

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ  
С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТИПА «ВЕРТУШКА»\*

С. Д. СМИРЯГИН, В. П. ШУК

(Представлена проф. Ю. Н. Соколовым)

Теоретическое уравнение статической характеристики преобразователей типа „вертушка“, полученное при помощи гидродинамической теории решеток, имеет вид [1]

$$v = \omega \left( \sqrt{\frac{a_1 + ab_1 + a^2c_1 + \frac{d_1 - ad_2}{z\rho\omega} + \frac{e_1 + ae_2}{z\rho\omega^2}}{a_2 + \alpha a_3 + a^2a_4}} + \frac{\alpha f_2 - f_1}{f_3 - \alpha f_4} \right), \quad (1)$$

где  $v$  — скорость жидкости,  $\omega$  — угловая скорость вращения преобразователя,  $\alpha$  — коэффициент, обусловленный проявлением вязкости жидкости,  $\rho$  — плотность жидкости. коэффициенты  $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, c_1, f_1, f_2, f_3, f_4$  определяются функциями вида  $F_1(L, z, d_{ст}, d_n, H_r, f)$ , а  $d_1, d_2, e_1, e_2$  — функциями  $F_2(L, z, d_{ст}, d_n, H_r, f, M_0, M_y)$ ; здесь  $L$  — длина лопасти,  $z$  — число лопастей,  $d_{ст}$  — диаметр ступицы,  $d_n$  — наружный диаметр,  $H_r$  — геометрический шаг,  $f$  — коэффициент трения в опорах,  $M_0$  — начальный момент трения,  $M_y$  — реакция тахометрического устройства.

Расчетная решетка профилей исследуемого преобразователя, скоростные и силовой треугольники для профиля в решетке, в предположении которых получено уравнение (1), представлены на рис. 1.

К статической характеристике (1) предъявляются следующие требования:

- 1) характеристика должна соответствовать максимальной чувствительности преобразователя;
- 2) характеристика должна как можно меньше отклоняться от прямой проходящей через начало координат;
- 3) характеристика должна быть воспроизводимой и стабильной во времени.

Рассмотрим пути удовлетворения этим требованиям.

Нарушение пропорциональности между  $v$  и  $\omega$  может произойти по двум причинам. Во-первых, когда момент сопротивления, обусловленный трением в опорах, и реакция тахометрического устрой-

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



ства становятся соизмеримыми с вращающим моментом. При этом в (1) увеличиваются члены  $\frac{d_1 - \alpha d_2}{z \rho \omega}$ ,  $\frac{e_1 - \alpha e_2}{z \rho \omega^2}$ . Во-вторых, когда работа преобразователя выходит за пределы области автомо-

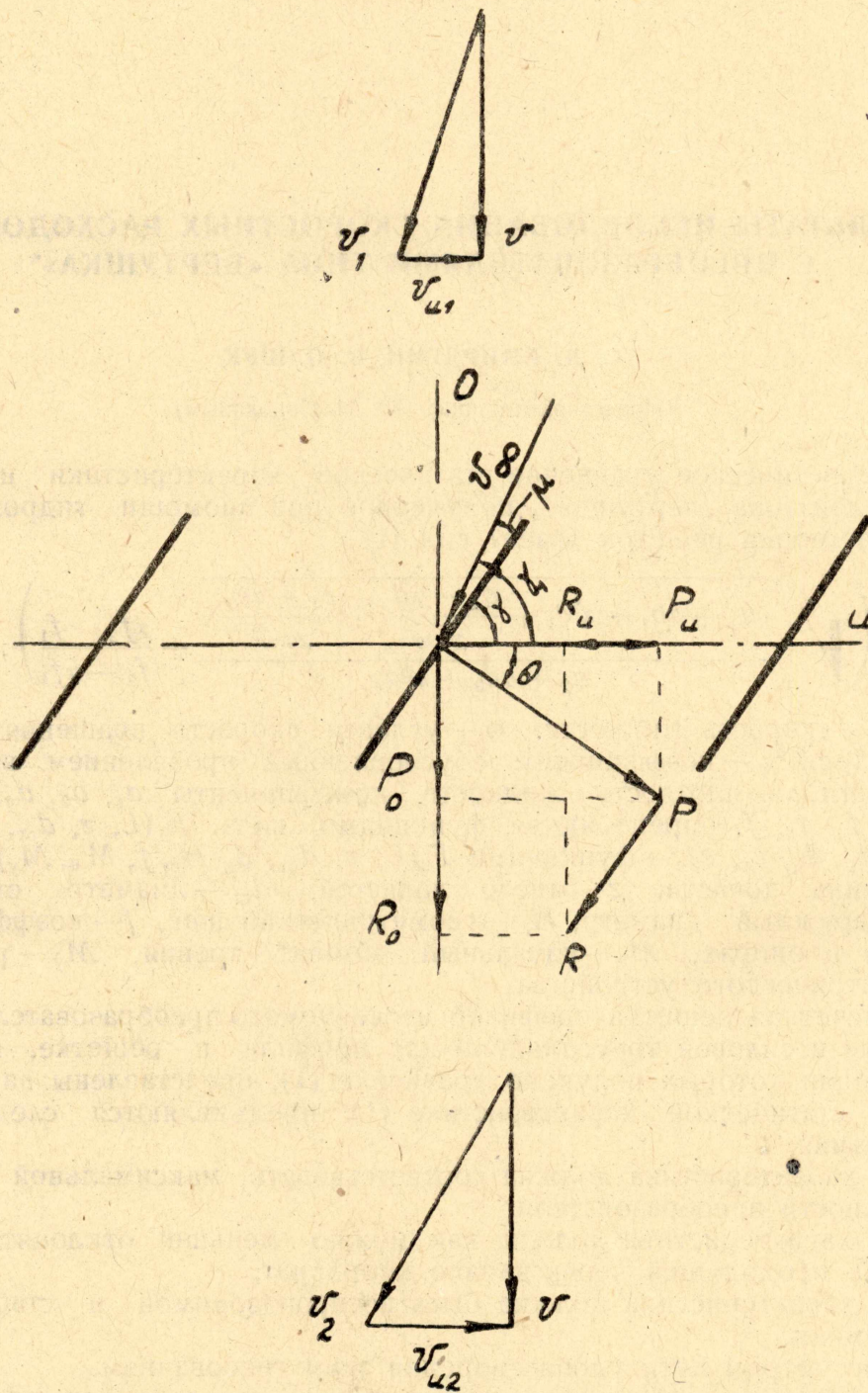


Рис. 1. Решетка профилей, скоростные и силовой треугольники профиля в решетке

дельной по числу  $Re$ . При этом нарушается прямолинейность характеристики за счет непостоянства  $\alpha$ .



Уменьшению  $\frac{d_1 - \alpha d_2}{z\rho\omega}$  и  $\frac{e_1 - \alpha e_2}{z\rho\omega^2}$  способствует увеличение числа лопастей. Это подтверждается экспериментально\*\*. При увеличении  $z$  от четырех до десяти минимальная скорость потока, при которой сохраняется пропорциональность между  $v$  и  $\omega$ , уменьшается от 0,3 м/сек до 0,1 м/сек.

Поэтому для обеспечения прямолинейности статической характеристики в нижнем диапазоне измерения можно рекомендовать применение многолопастных преобразователей с  $z = 6 \div 10$ . Это справедливо при измерении скорости жидкости, обладающей незначительной вязкостью. При измерении вязкой жидкости необходимо ориентироваться на меньшее число лопастей  $z = 3 \div 5$ , чтобы избежать преждевременного нарушения пропорциональности за счет изменения  $\alpha$ .

На статическую характеристику существенное влияние оказывает коэффициент трения в опорах преобразователя  $f$ , так как в уравнении (1) все коэффициенты, кроме  $\alpha$ , зависят от  $f$ . В [1] показано, что влияние  $f$  понижается с уменьшением диаметра подшипников.

При этом также уменьшаются члены  $\frac{d_1 - \alpha d_2}{z\rho\omega}$  и  $\frac{e_1 - \alpha e_2}{z\rho\omega^2}$ . Экспериментально получено, что при уменьшении диаметров подшипников в 1,5 раза нижний предел измерения при сохранении прямолинейности характеристик уменьшается от 0,1 м/сек для десятилопастного преобразователя до 0,054 м/сек для двухлопастного преобразователя, т. е. на 45 %.

Поэтому для расширения диапазона измерения за счет уменьшения начальных скоростей можно рекомендовать предельное уменьшение диаметра подшипников.

В связи с тем, что коэффициенты уравнения (1) находятся в сложной зависимости от коэффициента трения [1], воспроизводимость и стабильность градуировочных характеристик в значительной степени зависит от качества опор. Из опубликованных материалов [2] известно, что с помощью скоростных расходомеров можно производить измерения с точностью от 0,3 ÷ 0,5 %. Чтобы обеспечить эту точность при повторных измерениях после демонтажа датчика, необходимо прежде всего установить нормы на качество опор и разработать методы его контроля.

Из уравнения (1) следует, что для исключения влияния вязкости жидкости на работу преобразователей необходимо обратить в нуль коэффициенты при  $\alpha$ . Однако физически это неосуществимо и возможна только их минимизация за счет соответствующего выбора конструктивных параметров.

Расчеты, выполненные на цифровой вычислительной машине, показали, что для сведения к минимуму зависимости работы преобразователей от вязкости жидкости необходимо применение двухлопастных преобразователей с минимальной длиной лопастей. Влияние же на эту зависимость наружного диаметра, диаметра ступицы и геометрического шага незначительно. Поэтому для получения необходимой чувствительности преобразователя этими параметрами можно варьировать в более широких пределах.

Как отмечалось, помимо прямолинейности статической характеристики, важно, чтобы она обеспечивала наибольшую чувствитель-

\*\*\*) Здесь и далее приводятся опытные данные, полученные авторами настоящей статьи в результате специально проведенного экспериментального исследования преобразователей.



ность преобразователя. Из рис. 1 следует, что усилие  $P$ , действующее на элемент лопасти преобразователя, разлагается на составляющие: окружную  $P_u$ , создающую момент вращения, и осевую  $P_o$ , создающую момент сопротивления в опорах. Скорость вращения преобразователя определяется действием обеих составляющих. Расчеты показывают, что с изменением конструктивных параметров преобразователя вектор  $P$  изменяется по величине и направлению.

Поэтому для получения наибольшего вращающего усилия и, следовательно, чувствительности оптимальной будет конструкция преобразователя, которая обеспечивает наибольшее значение вектора  $P$  по модулю при наименьшем  $\Theta$  (рис. 1). Это соответствует максимальному  $P_u$  и минимальному  $P_o$ . Выясним условия, которые обеспечивают  $P_u = \max$  и  $P_o = \min$ .

В качестве основного параметра, определяющего работу преобразователя, примем  $\frac{Lz}{2\pi r}$  и исследуем функцию  $P_u - P_o = F\left(\frac{Lz}{2\pi r}\right)$ .

Результаты расчета этой функции по формулам работы [1] без учета вязкости жидкости представлены графически на рис. 2. Графики характеризуют распределение  $P_u - P_o$  по высоте лопасти в зависимости от длины лопасти  $L$  и числа лопастей  $z$ .

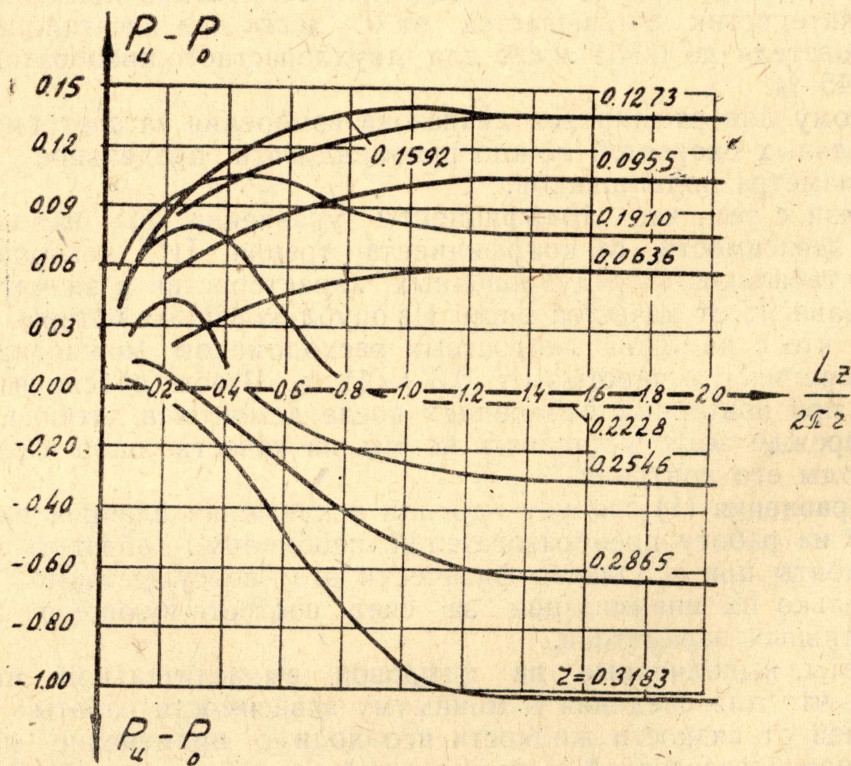


Рис. 2. Распределение  $P_u - P_o$  по высоте лопасти преобразователя в зависимости от  $\frac{Lz}{2\pi r}$

На рис. 2 различимы три участка:

- 1) при  $\frac{Lz}{2\pi r} \leq 0,1$  все кривые имеют тенденцию к возрастанию и в целом для лопасти  $P_u = \max$ ,  $P_o = \min$ , что соответствует наибольшей чувствительности преобразователя;



2) при  $0,1 < \frac{Lz}{2\pi r} \leq 1,0 - 1,2$  периферия лопасти создает увеличение  $P_0$  (кривые  $r = 0,3183; 0,2865; 0,2546; 0,2223$  резко идут вниз), что увеличивает тормозной момент в опорах и ухудшает чувствительность преобразователя;

3) при  $\frac{Lz}{2\pi r} > 1,2$  все кривые становятся параллельными оси абсцисс,  $P_u$  и  $P_0$  принимают постоянные значения, а чувствительность остается неизменной.

На основании расчетных данных приходим к выводу, что коротколопастные преобразователи обладают большей чувствительностью, чем длиннолопастные. Графики рис. 2 указывают пути достижения наибольшей чувствительности преобразователя. Для этого необходимо профилировать лопасти так, чтобы соотношение  $\frac{Lz}{2\pi r}$  для каждого  $r$  приходилось на максимум соответствующей кривой, т. е.  $\frac{Lz}{2\pi r_{0,3183}} \approx 0,1$ ,  $\frac{Lz}{2\pi r_{0,2865}} \approx 0,15$  и т. д. Это сложное профилирование на практике с достаточной степенью точности можно заменить выполнением условий  $\frac{Lz}{2\pi r_H} = 0,1$ ;  $\frac{Lz}{2\pi r_{CT}} = 0,8 \div 1,2$ .

Полученные теоретические результаты подтверждаются экспериментальными данными, представленными на рис. 3 в виде зависи-

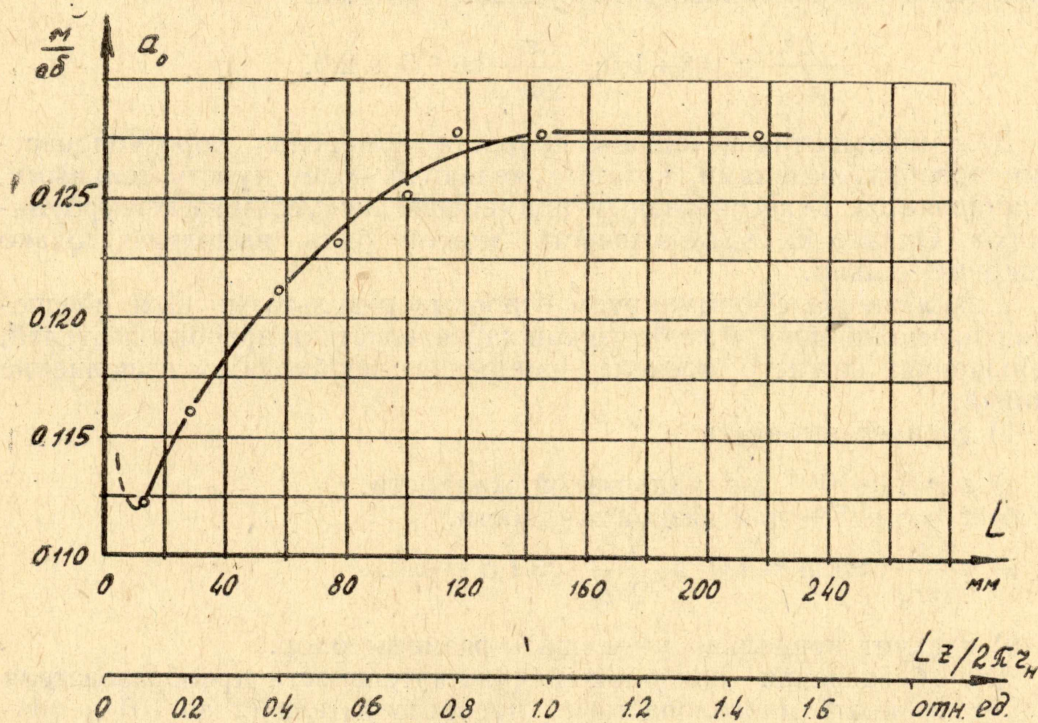


Рис. 3. Зависимость чувствительности преобразователей от длины лопасти

мости чувствительности преобразователей  $a_0$  от длины лопасти  $L$ . Из рис. 3 следует, что наибольшей чувствительностью обладает преобразователь с  $L = 13$  мм, что соответствует  $\frac{Lz}{2\pi r_H} = 0,09$ . При увели-



чении длины лопасти до  $L = 140 \div 160$  мм, что соответствует  $\frac{Lz}{2\pi r_n} = 0,97 - 1,11$ , чувствительность преобразователей ухудшается и при дальнейшем увеличении длины лопасти остается неизменной.

Теоретические и экспериментальные результаты позволяют рекомендовать для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователей выполнение условий  $\frac{Lz}{2\pi r_n} \approx 0,1$ ;  $\frac{Lz}{2\pi r_{ст}} \approx 0,8 \div 1,2$ .

Длина лопасти оказывает существенное влияние не только на чувствительность, но и на нижний предел измерения, т. е. на величину начальной скорости жидкости, при которой преобразователь начинает вращаться. Экспериментальное исследование трех преобразователей, имеющих длину лопастей соответственно 217,2 мм, 27 мм и 13 мм и одинаковых в отношении других геометрических параметров, показало, что наименьшую начальную скорость имел преобразователь с  $L = 217,2$  мм. Это обстоятельство объясняется различием условий обтекания длинных и коротких лопастей. Расчеты показывают, что лопасти с  $L = 13$  мм имеют в два с лишним раза больший гидродинамический угол атаки  $\mu$ , чем лопасти с  $L = 217,2$  мм. С возрастанием  $\mu$  увеличивается скорость жидкости, при которой наступает турбулизация пограничного слоя на границе лопасть—жидкость. Вследствие этого увеличивается начальная скорость, при которой преобразователь начинает вращаться.

Поэтому для обеспечения наименьшего нижнего предела измерения можно рекомендовать выполнение условий

$$\frac{Lz}{2\pi r_n} \approx 0,8 \div 1,0; \quad \frac{Lz}{2\pi r_{ст}} \approx 1,5 \div 2,0.$$

Для уменьшения начальной скорости измерения коротколопастными преобразователями, которые являются более чувствительными, представляется целесообразным применение искусственных турбулизаторов. Однако их эффективность может быть выявлена только экспериментально.

В заключение сформулируем основные результаты. Для обеспечения прямолинейности статической характеристики преобразователей, уменьшения нижнего предела измерения необходимо выполнение условий:

1) следует выбирать:

- а)  $z = 6 \div 10$  — для маловязкой жидкости,
- б)  $z = 3 \div 5$  — для вязкой жидкости,
- в)  $\frac{Lz}{2\pi r_n} \approx 0,8 \div 1,0$  и  $\frac{Lz}{2\pi r_{ст}} \approx 1,5 \div 2,0$ .

2) следует предельно уменьшать размеры опор.

Для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя следует выбирать многолопастные преобразователи ( $z$  до 10) и принимать  $\frac{Lz}{2\pi r_{ст}} \approx 0,8 \div 1,2$ ;  $\frac{Lz}{2\pi r_n} \approx 0,1$ .

Для сведения к минимуму влияния на работу преобразователей вязких свойств измеряемой жидкости необходимо применение двухлопастных преобразователей с короткими лопастями.



## Выводы

В статье приведены практические рекомендации по выбору числа лопастей, их длины, размеров опор, справедливые для различных типоразмеров преобразователей. С помощью теоретического уравнения статистической характеристики выяснен механизм влияния на работу преобразователей каждого из перечисленных параметров. Это позволяет глубже понять основные закономерности работы преобразователей типа „вертушка“.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Смирягин, В. П. Шук. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964—1965 гг., секция теплоэнергетическая, подсекция автоматизации производственных процессов. МЭИ, М., 1965.
2. Л. Л. Бошняк. Исследование преобразователей крыльчато-техометрических расходомеров. Кандидатская диссертация. ЛМИ, Ленинград, 1962.