

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

Пермский государственный технический университет
Perm State Technical University

ИССЛЕДОВАНИЕ L-ОБРАЗНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

INVESTIGATION INTO A L-TYPE AND INTEGRATED TYPE GATING SYSTEMS

Приведено описание лабораторных L-образной и комбинированной литниковых систем. Изложены результаты теоретического и экспериментального определения расходов и напоров жидкости в зависимости от количества одновременно работающих питателей. Получено хорошее совпадение расчетных и опытных данных.

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

A laboratory-type gating systems are described. Results of theoretical and experimental determination of liquid flow rates and head pressures depending on the number of feeders working at the same time are give n. A good agreement between the calculated and experimental data has been obtained.

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

Ранее были исследованы теоретически и экспериментально L-образная [1, 2] и разветвленная [3, 4] литниковые системы (ЛС), показанные на рис. 1 и 2. В литейном производстве широко применяются также ЛС, представляющие собой соединение этих двух систем (рис. 3). Будем называть такие ЛС комбинированными. Как видно, в L-образной ЛС есть только ответвления потока из коллектора в питатели I–VI, в разветвленной – только деление потока в сечениях 8–8, 9–9, 10–10, в комбинированной – деление потока в сечении 4–4 и ответвления потока в питатели I–VI. В лабораторных условиях эти системы собираются из набора стандартных элементов [5]. Каждая система состоит из литниковой чаши, стояка, коллектора и 4 (рис. 2) или 6 (рис. 1 и 3) одинаковых питателей I–VI. Внутренний диаметр литниковой чаши равен 0,272 м, высота воды в чаше – 0,1005 м. Продольные оси коллектора и питателей находятся в одной горизонтальной плоскости. Уровень жидкости H – расстояние по вертикали от сечения I–I в литниковой чаше до продольных

осей коллектора и питателей – поддерживался постоянным путем непрерывного доливания воды в чашу и сливания ее излишков через специальную щель в чаше: $H = 0,3600$ м. Жидкость выливалась сверху из питателей в форму. В сечениях коллектора 5–5, ..., 12–12 были установлены для измерения напора пьезометры – стеклянные трубочки длиной 370 мм и внутренним диаметром 4,5 мм. В сечениях стояка 2–2, 3–3 и 4–4 были также размещены изогнутые на 90° пьезометры (на рисунке не показаны). Время истечения жидкости из каждого питателя составляло 60–180 с – в зависимости от количества одновременно работающих питателей, а вес вылившейся из питателя воды – около 9 кг. Эти временные и весовые ограничения обеспечили отклонение от среднего значения скорости $\pm 0,005$ м/с, не более. Расход жидкости из каждого питателя определялся 8 и более раз.

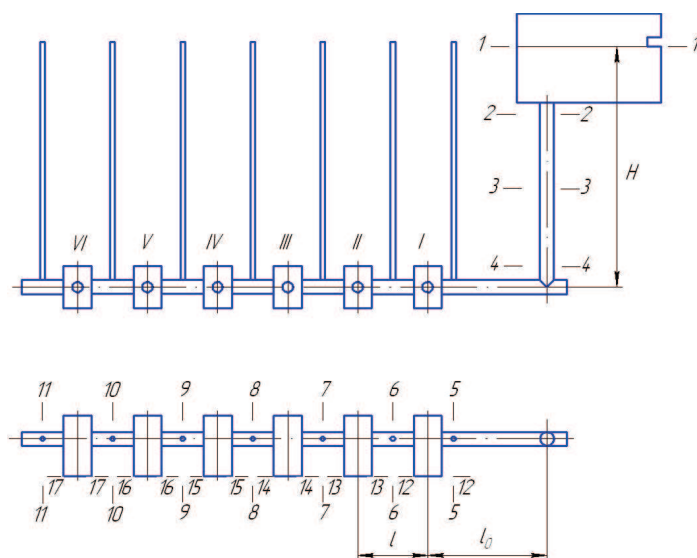


Рис. 1. L-образная литниковая система

Для каждой из приведенных ЛС уравнение Бернулли (УБ), например, для сечений 1–1 и 17–17 на рис. 1 (считаем, что работает только питатель VI), выглядит так:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} + H = \frac{p_{17}}{\gamma} + \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} + h_{1-17}^{(1)}, \quad (1)$$

где p_1 и p_{17} – давления в сечениях 1–1 и 17–17, Н/м² (равны атмосферному давлению: $p_1 = p_{17} = p_a$); α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса), принимаем $\alpha = 1,1$

[6, с. 108]; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; v_1 и v_{17} – скорости металла в сечениях $1-1$ и $17-17$, м/с (вследствие большой разности площадей чаши S_1 в сечении $1-1$ и питателя $S_{\text{п}}$ в сечении $17-17$ можно принять $v_1 = 0$); γ – удельный вес жидкости, Н/м³; $h_{1-17(17)}^{(1)}$ – потери напора при движении металла от сечения $1-1$ до сечения $17-17$ (в случае работы только одного питателя VI), м. Эти потери напора

$$h_{1-17(17)}^{(1)} = \zeta_{\text{ст}} \alpha \frac{v_2^2}{2g} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_3} \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_{\text{к}} + \lambda \frac{5l + l_0}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} + \left(\zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \right) \alpha \frac{v_{17}^2}{2g}, \quad (2)$$

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; v_2 , v_3 и $v_{\text{к}}$ – скорости жидкости в сечениях 2–2, 3–3 стояка и в коллекторе, м/с; $l_{\text{ст}}$ – длина стояка, м; d_3 , $d_{\text{к}}$ и $d_{\text{п}}$ – гидравлические диаметры стояка в сечении 3–3, коллектора и питателя VI, м; λ – коэффициент потерь на трение; l – расстояние между питателями, м; l_0 – расстояние от стояка до первого питателя, м; $l_{\text{п}}$ – длина питателя, м. Расход в литниковой системе при сливе сверху определяется скоростью металла v_{17} в выходном сечении $17-17$ питателя VI и площадью его поперечного сечения $S_{\text{п}}$:

$$Q_{17} = v_{17} S_{\text{п}}. \quad (3)$$

Остальные скорости жидкости в каналах ЛС определяем из уравнения неразрывности потока:

$$Q = Q_{17} = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = v_2 S_2 = v_3 S_3 = v_4 S_4 = v_{\text{к}} S_{\text{к}} = v_{17} S_{\text{п}}, \quad (4)$$

где S_2 , S_3 , S_4 , $S_{\text{к}}$ – площади стояка в сечениях 2–2, 3–3, 4–4 и коллектора, м². Выразим все скорости металла в формуле (2) через скорость v_{17} , используя уравнение неразрывности потока (4):

$$h_{1-17(17)}^{(1)} = \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{к}} + \lambda \frac{5l + l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \right].$$

Выражение в квадратных скобках обозначим как $\zeta_{1-17(17)}^{(1)}$ – это коэффициент сопротивления системы от сечения $1-1$ до сечения $17-17$, приведенный к скорости жидкости в сечении $17-17$:

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

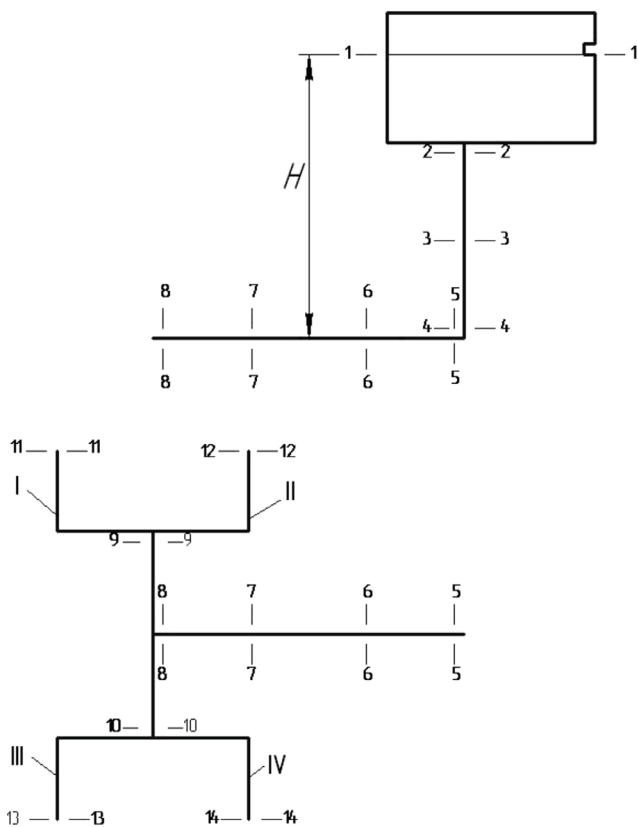


Рис. 2. Разветвленная литниковая система

Тогда выражение (1) можно записать так:

$$H = \alpha v_{17}^2 (1 + \zeta_{1-17(17)}^{(1)}) / 2g.$$

А коэффициент расхода системы от сечения 1-1 до сечения 17-17, приведенный к скорости v_{17} ,

$$\mu_{1-17(17)}^{(1)} = (1 + \zeta_{1-17(17)}^{(1)})^{-1/2}. \quad (6)$$

Скорость

$$v_{17} = \mu_{1-17(17)}^{(1)} \sqrt{2gH / \alpha}. \quad (7)$$

Расход Q находим по выражению (3). Для данной ЛС длина стояка $l_{ст} = 0,2675$ м, длина каждого питателя $l_{п} = 0,0495$ м, расстояние между питателями $l = 0,1190$ м, расстояние от стояка до первого питателя $l_0 = 0,1220$ м.

Диаметры стояка, коллектора и питателей (мм): $d_{ст} = d_2 = d_3 = d_4 = 24,08$, $d_к = d_5 = \dots = d_{11} = 16,03$, $d_п = 9,03$. Принимаем, как и в работе [7], что коэффициент потерь на трение $\lambda = 0,03$. Коэффициент местного сопротивления входа из чаши в стояк в зависимости от скругления входной кромки определяем по справочнику [8, с. 103]: $\zeta_{ст} = 0,10$. По данным работы [9], $\zeta_к = 0,397$, $\zeta_п = 0,347$. Результаты расчетов по соотношениям (5), (6), (7) и (3): $\zeta_{1-17(17)}^{(1)} = 0,695$, $\mu_{1-17(17)}^{(1)} = 0,768$, $v_{17} = 1,946$ м/с, $Q = Q_{17} = 124,64 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Для комбинированной ЛС (рис. 3) при работе, например, питателя III, коэффициент сопротивления системы от сечения 1-1 до сечения 15-15, приведенный к скорости металла в сечении 15-15, будет выглядеть так:

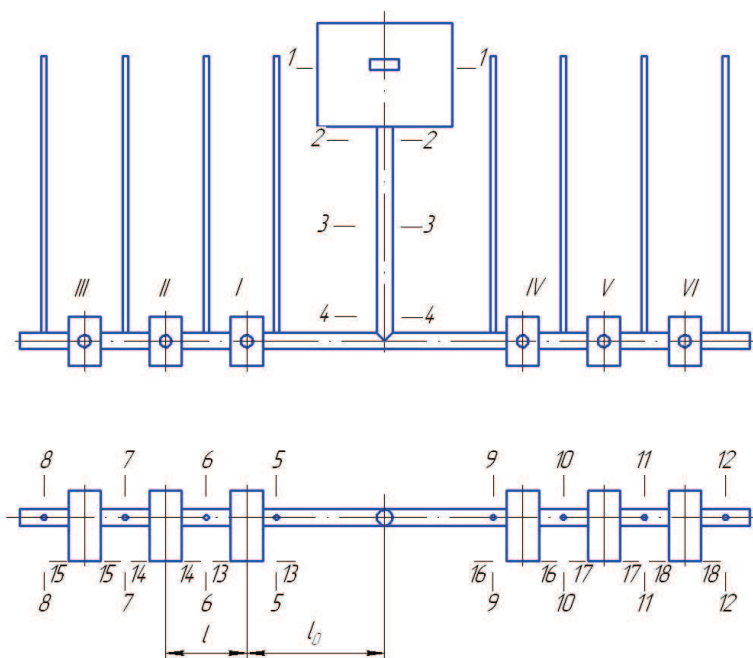


Рис. 3. Комбинированная литниковая система

$$\zeta_{1-15(15)}^{к(1)} = \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_п}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta_к + \lambda \frac{2l + l_0}{d_к} \right) \left(\frac{S_п}{S_к} \right)^2 + \zeta_п + \lambda \frac{l_п}{d_п}. \quad (8)$$

Результаты расчетов по выражениям (8), (6), (7) и (3): $\zeta_{1-15(15)}^{к(1)} = 0,628$, $\mu_{1-15(15)}^{к(1)} = 0,784$, $v_{15} = 1,987$ м/с, $Q = Q_{15} = 127,23 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Как видно, питатель III (рис. 3) находится ближе к стояку, чем питатель VI (рис. 1), поэтому у него меньше потери напора на трение по длине, больше скорость и расход

жидкости. Следует иметь в виду, что это один и тот же питатель и исключено влияние погрешностей механической обработки на размеры отверстий в питателе.

Чтобы найти расход в системе при работе двух и более питателей, будем составлять для каждого питателя УБ по типу (1). В случае работы питателей V и VI (см. рис. 1) имеем для сечений 1-1 и 17-17 $H = \alpha v_{17}^2 (1 + \zeta_{1-17(17)}^{(2)}) / 2g$, для сечений 1-1 и 16-16 $H = \alpha v_{16}^2 (1 + \zeta_{1-16(16)}^{(2)}) / 2g$, где $\zeta_{1-17(17)}^{(2)}$ – коэффициент сопротивления системы от сечения 1-1 до сечения 17-17, приведенный к скорости металла в сечении 17-17 и учитывающий работу двух питателей (V и VI); $\zeta_{1-16(16)}^{(2)}$ – коэффициент сопротивления системы от сечения 1-1 до сечения 16-16, приведенный к скорости жидкости в сечении 16-16 (при одновременной работе питателей V и VI). Однако потери напора от сечения 1-1 до сечения 9-9 будут одинаковыми для обоих питателей. Поэтому запишем УБ только для сечений 9-9 и 17-17:

$$\frac{p_9}{\gamma} + \alpha \frac{v_9^2}{2g} = \left(\zeta_{10} + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \alpha \frac{v_{10}^2}{2g} + \left(\zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1 \right) \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} + \frac{p_{17}}{\gamma}, \quad (9)$$

и для сечений 9-9 и 16-16:

$$\frac{p_9}{\gamma} + \alpha \frac{v_9^2}{2g} = \left(\zeta_{16} + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1 \right) \alpha \frac{v_{16}^2}{2g} + \frac{p_{16}}{\gamma}, \quad (10)$$

где p_9, p_{16} – давления в сечениях 9-9 и 16-16 (давление p_{16} равно атмосферному p_a), Н/м²; v_9, v_{10}, v_{16} – скорости металла в сечениях 9-9, 10-10 и 16-16, м/с; ζ_{10} – коэффициент сопротивления на проход жидкости от сечения 9-9 до сечения 10-10 при ответвлении части потока в питатель V; ζ_{15} – коэффициент сопротивления на ответвление потока в питатель V с выходным сечением 16-16. Решая (9) и (10) совместно и заменяя v_{10} на $v_{17} S_n / S_k$, имеем:

$$v_{16} = v_{17} \sqrt{\frac{(\zeta_{10} + \lambda l / d_k)(S_n / S_k)^2 + \zeta_n + \lambda l_n / d_n + 1}{\zeta_{16} + \lambda l_n / d_n + 1}}.$$

Подставляя известные величины, получаем:

$$v_{16} = v_{17} \sqrt{\frac{0,100697 \zeta_{10} + 1,533878}{\zeta_{15} + 1,164452}}.$$

В этом выражении неизвестны коэффициенты ζ_{10} и ζ_{15} , зависящие от отношения скоростей металла в коллекторе и питателе V. Коэффициенты сопротивлений, обусловленных отделением потока из коллектора в питатель, будем подсчитывать по формулам для тройников [10, с. 112–115]. Коэффициент сопротивления на проход в коллекторе при ответвлении части потока в питатель

$$\zeta_{\text{пр}} = 0,4 \left(1 - v_{\text{пр}} / v_{\text{к}}\right)^2 / \left(v_{\text{пр}} / v_{\text{к}}\right)^2, \quad (11)$$

а коэффициент сопротивления на ответвление части потока в питатель

$$\zeta_{\text{отв}} = \left[1 + \tau \left(v_{\text{п}} / v_{\text{к}}\right)^2\right] / \left(v_{\text{п}} / v_{\text{к}}\right)^2, \quad (12)$$

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, $\tau = 0,15$ для отношения $S_{\text{п}} / S_{\text{к}} = 0,317$. Коэффициент $\zeta_{\text{пр}}$ получается приведенным к скорости проходящего потока $v_{\text{пр}}$, а $\zeta_{\text{отв}}$ – к скорости в питателе $v_{\text{п}}$. Уравнение неразрывности потока для работы двух питателей примет вид:

$$Q = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = v_9 S_{\text{к}} = v_{10} S_{\text{к}} + v_{16} S_{\text{п}} = v_{17} S_{\text{п}} + v_{16} S_{\text{п}} = (v_{17} + v_{16}) S_{\text{п}}. \quad (13)$$

Допустим, что скорость в питателе V равна x скорости в питателе VI: $v_{16} = x v_{17}$. Тогда из выражения (13) получим:

$$Q = v_9 S_{\text{к}} = v_{17} (1 + x) S_{\text{п}}. \quad (14)$$

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

$$Q = v_{17} S_{\text{пр}(17)}^{(2)}. \quad (15)$$

Задаваясь (произвольно) величиной x и используя зависимости (11) и (12) и данные статьи [1], получаем после ряда последовательных приближений, что $x = v_{16} / v_{17} = 0,950368$. При этом коэффициент сопротивления на проход жидкости в коллекторе из сечения 9–9 в сечение 10–10 при ответвлении части потока в питатель V $\zeta_{10} = 0,361280$, коэффициент сопротивления на ответвление части потока в питатель V $\zeta_{16} = 0,574098$, $v_{10} / v_9 = 0,512724$, $v_{16} / v_9 = 1,535560$. Округляем x до 0,950 и получаем, что приведенная площадь питателей $S_{\text{пр}(17)}^{(2)} = 1,950 S_{\text{п}}$. Тогда коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 17–17, приведенный к скорости металла в сечении 17–17 (учитывает, разумеется, работу обоих питателей),

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

А $\mu_{1-17(17)}^{(2)}$, v_{17} , Q_{17} и Q определяем по соотношениям (6), (7), (3) и (14).

Поступая аналогичным образом, определяем расход жидкости в ЛС при одновременной работе трех, четырех, пяти и шести питателей (имеется в виду ЛС на рис. 1). После соответствующих расчетов получили: $v_{16} = 0,950v_{17}$, $v_{15} = 0,830v_{17}$, $v_{14} = 0,705v_{17}$, $v_{13} = 0,604v_{17}$, $v_{12} = 0,544v_{17}$, $v_{10}/v_9 = 0,513$, $v_9/v_8 = 0,702$, $v_8/v_7 = 0,798$, $v_7/v_6 = 0,852$, $v_6/v_5 = 0,883$, $\zeta_{10} = 0,361$, $\zeta_9 = 0,072$, $\zeta_8 = 0,026$, $\zeta_7 = 0,012$, $\zeta_6 = 0,007$, $\zeta_{17} = \zeta_{\text{п}} = 0,347$ (данные эксперимента), $\zeta_{16} = 0,574$, $\zeta_{15} = 1,280$, $\zeta_{14} = 2,610$, $\zeta_{13} = 4,763$, $\zeta_{12} = 7,456$. Отметим впечатляющий вид зависимости для определения коэффициента сопротивления системы из шести питателей от сечения $1-1$ до сечения $17-17$ (приведен к скорости v_{17}):

$$\zeta_{1-17(17)}^{(6)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(6)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{к}} + \lambda \frac{l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(6)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(5)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(4)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(3)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_9 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нп}(17)}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_{10} + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

Расчетные и экспериментальные (в знаменателе) данные сведены в табл. 1. Как видно, с увеличением количества питателей (и суммарной их площади) в 6 раз расход в системе стал больше только в 2,98 раза. Это объясняется ростом гидравлического сопротивления системы – $\zeta_{1-17(17)}$ увеличился в 4,44 раза. А скорость жидкости v_{17} в питателе VI уменьшилась с 1,946 до 1,254 м/с, в 1,55 раза, при увеличении количества одновременно работающих питателей с 1 до 6. Теоретические значения скорости v_{17} больше эксперимен-

тальных на 0,30–2,50 %. Отличие опытных величин расходов от расчетных варьируется от (–1,40) до (+1,30) %. Приведенная площадь питателей при работе 6 питателей $S_{np(6)} = 4,633S_n$, а их суммарная площадь $\Sigma S_n = 6S_n$.

Таблица 1

**Расчетные и экспериментальные характеристики
L-образной литниковой системы**

Работающие питатели	$\zeta_{1-17(17)}$	$\mu_{1-17(17)}$	$S_{np(17)}$	v_{17} , м/с	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
VI	0,695	0,768	S_n	1,946/1,940	124,64/125,27
V, VI	1,184	0,677	$1,950S_n$	1,715/1,691	214,19/211,38
IV–VI	1,756	0,602	$2,780S_n$	1,526/1,497	271,76/270,40
III–VI	2,290	0,551	$3,485S_n$	1,397/1,370	311,80/311,64
II–VI	2,735	0,517	$4,089S_n$	1,311/1,279	343,38/346,48
I–VI	3,086	0,495	$4,633S_n$	1,254/1,241	371,96/377,33

Чтобы найти расход в комбинированной ЛС при работе питателей III и VI, запишем УБ для сечений 1–1 и 15–15:

$$H = \left(\zeta_{ct} + \lambda \frac{l_{ct}}{d_{ct}} \right) \alpha \frac{v_{ct}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(1+1)} + \lambda \frac{2l + l_0}{d_k} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1 \right) \alpha \frac{v_{15}^2}{2g}, \quad (16)$$

и для 1–1 и 18–18:

$$H = \left(\zeta_{ct} + \lambda \frac{l_{ct}}{d_{ct}} \right) \alpha \frac{v_{ct}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-9(9)}^{d(1+1)} + \lambda \frac{2l + l_0}{d_k} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \left(\zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1 \right) \alpha \frac{v_{18}^2}{2g}, \quad (17)$$

где $\zeta_{4-5(5)}^{d(1+1)}$ – коэффициент сопротивления на деление потока в стояке между сечениями 4–4 и 5–5, приведенный к скорости металла в сечении 5–5; $\zeta_{4-9(9)}^{d(1+1)}$ – коэффициент сопротивления на деление потока в стояке между сечениями 4–4 и 9–9, приведенный к скорости жидкости в сечении 9–9. Эти коэффициенты определяем по следующему выражению [8, с. 277]:

$$\zeta^n = \left[1 + \varphi (v_d / v)^2 \right] / (v_d / v)^2, \quad (18)$$

где φ – коэффициент, зависящий от скругления кромок места деления потока; при большом радиусе скругления $\varphi = 0,3$; при нулевом радиусе скругления $\varphi = 1,5$, для нашей ЛС $\varphi = 1,5 \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$; v – скорость жидкости до деления потока, м/с; v_d – скорость жидкости в одном из каналов после деления потока, м/с.

Чтобы найти отношение v_d/v , запишем очевидное равенство: $v_4 S_4 = v_5 S_5 + v_9 S_9$. Понятно, что $v_5 = v_9$. Поскольку $S_4 = S_{\text{ст}}$, $S_5 = S_9 = S_{\text{к}}$, то $v_5/v_4 = S_{\text{ст}}/2S_{\text{к}} = 1,128278$. Подставив эту величину в уравнение (18), получаем: $\zeta_{4-5(5)}^{d(1+1)} = \zeta_{4-9(9)}^{d(1+1)} = 2,285540 \approx 2,286$. $v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = 2v_5 S_5 = 2v_{15} S_{\text{п}} = 2v_{18} S_{\text{п}}$. Тогда $v_{\text{ст}} = 2v_{15} S_{\text{п}}/S_{\text{ст}}$, $v_5 = v_{15} S_{\text{п}}/S_{\text{к}}$. Используя эти соотношения в выражении (16), получаем следующую формулу для коэффициента сопротивления комбинированной ЛС при работе двух питателей (III и VI):

$$\zeta_{1-15(15)}^{\kappa(1+1)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(1+1)} + \lambda \frac{2l+l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

$\mu_{1-15(15)}^{\kappa(1+1)}$, v_{15} , Q_{15} подсчитываем по (6), (7) и (3), а расход в системе $Q = 2Q_{15}$. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

При работе питателей II, III, V и VI УБ для сечений 1-1 и 15-15, 1-1 и 18-18 будут как (16) и (17). В случае деления потока пополам отношение $v_5/v_4 = S_{\text{ст}}/2S_{\text{к}} = 1,128278$ не зависит от количества симметрично расположенных относительно стояка питателей (только геометрические размеры), следовательно, $\zeta_{4-5(5)}^{d(1+1)} = \zeta_{4-5(5)}^{d(2+2)} = \zeta_{4-5(5)}^{d(3+3)} = 2,286$. Расход в системе $Q = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = 2v_5 S_5 = 2v_{15} S_{\text{п}}^{(2)}$, а $v_5 S_5 = v_{15} S_{\text{п}}^{(2)}$. Подставив эти соотношения в выражение (16), получаем следующую зависимость для коэффициента сопротивления комбинированной ЛС при работе четырех питателей (II, III, V, VI):

$$\zeta_{1-15(15)}^{\kappa(2+2)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{п}}^{(2)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(2+2)} + \lambda \frac{l+l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

$\mu_{1-15(15)}^{\kappa(2+2)}$, v_{15} , Q_{15} подсчитываем по (6), (7) и (3), а расход в системе $Q = 2v_{15} S_{\text{п}}^{(2)}$.

Аналогично для всех 6 работающих питателей имеем:

$$\zeta_{1-15(15)}^{\kappa(3+3)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{п}}^{(3)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(3+3)} + \lambda \frac{l_0}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}^{(3)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

$\mu_{1-15(15)}^{\kappa(3+3)}$, v_{15} , Q_{15} подсчитываем по (6), (7) и (3), а расход в системе $Q = 2v_{15} S_{\text{п}}^{(3)}$.

Чтобы найти расход в комбинированной ЛС при работе питателей II, III и VI, запишем УБ для сечений 4–4 и 15–15:

$$\frac{P_4}{\gamma} + \alpha \frac{v_4^2}{2g} = \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)} + \lambda \frac{l+l_0}{d_k} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{15}^2}{2g}, \quad (19)$$

и для 4–4 и 18–18:

$$\frac{P_4}{\gamma} + \alpha \frac{v_4^2}{2g} = \left(\zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)} + \lambda \frac{2l+l_0}{d_k} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \left(\zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{18}^2}{2g}. \quad (20)$$

Понятно, что $\zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)} \neq \zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)}$. Из расчета L-образной ЛС известно, что $v_5 = v_6 = v_{15} S_{\text{np}(15)}^{(2)} / S_k$. А $v_7 = v_{15} S_{\Pi} / S_k$, $v_9 = v_{10} = v_{11} = v_{18} S_{\Pi} / S_k$. Левые части выражений (19) и (20) равны, приравниваем их правые части, подставляем значения v_5 , v_7 и v_9 и после ряда преобразований получаем:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{\left(\zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)} + \lambda \frac{l+l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(15)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1}{\left(\zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)} + \lambda \frac{2l+l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1}}. \quad \text{Подста-}$$

вив известные величины, имеем:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{0,383045 \zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)} + 1,743022}{0,100697 \zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)} + 1,579295}}. \quad (21)$$

Здесь неизвестны величины коэффициентов $\zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)}$ и $\zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)}$. Нужно задаться отношением v_{18} / v_{15} . Можно взять любое число, но чтобы не делать лишних расчетов, сделаем так. Понятно, что $v_{18} > v_{15}$: на пути от стояка до сечения 18–18 потеря напора меньше, чем от стояка до сечения 15–15. Предположим, что $v_{18} = 1,1 v_{15}$. Тогда расход в системе $Q = v_{15} S_{\text{np}(15)}^{(2)} + v_{18} S_{\Pi} = v_{15} \cdot 1,950368 S_{\Pi} + 1,1 v_{15} S_{\Pi} = 3,050368 v_{15} S_{\Pi}$. В этом случае отношения $\frac{v_5 S_5}{v_4 S_4} = \frac{1,950368 v_{15} S_{\Pi}}{3,050368 v_{15} S_{\Pi}}$, $\frac{v_9 S_9}{v_4 S_4} = \frac{1,1 v_{15} S_{\Pi}}{3,050368 v_{15} S_{\Pi}}$. И $v_5 / v_4 = 1,4428137$, $v_9 / v_4 = 0,8137413$. По этим величинам v_5 / v_4 и v_9 / v_4 определяем по соотношению (18), что $\zeta_{4-5(5)}^{d(2+1)} = 1,9803739$ и $\zeta_{4-9(9)}^{d(2+1)} = 3,0101751$. Подставляем их в зависимость (21) и получаем: $v_{18} = 1,1527929 v_{15}$. А мы задавались $v_{18} = 1,1 v_{15}$. Делаем следующее приближение: $v_{18} = 1,1527929 v_{15}$ и повторяем расчет. После

ряда приближений при заданном $v_{18} = 1,157318v_{15}$ получаем по расчету $v_{18} = 1,1573179v_{15}$. На этом расчет v_{18} / v_{15} можно закончить, так как разница между заданным и рассчитанным значениями этого отношения всего 0,0000001. Расход в системе $Q = 3,107685v_{15}S_{\Pi}$, приведенная площадь питателей $S_{\Pi(17)}^{K(2+1)} = 3,107685S_{\Pi}$. Тогда коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 15–15, приведенный к скорости металла в сечении 15–15 (учитывает, разумеется, работу трех питателей),

$$\zeta_{1-15(15)}^{K(2+1)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{K(2+1)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{L(2+1)} + \lambda \frac{l+l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}}.$$

Чтобы найти расход в комбинированной ЛС при работе питателей I, II, III, V и VI, запишем УБ для сечений 4–4 и 15–15, 4–4 и 18–18 аналогично (19) и (20) и после ряда преобразований получим:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{\left(\zeta_{4-5(5)}^{L(3+2)} + \lambda \frac{l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{(3)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1}{\left(\zeta_{4-9(9)}^{L(3+2)} + \lambda \frac{l+l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(18)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_{11} + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1}}.$$

Подставив известные величины, имеем:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{0,778298 \zeta_{4-5(5)}^{L(2+1)} + 1,80997}{0,383045 \zeta_{4-9(9)}^{L(2+1)} + 1,743022}}.$$

Опять задавая отношением v_{18} / v_{15} , после ряда последовательных приближений и преобразований получаем: $v_{18} = 1,143119v_{15}$, $S_{\Pi(15)}^{K(3+2)} = 5,009631S_{\Pi}$,

$$\zeta_{1-15(15)}^{K(3+2)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{K(3+2)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{L(3+2)} + \lambda \frac{l_0}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{(3)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi(15)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\Pi}}{S_k} \right)^2 + \zeta_{\Pi} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}}.$$

Чтобы найти расход в комбинированной ЛС при работе питателей I, II, III и VI, запишем УБ для сечений 4–4 и 15–15, 4–4 и 18–18 аналогично (19) и (20) и после ряда преобразований получим:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{\left(\zeta_{4-5(5)}^{d(3+1)} + \lambda \frac{l_0}{d_k}\right) \left(\frac{S_{np(15)}^{(3)}}{S_k}\right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_k}\right) \left(\frac{S_{np(15)}^{(2)}}{S_k}\right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k}\right) \left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2 + \zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1}{\left(\zeta_{4-9(9)}^{d(3+1)} + \lambda \frac{2l+l_0}{d_k}\right) \left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2 + \zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} + 1}}.$$

Подставив известные величины, имеем:

$$v_{18} = v_{15} \sqrt{\frac{0,778298 \zeta_{4-5(5)}^{d(3+1)} + 1,860997}{0,100697 \zeta_{4-9(9)}^{d(3+1)} + 1,579295}}. \quad (22)$$

А коэффициент сопротивления

$$\zeta_{1-15(15)}^{k(3+1)} = \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right) \left(\frac{S_{np(15)}^{k(3+1)}}{S_{ст}}\right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{d(3+1)} + \lambda \frac{l_0}{d_k}\right) \left(\frac{S_{np(15)}^{(3)}}{S_k}\right)^2 + \left(\zeta_6 + \lambda \frac{l}{d_k}\right) \left(\frac{S_{np(15)}^{(2)}}{S_k}\right)^2 + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k}\right) \left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2 + \zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n}.$$

Однако расчеты по (22) дают следующие результаты: при заданных $v_{18} / v_{15} = 0,75, 1,00$ и $1,25$ получаем по расчету это отношение равным соответственно $1,2289, 1,2825$ и $1,3154$ при экспериментальной величине в $1,1963$. Как видно, резкое изменение отношения с $0,75$ до $1,25$ (в $1,67$ раза) увеличило его расчетную величину только в $1,07$ раза. Таким образом, система расчета почти не реагирует на изменение величины v_{18} / v_{15} . И расчет расхода жидкости в системе невозможен. Это началось со случая, когда поток после деления в стояке в левой части (рис. 3) больше потока в правой части в три раза. Ранее мы уже столкнулись с подобным, когда изучали истечение воды из тройников. Было установлено, что когда скорости течения отличаются в три и более раз, удар в месте деления потока в тройнике резко смягчается (непонятно почему), а коэффициент $\varphi = 0,3$, а не $1,5$.

Приняв $\varphi = 0,3$ и задаваясь отношением v_{18} / v_{15} , после ряда последовательных приближений и преобразований получаем: $v_{18} = 1,143119 v_{15}$, $S_{np(15)}^{k(3+1)} = 3,920884 S_n$. Скорость v_{17} получается завышенной на 10% , а расход – на $8,3\%$ по сравнению с экспериментальными величинами. Хотя такие ЛС на практике не встречаются, вопрос требует дальнейшего изучения с точки зрения понимания протекания процессов в ЛС, а также проверки теории расчета ЛС.

Расчетные и экспериментальные (в знаменателе) данные сведены в табл. 2. Как видно, с увеличением количества питателей (и суммарной их площади) в 6 раз расход в системе стал больше только в $3,57$ раза. Это объясняется ростом гидравлического сопротивления системы – $\zeta_{1-17(17)}$ увеличился

в 4,35 раза. А скорость жидкости v_{17} в питателе VI уменьшилась с 1,987 до 1,310 м/с, в 1,52 раза, при увеличении количества одновременно работающих питателей с 1 до 6. Теоретические значения скорости v_{17} отличаются от экспериментальных на $(-3,70) \dots (+5,00)$ %. Отличие опытных величин расходов от расчетных изменяется от $(-0,46)$ до $(+3,64)$ %. Приведенная площадь питателей при работе 6 питателей $S_{пр(6)} = 5,560S_n$.

Сравнивая табл. 1 и 2, мы видим, что характеристики L-образной и комбинированной ЛС сильно отличаются, хотя они имеют одинаковые размеры (при разных схемах сборки). Это объясняется тем, что коллектор в комбинированной ЛС по сравнению с L-образной разделен на две части, скорость в каждой части упала в два раза, а потери напора – в четыре раза, что привело к росту скорости в каждой части коллектора по сравнению с L-образной. А приведенная площадь питателей увеличилась с $4,633S_n$ до $5,560S_n$, приблизившись к максимуму – $6S_n$ – суммарной площади сечений питателей, когда скорости истечения жидкости из всех питателей одинаковые.

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные характеристики комбинированной литниковой системы

Работающие питатели	$\zeta_{1-15(15)}$	$\mu_{1-15(15)}$	$S_{пр(15)}$	v_{17} , м/с	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с
III	0,628	0,784	S_n	$\frac{1,987}{1,980}$	$\frac{127,23}{126,80}$
II, III	0,928	0,720	$1,950S_n$	$\frac{1,825}{1,789}$	$\frac{227,97}{222,29}$
I-III	1,236	0,669	$2,780S_n$	$\frac{1,695}{1,614}$	$\frac{301,70}{291,09}$
III, VI	0,844	0,736	$2S_n$	$\frac{1,866}{1,871}$	$\frac{239,03}{240,11}$
II, III, V, VI	1,690	0,610	$3,901S_n$	$\frac{1,468}{1,524}$	$\frac{385,95}{381,25}$
I-VI	2,733	0,518	$5,560S_n$	$\frac{1,312}{1,257}$	$\frac{467,03}{452,37}$
I-III, VI ($\varphi = 0,3$)	1,530	0,629	$3,921S_n$	$\frac{1,593}{1,447}$	$\frac{400,01}{369,48}$
I-III, V, VI	2,740	0,517	$5,010S_n$	$\frac{1,310}{1,319}$	$\frac{420,39}{418,48}$

Из-за малых отличий теоретических и экспериментальных результатов возникает мысль о порочном круге, когда в расчетах используются данные, полученные в своих же опытах. Действительно, коэффициент сопротивления на поворот из коллектора в питатель и изменение площадей сечений потока до и после поворота $\zeta_{\text{п}}$ находился для этой же литниковой системы, как и коэффициент $\zeta_{\text{к}}$. Однако порочного круга нет. Во-первых, в экспериментах по определению этих коэффициентов *при работе только одного питателя* (не было деления потока) использовалась не новая, а известная зависимость – уравнение Бернулли. Во-вторых, для определения указанных коэффициентов проводились независимые опыты [9]. И главное, коэффициенты сопротивлений в гидравлике расчету не поддаются, а определяются экспериментально. Только сопротивление резкого расширения потока, а также – с некоторыми допущениями – сопротивление резкого сужения и сопротивление поворота на 90° без изменения площадей сечений до и после поворота подсчитываются теоретически. А наши главные сопротивления – поворот из стояка в коллектор и поворот из коллектора в питатель с изменением площадей сечений до и после поворота – определяются только опытным путем, как и коэффициент потерь на трение λ . Коэффициент сопротивления входа из чаши в стояк в зависимости от радиуса скругления входной кромки стояка приведен в справочнике [8] – это данные экспериментов. Коэффициенты сопротивлений на проход и на ответвление части потока, определяемые по уравнениям (11) и (12), тоже получены путем обработки результатов опытов [10]. Раз гидравлика – расчетно-экспериментальная наука, то, как бы ни хотелось обратного, приходится использовать в теоретических исследованиях опытные данные.

Как видно из табл. 1 и 2, расхождение между расчетными и опытными значениями расходов составляет всего от $(-1,40)$ до $(+3,64)$ %, за исключением случая работы питателей по схеме 3+1, который на практике не встречается, но интересен для теории и требует изучения. Понятно, что при таких отличиях возникают сомнения в результатах работы. Появляется мысль: методика расчета подходит только «для данного случая» (*ad hoc*, как принято говорить). Чтобы отвести это серьезную претензию, были проведены следующие эксперименты. При диаметре питателя $d_{\text{п}} = 9,03$ мм диаметры коллектора и стояка были такими: 9,03, 12,03, 13,03, 14,03, 15,03, 16,03, 18,03, 20,08 и 24,08 мм. Также для коллектора с $d_{\text{к}} = 16,03$ мм изучали питатели диаметром $d_{\text{п}} = 2,03 \dots 16,03$ мм (через 1 мм). Величину напора H использовали такую: 0,1800, 0,3600, 0,5000, 0,7500 и 1,0800 м. А ЛС, кроме исследованных ранее теоретически и экспериментально L-образной [1, 2] и разветвленной [3, 4], были такие своеобразные системы, как комбинированная, крестовинная и кольцевая. И отклонения опытных величин от расчетных составляло 1–7 %. Поэтому говорить о применимости

предлагаемой теории расчета только «для данного случая» ($H = 0,3600$ м, $d_{\text{ст}} = 24,08$ мм, $d_{\text{к}} = 16,03$ мм, $d_{\text{п}} = 9,03$ мм, $l = 119$ мм) не следует. Хотя границы ее использования могут выявить только дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Рассмотрим, что же это такое – приведенная площадь питателей. По соотношению (15) $Q = v_{17} S_{\text{np}(17)}^{(2)}$, а $S_{\text{np}(17)}^{(2)} = (1+x) S_{\text{п}}$. Получается, что при работе питателей V и VI скорости истечения жидкости из них одинаковы и равны v_{17} , а площадь питателя V составляет x от площади питателя VI: $S_{16} = x S_{17} = x S_{\text{п}}$, т.е. появляются дробные, или частичные, питатели. Математически в ЛС во всех питателях скорость одна и та же, а площади их поперечных сечений разные. Хотя понятно, что физически у питателей площади сечений одинаковые, а скорости течения жидкости разные. Благодаря этому приему удалось решить систему уравнений истечения жидкости одновременно из нескольких питателей. При работе всех 6 питателей площадь питателя VI $S_{17} = S_{\text{п}}$, а питателя I $S_{12} = 0,544 S_{\text{п}}$. А если добавить еще три таких же питателя между стояком и питателем I, то расчетная площадь ближнего к стояку питателя составит всего $0,384 S_{\text{п}}$ (как и в эксперименте).

Отметим любопытный факт в пользу предлагаемой теории расчета ЛС. При увеличении количества питателей с 1 до 2 (в два раза) в L-образной ЛС расход в системе увеличился в 1,718 раза по расчету и в 1,687 раза в эксперименте. А изменение числа питателей с 5 до 6 привело к росту расхода только в 1,083 и 1,089 раза соответственно, т.е. в методике учитывается рост гидравлического сопротивления системы, как и в эксперименте. И питатели «знают» друг о друге, так как включение или выключение хотя бы одного питателя приводит к перестройке работы всей гидравлической системы, аналогично опытным данным (см. табл. 1 и 2).

Можно подсчитать $S_{\text{п}}$, ζ , μ , v и Q для каждого питателя, например, при двух работающих питателях у питателя V в L-образной ЛС такие характеристики (данные о питателе VI приведены в табл. 1): $S_{\text{np}(16)}^{(2)} = 2,052 S_{\text{п}}$, $\zeta_{1-16(16)}^{(2)} = 1,418$, $\mu_{1-16(16)}^{(2)} = 0,643$, $v_{16} = 1,630$ м/с, $Q_{16} = 104,39 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Следует отметить поразительное явление – стабильность отношения скорости в i -м питателе к скорости жидкости в дальнем от стояка питателе VI с выходным сечением 17–17. Отношение $v_{16}/v_{17} = 0,950$ по расчету при работе питателей VI и V, а в экспериментах оно равно $0,95 \pm 0,01$ при действии и этих двух питателей, и трех питателей (VI, V и IV), и четырех, пяти и шести питателей. То же самое следует сказать об отношениях v_{15}/v_{17} , v_{14}/v_{17} , v_{13}/v_{17}

и v_{12}/v_{17} . Дальнейшее увеличение питателей до 12 не повлияло на эти отношения. Пытались «разбить» эти отношения увеличением напора в 6 раз (с 0,1800 до 1,0800 м) и диаметра стояка в 34 раза, с 9,03 мм до 310 мм. Однако отношения v_i/v_{17} от этого не изменились. Это отрадный факт, так как в противном случае расчет ЛС был бы невозможен.

Так о чем же идет речь? Например, в случае работы всех шести питателей записываем для каждого из них свое УБ для сечений $l-l$ и $z-z$ при истечении в атмосферу и получаем: $H = \alpha v_{17}^2 / 2g\mu_{1-17(17)}^2$, $H = \alpha v_{16}^2 / 2g\mu_{1-16(16)}^2$, ..., $H = \alpha v_{12}^2 / 2g\mu_{1-12(12)}^2$. Или можно записать УБ для сечения $l-l$ и любого сечения ЛС, или двух любых сечений, хотя расходы жидкости в этих сечениях могут отличаться в разы и даже в десятки раз. Получается, мы *используем УБ для сечений с разными расходами* и, как это ни удивительно, эксперименты подтверждают данное, казалось бы, абсурдное допущение. И за счет этого стал возможным расчет ЛС безо всяких дополнительных принципов. Только очевидное $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$, где Q_i – расход жидкости в i -м питателе. В любом сече-

нии гидравлической системы действует H в виде суммы скоростного и пьезометрического напоров. Особенно эффектно это выглядит в системах кольцевых, с кольцами разных гидравлических сопротивлений, с тупиковыми участками крестовинных и L-образных ЛС, разбросанных на большой площади и на значительных расстояниях друг от друга.

Таким образом, нами разработана теория расчета скоростей и расходов металла в комбинированной литниковой системе и получено ее экспериментальное подтверждение.

Список литературы

1. Васенин В.И. Расчет расхода металла в литниковой системе // Литейное производство. – 2004. – № 12 (приложение). – С. 6–10.
2. Васенин В.И. Исследование L-образной литниковой системы // Литейное производство. – 2011. – № 1. – С. 18–22.
4. Васенин В.И. Исследование разветвленной литниковой системы // Литейное производство. – 2010. – № 8. – С. 17–20.
5. Васенин В.И. Стенд для исследования литниковых систем: пат. на полезную модель № 92817 от 8.12.2009, МПК В21D 11/18.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
7. 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.

8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

9. Васенин В.И. Экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений литниковой системы // Литейное производство. – 2009. – № 1. – С. 22–25.

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

Получено 21.02.2011