УДК 621.746.628.4

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

© 2013 В.И. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 1212.03.2013

Приведено описание лабораторной кольцевой литниковой системы. Изложены результаты теоретического и экспериментального определения скоростей и расходов жидкости в зависимости от количества одновременно работающих питателей. Получено хорошее совпадение расчётных и опытных данных.

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

В статье [1] была впервые рассчитана *L*-образная литниковая система (ЛС) с определением скорости жидкости в каждом питателе и расхода во всей системе. Затем были исследованы разветвленная [2], комбинированная [3], крестовинная и ярусная ЛС. Разница между расчетными и опытными значениями скоростей, расходов и напоров составляла несколько процентов. Это удивительно, так как использовали в расчетах уравнение Бернулли (УБ) для потока жидкости с переменным расходом (и массой). Хотя оно выведено для потока с постоянным расходом (массой) – при отсутствии раздачи жидкости по питателям, и его использование при расчетах ЛС с изменяющимся до нуля расходом жидкости в коллекторе (шлакоуловителе) в *теории не обосновано*. Поэтому представляется целесообразным рассчитать и экспериментально исследовать самую сложную ЛС – кольцевую.

Система (рис. 1) состоит из литниковой чаши, стояка, коллектора и семи одинаковых питателей I–VII [4]. Внутренний диаметр чаши равен 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).

Васенин Валерий Иванович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vaseninvaleriy@mail.ru)
Богомягков Алексей Васильевич, аспирант
Шаров Константин Владимирович, аспирант

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 ±0,005 м/с, не более. Расход жидкости из каждого питателя определялся не менее 6 раз.

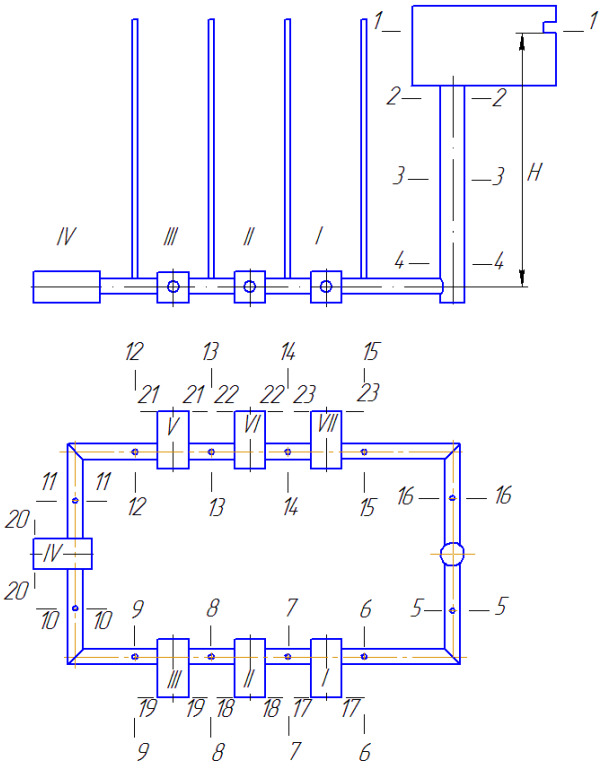

Рис. 1. Кольцевая литниковая система

Сначала рассчитаем истечение из питателя IV, когда гидравлическая цепь разомкнута в сечении *16–16*. Это *L*-образная ЛС. УБ для сечений *1–1* и *20–20* запишется так:

$$\frac{p_1}{\gamma} + H = \frac{p_{20}}{\gamma} + \alpha\frac{v_{20}^2}{2g} + h_{1-20}, \qquad (1)$$

где p_1 и p_{20} – давления в сечениях *1–1* и *20–20*, Н/м^2 (равны атмосферному давлению: $p_1=p_{20}=p_a$); γ – удельный вес жидкого металла, Н/м^3; α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса); принимаем α=1,1 [5]; g – ускорение свободного падения; g=9,81 м/с^2; v_{20} – скорость жидкости в сечении *20–20*, м/с; $h_{1\text{-}20}$ – потери напора при движении жидкости от сечения *1–1* до сечения *20–20*, м. Эти потери напора

$$h_{1-20}=\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)+\alpha\frac{v_5^2}{2g}\left(\zeta_к+\frac{l_{ст-IV}}{d_к}+2\zeta\right)+\alpha\frac{v_{20}^2}{2g}\left(\zeta_п+\lambda\frac{l_п}{d_п}\right), \qquad (2)$$

где $v_{ст}$ и v_5 – скорости жидкости в стояке и в коллекторе в сечении *5–5*, м/с; $v_5=v_6=\ldots v_{10}$; $\zeta_{ст}$, $\zeta_к$ и $\zeta_п$ – коэффициенты местных сопротивлений входа металла из чаши в стояк, поворота из стояка в коллектор и поворота из коллектора в питатель; λ – коэффициент потерь на трение; $l_{ст}$ – длина (высота) стояка, м; $l_{ст\text{-}IV}$ – расстояние от стояка до питателя IV, м; $l_п$ – длина питателя, м; $d_{ст}$, $d_к$ и $d_п$ – гидравлические диаметры стояка, коллектора и питателя, м; ζ – коэффициент местного сопротивления поворота на 90º из сечения *5–5* в сечение *6–6* и из сечения *9–9* в сечение *10–10*. Расход жидкости в системе

$$Q=v_{ст}S_{ст}=v_5S_к=v_{20}S_п. \qquad (3)$$

Выразив скорости $v_{ст}$ и v_5 через v_{20}, получаем из (2)

$$\zeta_{1-20(20)}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\left(\frac{S_п}{S_{ст}}\right)^2+\left(\zeta_к+\lambda\frac{l_{ст-IV}}{d_к}+2\zeta\right)\left(\frac{S_п}{S_к}\right)^2+\zeta_п+\lambda\frac{l_п}{d_п}, \qquad (4)$$

где $\zeta_{1\text{-}20(20)}$ – коэффициент сопротивления ЛС от сечения *1–1* до сечения *20–20*, приведённый к скорости v_{20} в питателе IV. Коэффициент расхода системы от сечения *1–1* до сечения *20–20*, приведенный к скорости v_{20}

$$\mu_{1-20(20)}=\left(1+\zeta_{1-20(20)}\right)^{-1/2}. \qquad (5)$$

Скорость

$$v_{20}=\mu_{1-20(20)}\sqrt{2gH/\alpha}. \qquad (6)$$

Для данной ЛС: $d_{ст}$=0,02408 м, $l_{ст}$=0,2675 м, $d_к$=0,01603 м, $l_{ст\text{-}I}$=0,251 м, $l_{ст\text{-}II}$=0,370 м, $l_{ст\text{-}III}$=0,489 м, $l_{ст\text{-}IV}$=0,742 м, $d_п$=0,00903 м, $l_п$=0,0495 м. Значения коэффициентов: λ=0,03 [6], $\zeta_{ст}$=0,12 [7], $\zeta_к$=0,396 [8], ζ=0,885 [8], $\zeta_п$=0,334 [8]. Результаты расчетов по выражениям (3)-(6) приведены в табл. 1.

Когда питатель IV находится в кольце, то УБ будет в виде (1). Однако течение идет по параллельным коллекторам 5–8–10 и 16–13–11, потери напора в них не суммируются, а берется одна из них. Так как $v_{ст}=v_{20}S_п/S_{ст}$, а $v_5=v_{20}S_п/2S_к$, то (2) преобразуется к следующему виду:

$$\zeta_{1-20(20)}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\left(\frac{S_п}{S_{ст}}\right)^2+\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-IV}}{d_к}+2\zeta\right)\left(\frac{S_п}{2S_к}\right)^2+\zeta_п+\lambda\frac{l_п}{d_п}, \qquad (7)$$

где $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5(5)}$ – 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 [7]:

$$\zeta^{\partial}=\frac{1+1{,}5\left(v_{отд}/v\right)^2}{\left(v_{отд}/v\right)^2}, \qquad (8)$$

где v – скорость жидкости до деления потока, м/с; $v_{отд}$ – скорость жидкости в одном из каналов после деления потока, м/с. Чтобы найти $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5}$ (и равный ему $\zeta^{\partial}_{4\text{-}16}$), запишем очевидное равенство $v_{ст}S_{ст}=2v_5S_к=2v_{16}S_к$, из которого получается, что $v_5/v_{ст}=S_{ст}/2S_к$=1,128278 – это и есть отношение $v_{отд}/v$ в формуле (8). Тогда по (8) находим, что $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5}=\zeta^{\partial}_{4\text{-}16}$=2,285538. Результаты расчетов по соотношениям (7), (5), (6) и (3) – в табл. 1. Как видно, замыкание кольца привело к уменьшению коэффициента сопротивления $\zeta_{1\text{-}20(20)}$ с 0,865 до 0,644. Стало 2 потока жидкости, скорость в коллекторе упала в 2 раза, а потери напора в коллекторе на трение и в местных сопротивлениях уменьшились в 4 раза.

Таблица 1. Характеристики ЛС при работе одного питателя

Работающие питатели	Характеристики системы				
	ζ	μ	$v/v^{эксп}$, м/с	$Q/Q^{эксп}$ см³/с	Q_o^*, %
I**	0,684	0,771	1,961 / 1,932	125,59 / 123,75	+1,52
I	0,631	0,783	1,992 / 1,976	127,60 / 126,51	+0,86
II**	0,706	0,766	1,948 / 1,925	124,76 / 123,26	+1,22
II	0,634	0,782	1,991 / 1,995	127,48 / 125,19	+1,83
III**	0,729	0,761	1,935 / 1,904	123,95 / 121,97	+1,62
III	0,637	0,782	1,989 / 2,010	127,37 / 128,71	-1,04
IV**	0,865	0,732	1,863 / 1,822	119,31 / 116,66	+2,27
IV	0,644	0,780	1,984 / 2,024	127,07 / 129,63	-1,97

Примечание: * - $Q_0=(Q-Q^{эксп})/Q^{эксп}$; ** - гидравлическая система разомкнута в сечении *16–16*

Характеристики работы только питателя III в разомкнутой в сечении *16–16* гидравлической системе находим по соотношениям (3)–(6), заменив в (4) $l_{ст\text{-}IV}$ на $l_{ст\text{-}III}$, а 2ζ на ζ; см. табл. 1. 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. Поэтому давление p_8 в сечении *8–8* равно давлению p_9 в *9–9*, а перетекания жидкости из сечения *8–8* в сечение *9–9* или из 9–9 в *8–8* нет. УБ для сечений *4–4* и *19–19* (по пути через сечения *5–5*,...8–8)

$$\frac{p_4}{\gamma}+\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}=\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-III}}{d_к}+\zeta\right)\alpha\frac{v_5^2}{2g}+\left(\zeta_n+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right)\alpha\frac{v_{19}^2}{2g}+\frac{p_a}{\gamma}. \quad (9)$$

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

$$\frac{p_4}{\gamma}+\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}=\left(\zeta^{\partial}_{4-16(16)}+\lambda\frac{l_{ст-III\,(16-9)}}{d_к}+3\zeta\right)\alpha\frac{v_{16}^2}{2g}+\left(\zeta_n+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right)\alpha\frac{v_{19}^2}{2g}+\frac{p_a}{\gamma}. \quad (10)$$

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

$$v_5=v_{16}\sqrt{\frac{\zeta^{\partial}_{4-16(16)}+4{,}517134}{\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+1{,}800159}}. \quad (11)$$

Понятно, что $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5(5)}\neq\zeta^{\partial}_{4\text{-}16(16)}$; эти коэффициенты зависят – см. формулу (8) – от отношения скоростей $v_5/v_{ст}$ и $v_{16}/v_{ст}$, которые неизвестны. Предположим, что $v_5=1{,}1v_{16}$. Тогда $v_{ст}S_{ст}=(v_5+v_{16})S_к=(1{,}1v_{16}+v_{16})S_к=2{,}1v_{16}S_к$. Отсюда $v_{16}/v_{ст}=S_{ст}/2{,}1S_к$. По (8) находим: $\zeta^{\partial}_{4\text{-}16(16)}$-2,366058. Так как $v_5=1{,}1v_{16}$, то $v_{16}=0{,}909091v_5$. $v_{ст}S_{ст}=(v_5+v_{16})S_к=(v_5+0{,}090901v_5)S_к=1{,}909091v_5S_к$. И $v_5/v_{ст}=S_{ст}/1{,}909091S_к=1{,}182005$. По (8) определяем: $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5(5)}=2{,}215750$. Подставляем найденные значения $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5(5)}$ и $\zeta^{\partial}_{4\text{-}16(16)}$ 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 расчёт. После ряда приближений при заданном $v_5=1{,}350291v_{16}$ получаем по расчёту $v_5=1{,}3502911v_{16}$. Расчёт этого отношения можно закончить, так как разница между заданным и рассчитанным значениями v_5/v_{16} составляет всего 0,0000001. При этом $\zeta^{\partial}_{4\text{-}5(5)}=2{,}094972$, $\zeta^{\partial}_{4\text{-}16(16)}=2{,}584805$, а $v_{16}=0{,}740581v_5$, $v_{ст}=v_{19}S_n/S_{ст}$, $(v_5+v_{16})S_к=(v_5+0{,}740581v_5)S_к=1{,}740581v_5S_к=v_{19}S_n$. Или $v_5=v_{19}S_n/1{,}740581S_к$. Коэффициент сопротивления ЛС от сечения *1–1* до сечения *19–19*, приведённый к скорости v_{19} в питателе III [(см. зависимости (2), (7) и (9)]

$$\zeta_{1-19(19)}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\left(\frac{S_n}{S_{ст}}\right)^2+\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-III}}{d_к}+\zeta\right)\left(\frac{S_n}{1{,}740581S_к}\right)^2+\zeta_n+\lambda\frac{l_n}{d_n}. \quad (12)$$

Результаты расчетов по (12), (5), (6) и (3) приведены в табл. 1. Как видно, замыкание кольца привело к уменьшению коэффициента сопротивления $\zeta_{1\text{-}19(19)}$ с 0,729 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 $\zeta_{1\text{-}19(19)}$, рост $\mu_{1\text{-}19(19)}$, v_{19} и Q_{19} по сравнению со случаем, когда питатель III работал при разрыве кольца в сечении *16–16*.

Когда в гидравлически 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*, да и то 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. Потоки встречаются на входе в питатель III в точке *A* (рис. 2), которая называется *точкой водораздела или нулевой точкой* [5, с. 216-217]. Мысленно разрезаем наше кольцо по намеченной линии водораздела и получаем сеть, изображенную на рис. 2. Далее по обычным формулам подсчитываем потери напора для линии *1–16–13–9–19'* $h_{1\text{-}16\text{-}9\text{-}19'}$ и для линии *1–5–8–19''* $h_{1\text{-}5\text{-}8\text{-}19''}$. После этого сопоставляем между собой две найденные потери напора. Если $h_{1\text{-}16\text{-}9\text{-}19'}=h_{1\text{-}16\text{-}9\text{-}19''}$, то заключаем, что напоры в точках *A'* и *A''* будут одинаковыми, что и должно быть, поскольку точки *A'* и *A''* представляют собой физически одна точку *A*. 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 *B* – в точку входа жидкости в питатель II (см. рис. 2). При этом обращаемся ко 2-й, 3-й и последующим попыткам, 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*)

$$H+\frac{p_a}{\gamma}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}+\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-II}}{d_к}+\zeta\right)\alpha\frac{v_5^2}{2g}+\left(\zeta_{18}+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right)\alpha\frac{v_{18}^2}{2g}+\frac{p_a}{\gamma}, \quad (13)$$

и для сечений *1–1* и *19–19* (для пути через сечения *2–2*,… *16–16*,… *13–13*,… *9–9*)

$$H+\frac{p_a}{\gamma}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}+\left(\zeta^{\partial}_{4-16(16)}+\lambda\frac{l_{ст-III\,(16-9)}}{d_к}+3\zeta\right)\alpha\frac{v_{16}^2}{2g}+\left(\zeta_n+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right)\alpha\frac{v_{19}^2}{2g}+\frac{p_a}{\gamma}, \quad (14)$$

где ζ_{18} – коэффициент сопротивления на ответвление части потока из сечения *7–7* коллектора в питатель II с выходным сечением *18–18*. Потребуется также подсчитывать ζ_8 – коэффициент сопротивления на проход жидкости из сечения *7–7* в сечение *8–8* при ответвлении части потока из сечения *7–7* в питатель II. ζ_{18} находим по соотношению [9, с. 112-115]

$$\zeta_{отв}=\left[1+\tau\left(v_n/v_к\right)^2\right]/\left(v_n/v_к\right)^2, \quad (15)$$

а ζ_8 – по следующей зависимости

$$\zeta_{пр}=0{,}4\left(1-v_{пр}/v_к\right)^2/\left(v_{пр}/v_к\right)^2, \quad (16)$$

где $v_к$ и $v_{пр}$ – скорости металла в коллекторе до и после ответвления части потока в питатель, м/с; v_n – скорость жидкости в питателе, м/с; τ – коэффициент. Для нашего случая при $S_n/S_к$=0,317 τ=0,15. Коэффициент $\zeta_{пр}$ получается приведенным к скорости проходящего потока $v_{пр}$, а $\zeta_{отв}$ – к скорости в питателе v_n.

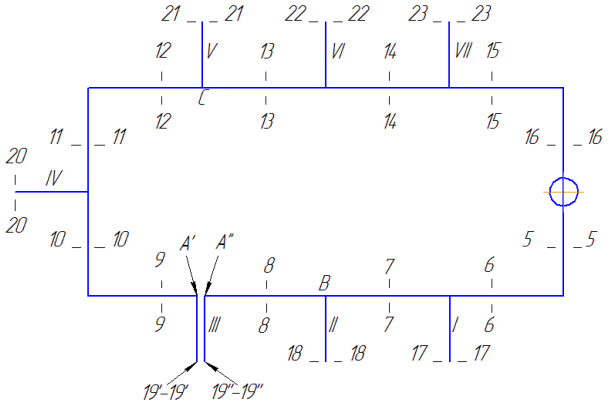

Рис. 2. Схема для расчета при работе питателей II и III

Запишем очевидные равенства:

$$Q=Q_{ст}=v_{ст}S_{ст}=Q_5+Q_{16}=v_5S_к+v_{16}S_к=$$
$$=Q_{18}+Q_{19}=v_{18}S_n+v_{19}S_n, \quad (17)$$
$$Q_8=v_8S_к=Q_7-Q_{18}=v_7S_к-v_{18}S_n,$$
$$Q_{19}=v_{19}S_n=Q_8+Q_9=v_8S_к+v_9S_к.$$

Как видно, у нас 3 уравнения – (13), (14), (17) – и 6 неизвестных величин скоростей $v_{ст}$, 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 тоже неизвестны, см. формулы (15) и (16). Казалось бы, задача не поддается решению. Поступим таким образом. Введём следующие обозначения: $v_{18/19}=v_{18}/v_{19}$, $x=v_8/v_7$, $y=v_5/v_{16}$. А $Q_8=xQ_7$, $v_7=v_8/x$, $Q_{16}=Q_5/y$, $v_{16}=v_5/y$, $v_5=v_6=v_7$, $v_9=v_{10}=\ldots=v_{15}=v_{16}$.
Расход жидкости в системе

$$Q=(v_{18}+v_{19})S_n=\left(v_{18}+\frac{v_{18}}{v_{18/19}}\right)S_n=v_{18}\left(1+\frac{1}{v_{18/19}}\right)S_n=v_{18}S_{пр(18)},$$

где $S_{пр(18)}=\left(1+\frac{1}{v_{18/19}}\right)S_n$ – приведенная (к скорости v_{18}) площадь питателей. И $v_{ст}=v_{18}S_{пр(18)}/S_{ст}$. Имеем также:

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

$$v_5=v_{ст}\frac{y}{1+y}\frac{S_{ст}}{S_к}=v_{18}\frac{y}{1+y}\frac{S_{пр(18)}}{S_к}.$$

Теперь выражение (13) можно записать так:

$$H=\alpha\frac{v_{18}^2}{2g}\left[\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\left(\frac{S_{пр(18)}}{S_{ст}}\right)^2+\left(\zeta^{д}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-II}}{d_к}+\zeta\right)\left(\frac{yS_{пр(18)}}{(1+y)S_к}\right)^2+\zeta_{18}+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right]. \quad (18)$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением “1”) – это коэффициент сопротивления системы от сечения *1–1* до сечения *18–18* $\zeta_{1\text{-}18(18)}$. Принимаем (произвольно): $x=v_8/v_7=0{,}4$, $y=v_5/v_{16}=1{,}6$, $v_{18/19}=1$. При $x=0{,}4$ $\zeta_8=0{,}9$, а $\zeta_{18}=0{,}429714$, см. формулы (15) и (16). Для $y=16$ по (8) находим, что $\zeta^{д}_{4\text{-}5(5)}=2{,}018579$, а $\zeta^{д}_{4\text{-}16(16)}=2{,}827562$. Результаты расчетов: $\zeta_{1\text{-}18(18)}=1{,}178541$, $\mu_{1\text{-}18(18)}=0{,}677512$, $v_{18}=1{,}723946$ м/с, $Q_{18}=110{,}405056\ 10^{-6}$ м^3/с.

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

$$Q=v_{ст}S_{ст}=(v_5+v_{16})S_к=(yv_{16}+v_{16})S_к=v_{16}(y+1)S_к,$$

$$v_{16}=v_9=v_{ст}\frac{1}{1+y}\frac{S_{ст}}{S_к}=v_{19}\frac{1}{1+y}\frac{S_{пр(19)}}{S_к}.$$

И выражение (14) будет выглядеть так:

$$H=\alpha\frac{v_{19}^2}{2g}\left[\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\left(\frac{S_{пр(19)}}{S_{ст}}\right)^2+\left(\zeta^{д}_{4-16(16)}+\lambda\frac{l_{ст-III\,(16-9)}}{d_к}+3\zeta\right)\left(\frac{S_{пр(19)}}{(1+y)S_к}\right)^2+\zeta_n+\lambda\frac{l_n}{d_n}+1\right]. \quad (19)$$

Выражение в квадратных скобках (за исключением “1”) – это коэффициент сопротивления системы от сечения *1–1* до сечения *19–19* (для линии *1–16–9*) $\zeta_{1\text{-}19(19)}$. Подсчитываем: $\zeta_{1\text{-}19(19)}=0{,}971933$, $\mu_{1\text{-}19(19)}=0{,}712121$, $v_{19}=1{,}812009$ м/с, $Q_{19}=116{,}044835\ 10^{-6}$ м^3/с. Расход в системе $Q=Q_{18}+Q_{19}=222{,}582933\ 10^{-6}$ м^3/с. $v_{ст}=Q/S_{ст}=+0{,}488753$ м/с. $Q_5=Qy/(1+y)=136{,}974112\ 10^{-6}$ м^3/с, $v_5=Q_5/S_к=0{,}678706$ м/с. $Q_{16}=Q/(1+y)=85{,}608820\ 10^{-6}$ м^3/с, $v_{16}=Q_{16}/S_{ст}=0{,}424191$ м/с. Значения отношений $x=0{,}4$, $y=1{,}6$ и $v_{18/19}=1$ были взяты произвольно. Предположим, что в результате расчётов $y=1{,}6$ и $v_{18/19}=1$ не изменились. Найдем x. Расход $Q_8=Q_5-Q_{18}=26{,}569057\ 10^{-6}$ м^3/с, а скорость $v_8=Q_8/S_к=0{,}131649$ м/с. Отношение $x=v_8/v_7=v_8/v_5=0{,}193971$. А мы задавались $x=0{,}4$.

В системе должно быть следующее равенство: $p_9=p_8$ Проверим это соотношение. Составим УБ для сечений *1–1* и *8–8*:

$$H+\frac{p_a}{\gamma}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}+\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-II}}{d_к}+\zeta\right)\alpha\frac{v_5^2}{2g}+\left(\zeta_8+\lambda\frac{l/2}{d_к}+1\right)\alpha\frac{v_8^2}{2g}+\frac{p_8}{\gamma}, \quad (20)$$

где l – расстояние между питателями II и III; l=0,119 м. Заметим, что $p_8 \neq p_a$. Запишем (20) так:

$$H_8=\frac{p_8-p_a}{\gamma}=H-\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}-\left(\zeta^{\partial}_{4-5(5)}+\lambda\frac{l_{ст-II}}{d_к}+\zeta\right)\alpha\frac{v_5^2}{2g}-\left(\zeta_8+\lambda\frac{l}{2d_к}+1\right)\alpha\frac{v_8^2}{2g}. \quad (21)$$

Подсчитаем по формуле (16) ζ_8 для отношения x=0,193971: ζ_8=6,906939. Все величины в (21) известны. Находим, что H_8=0,256159 м. Составим УБ для сечений *1–1* и *9–9* (линия *1–16–9*):

$$H+\frac{p_a}{\gamma}=\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}+\left(\zeta^{\partial}_{4-16(16)}+\lambda\frac{l_{ст-III\,(16-9)}-l/2}{d_к}+3\zeta+1\right)\alpha\frac{v_9^2}{2g}+\frac{p_9}{\gamma}. \quad (22)$$

$p_9 \neq p_a$. Выражение (22) запишется следующим образом:

$$H_9=\frac{p_9-p_a}{\gamma}=H-\left(\zeta_{ст}+\lambda\frac{l_{ст}}{d_{ст}}\right)\alpha\frac{v_{ст}^2}{2g}-\left(\zeta^{\partial}_{4-16(16)}+\lambda\frac{l_{ст-III\,(16-9)}-l/2}{d_к}+3\zeta+1\right)\alpha\frac{v_9^2}{2g}. \quad (23)$$

Определяем по (23): H_9=0,272746 м. Напор H_9 в сечении *9–9* больше напора H_8 в сечении *8–8* на 0,016587м. В данной ЛС с одним стояком и двумя работающими питателями это невозможно. Поэтому задаемся следующими величинами: $x=v_8/v_7$=0,193971, $y=v_5/v_{16}$=1,6 и v_{18}/v_{19}=1. Получаем: H_9 – H_8=0,017906 м, x=0,180700, v_{18}/v_{19}=0,116880.

Действуя таким образом, получаем, что при x=0,1391059, y=1,43712931 и v_{18}/v_{19}=1/03108789. H_9 – H_8=–2,2, 10^{-9} м. При этом по расчету x=0,13910596, а v_{18}/v_{19}= =1,03108791. 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.

Поступая аналогичным образом, находим характеристики ЛС при разном количестве работающих питателей (табл. 2). Как следует из табл. 1 и 2, отличие опытных данных от расчетных невелико (max 2,5% по расходу в ЛС и max 5,5% по расходу в питателе) и даже ставит под сомнение результаты работы. Хотя это отмечалось и при исследовании ЛС, перечисленных в начале статьи. Но ошибок ни в расчетах, ни в постановке экспериментов, ни в обработке опытных данных найдено не было. Даже на такой сложной ЛС как кольцевая, УБ не дает каких-либо сбоев и вполне согласуется с опытными данными. По-видимому, УБ можно использовать при расчетах систем с переменным расходом (массой). 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 *B* (см. рис. 2).

Как видно, по предлагаемой схеме можно решать систему, когда число неизвестных превышает число уравнений. Вначале произвольно задаемся множеством неизвестных величин, вроде бы не связанных друг с другом (для питателей I–III это v_{17}/v_{18}, v_{18}/v_{19}, v_5/v_{16}, v_7/v_6, v_8/v_9). И получение заданной величины разности H_8 – H_7 при подборе перечисленных величин ведет к решению системы уравнений, описывающих работу данной ЛС. То есть 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 0 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. А 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. Питатели «знают» свою скорость истечения жидкости. По-видимому, происходит нечто такое, что ещё предстоит понять. Здесь потребовалось рассчитывать приведенные площади для всех питателей, например, $S_{пр(17)}$, $S_{пр(18)}$ и $S_{пр(19)}$ при работе питателей I–III. В исследованных ранее ЛС можно было находить приведенную площадь питателей только для скорости в жидкости в одном из питателей.

Таблица 2. Характеристики ЛС при работе нескольких питателей

Работающие питатели	Характеристики системы							
	$\zeta_{1\text{-}19(19)}$	$\mu_{1\text{-}19(19)}$	$\frac{v_{19}}{v_{19}^{эксп}}$, м/с	$\frac{v_{18}}{v_{18}^{эксп}}$, м/с	$\frac{v_{17}}{v_{17}^{эксп}}$, м/с	$\frac{Q_{19}}{Q_{19}^{эксп}}$, см^3/с	$\frac{Q}{Q^{эксп}}$, см^3/с	Q_0, %
II, III*	1,530	0,629	1,600 1,626	1,514 1,547		102,46 104,13	199,36 203,21	–1,89
II,III	1,105	0,689	1,754 1,770	1,808 1,752		112,32 113,35	228,13 225,56	+1,14
I, III*	2,470	0,537	1,366 1,374	1,292 1,319	1,128 1,166	87,48 87,99	242,42 247,10	–1,89
I, III	1,639	0,616	1,566 1,525	1,556 1,558	1,514 1,455	100,30 97,66	296,92 290,62	+2,17
I, III, VII**	2,365	0,545	1,387 1,390	1,432 1,362	1,301 1,207	88,83 88,99	358,08 349,29	+2,52
I, III, V, VI***	3,031	0,498	1,267 1,256	1,259 1,209	1,119 1,098	81,16 80,42	390,23 384,96	+1,35
I, VII****	4,775	0,416	1,059 1,004	0,945 0,954	0,811 0,830	67,81 64,31	427,68 422,62	+1,20

Примечание: * - гидравлическая система разомкнута в сечении *16–16*; ** - v_{23}=1,471 м/с, $v_{23}^{эксп}$=1,433 м/с; *** - v_{21}=1,291 м/с, $v_{21}^{эксп}$=1,277 м/с, v_{22}=1,157 м/с, $v_{22}^{эксп}$=1,171 м/с; **** - $\zeta_{1\text{-}20(20)}$=4,904; $\mu_{1\text{-}20(20)}$=0,412, v_{20}=1,047 м/с, $v_{20}^{эксп}$=1,024 м/с

Выводы: 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 [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Васенин, В.И.* Особенности расчета расхода металла в литниковых системах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 1. С. 103-106.
2. *Васенин, В.И.* Расчет расхода металла в разветвленной литниковой системе // Литейное производство. 2007. № 4. С. 5-8.
3. *Васенин, В.И.* Исследование комбинированной литниковой системы / *В.И. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров* // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Том 14, № 3. С. 77-81.
4. Патент РФ на полезную модель № 114894 от 5.12.2011 “Стенд для исследования литниковых систем” / *В.И. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров* // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 11. С. 49.
5. *Чугаев, Р.Р.* Гидравлика. – М.: изд-во «Бастет», 2008. 672 с.
6. *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.
7. *Идельчик, И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
8. *Васенин, В.И.* Исследование местных сопротивлений литниковой системы / *В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров* // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14, № 2. С. 46-53.
9. *Меерович, И.Г.* Гидродинамика коллекторных систем / *И.Г. Меерович, Г.Ф. Мучник.* – М.: Наука, 1986. 144 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615883 от 27.06.2012 “Расчет кольцевой литниковой системы” / *В.И. Васенин, А.В. Богомягков, К.В. Шаров* // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2012. № 3. С. 128.

RESEARCHES OF RING GATE RUNNER SYSTEMS

© 2013 V.I. Vasenin, A.V. Bogomyagkov, K.V. Sharov

Perm National Research Polytechnical University

The description of laboratory ring gate runner system is provided. Results of theoretical and experimental determination of speeds and liquid flow rate depending on quantity of at the same time working feeders are stated. Good coincidence of calculated and experimental data is received.

Key words: *gate runner system, pouring gate, collector, feeder, resistance coefficient, flow speed, liquid flow rate*

Valeriy Vasenin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: vaseninvaleriy@mail.ru); Aleksey Bogomyagkov, Post-graduate Student; Konstantin Sharov, Post-graduate Student