

УДК 621.744.3

М.С. Нагаев**M.S. Nagaev**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПОРА В ЖИДКОСТИ
В ЯРУСНОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ****DETERMINATION OF THE HEAD OF THE FLUID
IN THE STOREYSHAPED GATING SYSTEM**

Приведено описание лабораторной ярусной литниковой системы. Изложены результаты теоретического и экспериментального определения напоров жидкости в зависимости от количества одновременно работающих питателей. Показано, что уравнение Бернулли пригодно для расчета литниковых систем с переменным расходом (массой), который изменяется в коллекторе по мере раздачи потока по питателям во много раз. Учитываются три вида потерь напора: на трение по длине, в местных сопротивлениях и на изменение напора. Получено хорошее совпадение расчетных и опытных данных.

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

The description of laboratory storeyshaped gating system is provided. Results of theoretical and experimental determination of pressure, depending on the quantity of at the same time working feeders are stated. It is shown that the Bernoulli equation is suitable for calculating the gating system with variable flow rate (mass), which varies for many times at the collector as flux distribution to gates. It takes stock of three loss pressure: by friction on length, in local resistances, on changing of pressure. Good agreement of the calculated and experimental data has been obtained.

Keywords: sprue, collector, feeder, resistance coefficient, flow speed, loss pressure.

Ранее были исследованы L -образная, разветвленная, комбинированная, крестовинная, кольцевая (горизонтальная и вертикальная) литниковые системы (ЛС), а также L -образная система с коллектором переменного сечения. Разница между расчетными и опытными значениями скоростей и расходов составляла 1–6 %, хотя использовали в расчетах уравнение Бернулли (УБ) для потока жидкости с переменным расходом (массой), а оно выведено для частного случая – потока с постоянным расходом (массой) при отсутствии раздачи жидкости по питателям [1, с. 205], т.е. для литниковой системы с одним питателем. Возможность использования УБ при расчетах ЛС с изменяющимся от максимального до нуля расходом в коллекторе (шлакоуловителе) теоретически не доказана, хотя и получено хорошее соответствие расчет-

ных и опытных данных, но это касается истечения жидкости из питателей в атмосферу. Не понятно, как на самом деле распределяется действующий напор H , в каждом сечении состоящий из пьезометрического и скоростного напоров и потерь напора. В перечисленных ЛС питатели располагаются в одной горизонтальной плоскости, а гидравлический напор в системе один и тот же для всех питателей, поэтому представляется целесообразным исследовать такую сложную ЛС, как ярусную, при размещении питателей на разных уровнях (ярусах) по высоте формы (на каждом ярусе имеются несколько питателей, а напоры жидкости в питателях разные) и определить расходы в каждом питателе и во всей системе, а также напоры на каждом ярусе.

Методика исследований. Система состоит из чаши-стояка, коллектора и 6 питателей I–VI (рисунок). Внутренний диаметр чаши-стояка равен 272 мм, высота воды в чаше – 103,5 мм. Уровень жидкости H – расстояние по вертикали от сечения $I-I$ в чаше-стояке до продольной оси коллектора – поддерживался постоянным путем непрерывного доливания воды в чашу-стояк и слива ее излишков через специальную щель в чаше: $H = 0,4530$ м. Жидкость выливалась сверху из питателей в форму. В сечениях коллектора 3–3, 7–7, 8–8, 9–9, 10–10, 11–11 и 12–12 установлены для измерения напора пьезометры – стеклянные трубки длиной 600 мм и внутренним диаметром 4,5 мм (на рисунке не показаны). Время истечения жидкости из каждого питателя составляло 40–160 с (в зависимости от количества одновременно работающих питателей), а объем вылившейся из питателя воды – около 9 л. 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.

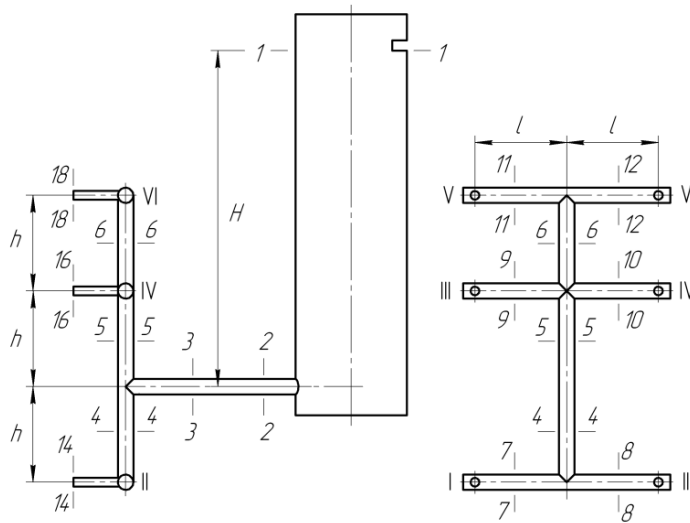


Рис. Литниковая система

Расчет скоростей и расходов жидкости в данной ЛС при разном количестве работающих питателей подробно описан в статье [2]. Приступим к расчету давлений (напоров) жидкости в коллекторе. Составим УБ для сечения 1–1 в чаше и сечения 3–3 в коллекторе:

$$\frac{p_1}{\gamma} + H = \frac{p_3}{\gamma} + \alpha \frac{v_3^2}{2g} + h_{1-3(3)}, \quad (1)$$

где p_1 и p_3 – давления в сечениях 1–1 и 3–3, Н/м² (равны атмосферному давлению p_a : $p_1 = p_3 = p_a$); γ – удельный вес жидкого металла, Н/м³; α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса), принимаем $\alpha = 1,1$ [1, с. 108]; v_3 – скорость жидкости в сечении 3–3, м/с; g – ускорение свободного падения; $g = 9,81$ м/с²; $h_{1-3(3)}$ – потери напора при движении жидкости от сечения 1–1 до сечения 3–3, приведенные к скорости v_3 , м, $h_{1-3(3)} = \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_{ст-3}}{d_{ст}} \right) \alpha \frac{v_3^2}{2g}$, здесь ζ_k – коэффициент местного сопротивления входа металла из чаши-стояка в коллектор I; λ – коэффициент потерь на трение; $l_{ст-3}$ – расстояние от чаши-стояка до сечения 3–3, м, $l_{ст-3} = 0,050$ м; d_k – гидравлический диаметр коллектора, м.

Чтобы найти напор H_7 в сечении 7–7 при работе одного питателя I, составим УБ для сечений 3–3 и 7–7:

$$H_3 + h + \alpha \frac{v_3^2}{2g} = H_7 + \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \zeta_{3-7(7)} \alpha \frac{v_7^2}{2g}, \quad (2)$$

где h – расстояние по вертикали от оси горизонтального коллектора до оси питателя I, м, $h = 0,129$ м; v_7 – скорость жидкости в сечении 7–7, м/с; $\zeta_{3-7(7)}$ – коэффициент сопротивления системы от сечения 3–3 до сечения 7–7, приведенный к скорости v_7 , ($v_3 = v_7$) $\zeta_{3-7(7)} = \lambda \frac{l_{3-к} + h + l_{к-7}}{d_k} + \zeta_{3-4} + \zeta_{4-7}$. Здесь $l_{3-к}$ – расстояние от сечения 3–3 до вертикального коллектора, м; $l_{к-7}$ – расстояние от вертикального коллектора до сечения 7–7, м; $l_{3-к} = 0,0725$ м; $l_{к-7} = 0,0565$ м. Напор в сечении 7–7 $H_7 = H_3 + h - \zeta_{3-7(7)} \alpha v_7^2 / 2g$.

В сечении 9–9 при работе одного питателя III находим аналогично: $H_9 = H_3 - h - \zeta_{3-9(9)} \alpha v_9^2 / 2g$, $\zeta_{3-9(9)} = \zeta_{3-7(7)}$. Напор в сечении 11–11 при работе одного питателя V $H_{11} = H_3 - 2h - \zeta_{3-11(11)} \alpha v_{11}^2 / 2g$, $\zeta_{3-11(11)} = \lambda \frac{l_{3-к} + 2h + l_{к-11}}{d_k} + \zeta_{3-5} + \zeta_{6-11}$.

При работе питателей I и II УБ для сечений 3–3 и 7–7 ($v_3 = v_4 = 2v_7$):

$$H_3 + h + \alpha \frac{v_3^2}{2g} = H_7 + \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_{3-4(4)} + \lambda \frac{l_{3-k} + h}{d_k} \right) \alpha \frac{v_4^2}{2g} + \\ + \left(\zeta_{4-7(7)} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g}.$$

После преобразований имеем $H_7 = H_3 + h + (3 - \zeta_{3-7(7)}) \alpha v_7^2 / 2g$, где $\zeta_{3-7(7)} = 4\zeta_{3-4(4)} + 4\lambda \frac{l_{3-k} + h}{d_k} + \zeta_{4-7(7)} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k}$. $H_7 = H_8$.

При работе трех питателей (I, II и III) УБ для сечений 3–3 и 7–7 выглядит так:

$$H_3 + h + \alpha \frac{v_3^2}{2g} = H_7 + \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_{3-4(4)} + \lambda \frac{h}{d_k} \right) \alpha \frac{v_4^2}{2g} + \\ + \left(\zeta_{4-7(7)} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g}.$$

Для трех питателей $S_{np(13)} = 2,758131S_n$, $v_3 S_k = v_{17} S_{np(13)} = 2,758131S_n \cdot v_{13} = 2,758131S_k \cdot v_7$, а $v_3 = 2,758131v_7$, $v_4 = 2v_7$. После преобразований получаем $H_7 = H_3 + h + (6,607287 - \zeta_{3-7(7)}) \alpha \frac{v_7^2}{2g}$, где коэффициент

$$\zeta_{3-7(7)} = 7,607287\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-4(4)} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{4-7(7)} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k}. H_7 = H_8.$$

УБ для сечений 3–3 и 9–9 при работе трех питателей I, II и III

$$H_3 + \alpha \frac{v_3^2}{2g} = H_9 + h + \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} \alpha \frac{v_3^2}{2g} + \\ + \left(\zeta_{3-5(5)} + \lambda \frac{h + l_{k-9}}{d_k} + \zeta_{5-9} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} \cdot S_{np(15)} = 3,638067S_n,$$

$v_3 S_k = v_{15} S_{np(15)} = 3,638067S_n \cdot v_{15} = 3,638067S_k \cdot v_9$, а $v_3 = 3,638067v_9$, $v_5 = v_9$. После преобразований получаем $H_9 = H_3 - h + (12,235531 - \zeta_{3-9(9)}) \alpha \frac{v_9^2}{2g}$, где коэффициент сопротивления $\zeta_{3-9(9)} = 13,235531\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + \zeta_{3-5(5)} + \lambda \frac{h + l_{k-9}}{d_k} + \zeta_{5-9}$.

При работе четырех питателей (I, II, III и IV) $S_{np(13)} = 3,125338S_n$, $v_3 = 3,125338v_7$, $v_4 = 2v_7$, $S_{np(15)} = 5,554488S_n$, $v_3 = 5,554488v_9$, $v_5 = 2v_9$. Уравнения для напоров и коэффициентов сопротивлений будут такими:

$$H_7 = H_3 + h + \left(8,767738 - \zeta_{3-7(7)}\right) \alpha \frac{v_7^2}{2g},$$

$$\zeta_{3-7(7)} = 9,767738\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-4(4)}^{\lambda} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{4-7(7)}^{\lambda} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k}, \quad H_7 = H_8,$$

$$H_9 = H_3 - h + \left(29,852337 - \zeta_{3-9(9)}\right) \alpha \frac{v_9^2}{2g},$$

$$\zeta_{3-9(9)} = 30,852337\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-5(5)}^{\lambda} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{5-9(8)}^{\lambda} + \lambda \frac{l_{k-9}}{d_k}, \quad H_9 = H_{10}.$$

При работе пяти питателей (I–V) $S_{np(13)} = 3,147648S_n$, $v_3 = 3,147648v_7$, $v_4 = 2v_7$, $S_{np(15)} = 5,485389S_n$, $v_3 = 5,485389v_9$, $S_{np(15)} = \infty$, $v_{17} = 0$. Уравнения для напоров и коэффициентов сопротивлений будут такими:

$$H_7 = H_3 + h + \left(8,767738 - \zeta_{3-7(7)}\right) \alpha \frac{v_7^2}{2g},$$

$$\zeta_{3-7(7)} = 9,767738\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-4(4)}^{\lambda} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{4-7(7)}^{\lambda} + \lambda \frac{l_{k-7}}{d_k}, \quad H_7 = H_8,$$

$$H_9 = H_3 - h + \left(29,852337 - \zeta_{3-9(9)}\right) \alpha \frac{v_9^2}{2g},$$

$$\zeta_{3-9(9)} = 30,852337\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-5(5)}^{\lambda} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{5-9(8)}^{\lambda} + \lambda \frac{l_{k-9}}{d_k}, \quad H_9 = H_{10}.$$

$$H_{11} = H_3 - 2h + \left(29,852337 - \zeta_{3-11(11)}\right) \alpha \frac{v_{11}^2}{2g},$$

$$\zeta_{3-11(11)} = 30,852337\lambda \frac{l_{3-k}}{d_k} + 4\zeta_{3-5(5)}^{\lambda} + 4\lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{5-6(6)}^{\lambda} + \lambda \frac{h}{d_k} + \zeta_{6-9(9)}^{\lambda} + \lambda \frac{l_{k-9}}{d_k}.$$

Расчетные и экспериментальные значения напоров в зависимости от количества и расположения питателей приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения напоров при работе одного питателя

№ п/п	Показатели	Работающие питатели		
		I	III	V
1	$H_3, \text{ м}$	$\frac{0,4071}{0,381}$	$\frac{0,4274}{0,406}$	$\frac{0,4378}{0,412}$
2	$H_7, \text{ м}$	$\frac{0,4618}{0,451}$	–	–
3	$H_9, \text{ м}$	–	$\frac{0,2571}{0,262}$	–
4	$H_{11}, \text{ м}$	–	–	$\frac{0,1526}{0,141}$

Таблица 2

Значения напоров при работе 2–4 питателей

№ п/п	Напоры, м	Работающие питатели					
		I, II	I – III	I – IV	I, III, IV	I, III, V	I, III, V, VI
1	H_3	$\frac{0,3339}{0,332}$	$\frac{0,2957}{0,279}$	$\frac{0,2667}{0,269}$	$\frac{0,3154}{0,309}$	$\frac{0,3317}{0,314}$	$\frac{0,3255}{0,329}$
2	H_7	$\frac{0,2993}{0,277}$	$\frac{0,2079}{0,218}$	$\frac{0,1917}{0,180}$	$\frac{0,3402}{0,322}$	$\frac{0,3545}{0,331}$	$\frac{0,3491}{0,330}$
3	H_9	–	$\frac{0,1195}{0,125}$	$\frac{0,0607}{0,063}$	$\frac{0,0879}{0,086}$	$\frac{0,1287}{0,136}$	$\frac{0,1164}{0,122}$
4	H_{11}	–	–	–	–	$\frac{0,0059}{0}$	$\frac{-0,008}{0}$

Как видно из табл. 1 и 2, экспериментальные значения напоров отличаются от расчетных на величину от 6,9 до –4,4 %. Однако отличия невелики, и какие-то выводы делать сложно. В целом можно считать, что получено хорошее соответствие опытных и теоретических данных.

Уравнение Бернулли выведено для элементарной струйки идеальной жидкости при установившемся движении строго теоретически, без привлечения экспериментальных данных [1, с. 95–97]: $h + p / \gamma + v^2 / 2g = \text{const}$ (вдоль струйки), где h – превышение сечения над плоскостью сравнения. Однако для потока реальной (вязкой) жидкости при установившемся движении приходится вводить потери напора на трение и в местных сопротивлениях, а также коэффициент не-

равномерности распределения скорости по сечению потока α [1, с. 108–111]. Причем для определения потерь на трение находят экспериментально коэффициент потерь λ , а для потерь в местных сопротивлениях – коэффициенты местных сопротивлений ζ . Таким образом, уравнение Бернулли становится расчетно-экспериментальным. Коэффициенты λ и ζ зависят от скорости движения потока, шероховатости поверхности трубы и др.

В расчетах используются, кроме потерь на трение и в местных сопротивлениях, потери на изменение напора: на деление потока и на ответвление части потока. Причем производится простое суммирование потерь напора на трение и в местных сопротивлениях с потерями напора на деление потока, что никак не обосновано. Однако пока не получено экспериментальных данных, противоречащих данному допущению.

Попытки обосновать применение уравнения Бернулли для потоков с переменным расходом ведутся уже давно. Обзор этих работ приведен в монографии [3], и по истечении почти 30 лет после выхода этой книги успехов достигнуто не было.

По-видимому, впервые расчет многопитательной ЛС был произведен в статье [4], в которой было учтено, что потери напора в параллельных трубах – питателях – не суммируются, уравнение Бернулли составляется для каждого из работающих питателей, а замыкается система уравнений очевидным соотношением: расход жидкого металла в литниковой системе равен сумме расходов во всех работающих питателях.

Были исследованы теоретически и экспериментально шесть наиболее распространенных типов ЛС при разном количестве работающих питателей: L -образная, разветвленная, комбинированная, крестовинная, ярусная, кольцевая (горизонтальная и вертикальная), а также L -образная система с коллектором переменного поперечного сечения. В статье [2] проведено изучение L -образной ЛС с 18 питателями. Исследованы также заполнение формы под затопленный уровень через ярусную и кольцевую ЛС [5], влияние диаметров питателя, коллектора и стояка, высоты стояка на характеристики ЛС [6–8]. Установлено [9], что интерференцией (взаимным влиянием местных сопротивлений) в ЛС можно пренебречь, а коэффициенты местных сопротивлений можно считать независимыми от скорости жидкости.

Последующие теоретические и экспериментальные исследования на воде и жидком алюминиевом сплаве АК12 [10, 11] (тысячи опытов) показали, что уравнение Бернулли можно использовать для сечений потока с изменяющимся расходом, хотя оно выведено для частного случая – потока с неизменным расходом, т.е. для ЛС с одним питателем. По-видимому, можно считать доказанной возможность использования уравнения Бернулли для сечений потока с разными расходами, по крайней мере для многопитательных литниковых систем.

Таким образом, теоретически и экспериментально исследована ярусная литниковая система с определением напоров жидкости на каждом ярусе. При расчете этой системы с изменяющимся расходом жидкости было использовано уравнение Бернулли, хотя оно в гидравлике выведено теоретически и проверено практически для потока жидкости с постоянным расходом, т.е. для литниковой системы с одним питателем. Получено хорошее соответствие опытных и расчетных данных.

Список литературы

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: Бастет, 2008. – 672 с.
2. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Investigation into a L-type gating system // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2016. – № 9–10. – P. 45–55.
3. Меерович И.Г., Мучник Г.Ф. Гидродинамика коллекторных систем. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
4. Васенин В.И. Особенности расчета расхода металла в литниковых системах // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1988. – № 1. – С. 103–106.
5. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of the mould filling with metal under the flooding level through the ringshaped gating system // *British Journal of Science, Education and Culture*. – 2015. – № 1. – P. 810–821.
6. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of gating system with collector of variable crosssection // *Science, Technology and Higher Education: materials of the II International research and practice conference*. – Westwood (Canada): Accent Graphics Communications, 2013. – Vol. II. – P. 250–260.
7. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of influence of head liquid and diameter sprue on the description of gating system // *European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches, papers of the 3rd International scientific conference*. – Stuttgart: ORT Publishing, 2013. – Vol. 2. – P. 21–27.
8. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Determination of the pressure of flow liquid in the gating system with collector of variable cross-section // *Applied Sciences and Technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings, papers of the 1st International scientific conference*. – New York: Cibunet Publishing, 2013. – Vol. 1. – P. 182–194.
9. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование интерференции местных сопротивлений литниковой системы // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 82–87.

10. Vasenin V.I. Research of filling the moulds with variable hydraulic resistances liquid aluminium under the MHD pump pressure // *Magnetohydrodynamics*. – 1986. – № 2. – P. 142–144.

11. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Measurement of head in flow liquid metal in the collector of the gating system // *Foundry*. – 2015. – № 8. – P. 16–17.

Получено 07.12.2015

Нагаев Максим Сергеевич – студент, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: detali@pstu.ru.

Научный руководитель – **Васенин Валерий Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru.