VI	2,08						133,27
V, VI	2,03	$\frac{2,02}{1}$					259,55
IV-VI	1,98	$\frac{1,96}{0,99}$	$\frac{1,94}{0,98}$				375,81
III-VI	1,92	$\frac{1,89}{0,99}$	$\frac{1,87}{0,98}$	$\frac{1,84}{0,96}$			481,61
II-VI	1,85	$\frac{1,84}{1}$	$\frac{1,82}{0,99}$	$\frac{1,77}{0,96}$	$\frac{1,75}{0,95}$		578,47
I-VI	1,79	$\frac{1,78}{0,99}$	$\frac{1,76}{0,98}$	$\frac{1,72}{0,96}$	$\frac{1,70}{0,95}$	$\frac{1,65}{0,92}$	665,50
I-VI (расчет):							
$\tau = 0,01$	1,789	$\frac{1,990}{1,112}$	$\frac{1,963}{1,097}$	$\frac{1,927}{1,077}$	$\frac{1,883}{1,053}$	$\frac{1,834}{1,025}$	729,12
$\tau = 0,15$	1,809	$\frac{1,903}{1,052}$	$\frac{1,880}{1,039}$	$\frac{1,848}{1,022}$	$\frac{1,811}{1}$	$\frac{1,768}{0,977}$	705,70
$\tau = 1,00$	1,886	$\frac{1,549}{0,821}$	$\frac{1,536}{0,815}$	$\frac{1,520}{0,806}$	$\frac{1,500}{0,795}$	$\frac{1,478}{0,784}$	606,41

Таблица 7

Скорость воды в питателях и коэффициенты
 местных сопротивлений питателей

d_k , мм	v_n , м/с	ζ_n
9,03	1,522	0,885
12,03	1,885	0,480
13,03	1,899	0,459
14,03	1,955	0,409
15,03	1,984	0,351
16,03	1,997	0,334
20,08	2,064	0,290
24,08	2,074	0,295
30,08	2,101	0,320

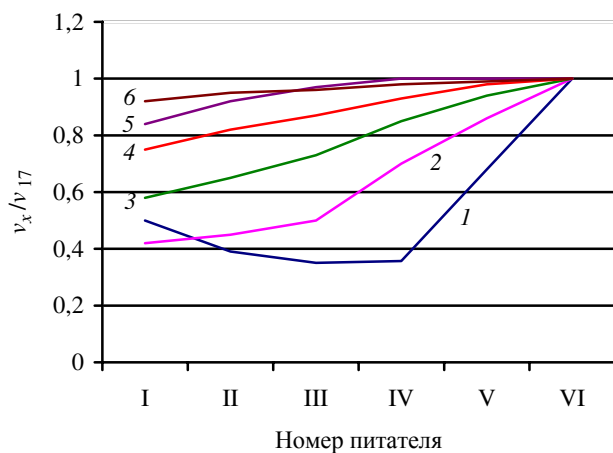


Рис. 3. Зависимость отношения скоростей v_x/v_{17} от диаметра коллектора и номера питателя: 1 – $d_k = 9,03$ мм; 2 – $d_k = 12,03$ мм; 3 – $d_k = 16,03$ мм; 4 – $d_k = 20,08$ мм; 5 – $d_k = 24,08$ мм; 6 – $d_k = 30,08$ мм

Если $d_{ст} = d_k = d_{пн} = 0,00903$ м, то у ЛС такие характеристики: $\zeta_{1-17(17)}^{(1)} = 5,339$, $\mu_{1-17(17)}^{(1)} = 0,397$, $v_{17}^{(1)} = 1,011$ м/с, $Q^{(1)} = Q_{17}^{(1)} = 64,73 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $\zeta_{1-17(17)}^{(6)} = 29,479$, $\mu_{1-17(17)}^{(6)} = 0,181$, $v_{17}^{(6)} = 0,461$ м/с, $Q^{(6)} = 89,12 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Когда $d_{ст} = d_k = 0,03008$ м, а $d_{пн} = 0,00903$ мм, то показатели ЛС таковы: $\zeta_{1-17(17)}^{(1)} = 0,501$, $\mu_{1-17(17)}^{(1)} = 0,816$, $v_{17}^{(1)} = 2,077$ м/с, $Q^{(1)} = Q_{17}^{(1)} = 133,03 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $\zeta_{1-17(17)}^{(6)} = 0,978$, $\mu_{1-17(17)}^{(6)} = 0,711$, $v_{17}^{(6)} = 1,809$ м/с, $Q^{(6)} = 705,70 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Как видно, увеличение только диаметров стояка и коллектора с 9,03 мм до 30,08 мм, в 3,33 раза (площадь увеличилась в 11,10 раза), при неизменных $d_{пн}$, H , l и l_0 привело к увеличению расхода в системе в 2,06 раза при работе питателя VI и в 7,92 раза при работе всех шести питателей.

Влияние τ растет с уменьшением отношения $S_{пн}/S_k$. При работе 6 питателей разница между значениями расходов при $\tau = 0,01$ и $\tau = 1,00$ равна 0,63 % для коллектора диаметром 9,03 мм, 20,24 % – для коллектора диаметром 30,08 мм. При $d_{пн} = d_k = 9,03$ мм разница между опытными и расчетными значениями расходов составляет 1,69 %, однако отношение скоростей v_{16}/v_{17} равно 0,500, 0,491 и 0,447 для $\tau = 0,01$, 0,15 и 1,00. А экспериментальная величина $v_{16}/v_{17} = 0,68$, на 36 % больше, чем при минимальном $\tau = 0,01$. По-видимому, требуется иная зависимость для $\zeta_{отв}$, не вида (10). Хотя, как уже

говорилось, ЛС с таким отношением $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ в литейном производстве не используются.

С увеличением диаметра коллектора и уменьшением $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ отношение v_{16}/v_{17} стремится к 1 и уже для $d_{\text{к}} = 20,08$ мм ($S_{\text{п}}/S_{\text{к}} = 0,202$) равно 0,98, а при дальнейшем росте $d_{\text{к}}$ почти не меняется, но отношения v_{16}/v_{17} , v_{15}/v_{17} , v_{14}/v_{17} , v_{13}/v_{17} и v_{12}/v_{17} устремляются к 1, см. табл. 1–6. Характер изменения отношения v_i/v_{17} в зависимости от $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$ представлен на рис. 3, это данные опытов.

Как следует из табл. 1–6 и рис. 2 и 3, необходимо принять $\tau = 0,15$. Экспериментальная точность определения отношений v_i/v_{17} не позволяет вывести какую-то зависимость τ от $S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$.

И в расчетах ЛС приходится использовать опытные величины α , λ , ζ и τ . В самом уравнении Бернулли их, конечно, нет. Они появляются при учете потерь напора. Получается, что чисто теоретическая зависимость – уравнение Бернулли – превращается в расчетно-экспериментальную формулу.

Таким образом, теоретически и экспериментально исследованы L-образные литниковые системы. Получено хорошее совпадение расчетных и опытных величин скоростей и расходов. Экспериментально подтверждена высказанная в статье [8] идея о том, что уравнение Бернулли можно применять при расчете потоков жидкости с переменным расходом за счет использования третьего вида коэффициентов сопротивления – коэффициентов изменения напора, подсчитываемых по зависимостям (9) и (10). А коэффициент $\tau = 0,15$ в соотношении (10) для всех типов исследованных ЛС значительно меньше рекомендуемых в книге [7] $\tau = 0,45$ и $\tau = 0,60$.

Список литературы

1. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование L-образной литниковой системы [Электронный ресурс] // Master's Journal. – Пермь, 2012. – № 1. – С. 5–22. – URL: <http://vestnik.pstu.ru/mj/about/inf>.
2. Васенин В.И., Емельянов К.И., Щелконогов М.Ю. Стенд для исследования литниковых систем. Патент на полезную модель № 92817 от 08.12.2009 г. // Изобретения. Полезные модели. – 2010. – № 28.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: Бастет, 2008. – 672 с.
4. 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.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

6. Исследование местных сопротивлений литниковой системы / В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2012. – Т. 14, № 2. – С. 46–53.

7. Меерович И.Г., Мучник Г.Ф. Гидродинамика коллекторных систем. – М.: Наука, 1986. – 144 с.

8. Васенин В.И. Особенности расчета расхода металла в литниковых системах // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 1. – С. 103–106.

Получено 1.11.2012

Васенин Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru).

Богомягков Алексей Васильевич – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lp@pstu.ru).

Шаров Константин Владимирович – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lp@pstu.ru).

Vasenin Valeriy Ivanovich – Candidate of Technicals Sciences, Assistant Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru).

Bogomjagkov Aleksey Vasilievich – Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: lp@pstu.ru).

Sharov Konstantin Vladimirovich – Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: lp@pstu.ru).