

В.И. Васенин, Д.К. Анисимов, А.В. Богомяков, К.В. Шаров
V.I. Vasenin, D.K. Anisimov, A.V. Bogomiagkov, K.V. Sharov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO AN RINGSHAPED GATING SYSTEM

Изложены результаты исследования кольцевой литниковой системы в зависимости от количества одновременно работающих питателей.

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

Results of the investigation of the ringshaped gating system depending 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.

Ранее были исследованы L-образная [1–4], разветвленная [5–7], комбинированная [3, 8] и крестовинная литниковые системы (ЛС). Разница между расчетными и опытными значениями скоростей, расходов и напоров составляла несколько процентов. Это удивительно, так как в расчетах использовалось уравнение Бернулли (УБ) для потока жидкости с переменным расходом (массой), хотя оно выведено для потока с постоянным расходом (массой) – при отсутствии раздачи жидкости по питателям. Возможность использования УБ при расчетах ЛС с изменяющимся до нуля расходом в коллекторе (шлакоуловителе) не была теоретически доказана. Нам представляется целесообразным экспериментально и расчетами исследовать самую сложную ЛС – кольцевую.

Система (рис. 1 и 2) состоит из литниковой чаши, стояка, коллектора и семи одинаковых питателей I–VII [9]. 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: $H = 0,363$ м. Жидкость выливается сверху из питателей в форму. В сечениях коллектора 5–5, ..., 16–16 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 размещены изогнутые на 90° пьезометры (на рис. 1 не показаны). Время истечения жидкости из каждого питателя составляло 50–200 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 не менее 6 раз.

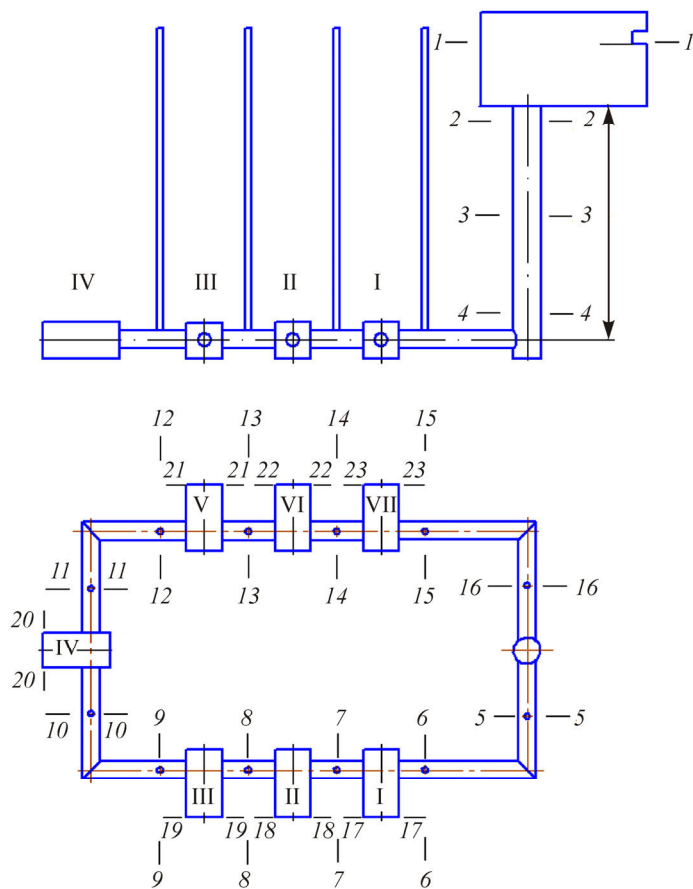


Рис. 1. Кольцевая литниковая система

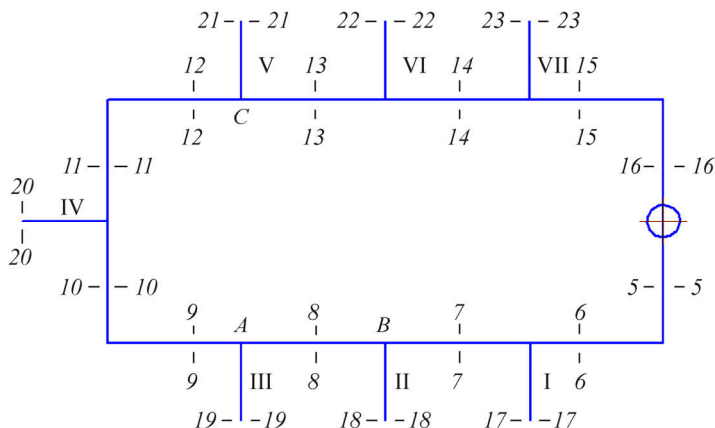


Рис. 2. Схема кольцевой литниковой системы

Сначала подсчитаем характеристики ЛС при работе только одного питателя в случае, когда система разомкнута в сечении 16–16 (нет кольца). Для питателя I коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 17–17, приведенный к скорости v_{17} (см. [4]),

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

где $\zeta_{ст}$, $\zeta_{к}$ и $\zeta_{п}$ – коэффициенты местных сопротивлений входа металла из чаши в стояк, поворота из стояка в коллектор и поворота из коллектора в питатель; ζ – коэффициент местного сопротивления поворота на 90° из сечения 5–5 в сечение 6–6; λ – коэффициент потерь на трение; $l_{ст}$ – длина (высота) стояка, м; $l_{п}$ – длина питателя, м; $l_{ст-1}$ – расстояние от стояка до питателя I; $d_{ст}$, $d_{к}$ и $d_{п}$ – гидравлические диаметры стояка, коллектора и питателя, м; $S_{ст}$, $S_{к}$, $S_{п}$ – площади сечений стояка, коллектора и питателя, м². Коэффициент расхода системы от сечения 1–1 до сечения 17–17, приведенный к скорости v_{17} ,

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

Скорость

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

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса), принимаем $\alpha = 1,1$ [10, с. 108]. Расход в ЛС при сливе сверху

$$Q = v_{17} S_{п}. \quad (4)$$

Для данной ЛС $l_{\text{ст}} = 0,2675$ м, $l_{\text{ст-I}} = 0,251$ м, $l_{\text{ст-II}} = 0,370$ м, $l_{\text{ст-III}} = 0,489$ м, $l_{\text{ст-IV}} = 0,742$ м, $l_{\text{п}} = 0,0495$ м, $d_{\text{п}} = 0,00903$ м, $d_{\text{к}} = d_5 = \dots = d_{16} = 0,01603$ м, $d_{\text{ст}} = 0,02408$ м. Принимаем, как и в работе [11], 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 [12, с. 126]: $\zeta_{\text{ст}} = 0,12$. Коэффициент местного сопротивления поворота из стояка в коллектор на 90° и изменения площадей сечений потока $\zeta_{\text{к}} = 0,396$ [13]. Коэффициент местного сопротивления поворота в коллекторе на 90° (без изменения площадей сечений потока до и после поворота) $\zeta = 0,885$ [13]. Коэффициент местного сопротивления поворота из коллектора в питатель на 90° (с изменением площадей сечений) $\zeta_{\text{п}} = 0,334$ [13]. Подставив в соотношения (1)–(4) известные величины, имеем: $\zeta_{1-17(17)} = 0,683710$, $\mu_{1-17(17)} = 0,770666$, $v_{17} = 1,960979$ м/с, $Q_{17} = 125,585130 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ЛС при работе одного питателя

Работающие питатели	Характеристики системы				
	ζ	μ	$v/v^{\text{эксп}}$, м/с	$Q/Q^{\text{эксп}}$, см ³ /с	Q_0 , %
I**	0,684	0,771	$\frac{1,961}{1,932}$	$\frac{125,59}{123,71}$	+1,52
I	0,631	0,783	$\frac{1,992}{1,976}$	$\frac{127,60}{126,51}$	+0,86
II**	0,706	0,766	$\frac{1,948}{1,925}$	$\frac{124,76}{123,26}$	+1,22
II	0,634	0,782	$\frac{1,991}{1,955}$	$\frac{127,48}{125,19}$	+1,83
III**	0,729	0,761	$\frac{1,935}{1,904}$	$\frac{123,95}{121,97}$	+1,62
III	0,637	0,782	$\frac{1,989}{2,010}$	$\frac{127,37}{128,71}$	-1,04
IV**	0,865	0,732	$\frac{1,863}{1,822}$	$\frac{119,31}{116,66}$	+2,27
IV	0,644	0,780	$\frac{1,984}{2,024}$	$\frac{127,07}{129,63}$	-1,97

Примечания. * $Q_0 = \frac{Q - Q^{\text{эксп}}}{Q^{\text{эксп}}} \cdot 100$ %. ** Гидравлическая система разомкнута в сечении 16–16.

Коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 20–20, приведенный к скорости v_{20} в питателе IV,

$$\zeta_{1-20(20)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{к}} + 2\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-IV}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \quad (5)$$

По формулам (5), (2)–(4) находим: $\zeta_{1-20(20)} = 0,865357$, $\mu_{1-20(20)} = 0,732182$, $v_{20} = 1,863054$ м/с, $Q_{20} = 119,313840 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Когда питатель IV находится в кольце, то потери напора от сечения 1–1 до сечения 20–20

$$h_{1-20(20)} = \zeta_{1-20(20)} \alpha \frac{v_{20}^2}{2g} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + 2\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-IV}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \right) \alpha \frac{v_{20}^2}{2g}, \quad (6)$$

где $\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}}$ – коэффициент сопротивления на деление потока в сечении 4–4 между сечениями 5–5 и 16–16, отнесенный к скорости v_5 . Этот коэффициент подсчитываем по следующему соотношению из справочника [12]:

$$\zeta^{\text{д}} = \frac{1 + 1,5(v_{\text{отд}}/v)^2}{(v_{\text{отд}}/v)^2}, \quad (7)$$

где v – скорость жидкости до деления потока, м/с; $v_{\text{отд}}$ – скорость жидкости в одном из каналов после деления потока, м/с.

Чтобы найти $\zeta_{4-5}^{\text{д}}$ (и равный ему $\zeta_{4-16}^{\text{д}}$), запишем очевидное равенство – $Q = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = 2v_5 S_{\text{к}} = 2v_{16} S_{\text{к}} = v_{20} S_{\text{п}}$, из которого получается, что $v_5/v_{\text{ст}} = S_{\text{ст}}/2S_{\text{к}} = 1,128278$ – это и есть отношение $v_{\text{отд}}/v$ в формуле (7). Тогда по (7) находим, что $\zeta_{4-5}^{\text{д}} = \zeta_{4-16}^{\text{д}} = 2,285538$.

Учитывая, что $v_{\text{ст}} = v_{20} S_{\text{п}}/S_{\text{ст}}$, а $v_5 = v_{20} S_{\text{п}}/2S_{\text{к}}$, преобразуем (6) к следующему виду:

$$\zeta_{1-20(20)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + 2\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-IV}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{2S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \quad (8)$$

Подставив в (8) известные величины, имеем: $\zeta_{1-20(20)} = 0,644469$. По формулам (2)–(4) определяем: $\mu_{1-20(20)} = 0,779807$, $v_{20} = 1,984238$ м/с, $Q_{20} = 127,074690 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Как видно, замыкание кольца привело к уменьшению коэффициента сопротивления $\zeta_{1-20(20)}$ с 0,865 (см. табл. 1) до 0,644.

Стало два потока жидкости, скорость в коллекторе упала в два раза, а потери напора в коллекторе на трение и в местных сопротивлениях уменьшились в 4 раза.

Когда питатель III находится в кольце, то потери напора в параллельных трубопроводах 5–7–8 и 16–13–9 не суммируются и они равны друг другу. В этом случае давление p_8 в сечении 8–8 равно давлению p_9 в 9–9, истечение идет только из 19–19, а перетекания жидкости из сечения 8–8 в сечение 9–9 или из 9–9 в 8–8 нет¹. УБ для сечений 4–4 и 19–19 (по пути через сечения 5–5, ..., 8–8)

$$\frac{P_4}{\gamma} + \alpha \frac{v_{ct}^2}{2g} = \left(\zeta_{4-5(5)}^d + \zeta + \lambda \frac{l_{ct-III}}{d_k} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_{II} + \lambda \frac{l_{II}}{d_{II}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}. \quad (9)$$

УБ для сечений 4–4 и 19–19 (через сечения 16–16, ..., 9–9)

$$\frac{P_4}{\gamma} + \alpha \frac{v_{ct}^2}{2g} = \left(\zeta_{4-16(16)}^d + 3\zeta + \lambda \frac{l_{ct-III(16-9)}}{d_k} \right) \alpha \frac{v_{16}^2}{2g} + \left(\zeta_{II} + \lambda \frac{l_{II}}{d_{II}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}. \quad (10)$$

Левые части выражений (9) и (10) равны. Приравниваем правые части и после преобразований получаем ($l_{ct-III(16-9)} = 0,995$ м):

$$v_5 = v_{16} \sqrt{\frac{\zeta_{4-16(16)}^d + 4,517134}{\zeta_{4-5(5)}^d + 1,800159}}, \quad (11)$$

где $\zeta_{4-5(5)}^d$ – коэффициент сопротивления на деление потока в сечении 4–4 между сечениями 5–5 и 16–16, отнесенный к скорости v_5 ; $\zeta_{4-16(16)}^d$ – коэффициент сопротивления на деление потока в сечении 4–4 между сечениями 5–5 и 16–16, отнесенный к скорости v_{16} . Эти коэффициенты зависят – см. формулу (7) – от отношения скоростей v_5/v_{ct} и v_{16}/v_{ct} , которые неизвестны.

Понятно, что $v_5 > v_{16}$. Предположим, что $v_5 = 1,1v_{16}$. Тогда $v_{ct}S_{ct} = v_5S_k + v_{16}S_k = 1,1v_{16}S_k + v_{16}S_k = 2,1v_{16}S_k$. Отсюда $v_{16}/v_{ct} = S_{ct}/2,1S_k = 1,074550$. По (7) находим: $\zeta_{4-16(16)}^d = 2,366058$.

При $v_5 = 1,1v_{16}$ получаем, что $v_{16} = 0,909091v_5$. $v_{ct}S_{ct} = (v_5 + v_{16})S_k = (v_5 + 0,909091v_5)S_k = 1,909091v_5S_k$. И $v_5/v_{ct} = S_{ct}/1,909091S_k = 1,182005$. По выражению (7) определяем: $\zeta_{4-5(5)}^d = 2,215750$.

¹ Давления p_8 и p_9 можно сделать разными путем установки насоса в литниковой системе (не в стояке). Тогда движение жидкости в коллекторе будет или по часовой, или против часовой стрелки – конечно, с обеспечением работы питателя III.

Подставляем найденные значения $\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}}$ и $\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}}$ в (11) и получаем: $v_5 = 1,309191v_{16}$. А мы задавались $v_5 = 1,1v_{16}$. Делаем следующее приближение – $v_5 = 1,309191v_{16}$ – и повторяем расчет. После ряда приближений при заданном $v_5 = 1,350291v_{16}$ получаем по расчету $v_5 = 1,3502911v_{16}$. Расчет этого отношения можно закончить, так как разница между заданным и рассчитанным значениями v_5/v_{16} составляет всего 0,0000001. При этом $\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} = 2,094972$, $\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} = 2,584805$, а $v_{16} = 0,740581v_5$.

$v_{\text{ср}} = v_{19}S_{\text{п}}/S_{\text{ср}}$, $(v_5 + v_{16})S_{\text{к}} = (v_5 + 0,740581v_5)S_{\text{к}} = 1,740581v_5S_{\text{к}} = v_{19}S_{\text{п}}$ и $v_5 = v_{19}S_{\text{п}}/1,740581S_{\text{к}}$. Коэффициент сопротивления ЛС от сечения I–I до сечения 19–19, приведенный к скорости v_{19} в питателе III, см. зависимости (5) и (9),

$$\zeta_{1-19(19)} = \left(\zeta_{\text{ср}} + \lambda \frac{l_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ср-III}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{1,740581S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \quad (12)$$

Подставив в (12) известные величины, имеем: $\zeta_{1-19(19)} = 0,636880$. $\mu_{1-19(19)} = 0,781613$, $v_{19} = 1,988832$ м/с, $Q_{19} = 127,368920 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Как видно, замыкание кольца привело к уменьшению коэффициента сопротивления $\zeta_{1-19(19)}$ с 0,729 (см. табл. 1) до 0,637. Появление параллельного коллектора привело к падению скоростей в каждой из линий, к снижению потерь на трение и в местных сопротивлениях, что и вызвало уменьшение $\zeta_{1-19(19)}$, рост $\mu_{1-19(19)}$, v_{19} и Q_{19} по сравнению со случаем, когда питатель III работал при разрыве кольца в сечении 16–16.

Если гидравлическая цепь разомкнута в сечении 16–16 и работают питатели II и III, I и III, I–III, III и VII, I–VII и др., то это обычные L-образные ЛС. Теоретическое и экспериментальное исследование таких систем проведено в статье [4].

При работе питателей II и III коэффициент сопротивления ЛС от сечения I–I до сечения 19–19, приведенный к скорости v_{19} в питателе III [4],

$$\zeta_{1-19(19)}^{(2)} = \left(\zeta_{\text{ср}} + \lambda \frac{l_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(19)}^{(2)}}{S_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\zeta_{\text{к}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ср-II}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(19)}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \quad (13)$$

Для питателей I–III коэффициент сопротивления ЛС от сечения $1-1$ до сечения $19-19$, приведенный к скорости v_{19} в питателе III [14],

$$\begin{aligned} \zeta_{1-19(19)}^{(3)} = & \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_{пр(19)}^{(3)}}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta_к + \zeta + \lambda \frac{l_{ст-1}}{d_к} \right) \left(\frac{S_{пр(19)}^{(3)}}{S_к} \right)^2 + \\ & + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_к} \right) \left(\frac{S_{пр(19)}^{(2)}}{S_к} \right)^2 + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_к} \right) \left(\frac{S_{п}}{S_к} \right)^2 + \zeta_{п} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}}. \end{aligned} \quad (14)$$

В выражениях (13) и (14) ζ_7 – коэффициент сопротивления на проход жидкости из сечения $6-6$ в сечение $7-7$ при ответвлении части потока из коллектора в питатель I; ζ_8 – коэффициент сопротивления на проход жидкости из сечения $7-7$ в сечение $8-8$ при ответвлении части потока из коллектора в питатель II; $S_{пр(19)}^{(2)}$ – приведенная к скорости v_{19} площадь питателей при работе питателей II и III; $S_{пр(19)}^{(3)}$ – приведенная к скорости v_{19} площадь питателей при работе питателей I–III. Коэффициенты сопротивлений, обусловленных отделением потока из коллектора в питатель, будем подсчитывать по формулам для тройников [14, с. 112–115]. Коэффициент сопротивления на проход в коллекторе при ответвлении части потока в питатель (это коэффициенты ζ_7 и ζ_8)

$$\zeta_{пр} = 0,4 \left(1 - v_{пр} / v_к \right)^2 / \left(v_{пр} / v_к \right)^2, \quad (15)$$

а коэффициент сопротивления на ответвление части потока в питатель

$$\zeta_{отв} = \left[1 + \tau \left(v_{п} / v_к \right)^2 \right] / \left(v_{п} / v_к \right)^2, \quad (16)$$

где $v_к$ и $v_{пр}$ – скорости металла в коллекторе до и после ответвления части потока в питатель, м/с; $v_{п}$ – скорость жидкости в питателе, м/с; τ – коэффициент. Для нашего случая при $S_{п} / S_к = 0,317$ $\tau = 0,15$. Коэффициент $\zeta_{пр}$ получается приведенным к скорости проходящего потока $v_{пр}$, а $\zeta_{отв}$ – к скорости в питателе $v_{п}$. Для данной ЛС [4] $\zeta_7 = 0,072011$, $\zeta_8 = 0,357769$, $S_{пр(19)}^{(2)} = 1,945739S_{п}$, $S_{пр(19)}^{(3)} = 2,771311S_{п}$. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Если гидравлическая цепь разомкнута в сечении $10-10$ и работают питатели III и V, то это обычная разветвленная ЛС [7]. А если работают питатели II, III, V и VI или I–III и V–VII, то это комбинированные ЛС [3, 8]: в них в нижнем сечении стояка поток делится на две части, как в разветвленной ЛС, а раздача потока по питателям идет как в L-образной ЛС.

Таблица 2

Характеристики ЛС при работе нескольких питателей

Рабо- тающие питатели	Характеристики системы							
	$\zeta_{1-19(19)}$	$\mu_{1-19(19)}$	$\frac{v_{19}}{v_{19}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{v_{18}}{v_{18}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{v_{17}}{v_{17}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{Q_{19}}{Q_{19}^{\text{эксп}}}$, см ³ /с	$\frac{Q}{Q^{\text{эксп}}}$, см ³ /с	$Q_0, \%$
III*	0,729	0,761	$\frac{1,935}{1,904}$			$\frac{123,95}{121,97}$	$\frac{123,95}{121,97}$	+1,62
III, V**	0,946	0,717	$\frac{1,824}{1,815}$			$\frac{116,82}{116,23}$	$\frac{233,64}{232,46}$	+0,51
II, III*	1,530	0,629	$\frac{1,600}{-}$	$\frac{1,514}{-}$		$\frac{102,46}{-}$	$\frac{199,36}{-}$	
II, III, V, VI**	2,165	0,562	$\frac{1,430}{-}$	$\frac{1,353}{-}$		$\frac{91,59}{-}$	$\frac{356,43}{-}$	
I-III*	2,470	0,537	$\frac{1,366}{-}$	$\frac{1,292}{-}$	$\frac{1,128}{-}$	$\frac{87,48}{-}$	$\frac{242,42}{-}$	
I-III, V-VI**	3,760	0,458	$\frac{1,166}{1,126}$	$\frac{1,103}{1,084}$	$\frac{0,963}{0,951}$	$\frac{74,69}{72,11}$	$\frac{413,99}{404,79}$	+2,27

Примечания. * Гидравлическая система разомкнута в сечении 16–16.

** Гидравлическая система разомкнута в сечении 10–10.

При работе питателей III и V (кольцо разомкнуто в сечении 10–10) коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 19–19, приведенный к скорости v_{19} в питателе III [7],

$$\zeta_{1-19(19)}^{(2)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{п}}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

При работе питателей II, III, V и VI (кольцо разомкнуто в сечении 10–10) коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 19–19, приведенный к скорости v_{19} в питателе III [8],

$$\zeta_{1-19(19)}^{(4)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{п}}^{(2)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-II}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}.$$

При работе питателей I–III и V–VII (кольцо разомкнуто в сечении 10–10) коэффициент сопротивления ЛС от сечения 1–1 до сечения 19–19, приведенный к скорости v_{19} в питателе III [8],

$$\begin{aligned} \zeta_{1-19(19)}^{(6)} = & \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{2S_{\text{np}(19)}^{(3)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-I}}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(19)}^{(3)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \\ & + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(19)}^{(2)}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \end{aligned}$$

$\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} = 2,285538$ (см. выше). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Когда в замкнутой ЛС работают питатели II и III (см. рис. 1), в питатель III поступает жидкость из сечений 8–8 и 9–9, а в питатель II – только из сечения 7–7, причем не вся. В рассматриваемом кольце имеются два разных потока: один против часовой стрелки (16–13–9), другой – по часовой стрелке (5–6–7–8). Движение жидкости в сечении 8–8 – справа налево. В данном случае при работе двух питателей это определяется легко. Потoki встречаются на входе в питатель III в точке А (рис. 2), которая называется точкой водораздела или нулевой точкой [10, с. 216–217]. Мысленно разрезаем наше кольцо по намеченной линии водораздела и получаем сеть (рис. 3). Далее по обычным формулам подсчитываем потери напора для линии 1–16–13–9–19' $h_{1-16-9-19}'$ и для линии 1–5–8–19'' $h_{1-5-8-19}''$. После этого сопоставляем между собой две найденные потери напора. Если $h_{1-16-9-19}' = h_{1-5-8-19}''$, то заключаем, что напоры в точках А' и А'' будут одинаковыми, что и должно быть, поскольку точки А' и А'' представляют собой физически одну точку А. Следовательно, получив указанное равенство, можем утверждать, что мы правильно задались величинами расходов Q_7 , Q_8 и Q_9 . Если указанное равенство не получается, то приходится изменять величины этих расходов, а иногда и переносить точку водораздела, например, в точку В – в точку входа жидкости в питатель II. При этом делаем вторую, третью и последующие попытки, добиваясь того, чтобы приведенное выше равенство было выдержано с нужной точностью.

Составим УБ для сечений 1–1 и 18–18 (для пути через сечения 2–2, ..., 5–5, ..., 7–7):

$$\begin{aligned} H + \frac{P_a}{\gamma} = & \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-II}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \\ & + \left(\zeta_{18} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{18}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}, \end{aligned} \quad (17)$$

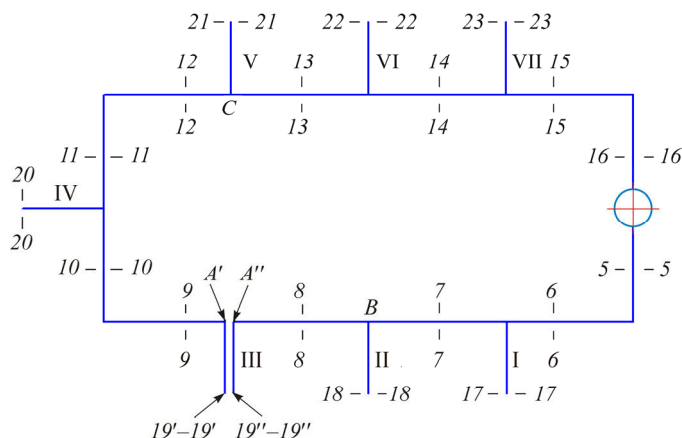


Рис. 3. Схема для расчета при работе питателей II и III

и для сечений 1-1 и 19-19 (для пути через сечения 2-2, ..., 16-16, ..., 13-13, ..., 9-9):

$$\begin{aligned}
 H + \frac{P_a}{\gamma} = & \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-16(16)}^d + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_k} \right) \alpha \frac{v_{16}^2}{2g} + \\
 & + \left(\zeta_{\text{II}} + \lambda \frac{l_{\text{II}}}{d_{\text{II}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}.
 \end{aligned} \quad (18)$$

Запишем очевидные равенства:

$$Q = Q_{\text{ст}} = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = Q_5 + Q_{16} = v_5 S_k + v_{16} S_k = Q_{18} + Q_{19} = v_{18} S_{\text{II}} + v_{19} S_{\text{II}}, \quad (19)$$

$$Q_8 = v_8 S_k = Q_7 - Q_{18} = v_7 S_k - v_{18} S_{\text{II}}, \quad Q_{19} = v_{19} S_{\text{II}} = Q_8 + Q_9 = v_8 S_k + v_9 S_k.$$

Как видно, у нас 3 уравнения (17)–(19) и 6 неизвестных величин скоростей $v_{\text{ст}}$, v_5 , v_8 , v_{16} , v_{18} , v_{19} и двух коэффициентов ζ_8 и ζ_{18} , зависящих от отношений v_8/v_7 и v_{18}/v_7 , которые также неизвестны, см. формулы (15) и (16). Казалось бы, задача не поддается решению. Поступим таким образом.

Введем следующие обозначения: $v_{18/19} = v_{18}/v_{19}$, $x = Q_8/Q_7 = v_8 S_k/v_7 S_k = v_{19}(v_{18/19} + 1) S_{\text{II}} = v_8/v_7$, $y = Q_5/Q_{16} = v_5 S_k/v_{16} S_k = v_5/v_{16}$. А $Q_8 = x Q_7$, $v_7 = v_8/x$, $Q_{16} = Q_5/y$, $v_{16} = v_5/y$, $v_5 = v_6 = v_7$, $v_9 = v_{10} = \dots = v_{15} = v_{16}$.

Расход жидкости в системе $Q = (v_{18} + v_{19}) S_{\text{II}} = (v_{18/19} v_{19} + v_{19}) S_{\text{II}} = v_{19} S_{\text{II}(19)}$, где $S_{\text{II}(19)} = (1 + v_{18/19}) S_{\text{II}}$ – приведенная к скорости v_{19} площадь питателей (учитывает работу обоих питателей). А $v_{\text{ст}} = v_{19} S_{\text{II}(19)} / S_{\text{ст}}$. Анало-

гично записываем: $Q = (v_{18} + v_{19})S_{\Pi} = \left(v_{18} + \frac{v_{18}}{v_{18/19}}\right)S_{\Pi} = v_{18}\left(1 + \frac{1}{v_{18/19}}\right)S_{\Pi} = v_{18}S_{\text{np}(18)}$, где $S_{\text{np}(18)} = \left(1 + \frac{1}{v_{18/19}}\right)S_{\Pi}$ – приведенная к скорости v_{18} площадь питателей (учитывает работу обоих питателей). И $v_{\text{CT}} = v_{18}S_{\text{np}(18)} / S_{\text{CT}}$.

Имеем также

$$Q = v_{\text{CT}}S_{\text{CT}} = (v_5 + v_{16})S_{\text{K}} = \left(v_5 + \frac{v_5}{y}\right)S_{\text{K}} = v_5\left(1 + \frac{1}{y}\right)S_{\text{K}},$$

$$v_5 = v_{\text{CT}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{\text{CT}}}{S_{\text{K}}} = v_{18} \frac{S_{\text{np}(18)}}{S_{\text{CT}}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{\text{CT}}}{S_{\text{K}}} = v_{18} \frac{y}{1+y} \frac{S_{\text{np}(18)}}{S_{\text{K}}}.$$

Теперь выражение (17) можно записать следующим образом:

$$H = \alpha \frac{v_{18}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{\text{CT}} + \lambda \frac{l_{\text{CT}}}{d_{\text{CT}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(18)}}{S_{\text{CT}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{CT-II}(5-7)}}{d_{\text{K}}} \right) \left(\frac{yS_{\text{np}(18)}}{(1+y)S_{\text{K}}} \right)^2 + \zeta_{18} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} + 1 \right].$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением «1») – это коэффициент сопротивления системы от сечения 1–1 до сечения 18–18:

$$\zeta_{1-18(18)} = \left(\zeta_{\text{CT}} + \lambda \frac{l_{\text{CT}}}{d_{\text{CT}}} \right) \left(\frac{S_{\text{np}(18)}}{S_{\text{CT}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{CT-II}}}{d_{\text{K}}} \right) \left(\frac{yS_{\text{np}(18)}}{(1+y)S_{\text{K}}} \right)^2 + \zeta_{18} + \lambda \frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}}. \quad (20)$$

Принимаем (произвольно): $x = v_8 / v_7 = 0,4$, $y = v_5 / v_{16} = 1,6$, $v_{18/19} = 1$. При $x = 0,4$ $\zeta_8 = 0,9$, $\zeta_{18} = 0,429714$, см. формулы (15) и (16). Для $y = 1,6$ по формуле (7) находим, что $\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} = 2,018579$, а $\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} = 2,827562$. Результаты расчетов по (20), (2)–(4): $\zeta_{1-18(18)} = 1,178541$, $\mu_{1-18(18)} = 0,677512$, $v_{18} = 1,723946$ м/с, $Q_{18} = 110,405056 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Для питателя III (линия 1–16–19) очевидны следующие соотношения:

$$Q = v_{\text{CT}}S_{\text{CT}} = v_5S_{\text{K}} + v_{16}S_{\text{K}} = (v_5 + v_{16})S_{\text{K}} = (yv_{16} + v_{16})S_{\text{K}} = v_{16}(y + 1)S_{\text{K}},$$

$$v_{16} = v_9 = v_{\text{CT}} \frac{1}{1+y} \frac{S_{\text{CT}}}{S_{\text{K}}} = v_{19} \frac{S_{\text{np}(19)}}{S_{\text{CT}}} \frac{1}{1+y} \frac{S_{\text{CT}}}{S_{\text{K}}} = v_{19} \frac{1}{1+y} \frac{S_{\text{np}(19)}}{S_{\text{K}}}.$$

И выражение (18) будет выглядеть так:

$$H = \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нр}(19)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нр}(19)}}{(1+y)S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right].$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением «1») – это коэффициент сопротивления системы от сечения I-I до сечения 19-19 (для линии 1-16-9):

$$\zeta_{1-19(19)} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нр}(19)}}{S_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} \right) \left(\frac{S_{\text{нр}(19)}}{(1+y)S_{\text{к}}} \right)^2 + \zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}. \quad (21)$$

Находим по (21), (2)-(4): $\zeta_{1-19(19)} = 0,971933$, $\mu_{1-19(19)} = 0,712121$, $v_{19} = 1,812009$ м/с, $Q_{19} = 116,044835 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Расход в системе $Q = Q_{18} + Q_{19} = 222,582933 \cdot 10^{-6}$ м³/с. $v_{\text{ст}} = Q/S_{\text{ст}} = 0,488753$ м/с.

$$Q_5 = Q \frac{y}{1+y} = 136,974112 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad v_5 = Q_5/S_{\text{к}} = 0,678706 \text{ м/с}.$$

$$Q_{16} = \frac{Q}{1+y} = 85,608820 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad v_{16} = Q_{16}/S_{\text{ст}} = 0,424191 \text{ м/с}.$$

Значения отношений $x = v_8/v_7 = 0,4$, $y = v_5/v_{16} = 1,6$ и $v_{18/19} = 1$ были взяты произвольно. Предположим, что в результате расчетов $y = 1,6$ и $v_{18/19} = 1$ не изменились. Найдем x . Расход $Q_8 = Q_5 - Q_{18} = 26,569057 \cdot 10^{-6}$ м³/с, а скорость $v_8 = Q_8/S_{\text{к}} = 26,569057/201,816620 = 0,131649$ м/с. Отношение $x = 0,193971$. А мы задавались $x = 0,4$.

В системе должно быть следующее равенство: $p_9 = p_8$. Проверим это соотношение. Составим УБ для сечений I-I и 8-8:

$$H + \frac{p_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-II}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g} + \frac{p_8}{\gamma}. \quad (22)$$

Заметим, что $p_8 \neq p_a$, а $v_5 = v_6 = v_7$. Запишем (22) как

$$H_8 = \frac{P_8 - P_a}{\gamma} = H - \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} - \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-II}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} - \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g}. \quad (23)$$

Подсчитаем по формуле (15) ζ_8 для отношения $x = 0,193971$: $\zeta_8 = 6,906939$. Все величины в выражениях (23) известны. Находим, что $H_8 = 0,256159$ м.

Составим УБ для сечений 1-1 и 9-9 (линия 1-16-9):

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \frac{P_9}{\gamma}. \quad (24)$$

$p_9 \neq p_a$, $v_9 = v_{16}$. Выражение (24) запишем как

$$H_9 = \frac{P_9 - P_a}{\gamma} = H - \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_4^2}{2g} - \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g}. \quad (25)$$

Все величины в формуле (25) известны, и $H_9 = 0,272746$ м.

Напор H_9 в сечении 9-9 больше напора H_8 в сечении 8-8 на 0,016587 м. Это может быть лишь при течении жидкости из сечения 8-8 в сечение 9-9, что в данной ЛС с одним стояком и двумя питателями невозможно.

Задаемся следующими величинами: $x = 0,193971$, $y = 1,6$ и $v_{18/19} = 1$. Получаем $H_9 - H_8 = 0,017096$ м, при этом $x = 0,180700$, $v_{18/19} = 1,016880$.

При $x = 0,193971$, $y = 1,4$ и $v_{18/19} = 1$ находим, что $H_9 - H_8 = -0,004429$ м. По расчету $x = 0,135945$, $v_{18/19} = 1,016260$.

Если $x = 0,193971$, $y = 1,4$ и $v_{18/19} = 1,016260$, то $H_9 - H_8 = -0,004412$ м – напор в сечении 8-8 больше напора в сечении 9-9. А $x = 0,134063$, $v_{18/19} = 1,020732$.

Действуя таким образом, получаем, что при $x = 0,13910590$, $y = 1,43712931$ и $v_{18/19} = 1,03108789$ $H_9 - H_8 = -2,2 \cdot 10^{-9}$ м. При этом по расчету $x = 0,13910596$, $v_{18/19} = 1,03108792$.

По-видимому, разность $H_9 - H_8$ можно привести к любой наперед заданной бесконечно малой величине, хотя в системе неизвестных больше, чем уравнений. Понятно, что разность напоров в 10^{-9} м бессмысленна. Нужно было убедиться в работоспособности предлагаемой методики расчета ЛС.

Результаты расчетов: $\zeta_{1-18(18)} = 0,979963$, $\mu_{1-18(18)} = 0,710676$, $v_{18} = 1,808331$ м/с, $Q_{18} = 115,809266$ см³/с, $\zeta_{1-19(19)} = 1,104982$, $\mu_{1-19(19)} = 0,689248$, $v_{19} = 1,753809$ м/с, $Q_{19} = 112,317548$ см³/с, $Q_5 = 134,522091$ см³/с, $Q_{16} = 93,604723$ см³/с, $Q_8 = 18,712825$ см³/с, $Q = 228,126814$ см³/с.

При работе питателей I–III (в кольце) в питатель II поступает жидкость из сечений 7–7 и 8–8, в питатель I – только из сечения 6–6, причем не вся, а в питатель III – из сечения 9–9 (также не вся). А нулевая точка будет находиться, по-видимому, в точке *B* (рис. 4).

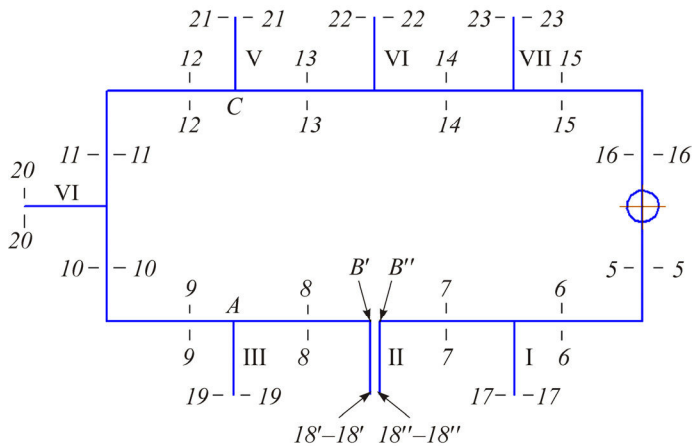


Рис. 4. Схема для расчета при работе питателей I, II и III

Составим УБ для сечений 1–1 и 17–17:

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{сг}} + \lambda \frac{l_{\text{сг}}}{d_{\text{сг}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{сг}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{сг}-1}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_{17} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}, \quad (26)$$

для сечений 1–1 и 18–18

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{сг}} + \lambda \frac{l_{\text{сг}}}{d_{\text{сг}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{сг}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{сг}-1}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_{\text{п}} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{18}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}, \quad (27)$$

и для сечений 1-1 и 19-19 (для пути через сечения 2-2, ..., 16-16, ..., 13-13, ..., 9-9)

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{ср}} + \lambda \frac{l_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ср-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_{16}^2}{2g} + \left(\zeta_{19} + \lambda \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma}. \quad (28)$$

Обозначим: $v_{17/19} = v_{17}/v_{19}$, $v_{18/19} = v_{18}/v_{19}$. Тогда $v_{17} = v_{17/19}v_{19}$, $v_{18} = v_{18/19}v_{19}$, $v_{19} = v_{17}/v_{17/19}$, $v_{19} = v_{18}/v_{18/19}$, $v_{17} = v_{17/19}v_{19} = v_{17/19}v_{18}/v_{18/19} = v_{18} \frac{v_{17/19}}{v_{18/19}}$, $v_{18} = v_{18/19}v_{19} = v_{18/19}v_{17}/v_{17/19} = v_{17} \frac{v_{18/19}}{v_{17/19}}$.

Введем следующие обозначения: $v_{7/6} = Q_7/Q_6 = v_7S_{\text{к}}/v_6S_{\text{к}} = v_7/v_6$, $v_{8/9} = Q_8/Q_9 = v_8S_{\text{к}}/v_9S_{\text{к}} = v_8/v_9$, $y = Q_5/Q_{16} = v_5S_{\text{к}}/v_{16}S_{\text{к}} = v_5/v_{16}$. А $v_6 = v_7/v_{7/6}$, $v_9 = v_8/v_{8/9}$, $v_{16} = v_5/y$, $v_5 = v_6$, $v_9 = v_{10} = \dots = v_{15} = v_{16}$.

Предположим, что $v_5 = 1,6v_{16}$ – понятно, что $v_5 > v_{16}$. Расход в системе $Q = v_{\text{ср}}S_{\text{ср}} = v_5S_{\text{к}} + v_{16}S_{\text{к}} = 1,6v_{16}S_{\text{к}} + v_{16}S_{\text{к}} = 2,6v_{16}S_{\text{к}}$. А отношение $v_{16}/v_{\text{ср}} = S_{\text{ср}}/2,6S_{\text{к}} = 0,867906$. Подсчитываем по формуле (7): $\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} = 2,827562$.

$v_5 = 1,6v_{16}$, а $v_{16} = 0,625v_5$. Расход в системе $Q = v_{\text{ср}}S_{\text{ср}} = (v_5 + v_{16})S_{\text{к}} = (v_5 + 0,625v_5)S_{\text{к}} = 1,625v_5S_{\text{к}}$. А отношение $v_5/v_{\text{ср}} = S_{\text{ср}}/1,625S_{\text{к}} = 1,388649$. Коэффициент $\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} = 2,018580$.

Примем $v_{7/6} = 0,4$. Тогда $\zeta_7 = 0,9$ – по соотношению (15). $v_{17}S_{\text{п}} = (1 - v_{7/6})v_6S_{\text{к}}$, $v_{17}/v_6 = (1 - v_{7/6})S_{\text{к}}/S_{\text{п}} = 1,890788$, $\zeta_{17} = 0,429714$ – по зависимости (16).

Аналогично при $v_{8/9} = 0,4$ $\zeta_8 = 0,9$, а $\zeta_{19} = 0,429714$.

Расход жидкости в системе

$$Q = v_{\text{ср}}S_{\text{ср}} = (v_{17} + v_{18} + v_{19})S_{\text{п}} = \left(v_{17} + v_{17} \frac{v_{18/19}}{v_{17/19}} + \frac{v_{17}}{v_{17/19}} \right) S_{\text{п}} = v_{17} \left(1 + \frac{v_{18/19}}{v_{17/19}} + \frac{1}{v_{17/19}} \right) S_{\text{п}} = v_{17}S_{\text{сп}(17)},$$

где $S_{\text{сп}(17)}$ – приведенная к скорости v_{17} площадь питателей (учитывает работу всех трех питателей), $S_{\text{сп}(17)} = (1 + v_{18/19}/v_{17/19} + 1/v_{17/19})S_{\text{п}}$. А $v_{\text{ср}} = v_{17}S_{\text{сп}(17)}/S_{\text{ср}}$.

Также

$$Q = v_{cr} S_{cr} = (v_5 + v_{16}) S_k = \left(v_5 + \frac{v_5}{y} \right) S_k = v_5 \left(1 + \frac{1}{y} \right) S_k,$$

$$v_5 = v_6 = v_{cr} \frac{y}{1+y} \frac{S_{cr}}{S_k} = v_{17} \frac{S_{np(17)}}{S_{cr}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{cr}}{S_k} = v_{17} \frac{y}{1+y} \frac{S_{np(17)}}{S_k}.$$

Скорость

$$v_7 = v_{7/6} v_6 = v_{7/6} v_5 = v_{7/6} v_{cr} \frac{y}{1+y} \frac{S_{cr}}{S_k} = v_{7/6} v_{17} \frac{S_{np(17)}}{S_{cr}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{cr}}{S_k} = v_{17} v_{7/6} \frac{y}{1+y} \frac{S_{np(17)}}{S_k}.$$

И соотношение (26) будет выглядеть следующим образом:

$$H = \alpha \frac{v_{17}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{cr} + \lambda \frac{l_{cr}}{d_{cr}} \right) \left(\frac{S_{np(17)}}{S_{cr}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^d + \zeta + \lambda \frac{l_{cr-1}}{d_k} \right) \left(\frac{y S_{np(17)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \right. \\ \left. + \zeta_{17} + \lambda l_n / d_n + 1 \right].$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением 1) – это коэффициент сопротивления системы от сечения 1-1 до сечения 17-17 (для линии 1-5-17):

$$\zeta_{1-17(17)} = \left(\zeta_{cr} + \lambda \frac{l_{cr}}{d_{cr}} \right) \left(\frac{S_{np(17)}}{S_{cr}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^d + \zeta + \lambda \frac{l_{cr-1}}{d_k} \right) \left(\frac{y S_{np(17)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \\ + \zeta_{17} + \lambda l_n / d_n. \quad (29)$$

По выражениям (29), (2)–(4) находим: $\zeta_{1-17(17)} = 1,832576$, $\mu_{1-17(17)} = 0,594168$, $v_{17} = 1,511874$ м/с, $Q_{17} = 96,823562 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Рассчитаем истечение жидкости из питателя II. Расход жидкости в системе

$$Q = v_{cr} S_{cr} = (v_{17} + v_{18} + v_{19}) S_{II} = \\ = \left(v_{18} \frac{v_{17/19}}{v_{18/19}} + v_{18} + \frac{v_{18}}{v_{18/19}} \right) S_{II} = v_{18} \left(\frac{v_{17/19}}{v_{18/19}} + 1 + \frac{1}{v_{18/19}} \right) S_{II} = v_{18} S_{np(18)},$$

где $S_{np(18)}$ – приведенная – к скорости v_{18} – площадь питателей (учитывает работу всех трех питателей), $S_{np(18)} = (v_{17/19} / v_{18/19} + 1 + 1 / v_{18/19}) S_{II}$.

А $v_{cr} = v_{18} S_{np(18)} / S_{cr}$. Имеем также $Q = v_{cr} S_{cr} = (v_5 + v_{16}) S_k = \left(v_5 + \frac{v_5}{y} \right) S_k =$

$$= v_5 \left(1 + \frac{1}{y} \right) S_k, \quad v_5 = v_6 = v_{ct} \frac{y}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} = v_{18} \frac{S_{np(18)}}{S_{ct}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} = v_{18} \frac{y}{1+y} \frac{S_{np(18)}}{S_k}.$$

Скорость $v_7 = v_{7/6} v_6 = v_{7/6} v_5 = v_{7/6} v_4 \frac{y}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} = v_{7/6} v_{18} \frac{S_{np(18)}}{S_{ct}} \frac{y}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} =$
 $= v_{18} v_{7/6} \frac{y}{1+y} \frac{S_{np(18)}}{S_k}$. И зависимость (27) будет выглядеть следующим образом:

$$H = \alpha \frac{v_{18}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{ct} + \lambda \frac{l_{ct}}{d_{ct}} \right) \left(\frac{S_{np(18)}}{S_{ct}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^d + \zeta + \lambda \frac{l_{ct-l}}{d_k} \right) \left(\frac{y S_{np(18)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{v_{7/6} y S_{np(18)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \zeta_{п} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}} + 1 \right].$$

В квадратных скобках (за исключением 1) записан коэффициент сопротивления системы от сечения 1-1 до сечения 18-18:

$$\zeta_{1-18(18)} = \left(\zeta_{ct} + \lambda \frac{l_{ct}}{d_{ct}} \right) \left(\frac{S_{np(18)}}{S_{ct}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-5(5)}^d + \zeta + \lambda \frac{l_{ct-l}}{d_k} \right) \left(\frac{y S_{np(18)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \\ + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_k} \right) \left(\frac{v_{7/6} y S_{np(18)}}{(1+y) S_k} \right)^2 + \zeta_{п} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}}. \quad (30)$$

Результаты расчетов по (30), (2)-(4): $\zeta_{1-18(18)} = 1,798513$, $\mu_{1-18(18)} = 0,597773$, $v_{18} = 1,521048$ м/с, $Q_{18} = 97,411043 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Рассчитаем истечение жидкости из питателя III. Расход жидкости в системе

$$Q = v_{ct} S_{ct} = (v_{17} + v_{18} + v_{19}) S_{п} = (v_{17/19} v_{19} + v_{18/19} v_{19} + v_{19}) S_{п} = \\ = v_{19} (v_{17/19} + v_{18/19} + 1) S_{п} = v_{19} S_{np(19)},$$

где $S_{np(19)}$ – приведенная к скорости v_{19} площадь питателей (учитывает работу всех трех питателей), $S_{np(19)} = (v_{17/19} + v_{18/19} + 1) S_{п}$. А $v_{ct} = v_{19} S_{np(19)} / S_{ct}$.

$$Q = v_{ct} S_{ct} = (v_5 + v_{16}) S_k = (y v_{16} + v_{16}) S_k = v_{16} (y + 1) S_k,$$

$$v_{16} = v_9 = v_{ct} \frac{1}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} = v_{19} \frac{S_{np(19)}}{S_{ct}} \frac{1}{1+y} \frac{S_{ct}}{S_k} = v_{19} \frac{1}{1+y} \frac{S_{np(19)}}{S_k}. \quad \text{И выражение (28)}$$

запишется следующим образом:

$$H = \alpha \frac{v_{19}^2}{2g} \left[\left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_{np(19)}}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-16(16)}^д + 3\zeta + \lambda \frac{l_{ст-III(16-9)}}{d_{к}} \right) \left(\frac{S_{np(19)}}{(1+y)S_{к}} \right)^2 + \zeta_{19} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}} + 1 \right].$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением 1) – это коэффициент сопротивления системы от сечения 1–1 до сечения 19–19 (для линии 1–16–19):

$$\zeta_{1-19(19)} = \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_{np(19)}}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta_{4-16(16)}^д + 3\zeta + \lambda \frac{l_{ст-III(16-9)}}{d_{к}} \right) \left(\frac{S_{np(19)}}{(1+y)S_{к}} \right)^2 + \zeta_{19} + \lambda \frac{l_{п}}{d_{п}}. \quad (31)$$

По соотношениям (31), (2)–(4) находим: $\zeta_{1-19(19)} = 1,659\,498$.
 $\mu_{1-19(19)} = 0,613\,197$, $v_{19} = 1,560\,295$ м/с, $Q_{19} = 99,924\,513 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Расход в системе из трех питателей I, II и III $Q = Q_{17} + Q_{18} + Q_{19} = 294,159\,118 \cdot 10^{-6}$ м³/с, а скорость жидкости в стояке $v_{ст} = Q/S_{ст} = 0,645\,921$ м/с.

$$Q_5 = Q \frac{y}{1+y} = 181,020\,995 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad v_5 = Q_5/S_{к} = 0,896\,958 \text{ м/с}.$$

$$Q_{16} = \frac{Q}{1+y} = 113,138\,122 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad v_{16} = Q_{16}/S_{ст} = 0,560\,599 \text{ м/с}.$$

Значения отношений $v_7/v_6 = 0,4$, $v_8/v_9 = 0,4$, $y = 1,6$, $v_{17/19} = 1$ и $v_{18/19} = 1$ были взяты произвольно. Предположим, что в результате расчетов $y = 1,6$, $v_{17/19} = 1$ и $v_{18/19} = 1$ не изменились. Найдём v_7/v_6 и v_8/v_9 . Расход $Q_7 = Q_5 - Q_{18} = 84,197\,434 \cdot 10^{-6}$ м³/с, а скорость $v_7 = Q_7/S_{к} = 0,417\,198$ м/с. Отношение $v_7/v_6 = v_7/v_5 = 0,465\,125$. А мы задавались $v_7/v_6 = 0,4$.

Расход $Q_8 = Q_{16} - Q_{19} = 13,213\,610 \cdot 10^{-6}$ м³/с, а скорость $v_8 = Q_8/S_{к} = 0,065\,473$ м/с. Отношение $v_8/v_9 = v_8/v_{16} = 0,116\,792$. Задавались $v_8/v_9 = 0,4$.

В системе должно быть следующее равенство: $p_7 = p_8$. Проверим это соотношение. Составим УБ для сечений 1–1 и 7–7 (линия 1–5–7):

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-1}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \frac{P_7}{\gamma}. \quad (32)$$

Заметим, что $p_7 \neq p_a$. Запишем (32) следующим образом:

$$H_7 = \frac{P_7 - P_a}{\gamma} = H - \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} - \left(\zeta_{4-5(5)}^{\text{д}} + \zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-1}}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} - \left(\zeta_7 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g}. \quad (33)$$

Подсчитаем ζ_7 для отношения $v_7/v_6 = 0,465125$: $\zeta_7 = 0,528962$. Для отношения $v_8/v_9 = 0,116792$ $\zeta_8 = 22,874931$. Все величины в (33) известны, и $H_7 = 0,183147$ м.

Составим УБ для сечений 1-1 и 8-8 (линия 1-16-8):

$$H + \frac{P_a}{\gamma} = \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} + \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g} + \frac{P_8}{\gamma}.$$

Это выражение представим в следующем виде:

$$H_8 = \frac{P_8 - P_a}{\gamma} = H - \left(\zeta_{\text{ст}} + \lambda \frac{l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} \right) \alpha \frac{v_{\text{ст}}^2}{2g} - \left(\zeta_{4-16(16)}^{\text{д}} + 3\zeta + \lambda \frac{l_{\text{ст-III}(16-9)}}{d_{\text{к}}} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} - \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l}{d_{\text{к}}} + 1 \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g}.$$

Находим, что $H_8 = 0,217195$ м.

Напор H_8 в сечении 8-8 больше напора H_7 в сечении 7-7 на 0,034048 м (по расчету). В данной ЛС с одним стояком при подводе жидкости к питателю II с двух сторон это невозможно.

Задаемся следующими величинами: $v_7/v_6 = 0,46512523$, $v_8/v_9 = 0,11679184$, $y = v_5/v_{16} = 1,6$, $v_{17/19} = 1$ и $v_{18/19} = 1$. Получаем $H_8 - H_7 = 0,034643$ м, при этом $v_7/v_6 = 0,47511350$, $v_8/v_9 = 0,09633600$, $v_{17/19} = 0,92934808$, $v_{18/19} = 0,94782750$, $Q = Q_{17} + Q_{18} + Q_{19} = 296,004881 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Следующие приближения: $v_7/v_6 = 0,475\,113\,50$, $v_8/v_9 = 0,096\,336\,00$,
 $y = v_5/v_{16} = 1,4$, $v_{17/19} = 0,929\,348\,08$, $v_{18/19} = 0,947\,827\,50$. Имеем $H_8 - H_7 =$
 $= -0,000\,284\,88$ м, а $v_7/v_6 = 0,446\,658\,67$, $v_8/v_9 = 0,174\,298\,88$, $v_{17/19} =$
 $= 0,938\,206\,14$, $v_{18/19} = 0,968\,414\,61$, $Q = Q_{17} + Q_{18} + Q_{19} = 296,818\,819 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Действуя таким образом, получаем, что при $v_7/v_6 = 0,440\,432$,
 $v_8/v_9 = 0,1887$, $y = 1,402\,032\,31$, $v_{17/19} = 0,966\,83$ и $v_{18/19} = 0,993\,38$ $H_8 - H_7 =$
 $= 2,09 \cdot 10^{-10}$ м. В этом случае $v_7/v_6 = 0,440\,432\,219\,1$, $v_8/v_9 = 0,188\,575\,477\,9$,
 $v_{17/19} = 0,966\,857\,93$, $v_{18/19} = 0,993\,407\,92$.

Результаты расчетов:

$$\zeta_{1-17(17)} = 1,823\,553, \quad \mu_{1-17(17)} = 0,595\,117,$$

$$v_{17} = 1,514\,288 \text{ м/с}, \quad Q_{17} = 96,978\,148 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\zeta_{1-18(18)} = 1,674\,644, \quad \mu_{1-18(18)} = 0,611\,459,$$

$$v_{18} = 1,555\,871 \text{ м/с}, \quad Q_{18} = 99,641\,176 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\zeta_{1-19(19)} = 1,639\,498, \quad \mu_{1-19(19)} = 0,615\,516,$$

$$v_{19} = 1,566\,195 \text{ м/с}, \quad Q_{19} = 100,302\,376 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q = Q_{17} + Q_{18} + Q_{19} = 296,921\,700 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad Q_5 = 173,309\,000 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{16} = 123,612\,700 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}, \quad Q_7 = 76,330\,852 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_8 = 23,310\,324 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Поступая аналогичным образом, находим характеристики ЛС при разном количестве работающих питателей (табл. 3). По-видимому, разность давлений с противоположных сторон питателя, являющегося нулевым, можно привести к любой наперед заданной бесконечно малой величине.

Как следует из табл. 1–3, отличие опытных данных от расчетных невелико (максимум 2,5 % по расходу в ЛС и 5,5 % по расходу в питателе) и даже ставит под сомнение результаты работы (это отмечалось и при исследовании ЛС, перечисленных в начале статьи). Но ошибок ни в расчетах, ни в постановке экспериментов, ни в обработке опытных данных не было найдено.

Таким образом, даже на такой сложной ЛС, как кольцевая, уравнение Бернулли не дает сбоев и вполне согласуется с опытными данными. По-видимому, УБ можно использовать при расчетах систем с переменным расходом. По крайней мере, для ЛС это доказано экспериментально. Впечатляет ЛС из питателей I–III, когда по линии 16–13–9 нет раздачи потока, и он целиком подходит к питателям III и II, а точка водораздела находится в точке В.

Таблица 3

Характеристики ЛС при работе нескольких питателей

Работающие питатели	Характеристики системы							
	$\zeta_{1-19(19)}$	$\mu_{1-19(19)}$	$\frac{v_{19}}{v_{19}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{v_{18}}{v_{18}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{v_{17}}{v_{17}^{\text{эксп}}}$, м/с	$\frac{Q_{19}}{Q_{19}^{\text{эксп}}}$, см ³ /с	$\frac{Q}{Q^{\text{эксп}}}$, см ³ /с	Q, %
II, III*	1,530	0,629	$\frac{1,600}{1,626}$	$\frac{1,514}{1,547}$		$\frac{102,46}{104,13}$	$\frac{199,36}{203,21}$	-1,89
II, III	1,105	0,689	$\frac{1,754}{1,770}$	$\frac{1,808}{1,752}$		$\frac{112,32}{113,35}$	$\frac{228,13}{225,56}$	+1,14
I-III*	2,470	0,537	$\frac{1,366}{1,374}$	$\frac{1,292}{1,319}$	$\frac{1,128}{1,166}$	$\frac{87,48}{87,99}$	$\frac{242,42}{247,10}$	-1,89
I-III	1,639	0,616	$\frac{1,566}{1,525}$	$\frac{1,556}{1,558}$	$\frac{1,514}{1,455}$	$\frac{100,30}{97,66}$	$\frac{296,92}{290,62}$	+2,17
I-III, VII**	2,365	0,545	$\frac{1,387}{1,390}$	$\frac{1,432}{1,362}$	$\frac{1,301}{1,270}$	$\frac{88,83}{88,99}$	$\frac{358,08}{349,29}$	+2,52
I-III, V, VI***	3,031	0,498	$\frac{1,267}{1,256}$	$\frac{1,259}{1,209}$	$\frac{1,119}{1,098}$	$\frac{81,16}{80,42}$	$\frac{390,23}{384,96}$	+1,35
I-VII****	4,775	0,416	$\frac{1,059}{1,004}$	$\frac{0,945}{0,954}$	$\frac{0,811}{0,830}$	$\frac{67,81}{64,31}$	$\frac{427,68}{422,62}$	+1,20

Примечания. * Гидравлическая система разомкнута в сечении 16–16.

** $v_{23} = 1,471$ м/с, $v_{23}^{\text{эксп}} = 1,433$ м/с.

*** $v_{21} = 1,291$ м/с, $v_{21}^{\text{эксп}} = 1,277$ м/с, $v_{22} = 1,157$ м/с, $v_{22}^{\text{эксп}} = 1,171$ м/с.

**** $\zeta_{1-20(20)} = 4,904$, $\mu_{1-20(20)} = 0,412$, $v_{20} = 1,047$ м/с, $v_{20}^{\text{эксп}} = 1,024$ м/с.

Как видно, по предлагаемой схеме можно решать систему, когда число неизвестных превышает число уравнений, т.е. УБ «перемалывает» все таким образом, что разность давлений справа и слева около нулевой точки стремится к нулю только при определенных значениях других величин. Попытки сделать его равным нулю только за счет какого-то одного фактора предпринимались, однако остальные факторы – заданные в начале и получившиеся в результате расчета – становились неприемлемо разными. Нужно менять все влияющие на работу ЛС факторы.

Здесь потребовалось рассчитывать приведенные площади всех питателей, например $S_{\text{пр}(17)}$, $S_{\text{пр}(18)}$ и $S_{\text{пр}(19)}$ при работе питателей I–III. В исследованных ранее ЛС [1–8] можно было находить приведенную площадь питателей только для скорости жидкости в одном из питателей.

Удивительно, но вначале произвольно задаемся множеством неизвестных величин, казалось бы, не связанных друг с другом (для питателей I–III это v_{17}/v_{19} , v_{18}/v_{19} , v_5/v_{16} , v_7/v_6 , v_8/v_9). А получение заданной величины разности $H_8 - H_7$ при регулировании перечисленных величин ведет к решению системы уравнений, описывающих работу данной ЛС. Причем экспериментально процесс истечения жидкости устанавливается очень быстро, за 3–5 с, даже при резком «перекосе» в системе, когда работают, например, питатели I–III и VII, т.е. питатели «знают» свою скорость истечения жидкости. По-видимому, здесь происходит нечто такое, что еще предстоит понять.

Таким образом, впервые теоретически и экспериментально исследована кольцевая литниковая система. Получено хорошее соответствие расчетных и опытных данных. Для теоретического исследования таких систем создана и зарегистрирована в государственном реестре программа для ЭВМ [15].

Список литературы

1. Васенин В.И. Расчет расхода металла в литниковой системе // Литейное производство. – 2004. – № 12 (прил.). – С. 6–10.
2. Васенин В.И. Исследование L-образной литниковой системы // Литейное производство. – 2011. – № 8. – С. 32–35.
3. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование L-образной и комбинированной литниковых систем // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 85–102.
4. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование L-образной литниковой системы // Master's Journal. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 1. – С. 5–22.
5. Васенин В.И. Расчет расхода металла в разветвленной литниковой системе // Литейное производство. – 2007. – № 4. – С. 5–8.
6. Васенин В.И., Щелконогов М.Ю. Исследование разветвленной литниковой системы // Литейное производство. – 2010. – № 8. – С. 17–20.
7. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование разветвленной литниковой системы // Master's Journal. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 1. – С. 58–75. – URL: <http://vestnik.pstu.ru/mj/about/inf/>.
8. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование комбинированной литниковой системы // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 77–81.
9. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Стенд для исследования литниковых систем. Патент на полезную модель № 114894 от 5.12.2011 // Изобретения. Полезные модели. – 2012. – № 11.

10. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: Бастет, 2008. – 672 с.
11. Токарев Ж.В. К вопросу о гидравлическом сопротивлении отдельных элементов незамкнутых литниковых систем // Улучшение технологии изготовления отливок: сб. тр. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1966. – С. 32–40.
12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
13. Исследование местных сопротивлений литниковой системы / В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 46–53.
14. Меерович И.Г., Мучник Г.Ф. Гидродинамика коллекторных систем. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
15. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Расчет кольцевой литниковой системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615883 от 27.06.2012 // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – 2012. – № 3. – С. 128.

Получено 15.02.2013

Васенин Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, МТФ, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru.

Анисимов Денис Константинович – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТЛП-12м, e-mail: detali@pstu.ru.

Богомягков Алексей Васильевич – аспирант, ПНИПУ, МТФ, e-mail: detali@pstu.ru.

Шаров Константин Владимирович – аспирант, ПНИПУ, МТФ, e-mail: detali@pstu.ru.