

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯРУСНОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ С ПИТАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Шаров К.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, ksharov@yandex.ru

В работе предложена методика расчета характеристик ярусной литниковой системы: расхода жидкости и скорости потока в каждом питателе отдельно и во всей системе в целом. Методика основана на применении уравнения Бернулли к поперечным сечениям каналов с различными расходами. Для выражения скоростей использовалось уравнение неразрывности потока $Q = v_i S_i = const$. При расчете характеристик системы с несколькими работающими питателями для нахождения неизвестных отношений скоростей использовался метод последовательных приближений. Экспериментальное исследование проводилось с помощью заливки специального лабораторного стенда водой. Измерялся расход жидкости в каждом питателе. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования. Получено соответствие экспериментальных и расчетных значений исследуемых величин. В приведенных в работе данных наибольшее отклонение составляет – 7,8%.

Ключевые слова: уравнение Бернулли, коллектор, питатель, напор, потери напора, коэффициент гидравлического сопротивления, скорость потока жидкости.

INVESTIGATION INTO A STEP GATING SYSTEM WITH FEEDERS OF VARIABLE CROSS-SECTION

Sharov K.V.¹

¹Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, ksharov@yandex.ru

The paper proposes a method of calculation of step gating system characteristics, such as liquid flow velocity and rate in every feeder separately and throughout the system as a whole. The method is based on the use of the Bernoulli equation to the cross-sections of channels with different rate. To express the velocity used flow continuity equation $Q = v_i S_i = const$. For calculating the characteristics of the system with multiple working feeders for finding the unknown velocity ratios used the method of successive approximations. An experimental study was conducted by pouring water of special laboratory stand. Flow rate was measured in each feeder. The paper shows the results of theoretical and experimental research. Compliance of theoretical and experimental data is obtained. In the above data the largest deviation is – 7.8%.

Keywords: Bernoulli equation, collector, feeder, head, head losses, resistance coefficient, liquid flow rate.

Одними из важнейших задач литниковой системы является обеспечение спокойного заполнения формы жидким металлом, а также последовательного охлаждения металла по направлению к прибыли. В случае изготовления высоких отливок для выполнения данных требований приходится подводить металл на нескольких уровнях [3]. Сложность расчета подобных систем состоит в том, что гидравлический напор для каждого яруса свой.

Целью данной работы является исследование ярусной литниковой системы с различными диаметрами поперечных сечений.

Материалы и методы исследования

Исследование ярусной литниковой системы производилось на лабораторном стенде (рис. 1). Стенд состоит из чаши-стояка (диаметр 175 мм), коллектора (диаметр $d_k = 16,03$ мм, длина $l_k = 0,2255$ м), обратного стояка, или вертикального коллектора (диаметр 16,03 мм) и питателей различных диаметров. Диаметры питателей в соответствующих сечениях: $d_8 = 6,03$ мм, $d_9 = 7,03$ мм, $d_{10} = 8,03$ мм, $d_{11} = 9,03$ мм. Длины питателей: $l_8 = 30,15$ мм, $l_9 = 35,15$ мм,

$l_{10} = 40,15$ мм, $l_{11} = 45,15$ мм. Расстояние $h_1 = 0,1290$ м, $h_2 = 0,1140$ м. Уровень воды $H = 0,453$ м поддерживался постоянным.

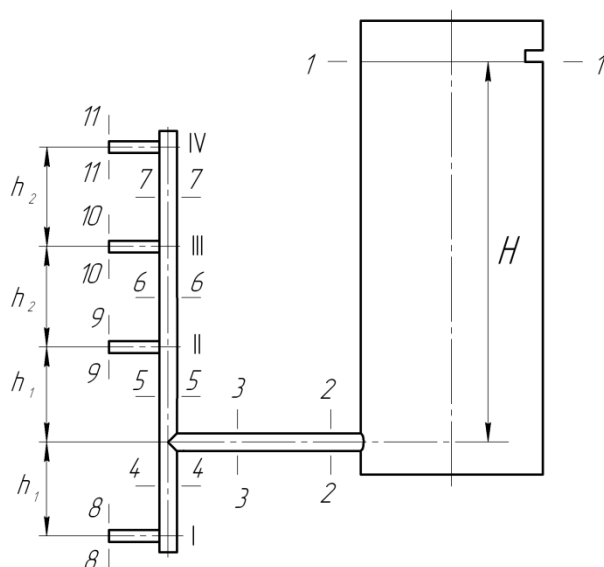


Рис. 1. Схема лабораторного стенда

При работе одного питателя уравнение Бернулли запишется в виде

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} + H_d = \frac{p_i}{\gamma} + \alpha \frac{v_i^2}{2g} + h_{1-i}^{(1)} \quad (1)$$

где p_1 и p_i – давления в сечениях $1-1$ и выходном сечении работающего питателя $i-i$ (8–8, 9–9, 10–10 или 11–11), Н/м²; γ – удельный вес жидкого металла, Н/м³; α – коэффициент Кориолиса, $\alpha = 1,1$ [6, с. 108]; v_1 и v_i – скорости в соответствующих сечениях, м/с; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; H_d – действующий в данном питателе напор, равный вертикальному расстоянию от оси i -го питателя до сечения $1-1$, м; $h_{1-i}^{(1)}$ – потери напора при движении жидкости от сечения $1-1$ до выходного сечения $i-i$.

При свободном сливе жидкости из питателя в форму давления p_1 и p_i равны атмосферному давлению p_a . Так как площадь стояка в сечении $1-1$ значительно больше площади выходного сечения, то скорость v_1 можно принять равной нулю. Тогда потери напора запишутся в виде

$$h_{1-i}^{(1)} = \left(\zeta_{\kappa} + \lambda \frac{l_{\kappa}}{d_{\kappa}} \right) \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_{\text{пов}} + \lambda \frac{h}{d_{\kappa}} \right) \alpha \frac{v_4^2}{2g} + \left(\zeta_i + \lambda \frac{l_i}{d_i} \right) \alpha \frac{v_i^2}{2g} \quad (2)$$

где ζ_{κ} , $\zeta_{\text{пов}}$, ζ_i , – коэффициенты местных сопротивлений входа жидкости из чаши-стояка в коллектор, $\zeta_{\kappa} = 0,3$ [2]; поворота из горизонтального коллектора в вертикальный и поворота из коллектора в i -тый питатель, $\zeta_{\text{пов}}$ и ζ_i определяется по зависимостям, приведённым в [1]; v_3 и v_4 – скорости в соответствующих сечениях, м/с; λ – коэффициент потерь на трение, $\lambda = 0,03$ [5]; h – расстояние от оси горизонтального коллектора до оси работающего питателя, м.

Расход при сливе сверху определяется скоростью жидкости в выходном сечении работающего питателя и площадью S_i его поперечного сечения. Скорости в других сечениях литниковой системы могут быть выражены с помощью уравнения неразрывности потока:

$$Q = v_2 S_k = v_3 S_k = v_4 S_k = v_5 S_k = v_6 S_k = v_7 S_k = v_i S_i, \quad (3)$$

где S_k – площадь поперечного сечения коллектора, m^2 .

Используя выражение (3), выразим все скорости в (2) через скорость v_i :

$$h_{1-i(i)}^{(1)} = \alpha \frac{v_i^2}{2g} \left[\left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k + h}{d_k} + \zeta_{пов} \right) \left(\frac{S_i}{S_k} \right)^2 + \zeta_i + \lambda \frac{l_i}{d_i} \right]. \quad (4)$$

Выражение в квадратных скобках в (4) обозначим как $\zeta_{1-i(i)}^{(1)}$ – это коэффициент сопротивления системы от сечения 1–1 до сечения $i-i$, приведенный к скорости жидкости в сечении $i-i$. Коэффициент расхода системы $\mu_{1-i(i)}^{(1)}$ от сечения 1–1 до сечения $i-i$, приведенный к скорости v_i

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

Приняв во внимание сказанное выше, скорость v_i можно выразить из (1):

$$v_i = \mu_{1-i(i)}^{(1)} \sqrt{\frac{2gH_d}{\alpha}}. \quad (6)$$

Расход находим из выражения (3).

При работе нескольких питателей требуется записать столько уравнений, аналогичных (1), сколько выходных сечений (работающих питателей) имеет система. Например, при работе питателей I и II уравнение Бернулли необходимо записать для сечений 1–1 и 8–8:

$$H_d = \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_{3-4(4)}^d + \lambda \frac{h_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_4^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{l_8}{d_8} + 1 \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g}, \quad (7)$$

и для сечений 1–1 и 9–9:

$$H_d = \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_{3-5(5)}^d + \lambda \frac{h_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_9 + \lambda \frac{l_9}{d_9} + 1 \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g}, \quad (8)$$

где $\zeta_{3-4(4)}^d$ – коэффициент сопротивления на деление потока в коллекторе в сечении 3–3 между сечениями 4–4 и 5–5, приведенный к скорости металла в сечении 4–4; $\zeta_{3-5(5)}^d$ – коэффициент сопротивления на деление потока в коллекторе в сечении 3–3 между сечениями 4–4 и 5–5, приведенный к скорости жидкости в сечении 5–5. Эти коэффициенты определяем по следующему соотношению [4, с. 277]:

$$\zeta^d = \left[1 + \varphi (v_d / v)^2 \right] / (v_d / v)^2 \quad (9)$$

где φ – коэффициент, зависящий от скругления кромок места деления потока, для данной литниковой системы $\varphi = 1,5$; v – скорость жидкости до деления потока, м/с; v_d – скорость жидкости в одном из каналов после деления потока, м/с. Из (9) следует, что искомые коэффициенты зависят от неизвестных отношений скоростей v_4/v_3 и v_5/v_3 . Данные отношения можно выразить через уравнение неразрывности (3), которое в случае работы двух питателей запишется следующим образом:

$$Q = v_2 S_k = v_3 S_k = v_4 S_k + v_5 S_k = v_8 S_8 + v_9 S_9 = v_8 S_8 + x_2 v_8 \cdot y_2 S_8 = v_8 S_8 (1 + x_2 y_2) = v_8 S_{\text{пр}(8)}^{(2)}. \quad (10)$$

где $x_2 = v_9/v_8$, $y_2 = S_9/S_8$, $S_{\text{пр}(8)}^{(2)} = S_8 (1 + x_2 y_2) S_8$ – приведенная к скорости v_8 площадь питателей (для двух работающих питателей I и II). Величиной x_2 задаемся произвольно.

Аналогично записываем:

$$Q = v_8 S_8 + v_9 S_9 = \frac{v_9}{x_2} \frac{S_9}{y_2} + v_9 S_9 = v_9 S_9 \left(\frac{1}{x_2 y_2} + 1 \right) = v_9 S_{\text{пр}(9)}^{(2)} \quad (11)$$

здесь $S_{\text{пр}(9)}^{(2)} = S_9 (1/x_2 y_2 + 1)$ приведенная к скорости v_9 площадь питателей (для двух работающих питателей).

Запишем ряд выражений. $Q = v_8 S_{\text{пр}(8)}^{(2)} = v_8 S_8 (1 + x_2 y_2) = v_3 S_k$, $v_4 S_k = v_8 S_8$,

$$\frac{v_4 S_k}{v_3 S_k} = \frac{v_8 S_8}{(1 + x_2 y_2) v_8 S_8}, \text{ тогда отношение скоростей } v_4/v_3 = (1 + x_2 y_2)^{-1}.$$

$$\text{Так же находим: } Q = v_9 S_{\text{пр}(9)}^{(2)} = v_9 S_9 \left(\frac{1}{x_2 y_2} + 1 \right) = v_3 S_k, \quad v_5 S_k = v_9 S_9, \quad \frac{v_5 S_k}{v_3 S_k} = \frac{v_9 S_9}{\left(\frac{1}{x_2 y_2} + 1 \right) v_9 S_9},$$

$$\frac{v_5}{v_3} = \left(\frac{1}{x_2 y_2} + 1 \right)^{-1}.$$

Теперь выражения (7) и (8) можно записать как

$$H_d = \alpha \frac{v_8^2}{2g} \left[\left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\text{пр}(8)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_{3-4(4)}^d + \lambda \frac{h_1}{d_k} \right) \left(\frac{S_8}{S_k} \right)^2 + \zeta_8 + \lambda \frac{l_8}{d_8} + 1 \right], \quad (12)$$

$$H_d = \alpha \frac{v_9^2}{2g} \left[\left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \left(\frac{S_{\text{пр}(9)}^{(2)}}{S_k} \right)^2 + \left(\zeta_{3-5(5)}^d + \lambda \frac{h_1}{d_k} \right) \left(\frac{S_9}{S_k} \right)^2 + \zeta_9 + \lambda \frac{l_9}{d_9} + 1 \right]. \quad (13)$$

Выражение в квадратных скобках в (12) обозначим как $\zeta_{1-8(8)}^{(2)}$, а в (13) как $\zeta_{1-9(9)}^{(2)}$. Затем найдём $\mu_{1-8(8)}^{(2)} = (1 + \zeta_{1-8(8)}^{(2)})^{-1/2}$ и $\mu_{1-9(9)}^{(2)} = (1 + \zeta_{1-9(9)}^{(2)})^{-1/2}$; скорости v_8 и v_9 определяем по выражению (6). Так как величиной x_2 мы задавались произвольно, то необходимо проверить полученное отношение скоростей. Если полученное значение не совпадает с принятым, то полученное

значение принимаем за x_2 , и повторяем расчет до тех пор, пока принятое и полученное значение не будут совпадать с требуемой точностью.

Расчеты характеристик других питателей производим аналогично.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетов характеристик одного работающего питателя и результаты экспериментальных исследований (с индексом «э») представлены в таблице 1. Совпадение расчетных и экспериментальных данных оценивалось с помощью выражения

$$Q^* = \frac{Q - Q_э}{Q_э} \cdot 100\%.$$

Таблица 1

Характеристики литниковой системы при работе одного питателя

Работающий питатель	I	II	III	IV
v , м/с	2,646	1,950	1,535	1,000
$v_э$, м/с	2,702	1,969	1,527	0,966
$Q \cdot 10^6$, м ³ /с	75,56	75,67	77,76	64,03
$Q_э \cdot 10^6$, м ³ /с	77,16	76,43	77,33	61,86
Q^* , %	- 2,1	- 1,0	+ 0,6	+ 3,5

Характеристики литниковой системы при работе двух и более питателей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики литниковой системы при работе нескольких питателей

Работающие питатели	I–II	I–III	I–IV
$v_{8э}$, м/с	2,536	2,453	2,451
v_8 , м/с	2,620	2,532	2,532
$Q_{8э} \cdot 10^6$, м ³ /с	72,42	70,05	69,99
$Q_8 \cdot 10^6$, м ³ /с	74,82	72,31	72,31
Q_8^* , %	- 3,2	- 3,1	- 3,2
$v_{9э}$, м/с	1,802	1,616	1,608
v_9 , м/с	1,855	1,665	1,665
$Q_{9э} \cdot 10^6$, м ³ /с	69,93	62,73	62,42
$Q_9 \cdot 10^6$, м ³ /с	72,00	64,63	64,63
Q_9^* , %	- 2,9	- 2,9	- 3,4
$v_{10э}$, м/с		1,061	1,088

$v_{10}, \text{ м/с}$		1,150	1,150
$Q_{10\text{э}} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$		53,72	55,11
$Q_{10} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$		58,24	58,24
$Q_{10}^*, \%$		- 7,8	- 5,4
$Q_3 \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	142,35	186,50	187,52
$Q \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	146,82	195,18	195,18
$Q^*, \%$	- 3,0	- 4,5	- 3,9

В случае работы четырех питателей при расчете отношения скоростей v_{11}/v_8 не получаем сближения заданного и рассчитанного значений, а только видим, что $v_{11}/v_8 \rightarrow 0$. Следовательно, общий расход при работе трех и четырех питателей одинаков (см. рис. 2). При экспериментальном исследовании вода из питателя IV действительно не течет ($v_{11} = 0$), хотя разница между горизонтальной осью питателя IV и сечением I-I составляет 96 мм. При увеличении напора H из питателя IV жидкость начинает течь. Получается, что напор тратится на преодоление сил трения, местных сопротивлений и сопротивлений при делении потока.

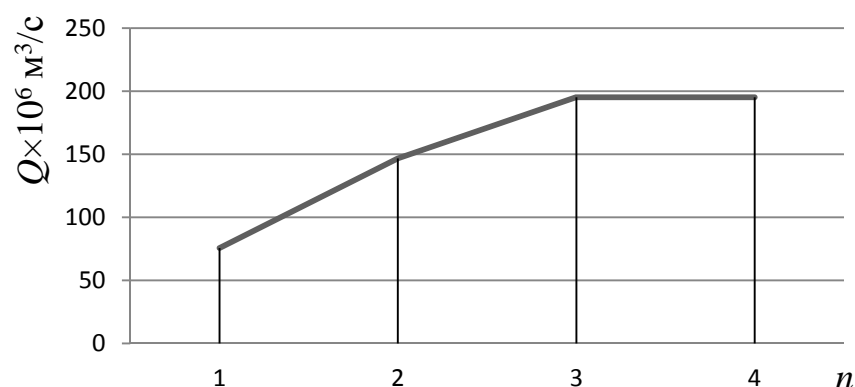


Рис. 2. Зависимость расхода Q от числа одновременно работающих питателей n

Заключение

Исследована ярусная литниковая система с питателями различных площадей поперечных сечений. Определены скорости и расходы жидкости в каждом питателе отдельно и во всей системе в целом. При расчёте системы с изменяющимся расходом жидкости использовали уравнение Бернулли, хотя оно в гидравлике выведено и проверено практически для потока жидкости с постоянным расходом. Получено хорошее соответствие опытных и расчетных данных – наибольшее отклонение составляет – 7,8%.

Список литературы

1. Васенин В.И., Васенин Д.В., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование местных сопротивлений литниковой системы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. – № 2. – С. 46–53.
2. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование влияния относительной длины питателя на характеристики литниковой системы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15. – № 2. – С. 48–52.
3. Дубицкий Г.М. Литниковые системы. – М. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 256 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. Токарев Ж.В. К вопросу о гидравлическом сопротивлении отдельных элементов незамкнутых литниковых систем // Улучшение технологии изготовления отливок. – Свердловск: изд-во Уральского политехнического института, 1966. – С. 32–40.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: изд-во “Бастет”, 2008. – 672 с.

Рецензенты:

Ханов А.М., д.т.н., проф., зав. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.

Сиротенко Л.Д., д.т.н., проф. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.