

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Исследование заполнения литейной формы жидкостью через ярусную литниковую систему // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 61–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.07

Please cite this article in English as:

Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Investigation of the mould filling with liquid fluid through a step gating system. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 1, pp. 61-72. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 25, № 1, 2023
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.07

УДК 621.746.628.4

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ЖИДКОСТЬЮ
ЧЕРЕЗ ЯРУСНУЮ ЛИТНИКОВУЮ СИСТЕМУ**

Теоретически и экспериментально исследована ярусная литниковая система с определением скоростей и расходов жидкости в каждом питателе и во всей системе при заполнении формы жидкостью. При расчёте таких систем с изменяющимся расходом жидкости использовали уравнение Бернулли, хотя оно выведено и проверено практически для потока жидкости с постоянным расходом, то есть для литниковой системы с одним питателем. Учитывается деление и слияние потоков жидкости, что в уравнении Бернулли даже не предполагается. В расчетах используются, кроме двух обычных гидравлических потерь – на трение по длине и в местных сопротивлениях, – потери на изменение напора, т.е. на ответвление части потока из коллектора в питатель и на проход из одного сечения коллектора в другое при ответвлении части потока в питатель. При заливке формы какие-то питатели работают при постоянном напоре, какие-то при переменном. Изменяются по мере подъёма уровня металла в форме коэффициенты сопротивлений, коэффициенты расхода всех работающих питателей, скорости истечения жидкости из питателей. Использование расчетного напора и метода последовательных приближений (5–8 шагов) при подсчете отношений скоростей позволило рассчитывать заполнение участков формы между питателями и всей формы. Для каждого питателя составляется свое уравнение Бернулли, а в литниковой системе столько же коэффициентов расхода, сколько в ней питателей. Установлено, что при подъема уровня в форме с пятью питателями скорость истечения жидкости из нижнего питателя уменьшается, а из верхних – увеличивается, и в конце заполнения скорость жидкости в четвертом от низа формы питателе выше скорости в нижнем питателе в 1,56 раза.

Ключевые слова: литниковая чаша, стояк, коллектор, питатель, деление потока, слияние потоков, коэффициент сопротивления, коэффициент расхода, приведенная к скорости площадь питателей, скорость потока, расход жидкости.

V.I. Vasenin, A.V. Bogomjagkov, K.V. Sharov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE MOULD FILLING WITH LIQUID FLUID THROW A STEP GATING SYSTEM

A step gating system with determination of fluid velocities and flow rates in each feeder and in the entire system in the process of the mould filling with liquid has been theoretically and experimentally investigated. During calculation of such systems with variable fluid flow the Bernoulli equation was used despite the fact that it was derived and tested practically for a fluid flow with a constant flow rate, that is, for a gate system with a single feeder. The division and fusion of fluid flows are taken into account, which is not even assumed in the Bernoulli equation. In addition to the usual hydraulic losses – for friction along the length and in local resistances – losses for changing the pressure, i.e. for branching the part of the flow from the collector to the feeder and for passage from one section of the collector to another while branching the part of the flow to the feeder are used in calculation. In the process of mould filling some feeders work at constant pressure, some at variable pressure. As the metal level rises the resistance coefficients, the flow coefficients of all working feeders and the flow rates of the liquid from the feeders change in the form. Using the design pressure and the method of successive approximations (5–8 steps) in calculating velocity ratios, we could to calculate the filling of the mould sections between the feeders and the entire mould. Each feeder has its own Bernoulli equation, and there are as many flow coefficients in the gating system as there are feeders in it. It has been determined that when the level in a mould with five feeders rises, the fluid flow rate from the lower feeder decreases while from the upper ones increases, and at the end of filling the fluid velocity in the fourth feeder from the bottom of the mould is 1.56 times higher than velocity in the lower feeder.

Keywords: gating bowl, riser, collector, feeder, division of stream, fusion of streams, resistance coefficient, flow coefficient, brought to speed area of feeders, flow rate, liquid flow rate.

Введение

В статье [1] была впервые рассчитана L-образная литниковая система (ЛС) с определением коэффициента сопротивления и коэффициента расхода каждого питателя, скорости жидкости в каждом питателе и расхода во всей системе. Затем были теоретически и экспериментально исследованы разветвленная [2], крестовинная [3], ярусная [4–6], Р-образная, одно- и двухкольцевая системы [7–10], L-образная система с коллектором переменного сечения, система с двумя стояками одинаковой и разной высоты. Изучались вертикальные ЛС с разным количеством питателей на ярусах. Исследована вертикальная двухкольцевая ЛС, а также совместная работа горизонтальной кольцевой системы с ярусной или разветвленной системами. В расчетах многопитательных ЛС использовалось уравнение Бернулли (УБ), хотя оно выведено для потока с постоянным расходом (массой) [11, с. 12; 12, с. 205], то есть для ЛС с одним питателем. Следовательно, УБ работает и в потоке с переменным расходом, хотя непонятно, почему оно работает. И возможность использования УБ при расчетах ЛС с изменяющимся от максимального до нуля расходом в коллекторе (шлакоуловителе) теоретически не доказана. Однако ни одна из перечисленные ЛС не исследована при заполнении жидким металлом формы под затопленный уровень – это второй этап заполнения формы. На первом этапе происходит слив жидкого металла сверху вниз из питателей в форму. Поэтому представляется целесообразным исследовать такую сложную ЛС, как ярусная, у которой питатели расположены на разных уровнях (ярусах), а заполнение формы идет под затопленный уровень с после-

довательным перекрытием отверстий питателей поднимающейся жидкостью и непрерывным уменьшением действующего напора в системе.

Методика исследований

Ярусная литниковая система показана на рис. 1. Система состоит из литниковой чаши, стояка, горизонтального коллектора, вертикального коллектора и 5 одинаковых питателей I–V.

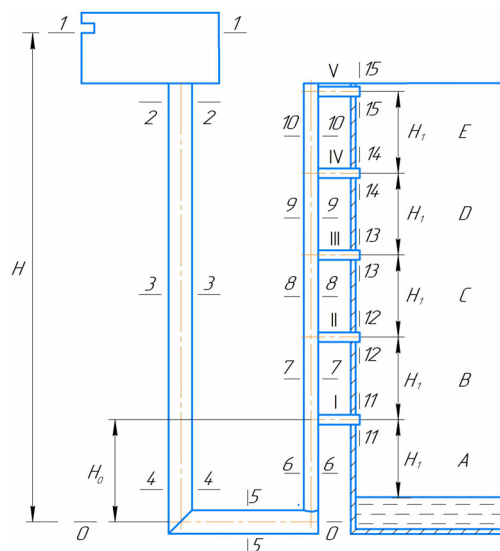


Рис. 1. Литниковая система для заполнения формы жидкостью

Внутренний диаметр чаши равен 272 мм, высота воды в чаше – 103,5 мм. Уровень жидкости H – расстояние по вертикали от сечения 1–1 в чаше до продольной оси горизонтального коллектора (плоскости сравнения 0–0) – поддерживался постоянным путем непрерывного доливания воды в чашу и слива ее излишек через специальную щель

в чаше: $H = 0,8395$ м. Размеры формы в горизонтальном сечении – 248×259 мм.

Основная часть

Сначала произведем расчет истечения жидкости только из одного питателя I сверху в форму, не под затопленный уровень. Составим УБ для сечений I-I и II-II ЛС:

$$H = H_0 + \alpha \frac{v_{11}^2}{2g} + h_{1-11}, \quad (1)$$

где H_0 – расстояние по вертикали от плоскости сравнения 0-0 до горизонтальной оси питателя I, м; $H_0 = 0,124$ м; α – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока (коэффициент Кориолиса); принимаем $\alpha = 1,1$ [12, с. 108]; v_{11} – скорость металла в сечении II-II питателя I, м/с; g – ускорение свободного падения; $g = 9,81$ м/с²; h_{1-11} – потери напора при движении жидкости от сечения I-I до сечения II-II, м.

Коэффициент сопротивления системы от сечения I-I до сечения II-II, приведенный к скорости жидкости в сечении II-II,

$$\zeta_{1-11(11)} = \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \left(\frac{S_n}{S_{ст}} \right)^2 + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \left(\frac{S_n}{S} \right)^2 + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \left(\frac{S_n}{S_k} \right)^2 + \zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n}. \quad (2)$$

где $\zeta_{ст}$, ζ , ζ_k , ζ_n – коэффициенты местных сопротивлений входа металла из чаши в стояк, поворота из стояка в горизонтальный коллектор, поворота из сечения 5-5 горизонтального коллектора в сечение 6-6 вертикального коллектора, поворота из сечения 6-6 вертикального коллектора в питатель I с выходным сечением II-II; λ – коэффициент потерь на трение; $l_{ст}$ – длина (высота) стояка, м; $l_{ст} = 0,7485$ м; $d_{ст}$, d , d_k , d_n – гидравлические диаметры стояка, горизонтального коллектора, вертикального коллектора и питателя I, м; $d_{ст} = 0,02408$ м, $d = 0,02408$ м, $d_k = 0,01603$ м, $d_n = 0,00903$ м; $S_{ст}$, S , S_k и S_n – площади сечений стояка, горизонтального коллектора, вертикального коллектора и питателя, м²; l – длина горизонтального коллектора, $l = 0,125$; l_k – расстояние от горизонтального коллектора до продольной оси питателя I, м; $l_k = 0,112$ м; l_n – длина питателя, м; $l_n = 0,0495$ м.

Коэффициент расхода системы от сечения I-I до сечения II-II, приведенный к скорости v_{11} ,

$$\mu_{1-11(11)} = \left(1 + \zeta_{1-11(11)} \right)^{-1/2}. \quad (3)$$

Скорость

$$v_{11} = \mu_{1-11(11)} \sqrt{2g(H - H_0) / \alpha}. \quad (4)$$

Расход в системе $Q = Q_{11} = v_{ст} S_{ст} = v_5 S = v_6 S_k = v_{11} S_n$. Принимаем, как и в работах [13; 14], 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 [15, с. 126]: $\zeta_{ст} = 0,12$. Коэффициенты местных сопротивлений [16]: $\zeta_k = 0,396$, $\zeta = 0,885$, $\zeta_n = 0,334$.

Размеры формы в поперечном сечении – $0,248 \times 0,259$ м. Объем части формы A $W = 0,248 \cdot 0,259 \cdot 0,119 = 7643,608 \cdot 10^{-6}$ м³. Время заполнения этого объема из питателя I $t = W / Q_{11}$. Результаты расчетов и экспериментов (в знаменателе) приведены в табл. 1. $t^* = \frac{t - t_{эксп}}{t_{эксп}} \cdot 100$ %.

При заполнении объема B под затопленный уровень (выше горизонтальной оси питателя I) над питателем I все время увеличивается уровень жидкости в форме, а напор в системе уменьшается от $H - H_0$ до $H - H_0 - H_1$. Как известно (см., например, [17, 18]), в этом случае подсчитывается расчетный напор, который для объема B между питателями I и II находится по следующему соотношению:

$$\sqrt{H_p} = \frac{\sqrt{H - H_0} + \sqrt{H - H_0 - H_1}}{2}. \quad (5)$$

Это точная формула для определения расчетного напора при заполнении формы с постоянным по высоте сечением. А выражение (4) нужно записать так:

$$v_{11} = \mu_{1-11(11)} \sqrt{2g / \alpha} \sqrt{H_p}. \quad (6)$$

По (5) находим, что $\sqrt{H_p} = 0,809103$ м^{1/2}. Коэффициенты $\zeta_{1-11(11)}$ и $\mu_{1-11(11)}$ – прежние. Расчетный напор при заполнении объема C из питателя I

$$\begin{aligned} \sqrt{H_p} &= \frac{\sqrt{H - H_0 - H_1} + \sqrt{H - H_0 - 2H_1}}{2} = \\ &= 0,731674 \text{ м}^{1/2}. \end{aligned}$$

Коэффициенты $\zeta_{1-11(11)}$ и $\mu_{1-11(11)}$ – прежние. Поступая аналогичным образом, определяем время заполнения объемов D и E из питателя I, а также заполнение формы при работе питателей II, III, IV или V. При работе питателя II в выражении (4) вместо « $H - H_0$ » должно быть « $H - H_0 - H_1$ », для питателя III – « $H - H_0 - 2H_1$ », для питателя IV – « $H - H_0 - 3H_1$ », для питателя V – « $H - H_0 - 4H_1$ ». Для питателя II в формуле (2) нужно заменить $l_{ст-1}$ на $l_{ст-1} + H_1$, для питателя III – на $l_{ст-1} + 2H_1$, для питателя IV – на $l_{ст-1} + 3H_1$, для питателя V – на $l_{ст-1} + 4H_1$. Расчетный напор находим по формуле (5) с соответствующими поправками. Результаты – в табл. 1.

Рассмотрим заполнение части формы A при работе питателей I и II. УБ для сечений $I-I$ чаши и $II-II$ питателя I:

$$H = H_0 + \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \alpha \frac{v_{ст}^2}{2g} + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_6^2}{2g} + \left(\zeta_{11} + \lambda \frac{l_{11}}{d_{11}} \right) \alpha \frac{v_{11}^2}{2g}. \quad (7)$$

УБ для сечений $I-I$ чаши и $II-II$ питателя II:

$$H = H_0 + H_1 + \left(\zeta_{ст} + \lambda \frac{l_{ст}}{d_{ст}} \right) \alpha \frac{v_{ст}^2}{2g} + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_6^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{H_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} \right) \alpha \frac{v_{12}^2}{2g}. \quad (8)$$

Таблица 1

Характеристики литниковой системы с одним работающим питателем

Работающий питатель, объем заполнения	Показатель			
	$\sqrt{H_p}, \text{ м}^{1/2}$	$v, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$t^*, \%$
I				
A	0,846	2,823	42,27 / 41,3	2,3
B	0,809	2,701	44,19 / 44,0	0,4
C	0,732	2,442	48,87 / 47,9	2,0
D	0,645	2,153	55,45 / 54,8	1,2
E	0,544	1,816	65,72 / 64,5	1,9
A – E			256,50 / 254,8	0,7
II				
A	0,772	2,560	46,62 / 45,0	2,5
B	0,772	2,560	46,62 / 45,5	2,7
C	0,732	2,425	49,21 / 48,1	2,3
D	0,645	2,138	55,83 / 54,9	1,7
E	0,544	1,803	66,18 / 65,5	1,0
A – E			264,46 / 258,3	2,4
III				
A	0,691	2,275	52,46 / 51,3	2,3
B	0,691	2,275	52,46 / 51,6	1,7
C	0,691	2,275	52,46 / 51,2	2,5
D	0,645	2,123	56,22 / 56,1	0,2
E	0,544	1,791	66,63 / 66,0	1,0
A – E			280,25 / 276,3	1,4
IV				
A	0,599	1,958	60,96 / 59,6	2,3
B	0,599	1,958	60,96 / 60,0	1,6
C	0,599	1,958	60,96 / 60,1	1,4
D	0,599	1,958	60,96 / 59,5	2,5
E	0,544	1,779	67,09 / 66,9	0,3
A – E			310,93 / 304,5	2,1
V				
A	0,489	1,590	75,08 / 73,7	1,9
B	0,489	1,590	75,08 / 73,9	1,6
C	0,489	1,590	75,08 / 74,0	1,5
D	0,489	1,590	75,08 / 73,6	2,0
E	0,489	1,590	75,08 / 73,7	1,9
A – E			375,40 / 368,9	1,8

Примечание: $\mu_{1-11(11)} = 0,790$, $\mu_{1-12(12)} = 0,785$, $\mu_{1-13(13)} = 0,780$, $\mu_{1-14(14)} = 0,774$, $\mu_{1-15(15)} = 0,769$.

Здесь v_7 – скорость металла в сечении 7–7, м/с. В выражениях (7) и (8) ζ_{11} – коэффициент сопротивления на ответвление части потока из сечения 6–6 коллектора в питатель I с выходным сечением 11–11; ζ_7 – коэффициент сопротивления на проход в коллекторе из сечения 6–6 в сечение 7–7 при ответвлении части потока в питатель I. Коэффициенты сопротивлений, обусловленных отделением потока из коллектора в питатель, будем подсчитывать по формулам для тройников [11, с. 112–115]. Коэффициент сопротивления на проход в коллекторе при ответвлении части потока в питатель

$$\zeta_{\text{пр}} = 0,4 \left(1 - v_{\text{пр}} / v_{\text{к}} \right)^2 / \left(v_{\text{пр}} / v_{\text{к}} \right)^2, \quad (9)$$

а коэффициент сопротивления на ответвление части потока в питатель

$$\zeta_{\text{отв}} = \left[1 + \tau \left(v_{\text{н}} / v_{\text{к}} \right)^2 \right] / \left(v_{\text{н}} / v_{\text{к}} \right)^2, \quad (10)$$

где $v_{\text{к}}$ и $v_{\text{пр}}$ – скорости металла в коллекторе до и после ответвления части потока в питатель, м/с; $v_{\text{н}}$ – скорость жидкости в питателе, м/с; τ – коэффициент. Для нашего случая при $S_{\text{п}} / S_{\text{к}} = 0,317$ $\tau = 0,15$ [12]. Коэффициент $\zeta_{\text{пр}}$ получается приведенным к скорости проходящего потока $v_{\text{пр}}$, а $\zeta_{\text{отв}}$ – к скорости в питателе $v_{\text{н}}$. Как видно, коэффициенты $\zeta_{\text{пр}}$ и $\zeta_{\text{отв}}$ зависят от отношений скоростей $v_{\text{пр}} / v_{\text{к}}$ и $v_{\text{н}} / v_{\text{к}}$, точнее, от v_7 / v_6 и v_{11} / v_6 , которые неизвестны.

Введём следующие обозначения: $x = v_{12} / v_{11}$, $w = v_7 / v_6$. Тогда $v_{12} = xv_{11}$, а $v_{11} = v_{12} / x$. Расход жидкости в системе $Q = v_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = (v_{11} + v_{12}) S_{\text{п}} = (v_{11} + xv_{11}) S_{\text{п}} = v_{11} (1 + x) S_{\text{п}} = v_{11} S_{\text{пр(11)}}$, где $S_{\text{пр(11)}} = (1 + x) S_{\text{п}}$ – приведенная к скорости v_{11} площадь питателей (учитывает работу обоих питателей). Аналогично записываем: $Q = (v_{11} + v_{12}) S_{\text{п}} = (v_{12} / x + v_{12}) S_{\text{п}} = v_{12} (1 / x + 1) S_{\text{п}} = v_{12} S_{\text{пр(12)}}$, где $S_{\text{пр(12)}} = (1 / x + 1) S_{\text{п}}$ – приведенная к скорости v_{12} площадь питателей. $Q = Q_{\text{ст}} = Q_5 = Q_6$. И $v_{\text{ст}} = v_{11} S_{\text{пр(11)}} / S_{\text{ст}} = v_{12} S_{\text{пр(12)}} / S_{\text{ст}}$, $v_5 = v_6 = v_{11} S_{\text{пр(11)}} / S_{\text{к}} = v_{12} S_{\text{пр(12)}} / S_{\text{к}}$. $v_7 = v_{12} S_{\text{п}} / S_{\text{к}}$. $w = v_7 / v_6 = v_{12} / (v_{11} + v_{12}) = v_{12} / (v_{12} / x + v_{12}) = 1 / (1 / x + 1)$.

Принимаем для начала расчета $x = v_{12} / v_{11} = 1$. При этом $w = 0,5$, $\zeta_7 = 0,4$, $\zeta_{11} = 0,552788$ (см. формулы (9) и (10)). Результа-

ты расчетов: $\zeta_{1-11(11)} = 1,126751$, $\mu_{1-11(11)} = 0,685712$, $v_{11} = 2,449625$ м/с, $\zeta_{1-12(12)} = 0,970667$, $\mu_{1-12(12)} = 0,712350$, $v_{12} = 2,323548$ м/с, $x = v_{12} / v_{11} = 0,948532$. Задаем $x = 0,948532$, повторяем расчет и получаем $x = 0,932912$. Путем подобных приближений определяем, что при $x = 0,925878$ по расчету $x = 0,9258778$, при этом $w = v_8 / v_7 = 0,480756$. На этом расчет x можно закончить, так как разница между заданной и полученной в результате расчета величиной составляет $2 \cdot 10^{-7}$. Время заполнения объема A из питателей I и II составляет 24,95 с.

При заполнении объема B из питателя II жидкость выливается при постоянном напоре $H - H_0 - H_1$, в питателе I напор уменьшается от $H - H_0$ до $H - H_0 - H_1$, а расчетный напор находим по формуле (6): $\sqrt{H_p} = 0,809103$ м^{1/2}. Скорость жидкости в питателе I определяем по формуле (15), а в питателе II – по следующему соотношению: $v_{11} = \mu_{1-12(12)} \sqrt{2g(H - H_0 - H_1) / \alpha}$. Нужно задаться величиной $x = v_{12} / v_{11}$. Для начала расчета возьмем $x = 1$ и получим в результате $x = 0,991637$. Путем последовательных приближений находим, что $x = 0,987815$. Время заполнения объема B из питателей I и II составляет 25,55 с.

Заполнение объема C из питателей I и II идет под одинаковым напором, изменяющимся от $H - H_0 - H_1$ до $H - H_0 - 2H_1$. Расчетный напор в этом случае $\sqrt{H_p} = 0,731674$ м^{1/2}. При заполнении объема D из питателей I и II расчетный напор изменяется от $H - H_0 - 2H_1$ до $H - H_0 - 3H_1$, для объема E расчетный напор изменяется от $H - H_0 - 3H_1$ до $H - H_0 - 4H_1$. Аналогично рассчитываем заполнение формы жидкостью из питателей I и III, I и IV, I и V, II и III, IV и V и др. Результаты расчетов и экспериментов заполнения формы из питателей I и II, I и V приведены в табл. 2 и 3. Также в табл. 4 приведены результаты расчетов и экспериментов.

Произведем расчет заполнения формы металлом из всех пяти питателей. При заполнении объема A УБ для питателя I уже записано – это выражение (7). Для питателя II в формуле (8) нужно заменить коэффициент сопротивления питателя $\zeta_{\text{н}}$ на коэффициент сопротивления ζ_{12} на ответвление части потока из сечения 7–7 коллектора в сечение 12–12 питателя II, величина которого подсчитывается по зависимости (10).

Таблица 2

Характеристики литниковой системы с питателями I и II

Показатель	Объем заполнения				
	A	B	C	D	E
$\zeta_{1-11(11)}$	1,068	1,117	1,174	1,174	1,174
$\mu_{1-11(11)}$	0,695	0,687	0,678	0,678	0,678
v_{11} , м/с	2,484	2,350	2,098	1,849	1,561
$\zeta_{1-12(12)}$	1,011	0,977	0,945	0,945	0,945
$\mu_{1-12(12)}$	0,705	0,711	0,717	0,717	0,717
v_{12} , м/с	2,300	2,322	2,218	1,955	1,651
Q , см ³ /с	306,42	299,21	276,38	243,66	205,67
v_{12} / v_{11}	0,926	0,988	1,057	1,057	1,057
t , с	$\frac{24,95}{24,0}$	$\frac{25,55}{25,6}$	$\frac{27,66}{27,0}$	$\frac{31,37}{31,6}$	$\frac{37,16}{37,0}$
t^* , %	4,0	-0,2	2,4	-0,7	0,4

Примечание: время заполнения формы – $\frac{146,69}{144,5}$,

$t^* = 1,5\%$.

Таблица 4

Характеристики литниковой системы с питателями I, III и V

Показатель	Объем заполнения				
	A	B	C	D	E
$\zeta_{1-11(11)}$	1,219	1,307	1,550	1,846	2,195
$\mu_{1-11(11)}$	0,671	0,658	0,626	0,593	0,559
v_{11} , м/с	2,398	2,251	1,937	1,616	1,288
$\zeta_{1-13(13)}$	1,418	1,381	1,302	1,353	1,626
$\mu_{1-13(13)}$	0,643	0,648	0,659	0,652	0,617
v_{13} , м/с	1,877	1,893	1,925	1,778	1,420
$\zeta_{1-15(15)}$	5,889	5,184	4,130	2,935	1,930
$\mu_{1-15(15)}$	0,381	0,402	0,442	0,504	0,584
v_{15} , м/с	0,787	0,833	0,914	1,044	1,210
Q , см ³ /с	324,18	318,77	305,92	284,24	250,92
v_{13} / v_{11}	0,783	0,841	0,994	1,100	1,103
v_{15} / v_{11}	0,328	0,370	0,472	0,646	0,940
t , с	$\frac{23,58}{22,8}$	$\frac{23,98}{24,2}$	$\frac{24,99}{24,7}$	$\frac{26,89}{26,4}$	$\frac{30,46}{29,9}$
t^* , %	3,4	-0,9	1,2	1,9	1,9

Примечание: время заполнения формы – $\frac{129,90}{129,0}$,

$t^* = 0,7\%$.

Таблица 3

Характеристики литниковой системы с питателями I и V

Показатель	Объем заполнения				
	A	B	C	D	E
$\zeta_{1-11(11)}$	0,744	0,765	0,817	0,896	1,036
$\mu_{1-11(11)}$	0,757	0,753	0,742	0,726	0,701
v_{11} , м/с	2,707	2,574	2,295	1,980	1,613
$\zeta_{1-15(15)}$	1,831	1,706	1,483	1,285	1,104
$\mu_{1-15(15)}$	0,594	0,608	0,635	0,662	0,689
v_{15} , м/с	1,231	1,259	1,314	1,370	1,428
Q , см ³ /с	252,18	245,49	231,13	214,58	194,74
v_{15} / v_{11}	0,455	0,489	0,573	0,692	0,885
t , с	$\frac{30,31}{30,1}$	$\frac{31,14}{31,4}$	$\frac{33,07}{33,8}$	$\frac{35,62}{35,3}$	$\frac{39,25}{39,7}$
t^* , %	0,7	-0,8	-2,2	0,9	-1,1

Примечание: время заполнения формы – $\frac{169,39}{168,5}$,

$t^* = 0,5\%$.

Для питателя III УБ запишется так:

$$H = H_0 + 2H_1 + \left(\zeta_{cr} + \lambda \frac{l_{cr}}{d_{cr}} \right) \alpha \frac{v_{cr}^2}{2g} + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_6^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{H_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{H_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g} + \left(\zeta_{13} + \lambda \frac{l_n}{d_n} \right) \alpha \frac{v_{13}^2}{2g}. \quad (11)$$

УБ для питателя IV:

$$H = H_0 + 3H_1 + \left(\zeta_{cr} + \lambda \frac{l_{cr}}{d_{cr}} \right) \alpha \frac{v_{cr}^2}{2g} + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_6^2}{2g} + \left(\zeta_7 + \lambda \frac{H_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{H_1}{d} \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g} + \left(\zeta_9 + \lambda \frac{H_1}{d} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \left(\zeta_{14} + \lambda \frac{l_n}{d_n} \right) \alpha \frac{v_{14}^2}{2g}. \quad (12)$$

УБ для питателя V:

$$\begin{aligned}
 H = H_0 + 4H_1 + & \left(\zeta_{cr} + \lambda \frac{l_{cr}}{d_{cr}} \right) \alpha \frac{v_{cr}^2}{2g} + \\
 + & \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \alpha \frac{v_5^2}{2g} + \left(\zeta_k + \lambda \frac{l_k}{d_k} \right) \alpha \frac{v_6^2}{2g} + \\
 + & \left(\zeta_7 + \lambda \frac{H_1}{d_k} \right) \alpha \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \lambda \frac{H_1}{d} \right) \alpha \frac{v_8^2}{2g} + \\
 + & \left(\zeta_9 + \lambda \frac{H_1}{d} \right) \alpha \frac{v_9^2}{2g} + \left(\zeta_{10} + \lambda \frac{H_1}{d} \right) \alpha \frac{v_{10}^2}{2g} + \\
 + & \left(\zeta_n + \lambda \frac{l_n}{d_n} \right) \alpha \frac{v_{15}^2}{2g}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Здесь ζ_8 , ζ_9 и ζ_{10} – коэффициенты сопротивлений на проход в коллекторе из сечения 7–7 в сечение 8–8, из сечения 8–8 в сечение 9–9, из сечения 9–9 в сечение 10–10; ζ_{13} , ζ_{14} и ζ_{15} – коэффициенты сопротивлений на ответвление части потока из коллектора в питатели с сечениями 13–13, 14–14 и 15–15; v_8 , v_9 , v_{10} , v_{13} , v_{14} , v_{15} – скорости жидкости в сечениях 8–8, 9–9, 10–10, 13–13, 14–14 и 15–15, м/с.

Введём следующие обозначения: $x_1 = v_{12} / v_{11}$, $x_2 = v_{13} / v_{11}$, $x_3 = v_{14} / v_{11}$, $x_4 = v_{15} / v_{11}$, $w_1 = v_7 / v_6$, $w_2 = v_8 / v_7$, $w_3 = v_9 / v_8$, $w_4 = v_{10} / v_9$. Расход жидкости в системе $Q = (v_{11} + v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n$. Приведенные площади питателей будут такими:

$$\begin{aligned}
 S_{np(11)} &= (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4)S_n, \\
 S_{np(12)} &= (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_1 S_n, \\
 S_{np(13)} &= (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_2 S_n, \\
 S_{np(14)} &= (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_3 S_n, \\
 S_{np(15)} &= (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_4 S_n.
 \end{aligned}$$

Скорость v_7 через скорости v_{12} , v_{13} , v_{14} или v_{15} запишется так:

$$\begin{aligned}
 v_7 &= (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (v_{12} + x_2 / x_1 v_{12} + x_3 / x_1 v_{12} + x_4 / x_1 v_{12})S_n / S_k = \\
 &= v_{12}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_1 S_n / S_k, \\
 v_7 &= (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (x_1 / x_2 v_{13} + v_{13} + x_3 / x_2 v_{13} + x_4 / x_2 v_{13})S_n / S_k = \\
 &= v_{13}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_2 S_n / S_k, \\
 v_7 &= (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (x_1 / x_3 v_{14} + x_2 / x_3 v_{14} + v_{14} + x_4 / x_3 v_{14})S_n / S_k = \\
 &= v_{14}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_3 S_n / S_k,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_7 &= (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (x_1 / x_4 v_{15} + x_2 / x_4 v_{15} + x_3 / x_4 v_{15} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= v_{15}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / x_4 S_n / S_k.
 \end{aligned}$$

Скорость v_8 через скорости v_{13} , v_{14} или v_{15} :

$$\begin{aligned}
 v_8 &= (v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (v_{13} + x_3 / x_2 v_{13} + x_4 / x_2 v_{13})S_n / S_k = \\
 &= v_{13}(x_2 + x_3 + x_4) / x_2 S_n / S_k, \\
 v_8 &= (v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (x_2 / x_3 v_{14} + v_{14} + x_4 / x_3 v_{14})S_n / S_k = \\
 &= v_{14}(x_2 + x_3 + x_4) / x_3 S_n / S_k, \\
 v_8 &= (v_{13} + v_{14} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= (x_2 / x_4 v_{15} + x_3 / x_4 v_{15} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= v_{15}(x_2 + x_3 + x_4) / x_4 S_n / S_k.
 \end{aligned}$$

Скорость v_9 через скорости v_{14} или v_{15} :

$$\begin{aligned}
 v_9 &= (v_{14} + v_{15})S_n / S_k = (v_{14} + x_4 / x_3 v_{14})S_n / S_k = \\
 &= v_{14}(x_3 + x_4) / x_3 S_n / S_k, \\
 v_9 &= (v_{14} + v_{15})S_n / S_k = (x_3 / x_4 v_{15} + v_{15})S_n / S_k = \\
 &= v_{15}(x_3 + x_4) / x_4 S_n / S_k.
 \end{aligned}$$

Скорость $v_{10} = v_{15}S_n / S_k$.

Также имеем следующие отношения скоростей:

$$\begin{aligned}
 w_1 = v_7 / v_6 &= (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15}) / (v_{11} + v_{12} + v_{13} + \\
 &+ v_{14} + v_{15}) = (x_1 v_{11} + x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) / (v_{11} + \\
 &+ x_1 v_{11} + x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = \\
 &= (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{11} S_n / v_6 S_k &= v_{11} S_n / (v_{11} + v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15}) S_n = \\
 &= v_{11} / (v_{11} + x_1 v_{11} + x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = \\
 &= 1 / (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{11} / v_6 &= S_k / S_n / (1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4); \\
 w_2 = v_8 / v_7 &= (v_{13} + v_{14} + v_{15}) / (v_{12} + v_{13} + \\
 &+ v_{14} + v_{15}) = (x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) / (x_1 v_{11} + \\
 &+ x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = \\
 &= (x_2 + x_3 + x_4) / (x_1 + x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{12} S_n / v_7 S_k &= v_{12} S_n / (v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15}) S_n = \\
 &= x_1 v_{11} / (x_1 v_{11} + x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = \\
 &= x_1 / (x_1 + x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{12} / v_7 &= S_k / S_n x_1 / (x_1 + x_2 + x_3 + x_4); \\
 w_3 = v_9 / v_8 &= (v_{14} + v_{15}) / (v_{13} + v_{14} + v_{15}) = \\
 &= (x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) / (x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = \\
 &= (x_3 + x_4) / (x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{13} S_n / v_8 S_k &= v_{13} S_n / (v_{13} + v_{14} + v_{15}) S_n = \\
 &= x_2 v_{11} / (x_2 v_{11} + x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = x_2 / (x_2 + x_3 + x_4), \\
 v_{13} / v_8 &= S_k / S_n x_2 / (x_2 + x_3 + x_4);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_4 &= v_{10} / v_9 = v_{15} / (v_{14} + v_{15}) = \\
 &= x_4 v_{11} / (x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = x_4 / (x_3 + x_4), \\
 v_{14} S_{\Pi} / v_9 S_{\kappa} &= v_{14} S_{\Pi} / (v_{14} + v_{15}) S_{\Pi} = \\
 &= x_3 v_{11} / (x_3 v_{11} + x_4 v_{11}) = x_3 / (x_3 + x_4), \\
 v_{14} / v_9 &= S_{\kappa} / S_{\Pi} x_3 / (x_3 + x_4).
 \end{aligned}$$

Таблица 5

Характеристики литниковой системы с питателями I–V

Показатель	Объём заполнения				
	A	B	C	D	E
$\zeta_{1-11(11)}$	2,459	2,832	3,808	5,773	8,314
$\mu_{1-11(11)}$	0,538	0,511	0,456	0,384	0,328
v_{11} , м/с	1,921	1,747	1,411	1,048	0,754
$\zeta_{1-12(12)}$	2,328	2,279	2,538	3,879	5,752
$\mu_{1-12(12)}$	0,548	0,552	0,532	0,453	0,385
v_{12} , м/с	1,788	1,803	1,644	1,235	0,886
$\zeta_{1-13(13)}$	2,681	2,574	2,264	2,680	3,918
$\mu_{1-13(13)}$	0,521	0,529	0,553	0,521	0,451
v_{13} , м/с	1,521	1,545	1,617	1,421	1,038
$\zeta_{1-14(14)}$	5,244	4,756	3,619	2,862	2,835
$\mu_{1-14(14)}$	0,400	0,417	0,465	0,509	0,511
v_{14} , м/с	1,012	1,055	1,178	1,289	1,175
$\zeta_{1-15(15)}$	∞	∞	∞	21,213	4,541
$\mu_{1-15(15)}$	0	0	0	0,212	0,425
v_{15} , м/с	0	0	0	0,439	0,880
Q , см ³ /с	399,75	393,89	374,66	347,86	303,12
v_{12} / v_{11}	0,931	1,032	1,166	1,178	1,174
v_{13} / v_{11}	0,792	0,885	1,146	1,357	1,376
v_{14} / v_{11}	0,527	0,604	0,835	1,230	1,558
v_{15} / v_{11}	0	0	0	0,419	1,167
t , с	18,98	19,26	20,25	21,81	25,03
	19,1	19,7	20,6	22,3	25,4
t^* , %	-0,6	-2,2	-1,7	-2,2	-1,6

Примечание: время заполнения формы – $\frac{105,85}{106,6}$,

$$t^* = -0,7\%.$$

Используя эти соотношения, преобразуем формулы (7), (8), (11)–(13) так, чтобы в них осталось одно неизвестное – скорость v_{11} , v_{12} , v_{13} , v_{14} или v_{15} . Получается по одному уравнению с одним неизвестным. А коэффициенты x_1 , x_2 , x_3 и x_4 находим методом последовательных приближений.

Задаемся для начала расчета $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 1$, при этом $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0,5$, $\zeta_7 = \zeta_8 = \zeta_9 = \zeta_{10} = 0,4$, $\zeta_{11} = \zeta_{12} = \zeta_{13} = \zeta_{14} = 0,552788$, см. формулы (9) и (10). Результаты расчетов заполнения объема A: $x_1 = v_{12} / v_{11} = 0,821748$, $x_2 = v_{13} / v_{11} = 0,698826$, $x_3 = v_{14} / v_{11} = 0,592928$, $x_4 = v_{15} / v_{11} = 0,490957$. Задаемся найденными значениями x_1 , x_2 , x_3 , x_4 и повторяем расчет. Путем последовательных приближений определяем, что $x_1 = 0,930930$, $x_2 = 0,791971$, $x_3 = 0,526842$, $x_4 = 0$, а время заполнения объема A из питателей I – V составляет 18,98 с.

Объем B заполняется при постоянных напорах в питателях II, III, IV и V, а в питателе I напор изменяется от $H - H_0$ до $H - H_0 - H_1$. При заполнении объема C напор в питателях I и II изменяется от $H - H_0 - H_1$ до $H - H_0 - 2H_1$, в питателях III, IV и V напоры постоянны. Аналогично производим расчет заполнения остальных объемов формы. Результаты – в табл. 5.

Результаты исследований и их обсуждение

Опытные значения времени заполнения формы отличаются от расчетных на величину от -2,2 до +4,0 %. Отличия небольшие, и какие-то выводы о влиянии количества работающих питателей и их расположения по высоте на заполнение формы делать не следует. Заметим только, что при работе одного питателя (см. табл. 1) теоретические значения больше экспериментальных, а при работе всех пяти питателей (см. табл. 5) – меньше.

Когда в системе работает только один питатель, то коэффициент расхода один и тот же и при сливе жидкости сверху вниз в форму, и при заполнении формы под затопленный уровень. Например, при работе питателя I этот коэффициент равен 0,790 при сливе сверху и при заполнении под уровень объемов B, C, D и E.

Если питателей в ЛС больше одного, то по мере подъема уровня жидкости в форме уменьшается коэффициент расхода в нижних питателях и увеличивается в верхних. Например, в системе из питателей I–V при заполнении объема A при сливе сверху $\mu_{1-11(11)} = 0,538$, $\mu_{1-12(12)} = 0,548$, $\mu_{1-13(13)} = 0,521$, $\mu_{1-14(14)} = 0,400$, $\mu_{1-15(15)} = 0$; при заполнении объема B (под уровень) – соответственно 0,511, 0,552, 0,529, 0,417 и 0; для объема C – 0,456, 0,532, 0,553, 0,465 и 0; для объема D – 0,384, 0,453, 0,521, 0,509 и 0,212; для объема E – 0,328, 0,385, 0,451, 0,511 и 0,425. Причем коэффициент расхода

у питателя I уменьшился в 1,64 раза, у питателя V – увеличился с 0 до 0,425. То есть коэффициент расхода у питателя I уменьшается медленнее, чем растет коэффициент расхода у питателя V.

В расчетах учитываются, кроме двух обычных гидравлических потерь – на трение по длине и в местных сопротивлениях, – потери на изменение напора (на ответвление части потока из коллектора в питатель и на проход из одного сечения коллектора в другое при ответвлении части потока в питатель), подсчитываемые по соотношениям (9) и (10). Суммирование потерь на изменение напора с потерями на трение по длине и в местных сопротивлениях теоретически не обосновано. Однако пока не получено экспериментальных данных, противоречащих данному допущению.

Как видно, заполнение формы жидкостью под затопленный уровень через питатели ярусной ЛС, расположенные на разной высоте, поддается расчету. До затопления отверстия питателя поднимающейся в форме жидкостью истечение из питателя происходит при постоянном напоре, а после затопления истечение идет при переменном напоре, величина которого подсчитывается по формуле для расчетного напора. Для каждого объема между питателями находится свой расчетный напор, а отношения между скоростями в питателях при заполнении этого объема определяются методом последовательных приближений. Причем эти отношения по мере перехода от одного объема жидкости к другому увеличиваются. И при заполнении объема D в ЛС I–V скорости в питателях II и III больше скорости в питателе I в 1,18 и 1,36 раза соответственно. А при заполнении объема E скорость в питателе IV больше скорости в питателе I в 1,56 раза. Хотя питатели II, III и IV расположены соответственно на 119, 238 и 357 мм выше питателя I.

В многопитательной ЛС по мере подъема уровня жидкости в форме изменяются сопротивление на ответвление части потока из вертикального стояка в форму и на проход из сечения в сечение в этом стояке. Для системы из питателей I–V $\zeta_{11} = 1,215$ при сливе сверху в объем A , $\zeta_{11} = 1,398, 1,882, 2,856$ и $4,116$ соответственно при заполнении объемов B, C, D и E . А на проход из сечения $6-6$ в сечение $7-7$ сопротивление падает: $\zeta_7 = 0,079$ – при сливе сверху, $\zeta_7 = 0,063, 0,040, 0,023$ и $0,014$ – при заполнении объемов B, C, D и E .

По-видимому, это объясняется следующим образом. При заполнении объема B жидкость из питателя I поступает под слой жидкости (высота которого все время увеличивается), а скорость па-

дает до 0. При переходе из сечения $6-6$ в сечение $7-7$ в стояке скорость жидкости не имеет такого резкого торможения, не уменьшается до 0, сопротивление этого перехода ниже и к тому же уменьшается по мере подъема уровня жидкости в форме. В итоге коэффициенты расхода питателей значительно меняются.

Для исследования этого эффекта были проведены следующие опыты (см. рис. 2). Определялся расход из питателя IV при заполнении объема E в случае работы всех пяти питателей. Время заполнения объема D определялось от момента достижения жидкостью продольной оси питателя IV до продольной оси питателя V. Получилось v_{14} в 1,5 раза больше v_{11} . Хотя сама методика не дает 100%-ного определения расхода из питателя IV, не совсем точна. Но экспериментальный результат говорит о правильности полученной вычислением, казалось бы, неправдоподобной величины отношения $v_{14} / v_{11} = 1,56$.

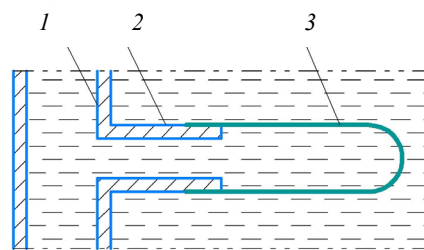


Рис. 2. Определение расхода жидкости из питателя:
1 – вертикальный коллектор, 2 – питатель (питатель IV),
3 – полиэтиленовый пакет

Когда в системе работает один питатель, его коэффициент не меняется при повышении уровня жидкости в форме. Если питателей больше одного, то коэффициенты расхода изменяются: уменьшаются в нижних питателях и растут в верхних. Это «плата» за то, что мы используем уравнение Бернулли для расчета многопитательных ЛС, хотя оно выведено для однопитательной системы.

Так о чем же речь? Дело в том, что когда в ЛС больше одного питателя, то использование УБ считается недопустимым. Например, в виде (7) и (8) при работе питателей I и II. И, естественно, ЛС не рассчитываются, идет использование экспериментальных данных, коэффициенты расхода не определяются. За последние более чем 50 лет положение дел не изменилось, см., например, работы [20–26]. Конечно, УБ выведено для потока с постоянным расходом [27], т.е. для ЛС с одним питателем. Однако тысячи опытов на воде и алюминиевом сплаве [2; 3; 5; 9; 10; 19; 28–32] говорят о возможности использования УБ для расчета многопитательных ЛС. Мало того, что при расчете

ярусной ЛС изменяются при заполнении под уровень коэффициенты расхода, так еще находится усредненное время заполнения участка формы, и оно соответствует экспериментальным данным. Также мы учитываем деление и слияние потоков жидкости, что в УБ, разумеется, не предполагается. Для каждого питателя составляется свое УБ, а в ЛС столько же коэффициентов расхода, сколько в ней питателей. Задача решается методом последовательных приближений, причем обычно достаточно 5–8 шагов.

Заключение

Таким образом, впервые удалось рассчитать заполнение формы металлом под затопленный уровень через ярусную литниковую систему и проверить расчеты экспериментально. Рассчитывается по отдельности заполнение каждого объема формы между питателями. Изменяются по мере подъема уровня металла в форме коэффициенты сопротивлений, коэффициенты расхода всех работающих питателей и скорости истечения жидкости из питателей. Однако использование расчетного напора и метода последовательных приближений при подсчете отношений скоростей позволило рассчитывать заполнение участков формы между питателями и всей формы даже для такой сложной системы, как ярусная, в которой питатели расположены на разной высоте в форме. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных.

Библиографический список

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. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of cross gating system // Science and Education: materials of the III international research and practice conference. – Munich: Vela Verlag, 2013. – Vol. I. – P. 194–205.
4. Расчет ярусной литниковой системы: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614535 от 21.05.2012 / В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомяжков, К.В. Шаров // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – 2012. – № 3. – С. 345–346.
5. Теоретическое и экспериментальное исследование ярусной литниковой системы / В.И. Васенин, А.В. Богомяжков, И.Р. Исламов, К.В. Шаров // Master's Journal (Пермь). – 2013. – № 1. – С. 42–73.
6. Пат. РФ на полезную модель № 116237 от 11.01.2012. Стенд для исследования литниковых систем / Васенин В.И., Богомяжков А.В., Шаров К.В. // Изобретения. Полезные модели. – 2012. – № 14. – С. 137.

7. Пат. РФ на полезную модель № 114894 от 5.12.2011 “Стенд для исследования литниковых систем” / Васенин В.И., Богомяжков А.В., Шаров К.В. // Изобретения. Полезные модели. – 2012. – № 11. – С. 49.
8. Пат. РФ на полезную модель № 168840 от 2.02.2016. Стенд для исследования кольцевых литниковых систем / Васенин В.И., Богомяжков А.В., Гладких Я.А., Шаров К.В. // Изобретения. Полезные модели. – 2017. – № 6. – С. 282.
9. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V. Investigation of the operation of a ring-shaped gating system // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2016. – № 9–10. – P. 18–28.
10. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V. Investigation of the work of the double-ring-shaped gating system with central sprue // Eastern European Scientific Journal. – 2018. – № 1. – P. 138–160.
11. Меерович И.Г., Мучник Г.Ф. Гидродинамика коллекторных систем. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
12. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – М.: Бастет, 2008. – 672 с.
13. 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.
14. Calculation of amount of flow in gating systems for some automotive castings / Jonekura Koji [et al.] // The Journal of the Japan Foundrymen's Society. – 1988. – Vol. 60. – № 8. – P. 326–331.
15. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
16. Исследование местных сопротивлений литниковой системы / В.И. Васенин, Д.В. Васенин, А.В. Богомяжков, К.В. Шаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 46–53.
17. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
18. Васенин В.И., Голубцов С.А. Определение напора и суммарной площади питателей литниковой системы // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2007. – № 3 (10). – С. 76–81.
19. Васенин В.И., Богомяжков А.В., Шаров К.В. Исследования L-образных литниковых систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 108–122.
20. Василевский П.Ф., Быков М.А. Вертикально-целиевые литниковые системы в производстве стальных отливок // Литейное производство. – 1967. – № 5. – С. 4–5.
21. Рабинович Б.В., Наджафов Т.А. Моделирование как метод разработки рациональных конструкций литниковых систем // Литейное производство. – 1969. – № 7. – С. 22–27.
22. Bradley F.J., Heinemann S. A hydraulics-based/optimization methodology for gating design // Applied mathematical modelling. – 1993. – Vol. 17, № 3. – P. 406–414.

23. Sutton T.L. The casting filling process // Foundryman. – 2002. – № 10. – P. 347–354.

24. Renucananda K.H., Chavan A., Ravi B. Flow rates in multi-gate systems: experimental and simulation studies // Indian foundry journal. – 2012. – Vol. 58, № 4. – P. 1–13.

25. Сравнительный анализ различных способов подвода металла в форму для условий скоростной заливки / А.В. Дудченко, Н.И. Тарасевич, И.Н. Примак, В.М. Щеглов // Процессы литья. – 2014. – № 2. – С. 21–33.

26. К методике расчета ярусных литниковых систем / А.Ю. Коротченко, А.Ю. Куцай, М.В. Тверской, Д.Э. Хилков // Литейное производство. – 2016. – № 5. – С. 18–22.

27. Bernoulli D. Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii. – Strassburg, 1738. – 552 p.

28. Васенин В.И., Ковалев Ю.Г. Экспериментальное исследование кондукционного МГД-насоса постоянного тока // Магнитная гидродинамика. – 1984. – № 3. – С. 142–143.

29. Васенин В.И. Исследование заполнения литейных форм с разными гидравлическими сопротивлениями расплавленным алюминием под давлением кондукционного МГД-насоса // Магнитная гидродинамика. – 1986. – № 2. – С. 142–144.

30. Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Определение величины напора в потоке жидкого металла в коллекторе литниковой системы // Литейное производство. – 2015. – № 8. – С. 16–17.

31. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of the mould filling with metal through the ringshaped gating system // 8th International Scientific and Practical Conference “Science and Society”. – London: Scieuro, 2016. – P. 20–25.

32. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of the mould filling with metal through the step gating system // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2016. – № 3–4. – P. 32–34.

References

- Vasenin V.I. Osobennosti rascheta rashoda metalla v litnikovyyh sistemah [Features of the calculation flow of metal in the runner system]. *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenii. Mashinostroenie*, 1988, no. 1, pp. 103–106.
- Vasenin V.I. Raschet rashoda metalla v razvetvliionnoi litnikovoi sisteme [The calculation of the metal in the runner system branched]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2007, no. 4, pp. 5–8.
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of cross gating system. *Science and Education: materials of the III international research and practice conference*, vol. I. Munich: Vela Verlag, 2013, pp. 194–205.
- Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii programmy dlia EVM № 2012614535 ot 21.05.2012 Raschet iarusnoi litnikovoi sistemy [The calculation of the step gating system]. *Programmy dlia EVM. Bazy dannyh. Topologii integral'nyh mikroshem*, 2012, no. 3, pp. 345–346.
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Islamov I.P., Sharov K.V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie iarusnoi litnikovoi sistemy [Theoretical and experimental investigation into a step gating system]. *Master's Journal (Perm)*. 2013, no. 1, pp. 42–73. URL: <http://vestnik.pstu.ru/mj/about/inf/>
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Stend dlia issledovaniia litnikovyyh sistem [Stand for investigation of the gating systems]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 116237 (2012).
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Stend dlia issledovaniia litnikovyyh sistem [Stand for investigation of gating systems]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 114894 (2011).
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Gladkich Ya.A., Sharov K.V. Stend dlia issledovaniia kol'cevyyh litnikovyyh sistem [Stand for investigation of the ring gating systems]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 168840 (2016).
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V. Investigation of the operation of a ring-shaped gating system. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2016, no. 9–10, pp. 18–28.
- Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V. Investigation of the work of the double-ring-shaped gating system with central sprue. *Eastern European Scientific Journal*, 2018, no. 1, pp. 138–160.
- Meerovich I.G., Muchnik G.F. Hidrodinamika kollektornyh sistem [Hydrodynamics of collecting systems]. Moscow: Nauka, 1986, 144 p.
- Chugaev R.R. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow: Batstet, 2008, 672 p.
- Tokarev J.V. K voprosu o gidravlicheskom soprotivlenii otdel'nyh elementov nezamknutyh litnikovyyh sistem [On the hydraulic resistance of the individual elements of unclosed gating systems]. *Uluchshenie tehnologii izgotovleniia otlivok. Sverdlovsk: Izdatel'stvo UPI*, 1966, pp. 32–40.
- Jonekura K. et al. Calculation of amount of flow in gating systems for some automotive castings // *The Journal of the Japan Foundrymen's Society*, 1988, vol. 60, no. 8, pp. 326–331.
- Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p.
- Vasenin B.I., Vasenin D.V., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Issledovanie mestnyh soprotivlenii litnikovoi sistemy [Research of the local resistances in the gating system]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 46–53.
- Shterenliht D.V. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow, Energoatomizdat, 1984, 640 p.
- Vasenin V.I., Golubcov S.A. Opredelenie napora i summarnoi ploshadi pitatelei litnikovoi sistemy [Determination of the head and summary area feeders of the gating system]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2007, no. 3(10), pp. 76–81.
- Vasenin B.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Issledovaniia L-obraznyh litnikovovyh sistem [Research of L-shaped gating systems]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 108–112.

20. Vasilevskii P.F., Bykov M.A. Vertikal'no-shelevye litnikovye sistemy v proizvodstve stal'nykh otlivok [Vertical-slot gating systems in the production of steel castings]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1967, no. 5, pp. 4–5.
21. Rabinovich B.V., Nadzhafov T.A. Modelirovanie kak metod razrabotki razional'nykh konstruktsii litnikovyykh sistem [Modeling as a method of developing rational designs of gate systems]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1969, no. 7, pp. 22–27.
22. Bradley F.J., Heinemann S. A hydraulics-based/optimization methodology for gating design. *Applied mathematical modelling*, 1993, vol. 17, no. 3, pp. 406–414.
23. Sutton T.L. The casting filling process. *Foundryman*. 2002, no. 10, pp. 347–354.
24. Renucananda K.H., Chavan A., Ravi B. Flow rates in multi-gate systems: experimental and simulation studies. *Indian foundry journal*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 1–13.
25. Dudchenko A.V., Tarasevich N.I., Primak I.N., Sheglov V.M. Sravnitel'nyi analiz razlichnykh sposobov podvoda metalla v formu [Comparative analysis of various methods of metal supply to the mould for high-speed pouring conditions]. *Processi litia*, 2014, no. 2, pp. 21–33.
26. Korotchenko A.Iu., Kuzaia A.Iu., Tverskoi M.V., Xilkov D.E. K metodike rascheta iarusnykh litnikovyykh sistem [On the methods of designing tier gating systems]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2016, no. 5, pp. 18–22.
27. Bernoulli D. *Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*. Strassburg, 1738, 552 p.
28. Vasenin V.I., Kovaliov Iu.G. Eksperimental'noe issledovanie kondukcionnogo MGD-nasosa [Experimental study of conductive MHD pump]. *Magnitnaia gidrodinamika*, 1984, № 3, p. 142–143.
29. Vasenin V.I. Issledovanie zapolneniia liteinykh form s raznymi gidravlicheskimy soprotivleniiami rasplavlennym aliuminiem pod davleniem kondukcionnogo MGD-nasosa [Investigation of filling molds with different hydraulic resistances with molten aluminum under the pressure of a conductive MHD pump]. *Magnitnaia gidrodinamika*, 1986, № 2, p. 142–144.
30. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Opredelenie velichiny napora v potoke zhidkogo metalla v kollektore litnikovoi sistemy [Measurement of head in flow liquid metal in the collector of the gating system]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2015, no. 8, pp. 16–17.
31. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of the mould filling with metal through the ringshaped gating system. *8th International Scientific and Practical Conference "Science and Society"*. London: *Sciouro*, 2016, pp. 20–25.
32. Vasenin V.I., Bogomyagkov A.V., Sharov K.V. Research of the mould filling with metal through the step gating system. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2016, no. 3–4, pp. 32–34.

Поступила: 06.11.2022

Одобрена: 09.02.2023

Принята к публикации: 15.02.2023

Об авторах

Васенин Валерий Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru).

Богомягков Алексей Васильевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bogomyagkovav@yandex.ru).

Шаров Константин Владимирович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ksharov@yandex.ru).

About the authors

Valeriy I. Vasenin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Engineer, Department “Innovation Technologies of Engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vaseninvaleriy@mail.ru).

Aleksei V. Bogomiagkov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Innovation Technologies of Engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bogomyagkovav@yandex.ru).

Konstantin V. Sharov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Innovation Technologies of Engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ksharov@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.