

### ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА СКОРОСТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТИПА «ВЕРТУШКА»\*

С. Д. СМИРЯГИН, В. П. ШУК

(Представлена проф. Ю. Н. Соколовым)

В настоящее время скоростные расходомеры с преобразователями типа „вертушка“ нашли широкое распространение для измерения скорости (расхода) различных жидкостей в разнообразных условиях. В связи с этим возникает необходимость разработки методики расчета конструктивных параметров, которыми определяются рациональные габариты и заданный режим работы преобразователей.

Связь между скоростью потока  $v$ , угловой скоростью вращения преобразователя  $\omega$ , его конструктивными параметрами, параметрами потока и трением в опорах определяется приближенно уравнением статической характеристики [1]

$$v = \omega \left( \sqrt{\frac{a_1 + ab_1 + a^2c_1}{a_2 + aa_3 + a^2a_4}} + \frac{af_2 - f_1}{f_3 - af_4} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, обусловленный проявлением вязкости жидкости, остальные коэффициенты определяются функциями

$$F(L, z, d_{ст}, d_n, H_r, f); \quad (2)$$

здесь  $L$  — длина лопасти,  $z$  — число лопастей,  $d_{ст}$  — диаметр ступицы,  $d_n$  — наружный диаметр,  $H_r$  — геометрический шаг,  $f$  — коэффициент сопротивления трения в опорах преобразователя.

Уравнение (1) свидетельствует о том, что работа преобразователя зависит от физических свойств измеряемой жидкости. Использование же этого уравнения для точного расчета преобразователей невозможно из-за отсутствия числовых данных о коэффициенте сопротивления  $\alpha$  для различных чисел Рейнольдса и коэффициенте трения  $f$  для жидкостей с различной вязкостью. Однако уравнение (1) указывает на возможности разработки методики приближенного расчета преобразователей.

\*) Исследование проведено на кафедре теплового контроля и автоматики Московского энергетического института.

Выясним, при каких условиях уравнение (1) будет численно одинаково для различных преобразователей. Это возможно, когда

$$\sqrt{\frac{a_1 + \alpha b_1 + \alpha^2 c_1}{a_2 + \alpha a_3 + \alpha^2 a_4}} + \frac{\alpha f_2 - f_1}{f_3 - \alpha f_4} = \text{idem.} \quad (3)$$

Для выполнения равенства (3) необходимо

$$F(L, z, d_{\text{ст}}, d_{\text{н}}, H_{\Gamma}, f) = \text{idem.} \quad (4)$$

Очевидно, что уравнение (4) будет иметь место при равенстве аргументов. Поскольку  $L, z, d_{\text{ст}}, d_{\text{н}}, H_{\Gamma}$  — геометрические параметры, то в относительных единицах они будут численно одинаковы для всех геометрически подобных преобразователей.

Коэффициент  $f$  зависит от качества соприкасающихся поверхностей, рода смазки и т. д., и при выполнении определенных условий можно обеспечить его постоянство.

Следовательно, у геометрически подобных преобразователей будет справедливо равенство (4).

В (3) коэффициент  $\alpha$  является безразмерным коэффициентом сопротивления, зависящим от характера потока и конструкции преобразователя. Очевидным является стремление сконструировать преобразователь так, чтобы потери напора на нем были незначительны. При этом в случае стационарного обтекания лопастей преобразователя потоком жидкости полное сопротивление практически определяется сопротивлением трения. В работе [2] для подобных условий получена функция

$$\alpha = F_1(\text{Re}, N_{ji}), \quad (6)$$

указывающая, что коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса  $\text{Re}$  и чисел турбулентности  $N_{ji}$ .

Из (6) следует, что при  $\text{Re} = \text{idem}$ ,  $N_{ji} = \text{idem}$  также  $\alpha = \text{idem}$ .

Число  $\text{Re}$ , входящее в (6), определяется известным соотношением. Трудности возникают при определении чисел  $N_{ji}$ . Однако опыты показывают, что с ростом  $\text{Re}$  влияние  $N_{ji}$  на  $\alpha$  уменьшается. Поэтому для турбулентного потока с приближением можно принять

$$\alpha = F_1'(\text{Re}). \quad (7)$$

В теории подобия доказывается, что для получения  $\text{Re} = \text{idem}$  необходимо и достаточно соблюдение механического подобия, которое определяется геометрическим, кинематическим и силовым подобием потоков. Многочисленные опыты показывают [3], что в турбулентных потоках тщательное соблюдение геометрического подобия конструкции в целом и относительной шероховатости поверхности лопастей, в частности, автоматически обеспечивает с приемлемой погрешностью одновременно и кинематическое, и силовое подобие потоков.

Следовательно, коэффициент сопротивления  $\alpha$  будет численно одинаков для различных преобразователей, работающих в разнообразных условиях, при соблюдении:

- 1) геометрического подобия преобразователей,
- 2) геометрического подобия относительных шероховатостей лопастей преобразователей,
- 3) чисел Рейнольдса.

При выполнении этих условий будет выполнено равенство (3), а следовательно, и уравнение (1) в относительных единицах будет численно одинаково для различных преобразователей.

Из (1) следует, что при соблюдении  $Re = idem$  у всех геометрически подобных преобразователей статические характеристики в абсолютных единицах будут отличаться на величину константы геометрического подобия. Если имеется два преобразователя 1 и 2 с чувствительностью  $a_{01}$  и  $a_{02}$ , отличающиеся тем, что линейные размеры преобразователя 2 в  $\kappa$  раз меньше тех же размеров преобразователя 1, то

$$a_{02} = \frac{a_{01}}{\kappa}. \quad (8)$$

Это позволяет по статическим характеристикам, полученным в результате экспериментального исследования преобразователей одного типоразмера на определенной жидкости, рассчитать характеристики всех геометрически подобных преобразователей, предназначенных для измерения скорости разнообразных сред в трубопроводах различного диаметра.

Для преобразователей, работающих в автомоделной области, нижняя граница справедливости результатов пересчета определится из соотношения

$$Re_{\min}^p = \frac{v_{\min}^p L^p}{\nu^p} \geq Re_{\text{пред.}}^{\text{он}} = \frac{v_{\min}^{\text{он}} L^{\text{он}}}{\nu^{\text{он}}}, \quad (9)$$

где  $v_{\min}^{\text{он}}$  — минимальная скорость потока, при которой наступил автомоделный режим обтекания лопастей опытного преобразователя;

$L^{\text{он}}$  — характерный геометрический параметр опытного преобразователя;

$\nu^{\text{он}}$  — вязкость жидкости, на которой снималась статическая характеристика опытного преобразователя;

$v_{\min}^p, L^p, \nu^p$  — то же самое для расчетного преобразователя.

Построение методики заключается в следующем:

1) в пересчете по (8) экспериментальных зависимостей чувствительности преобразователей от соответствующих параметров ( $L, z, d_n, H_r$ ) на преобразователи, геометрически подобные испытанным;

2) в указании из (9) нижней границы справедливости пересчитанных характеристик по числу  $Re$ . В качестве характерного размера, входящего в (9), целесообразно принять внутренний диаметр трубопровода  $D_{\text{тр}}$ .

Результаты подобных расчетов для четырех стандартных диаметров трубопроводов представлены в виде номограммы:

рис. 1 — для преобразователей, отличающихся  $L$ ;

рис. 2 — для преобразователей, отличающихся  $d_n$  (на этой номограмме  $\Delta$  — зазор между преобразователем и трубопроводом, следовательно,  $d_n = D_{\text{тр}} - 2\Delta$ );

рис. 3 — для преобразователей, отличающихся  $z$ ;

рис. 4 — для преобразователей, отличающихся  $H_r$ .

На номограммах зависимость, соответствующая  $D_{\text{тр}} = 93 \text{ мм}$ , получена экспериментально.

Конструктивные параметры расчетных и опытных (соответствующих  $D_{\text{тр}} = 93 \text{ мм}$ ) преобразователей сведены в табл. 1.

Пользование номограммой состоит в следующем. Из задания на измерение определяется необходимая чувствительность преобразователя  $a_0^p$  и число  $Re_{min}^p$ , соответствующее нижнему пределу измерения  $v_{min}$ . По  $a_0^p$  и  $D_{тр}$ , в котором предполагается измерение, из соот-

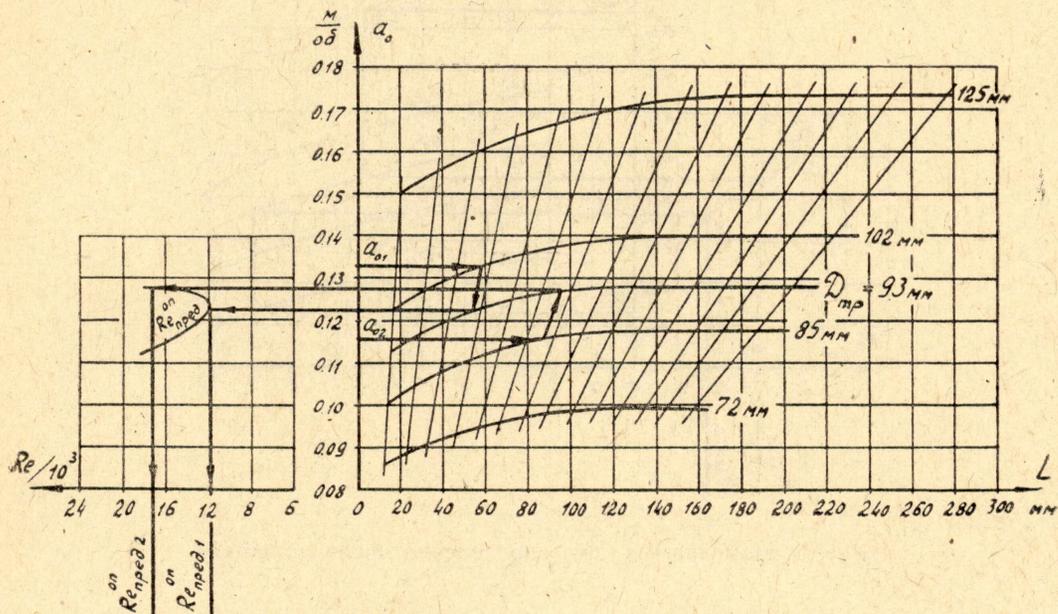


Рис. 1. Номограмма для определения длины лопасти

ветствующей номограммы определяется  $Re_{пред}^{оп}$  и один из конструктивных параметров  $\Delta$ ,  $z$ ,  $H_r$  или  $L$  (в зависимости от того, какая номограмма используется). При пользовании номограммой рис. 2

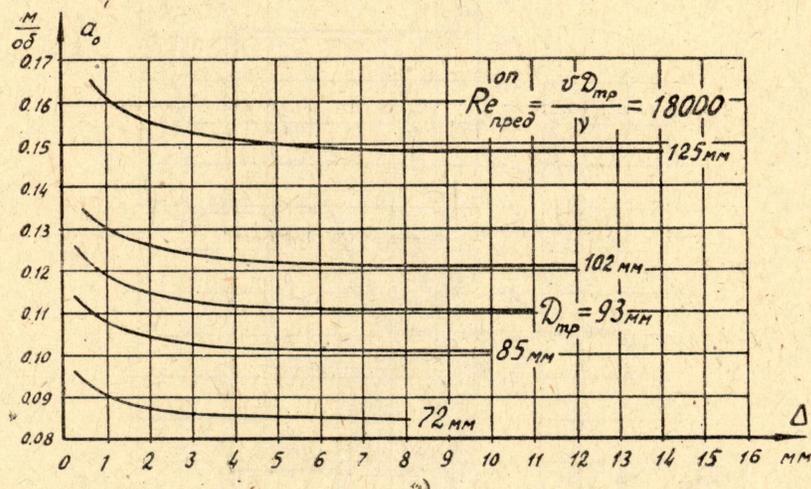


Рис. 2. Номограмма для определения наружного диаметра

принимается  $Re_{пред}^{оп} = 18000$ , а на рис. 1, 3, 4 определение  $Re_{пред}^{оп}$  указано стрелками. После определения  $Re_{пред}^{оп}$  проверяется соотношение  $Re_{пред}^{оп} \leq Re_{min}^p$ . При невыполнении этого условия необходимо определить из соответствующей номограммы другой из параметров

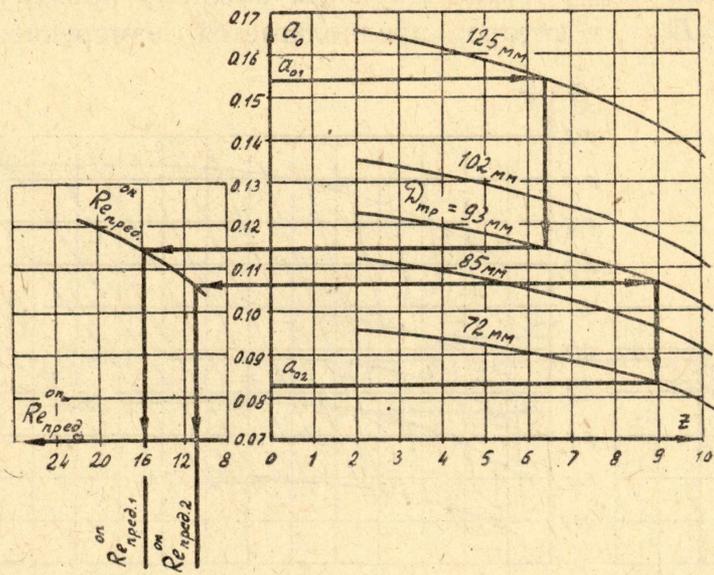


Рис. 3. Номограмма для определения числа лопастей

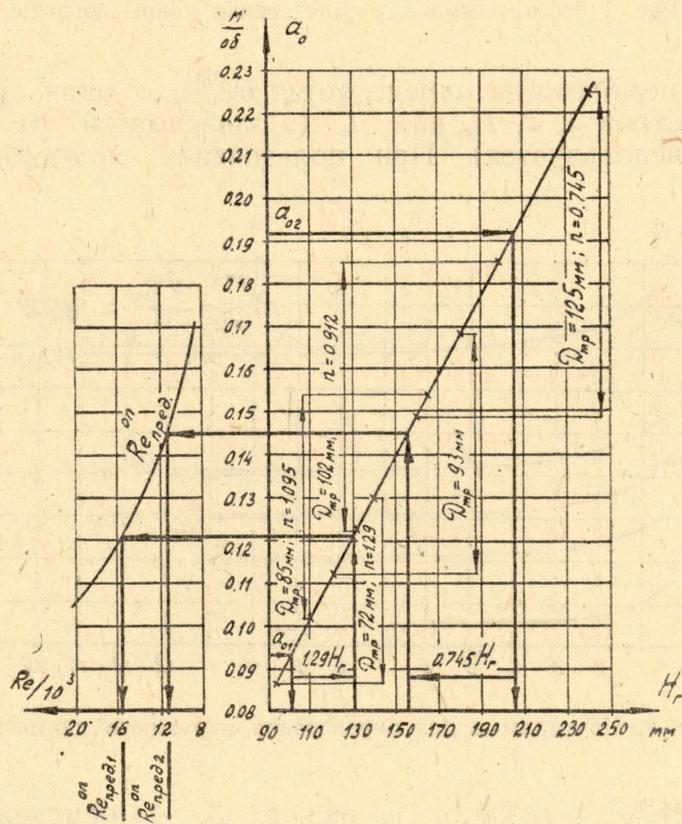


Рис. 4. Номограмма для определения геометрического шага

$\Delta$ ,  $z$ ,  $H_r$ ,  $L$  до тех пор, пока неравенство удовлетворится. После этого из табл. 1 для данного  $D_{тр}$  берутся остальные конструктивные параметры преобразователя.

Таблица 1

Параметр	$D_{тр}, мм$					Примечание
	72	85	93	102	125	
$d_{ст.}, мм$	20,2	23,8	26,0	28,5	34,9	$t$ —толщина лопасти
$d, мм$	11,2	13,2	14,5	15,9	19,5	
$t, мм$	2,3	2,7	3,0	3,3	4,0	$d$ —средний радиус шарикоподшипника
$L, мм$	78,5	92,4	101	111	136	
$H_r, мм$	107,4	126,5	138,4	152,0	187,5	$L$ —постоянная по высоте лопасти
$d_n, мм$	71,3	84,0	92,0	11,0	123,5	
$z$						2

Применение и точность предлагаемой методики поясним примером.

Пример.

а. Технические условия на измерение.

В трубопроводе  $D_{тр} = 72 мм$  необходимо измерять скорость воды при температуре  $t_v = 15^\circ C$ . Диапазон измеряемых скоростей  $v = 0,3 - 3 м/сек$ . Необходимо обеспечить на входе измерительного прибора частоту электрического сигнала  $f = 6 \div 66 герц$ .

в. Расчет преобразователя.

Полагаем, что за один оборот преобразователя тахометрическое устройство выдает два импульса. Тогда число оборотов преобразователя будет  $n = 3 \div 33 об/сек$ .

Необходимая чувствительность преобразователя

$$a_0^p = \frac{\Delta v}{\Delta n} = \frac{2,7}{30} = 0,09 м/об.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{мин}^p = \frac{0,3 \cdot 0,072}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 21400. \text{ По } a_0^p = 0,09 м/об \text{ и}$$

$D_{тр} = 72 мм$  из номограммы рис. 2 (можно использовать в данном случае любую другую номограмму) определяем  $\Delta = 1,2 мм$ . Принимаем  $Re_{пред.}^{оп} = 18000$ .

Условие  $Re_{пред.}^{оп} \leq Re_{мин}^p$  выполнено. В соответствии с  $\Delta = 1,2 мм$  наружный диаметр преобразователя равен  $d_n = 69,6 мм$ . Из табл. 1 для  $D_{тр} = 72 мм$  выписываем конструктивные параметры преобразователя:

$$d_{ст} = 20,2 мм, d = 11,2 мм, t = 2,3 мм, L = 78,5 мм,$$

$$H_r = 107,4 мм, z = 2.$$

Экспериментальная проверка рассчитанного преобразователя показала, что расхождение расчетных и опытных данных не превышает 2,5% и обусловлено погрешностью графиков номограммы, не-

точностью изготовления преобразователя и неконтролируемостью качества опор. Снижение до минимума этих причин, несомненно, повысит точность расчета преобразователей по изложенной методике.

### Выводы

Таким образом, выше изложены основы приближенной методики расчета преобразователей типа „вертушка“. Для практического использования методика предполагает только задание условий на измерение и не требует специального экспериментального определения каких-либо коэффициентов. Погрешность расчета не превышает 2,5 %. Для повышения точности расчета необходим количественный учет трения в опорах преобразователя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Смирягин, В. П. Шук. Сб. «Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964—1965 гг.», секция теплоэнергетическая, подсекция автоматизации производственных процессов. МЭИ, М., 1965.
2. А. Н. Патрашов. Гидромеханика. Военно-Морское изд., М., 1953.
3. М. В. Кирпичев. Теория подбоя. Изд. АН СССР, 1953.