



## СХОДСТВА И ПРАВИЛА ВЕНТИЛЯТОРОВ-1

### 3.1 Концепция Сходства

Уравнения теоретической механики жидкости недостаточны для полного определения геометрии современных машин, таких как вентиляторы, поэтому решения данной задачи с различными допущениями можно сравнивать только экспериментально, и таким образом можно выбрать наилучшее решение. Во всех отношениях экономически выгодно проводить такие исследования на небольших моделях. Характерный размер промышленной машины может быть рассчитан из экспериментальных результатов модели, которые могут быть найдены с достаточной точностью. Теория подобия, которая обеспечивает это, важна в этом отношении. Однако, поскольку всесторонние экспериментальные исследования требуют много времени и затрат, это очень успешный анализ проектирования и изготовления проточных машин широкого спектра, таких как механика твердых и деформированных тел, теория и динамика машин, а также анализ потока, выполненный с помощью уравнений теоретической механики жидкости. Были разработаны программы НАД (вычислительная гидродинамика) и структурного анализа. Эти методы, которые основаны на решении основных уравнений на основе экспериментальных данных и с помощью компьютерных программ, использующих соответствующие физические граничные условия, в этом отношении называются «численным экспериментом или численным моделированием». Тем не менее, точность этих численных расчетов должна быть проверена в реальных экспериментальных условиях.

### 3.2. Механическое Сходство

Есть четыре сходства между двумя существующими машинами, которые механически похожи друг на друга;

1. Геометрическое сходство
2. Кинематическое сходство

3. Динамическое сходство
4. Термодинамическое сходство

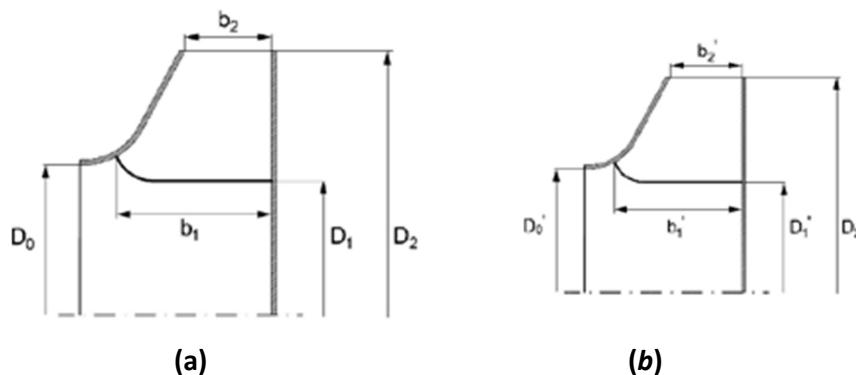
### 3.2.1. Геометрическое Сходство

На рисунке 2.1 приведены изображения в разрезе (а) реального (прототипа) вентилятора и (б) модели колес вентилятора.

Здесь:

$D'_0, D'_1, D'_2, b'_1, b'_2, R', k'$ , : Геометрические длины вентилятора  $D_0, D_1, D_2, b_1, b_2, R, k$ , показывает геометрические длины реального (прототипа) вентилятора. Геометрическое сходство достигается путем нахождения постоянного соотношения, заданного уравнением между взаимными геометрическими длинами двух машин (2.1). Это называется «коэффициент геометрического сходства» и обозначается  $\lambda$ . По сходству стен, которые ограничивают потоки, шероховатость стен должна быть геометрически одинаковой на обеих машинах. Если длина  $k$  (средняя высота шероховатости), которая может характеризовать шероховатость, выражить ее частоту и радиусы кривизны криволинейных поверхностей, обозначена как  $R$ , то  $\lambda$  должна быть равна:

$$\lambda = \frac{D'_0}{D_0} = \frac{D'_1}{D_1} = \frac{D'_2}{D_2} = \frac{L'}{L} = \frac{b'_1}{b_1} = \frac{b'_2}{b_2} = \frac{R'}{R} = \frac{k'}{k} = \dots = \text{консм}. \quad (3.1)$$



**Рис. 3.1:** Фотографии выреза вентилятора; (а) реальный вентилятор и (б) модель вентилятора.

### 3.2.2. Кинематическое сходство

Если потоки в обеих машинах имеют постоянное отношение между однотипными скоростями или компонентами в соответствующих точках потоков, потоки будут «кинематически подобными», и это значение называется коэффициентом кинематического сходства.

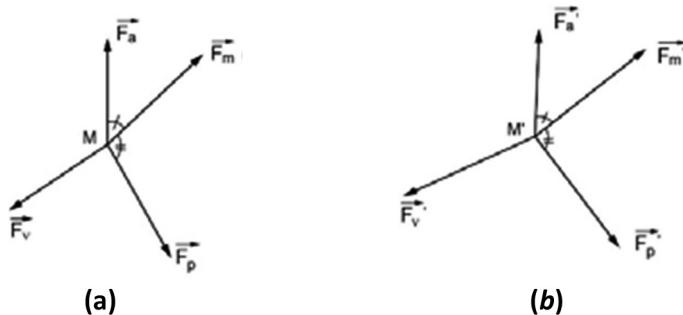
$$\mu = \frac{U'_1}{U_1} = \frac{W'_1}{W_1} = \frac{C'_1}{C_1} = \frac{C'_{m1}}{C_{m1}} = \frac{C'_{u1}}{C_{u1}} = \frac{U'_2}{U_2} = \frac{W'_2}{W_2} = \frac{C'_2}{C_2} = \frac{C'_{m2}}{C_{m2}} = \frac{C'_{u2}}{C_{u2}} = \dots = \text{консм.} \quad (3.2)$$

Таким образом, треугольники скорости в одинаковых точках взаимно схожи, а их углы равны друг другу.

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \quad ; \quad \alpha_2 = \alpha'_2 \quad ; \quad \beta_1 = \beta'_1 \quad ; \quad \beta_2 = \beta'_2 \quad (3.3)$$

### 3.2.3. Динамическое сходство

На рисунке 2.2 силы в (а) реальном (прототип) вентиляторе и (б) модельном вентиляторе показаны в тех же точках. Требование динамического сходства состоит в том, что существует постоянное соотношение между силами в точках, которые идентичны друг другу. Инерция, масса (масса), вязкость (трение), давление, поверхностное натяжение и т. д. Различные размеры, такие как пропорциональные или безразмерные числа, полученные путем соответствующего распределения этих сил, должны быть равными значениями в обеих машинах.



**Рис. 3.2.** (а) Силы в точках, которые соответствуют друг другу с реальным вентилятором и (б) моделью вентилятора.

$$\frac{F'_a}{F_a} = \frac{F'_m}{F_m} = \frac{F'_p}{F_p} = \frac{F'_v}{F_v} = \dots = \text{консм.} \quad (3.4)$$

Измеряя силы из приведенных выше уравнений, можно получить безразмерные числовые уравнения, известные как следующие:

$$\frac{F_a}{F_v} = \frac{F'_a}{F'_v} \Rightarrow Re = Re' \Rightarrow Re = \frac{VL}{\nu} = Re' = \frac{V'L'}{\nu'} \quad (3.5)$$

$$\frac{F_p}{F_a} = \frac{F'_p}{F'_a} \Rightarrow Ne = Ne' \Rightarrow Ne = \frac{\Delta P}{\rho V^2} = Ne' = \frac{\Delta P'}{\rho' V'^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{F_a}{F_m} = \frac{F'_a}{F'_m} \Rightarrow Fr = Fr' \Rightarrow Fr = \frac{V^2}{gL} = Fr' = \frac{V'^2}{g'L'} \text{ или } \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{V'}{\sqrt{g'L'}} \quad (3.7)$$

$$\frac{F_a}{F_\sigma} = \frac{F'_a}{F'_\sigma} \Rightarrow We = We' \Rightarrow We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} = We' = \frac{\rho' V'^2 L'}{\sigma'} \quad (3.8)$$

$$\frac{F_a}{F_E} = \frac{F'_a}{F'_E} \Rightarrow Ma = Ma' \Rightarrow Ma = \frac{V}{a} = Ma' = \frac{V'}{a'}; \dots \dots \dots \dots \quad (3.9)$$

Если жидкости несжимаемы (например, в гидравлических машинах и вентиляторах, где эффекты сжимаемости часто пренебрежимо малы, поскольку  $Ma < 0,122$  или  $< 40$   $s / Mach$ ), числа Маха не обязательно должны быть равными, т. е. сходство Маха не обязательно. Следующие уравнения необходимы для обеспечения полного сходства в современных машинах:

1.  $Re = Re' \rightarrow$  **Сходство Рейнольдса** (важно в закрытых каналах, трубах и других потоках под давлением)
2.  $Ne = Ne' \rightarrow$  **Сходство Ньютона** (важное значение для напорных потоков под давлением и гидравлических)
3.  $Fr = Fr' \rightarrow$  **Сходство Фруда** (важно в свободных поверхностных потоках)
4.  $Ma = Ma' \rightarrow$  **Сходство Маха** (важно в сжимаемых потоках)

Однако добиться полного сходства невозможно. Например, сходства  $Re$  и  $Fr$  не могут быть достигнуты одновременно.

$$Re = Re' \Rightarrow \frac{VL}{\nu} = \frac{V'L'}{\nu'} \quad \text{и} \quad Fr = Fr' \Rightarrow \frac{V^2}{gD} = \frac{V'^2}{g'D'} \quad (3.10)$$

Если принять  $g = g'$ ,

$$\frac{V'^2}{V^2} = \frac{D'}{D} \quad ; \quad \frac{V'}{V} = \frac{D}{D'} \frac{\nu}{\nu'} \Rightarrow \frac{D'^3}{D^3} = \frac{\nu'^2}{\nu'^2} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{D'}{D} = \left[ \left( \frac{\nu'}{\nu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.12)$$

Поскольку  $\lambda \neq 1$ , то  $\nu \neq \nu'$ , что означает, что один и тот же тип жидкости нельзя использовать в двух машинах, или если один из них будет работать с водой, а другой с воздухом, будет невозможно выбрать геометрическое подобие случайным образом.

В вентиляторах сходства Fr и Ma не учитываются. Чтобы обеспечить сходство вентиляторов, необходимо обеспечить сходство Re и Ne. Если число Re слишком велико, сходством Re также пренебрегают (предполагается, что оно достигнуто). Таким образом, остается только обеспечить сходство Ne.

### 3.2.4. Термодинамическое Сходство

Требование термодинамического сходства состоит в том, что существует постоянное соотношение между абсолютными температурами в точках, которые идентичны. Если,

$$\frac{T'_1}{T_1} = \frac{T'_2}{T_2} = \frac{T'_3}{T_3} = \frac{T'_4}{T_4} = \dots = \text{консм.} \quad (3.13)$$

есть термодинамическое сходство.

### 3.3. Частичное Сходство

Невозможно полностью обеспечить геометрическое подобие шероховатости поверхности, и условия динамического сходства не могут быть выполнены одновременно. Некоторые сходства (которые оказывают незначительное влияние или вообще не оказывают влияния) отбрасываются в зависимости от ситуации события. Следовательно, частичное сходство будет обеспечено. Например, в гидравлических машинах и вентиляторах, где эффекты сжимаемости часто пренебрежимо малы, поскольку число Маха очень мало ( $Ma < 0,122$  или  $V < 40 \text{ м / с}$ ).

Сходство Маха можно отбросить. В отсутствие течений со свободной поверхностью сходства Фруда и Вебера не имеют значения. В этом случае обеспечение сходства Рейнольдса и Ньютона в вентиляторах считается достаточным для обеспечения динамического сходства.

Согласно экспериментам Никирадзе, в очень больших числах  $Re$  коэффициент непрерывной потери нагрузки не зависит от числа  $Re$ , а только относительная шероховатость зависит от  $k / D$ . В этих случаях или в случаях, когда число  $Re$  одинаково для обоих вентиляторов, будет достаточно обеспечить достаточность подобия Ньютона, поскольку сходство  $Re$  уже будет достигнуто. Таким образом, даже если шероховатость поверхности не совсем одинакова, если геометрическое сходство  $\lambda$  и ньютоновское сходство достигается в оставшихся проблемах, два вентилятора считаются «приблизительно похожими» друг на друга, и этот тип сходства называется «частичным сходством». Ошибки, возникающие из-за этого, либо очень малы, либо результаты исправляются соответствующими эмпирическими (экспериментальными) соотношениями.

Фактически, если необходимо обеспечить сходство  $Re$ , это может быть невозможно в большинстве случаев. Например, если два вентилятора будут работать с одной и той же жидкостью ( $v' = v$ ), уравнение чисел  $Re$ ,

$$\frac{VD}{v} = \frac{V'D'}{v'} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{D'}{D} = \frac{V}{V'} = \frac{1}{\mu} \quad (3.14)$$

Чтобы соответствовать этому условию, модельное колесо вентилятора со шкалой  $\lambda = 1/5$  должно быть испытано при скорости, в 25 раз превышающей промышленный, и при напоре в 25 раз больше!

### 3.4. Законы Вентиляторов (отношения схожести вентиляторов)

Вопрос о действительности законов, называемых «Закон о вентиляторах или отношения схожести между вентиляторами», может показаться противоречием многим инженерам. Эти законы во многих четко определенных ситуациях на самом деле являются близкими приближениями, хотя на самом деле они являются близкими приближениями. Поскольку эти законы широко используются без вопросов, представляется целесообразным взглянуть на их производные. С учетом производительности серии вентиляторов ясно, что они могут быть выполнены в геометрически одинаковом диапазоне размеров и могут работать с бесконечным числом скоростей вращения. С учетом производительности серии вентиляторов ясно, что они могут быть выполнены в геометрически одинаковом диапазоне размеров и могут работать с бесконечным числом скоростей вращения. Вентиляторы также могут работать с газами или воздухом с различными физическими свойствами, такими как температура, влажность, плотность, вязкость и конкретные температуры. Поскольку производитель не сможет проверить вентиляторы при всех этих изменяющихся условиях, можно будет оценить производительность серии вентиляторов, используя законы вентиляторов, а также скорость вращения одного вентилятора и изменение газовых условий.

#### 3.4.1. Коэффициент сходства для высоты головки вентилятора:

Размер модели вентилятора является экспоненциальным, размер реального (прототипа) вентилятора неэкспоненциальным, а индекс всасывающего (входного) отверстия вентилятора обозначается давлением (выходным отверстием) и индексом трех, энергией в виде энергии, получаемой на единицу веса жидкости между выходом вентилятора и входным отверстием. Это может быть написано с использованием определения главы головы:

$$\frac{H'}{H} = \frac{\left[ Z_{\zeta}' + \frac{P_{\zeta}'}{\gamma'} + \frac{V_{\zeta}'^2}{2g} \right] - \left[ Z_g' + \frac{P_g'}{\gamma'} + \frac{V_g'^2}{2g} \right]}{\left[ Z_{\zeta} + \frac{P_{\zeta}}{\gamma} + \frac{V_{\zeta}^2}{2g} \right] - \left[ Z_g + \frac{P_g}{\gamma} + \frac{V_g^2}{2g} \right]} \quad (3.15)$$

Если пьезометрические давления на входе модели и реального (прототипа) вентилятора также определяются как экспоненциальные (\*):

$$\frac{P_g'^*}{\gamma'} = \left[ Z_g' + \frac{P_g'}{\gamma'} \right] \quad \text{и} \quad \frac{P_g^*}{\gamma} = \left[ Z_g + \frac{P_g}{\gamma} \right] \quad (3.16)$$

$$\frac{P_\zeta'^*}{\gamma'} = \left[ Z_\zeta' + \frac{P_\zeta'}{\gamma'} \right] \quad \text{и} \quad \frac{P_\zeta^*}{\gamma} = \left[ Z_\zeta + \frac{P_\zeta}{\gamma} \right] \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta P_\zeta'^*}{\gamma'} = \frac{P_\zeta'}{\gamma'} - \frac{P_g'^*}{\gamma'} = \left[ Z_\zeta' + \frac{P_\zeta'}{\gamma'} \right] - \left[ Z_g' + \frac{P_g'}{\gamma'} \right] \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta P_\zeta^*}{\gamma'} = \frac{P_\zeta^*}{\gamma} - \frac{P_g^*}{\gamma} = \left[ Z_\zeta + \frac{P_\zeta}{\gamma} \right] - \left[ Z_g + \frac{P_g}{\gamma} \right] \quad (3.19)$$

Исходя из этих результатов можно написать уравнение 3.15 так:

$$\frac{H'}{H} = \frac{\left[ \frac{P_\zeta'^*}{\gamma'} + \frac{V_\zeta'^2}{2g} \right] - \left[ \frac{P_g'^*}{\gamma'} \right]}{\left[ \frac{P_\zeta^*}{\gamma} + \frac{V_\zeta^2}{2g} \right] - \left[ \frac{P_g^*}{\gamma} \right]} = \frac{\frac{V_\zeta'^2}{2g} \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta'^*}{\rho' V_\zeta'^2} + 1 \right]}{\frac{V_\zeta^2}{2g} \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta^*}{\rho V_\zeta^2} + 1 \right]} \quad (3.20)$$

Для прототипов и моделей вентиляторов, когда сходство Ньютона обеспечивается на выходе машины,

$$Ne_\zeta = \frac{\Delta P_\zeta^*}{\rho V_\zeta^2} = Ne_\zeta' = \frac{\Delta P_\zeta'^*}{\rho' V_\zeta'^2} \quad (3.21)$$

$$\frac{H'}{H} = \frac{\frac{V_\zeta'^2}{2g}}{\frac{V_\zeta^2}{2g}} \quad (3.22)$$

и коэффициент кинематического сходства,

$$\mu = \frac{V_\zeta'}{V_\zeta} = \frac{V_g'}{V_g} \quad (3.23)$$

Таким образом, доля давления головы для вентиляторов,

$$\frac{H'}{H} = \left( \frac{V_\zeta'}{V_\zeta} \right)^2 = \left( \frac{V_g'}{V_g} \right)^2 = \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = \mu^2 \quad (3.24)$$

### 3.4.2. Коэффициент сходства для общего давления вентилятора:

Используя определение полного давления вентилятора, можно написать следующее утверждение:

$$\frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{\left[ P_\zeta' + \frac{1}{2} \rho' V_\zeta'^2 \right] - \left[ P_g' + \frac{1}{2} \rho' V_g'^2 \right]}{\left[ P_\zeta + \frac{1}{2} \rho V_\zeta^2 \right] - \left[ P_g + \frac{1}{2} \rho V_g^2 \right]} \quad (3.25)$$

$$\Delta P_\zeta' = P_\zeta' - P_g' \quad \text{и} \quad \Delta P_g = P_\zeta - P_g \quad (3.26)$$

Пренебрегая величиной кинетической энергии жидкости единичного веса в выходном отверстии в вентиляторах рядом с порядком величины в выходном отверстии:

$$\frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{(P_\zeta' - P_g') + \frac{1}{2} \rho' V_\zeta'^2}{(P_\zeta - P_g) + \frac{1}{2} \rho V_\zeta^2} = \frac{\Delta P_\zeta' + \frac{1}{2} \rho' V_\zeta'^2}{\Delta P_\zeta + \frac{1}{2} \rho V_\zeta^2} = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_\zeta'^2 \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta'}{\rho' V_g^2} + 1 \right]}{\frac{1}{2} \rho V_\zeta^2 \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta}{\rho V_g^2} + 1 \right]} \quad (3.27)$$

Когда ньютоновское сходство достигается на выходе машины для прототипов и модельных вентиляторов:

$$Ne_\zeta = \frac{\Delta P_\zeta}{\rho V_\zeta^2} = Ne_\zeta' = \frac{\Delta P_\zeta'}{\rho' V_\zeta'^2} \quad (3.28)$$

В соответствии с кинематическим сходством:

$$\frac{V_g'}{V_\zeta'} = \frac{V_g}{V_\zeta} \quad (3.29)$$

Коэффициент сходства общих давлений для вентиляторов:

$$\frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_\zeta'}{V_\zeta} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_g'}{V_g} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 \quad (3.30)$$

### 3.4.3. Коэффициент Сходства Для Статического Давления Вентилятора

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{\Delta P_t' - P_{df}'}{\Delta P_t - P_{df}} \quad (3.31)$$

Можно написать как:

$$\Delta P_t = P_{t2} - P_{t1}, \Delta P_t' = P_{t2}' - P_{t1}', P_{df}' = P_{d2}', P_{df} = P_{d2}, P_{t2}' = P_{s2}' + P_{d2}' \quad (3.32)$$

$$P_{t2} = P_{s1} + P_{d1} \quad (3.33)$$

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{\Delta P_t' - P_d'}{\Delta P_t - P_d} = \frac{(P_{t2}' - P_{t1}') - (P_{d2}')}{(P_{t2} - P_{t1}) - (P_{d2})} = \frac{P_{s2}' - P_{t1}'}{P_{s2} - P_{t1}} = \frac{P_{s2}' - P_{t1}'}{P_{s2} - P_{t1}} \quad (3.34)$$

$$\Delta P_\zeta' = P_\zeta' - P_g' \quad ve \quad \Delta P_\zeta = P_\zeta - P_g \quad (3.35)$$

Если сформулировать уравнение:

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{P_{s2}' - \left[ P_g' + \frac{1}{2} \rho' V_g'^2 \right]}{P_{s2} - \left[ P_g + \frac{1}{2} \rho V_g^2 \right]} = \frac{(P_\zeta' - P_g') - \frac{1}{2} \rho' V_g'^2}{(P_\zeta - P_g) - \frac{1}{2} \rho V_g^2} = \frac{\Delta P_\zeta' - \frac{1}{2} \rho' V_g'^2}{\Delta P_\zeta - \frac{1}{2} \rho V_g^2} \quad (3.36)$$

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_g'^2 \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta'}{\rho' V_g'^2} - 1 \right]}{\frac{1}{2} \rho V_g^2 \left[ 2 \frac{\Delta P_\zeta}{\rho V_g^2} - 1 \right]} \quad (3.37)$$

Ньютоńskое сходство на входе в машину для прототипов и модельных вентиляторов:

$$Ne_\zeta = \frac{\Delta P_\zeta'}{\rho V_\zeta^2} = Ne_\zeta' = \frac{\Delta P_\zeta}{\rho' V_\zeta'^2}$$

также в соответствии с кинематическим сходством:

$$\frac{V_g'}{V_g^2} = \mu^2$$

коэффициент сходства статических давлений для вентиляторов:

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_g'}{V_g} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 \quad (3.38)$$

### 3.4.4. Коэффициент Сходства Для Динамических Давлений Вентилятора:

Если вычисляется коэффициент сходства для динамических давлений вентилятора который аналогично определяется как эквивалентный динамическому давлению на выходе вентилятора:

$$(P_{df} = \frac{1}{2} \rho V_c^2)$$

$$\frac{P_{df}'}{P_{df}} = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_c'^2}{\frac{1}{2} \rho V_c^2} = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_c'}{V_c} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 \quad (3.39)$$

Таким образом, в результате получается вывод о том, что коэффициенты сходства для общих давлений, статических давлений и динамических давлений для вентиляторов равны одному и тому же значению, то есть умножению квадрата отношения плотности и кинематического сходства.

$$\frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{P_{df}'}{P_{df}} = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_g'}{V_c} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V_g'}{V_g} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{V'}{V_g} \right)^2 = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 \quad (3.40)$$

Если используется одна и та же жидкость или плотность не изменяется, можно записать, что высоты давления для вентиляторов равны одному и тому же значению, то есть квадрату кинематического отношения сходства для общих давлений, статических давлений и динамических давлений.

$$\frac{H'}{H} = \frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{P_{df}'}{P_{df}} = \left( \frac{V_g'}{V_c} \right)^2 = \left( \frac{V_g'}{V_g} \right)^2 = \left( \frac{V'}{V_g} \right)^2 = \mu^2 \quad (3.41)$$

### 3.4.5. Коэффициент Сходства Для Оборотов

Если корреляция кинематического сходства записывается с использованием дрейфующих (периферийных, тангенциальных) скоростей,

$$\mu = \frac{U'}{U} = \frac{\pi D' n' / 60}{\pi D n / 60} = \lambda \frac{n'}{n} \Rightarrow \frac{n'}{n} = \frac{\mu}{\lambda} \quad (3.42)$$

Отношение сходства высот давления вентилятора, общих давлений, статических давлений и динамических давлений в этом случае:

$$\frac{H'}{H} = \frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{P_{df}'}{P_{df}} = \mu^2 = \lambda^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \quad (3.43)$$

Если речь идет о том же вентиляторе; так как  $\lambda = 1$ ,

$$\mu = \frac{n'}{n}$$

Также используется одна и та же жидкость или будет, если плотность не изменится ( $\rho' = \rho$ ). Таким образом, если один и тот же вентилятор работает с использованием одной и той же жидкости, но с разными оборотами, высота давления, общее давление, статическое давление и динамическое давление могут быть рассчитаны по следующей корреляции:

$$\frac{H'}{H} = \frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{P_{df}'}{P_{df}} = \mu^2 = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad (3.44)$$

### 3.4.6. Коэффициент сходства для потоков

Коэффициент сходства для расходных материалов, чтобы показать диаметр рабочего колеса, ширину выходного крыла рабочего колеса и скорость меридиана на выходе рабочего колеса:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\pi D'_2 b'_2 C'_{m2}}{\pi D_2 b_2 C_{m2}} = \frac{D'_2}{D_2} \frac{b'_2}{b_2} \frac{C'_{m2}}{C_{m2}} = \lambda \lambda \mu = \lambda^2 \mu = \lambda^2 \lambda \left(\frac{n'}{n}\right) = \lambda^3 \left(\frac{n'}{n}\right) \quad (3.45)$$

Если речь идет о том же вентиляторе; так как  $\lambda = 1$ :

$$\frac{Q'}{Q} = \mu = \frac{n'}{n} \quad (3.46)$$

### 3.4.7. Коэффициент Сходства Для Теоретических Сил

$H$ : высота отжима

$$N = \frac{\gamma Q H}{75}; \quad N' = \frac{\gamma' Q' H'}{75} \quad (3.47)$$

Когда эти два выражения пропорциональны получается:

$$\frac{N'}{N} = \frac{\gamma' Q' H'}{\gamma Q H} = \frac{\rho' g' Q' H'}{\rho g Q H} = \frac{\rho' g'}{\rho g} \lambda^2 \mu \mu^2 = \frac{\rho' g'}{\rho g} \lambda^2 \mu^3 = \frac{\rho' g'}{\rho g} \lambda^2 \mu^3 \quad (3.48)$$

Если используется одна и та же порода жидкости, и эксперимент проводится в том же месте будет  $g! = g$ :

$$\frac{N'}{N} = \frac{Q' H'}{Q H} = \lambda^2 \mu^3 = \lambda^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^3 = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3.49)$$

Также, если речь идет о том же вентиляторе, будет  $\lambda = 1$

$$\frac{N'}{N} = \mu^3 = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3.50)$$

### 3.4.8. Коэффициент Сходства Для Гидравлических Сил

$$N'_h = M' \omega' = \rho' Q'_c \cdot (C_{u2}' U_2' - C_{u1}' U_1') \quad (3.51)$$

$$N_h = M \omega = \rho Q_c \cdot (C_{u2} U_2 - C_{u1} U_1) \quad (3.52)$$

$$\frac{N'_h}{N_h} = \frac{\rho' Q'_c}{\rho Q_c} \cdot \frac{C_{u2}' U_2'}{C_{u2} U_2} \cdot \frac{U_1'}{U_1} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu \mu = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu^3 \quad (3.53)$$

Если используется одна и та же порода жидкости, будет  $\rho' = \rho$ :

$$\frac{N'_h}{N_h} = \lambda^2 \mu^3 = \lambda^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^3 = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3.54)$$

Также, если речь идет о том же вентиляторе, это будет  $\lambda = 1$

$$\frac{N'_h}{N_h} = \mu^3 = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3.55)$$

### 3.4.9. Коэффициент Сходства Для Эффективных Сил

Технический Бюллетень 1/2018, приведенный на рис. 1.2, аналогичен треугольникам скорости, нарисованным для точек входа (1) и выхода (2) в канал между лопастями рабочего колеса фактического (прототипа) вентилятора вход в канал между лопастями рабочего колеса модельного вентилятора (1!) и выход (2!) рассмотрим треугольники скорости, нарисованные для их точек вместе. Если достигается кинематическое сходство, можно сказать, что гидравлические выходы равны.

$$\mu = \frac{U'_1}{U_1} = \frac{W'_1}{W_1} = \frac{C'_1}{C_1} = \frac{C'_{m1}}{C_{m1}} = \frac{C'_{u1}}{C_{u1}} = \frac{U'_2}{U_2} = \frac{W'_2}{W_2} = \frac{C'_2}{C_2} = \frac{C'_{m2}}{C_{m2}} = \frac{C'_{u2}}{C_{u2}} = \dots = \text{консм.} \quad (3.56)$$

Таким образом, треугольники скорости в одноранговых точках будут взаимно похожи друг на друга, а их углы будут взаимно равны.

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \quad ; \quad \alpha_2 = \alpha'_2 \quad ; \quad \beta_1 = \beta'_1 \quad ; \quad \beta_2 = \beta'_2 \quad (3.57)$$

Корреляции гидравлической эффективности,

$$\eta_h = \frac{H}{H_E} = \frac{gH}{C_{u2}U_2 - C_{u1}U_1} \quad \text{и} \quad \eta'_h = \frac{H'}{H'_E} = \frac{g'H'}{C_{u2}'U_2' - C_{u1}'U_1'} \quad (3.58)$$

$$g' = g$$

$$\eta'_h = \frac{g\mu^2 H}{\mu C_{u2}\mu U_2 - \mu C_{u1}\mu U_1} = \frac{g\mu^2 H}{\mu^2(C_{u2}U_2 - C_{u1}U_1)} = \eta_h \quad (3.59)$$

Если нет геометрически очень большой разницы между большим фактическим (прототипным) вентилятором и модельным вентилятором, механические выходы считаются примерно равными декомпозиции.

$$\eta'_m \cong \eta_m \quad (3.60)$$

Мы также можем принять эффективность утечки примерно равной,

$$\eta'_k \cong \eta_k \quad (3.61)$$

Таким образом, общая доходность также примерно равна,

$$\eta'_g \cong \eta_g \quad (3.62)$$

равенство может быть написано как,

$$\frac{N_e'}{N_e} = \frac{\gamma' Q' H'}{\gamma Q H} \frac{\eta_g}{\eta'_g} \quad (3.63)$$

Как сказано выше, учитывая ,

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \frac{\gamma' Q' H'}{\gamma Q H} \cong \frac{\rho' Q' H'}{\rho Q H} \cong \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu \mu^2 \cong \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu^3 \quad (3.64)$$

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \lambda^2 \mu^3 \cong \lambda^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^3 = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^3 \quad (3.65)$$

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \mu^3 \cong \left( \frac{n'}{n} \right)^3 \quad (3.66)$$

### 3.4.10. Коэффициент Сходства Для Крутящих Моментов

Используя уравнения;

$$Ne' = M'\omega'; Ne = M\omega \Rightarrow \frac{M'}{M} = \frac{Ne'}{Ne} \frac{\omega}{\omega'} \quad (3.67)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad \omega' = \frac{2\pi n'}{60} \quad (3.68)$$

$$\frac{M'}{M} = \frac{Ne' \omega}{Ne \omega'} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu^3 \frac{\eta_g}{\eta'_g} \frac{n}{n'} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu^3 \frac{\eta_g}{\eta'_g} \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^3 \mu^2 \frac{\eta'_g}{\eta_g} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\eta'_g}{\eta_g} \quad (3.69)$$

$$\frac{M'}{M} = \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\eta'_g}{\eta_g} \quad (3.70)$$

Как указано выше, принимая во внимание  $\eta'_g \cong \eta_g$  и используя тот же тип жидкости, принимая  $\rho' = \rho$

$$\frac{M'}{M} \cong \lambda^3 \mu^2 \cong \lambda^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \quad (3.71)$$

Также, если речь идет о том же вентиляторе, то  $\lambda = 1$ ;

$$\frac{M'}{M} \cong \mu^2 \cong \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \quad (3.72)$$

### 3.4.11. Уравнения Сходства Для Шума

Уровень шума (звукового давления) на входе или выходе вентилятора, D рабочее колесо вентилятора если частота вращения вентилятора (об / мин), а индексы 1 и 2 соответственно отображают аналогичные рабочие точки вентилятора; корреляция логарифмического сходства, используемая при расчете разницы между уровнями шума вентилятора между этими рабочими точками, определяется следующим образом;

$$L_2 - L_1 = 70 \log_{10} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) + 50 \log_{10} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.73)$$

Хотя это уравнение не дает таких точных результатов, как другие корреляции сходства, используемые для прогнозирования характеристик производительности вентилятора, она по-прежнему дает достаточно точные результаты в расчетах прогнозируемого шума.

### 3.4.12. 3 Закона Вентилятора, Которые Часто Используются В Приложении:

Используя корреляции сходства вентилятора (законы вентилятора), приведенные ранее, получается 3 Закона вентилятора (на самом деле 9 уравнений), которые широко используются в приложении.

Согласно стандарту AMCA210-16, эффекты сжимаемости могут быть незначительными при небольших изменениях плотности воздуха, не превышающих 10%, и 5% при оборотах в зависимости от условий входа (всасывания) в условиях испытаний в приложениях вентилятора. Следующие корреляции применимы к этим ситуациям.

#### 1. Закон Вентилятора:

Этот закон включает в себя объемный расход ( $Q$ ), давление вентилятора  $P$  и эффективную (вал) мощность на то, что; размер вентилятора (рабочее колесо вход (всасывание) диаметр  $D_1$ , рабочее колесо (выход) диаметр  $D_2$ , крыльчатка вход крыло  $B_1$ , крыльчатка выход крыло  $B_2$ , и т. д .. ) относится к эффекту числа оборотов ( $n$ ) или плотности жидкости. В отличие от других уравнений в выражении объемного расхода, было бы более точным получить входной диаметр колеса  $D_1$ .

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Q_2}{Q_1} = \lambda^3 \left( \frac{n'}{n} \right) = \left( \frac{D'_1}{D_1} \right)^3 \left( \frac{n'}{n} \right) = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^3 \left( \frac{n'}{n} \right) \quad (3.74)$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{P_2}{P_1} = \mu^2 \frac{\rho'}{\rho} = \lambda^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\rho'}{\rho} = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.75)$$

$$\frac{N_e'}{N_e} = \frac{Ne_2}{Ne_1} = \lambda^2 \mu^3 \frac{\rho'}{\rho} = \lambda^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^3 \frac{\rho'}{\rho} = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^3 \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.76)$$

#### 2. Закон Вентилятора:

Этот закон о том, что такое массовый расход ( $m=pQ$ ), частота вращения ( $n$ ) и эффективная (вал) мощность; размер вентилятора ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  и т. д.), относится к влиянию давления вентилятора  $P$  (общее давление вентилятора  $P_{tf}$  или статическое давление вентилятора  $P_{sf}$ ) или плотности жидкости.

$$\frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{\rho' Q'}{\rho Q} = \frac{\rho' Q_2}{\rho Q_1} = \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{D'_1}{D_1} \right)^2 \left( \frac{P'}{P} \right)^{1/2} = \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \left( \frac{P'}{P} \right)^{1/2} \quad (3.77)$$

$$\frac{n'}{n} = \frac{n_2}{n_1} = \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^{1/2} \left( \frac{P'}{P} \right)^{1/2} \left( \frac{D_2}{D'_2} \right) \quad (3.78)$$

$$\frac{N_e'}{N_e} = \frac{Ne_2}{Ne_1} = \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^{1/2} \left( \frac{P'}{P} \right)^{3/2} \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \quad (3.79)$$

### 3. Закон Вентилятора:

Этот закон включает в себя размер вентилятора ( $D_1, D_2, b_1, b_2$  и т. д.), объемный расход ( $Q$ ) или изменение плотности в жидкости; относится к влиянию на то, что частота вращения, давление вентилятора (общее давление вентилятора  $P_{tf}$  или статическое давление вентилятора  $P_{sf}$ ) и эффективную (вал) мощность.

$$\frac{n'}{n} = \frac{n_2}{n_1} = \left( \frac{D_2}{D'_2} \right)^3 \left( \frac{Q'}{Q} \right) \quad (3.80)$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{D_2}{D'_2} \right)^4 \left( \frac{Q'}{Q} \right)^2 \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.81)$$

$$\frac{N_e'}{N_e} = \frac{Ne_2}{Ne_1} = \left( \frac{D_2}{D'_2} \right)^4 \left( \frac{Q'}{Q} \right)^3 \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.82)$$

**Задача 3.1.** Вентиляция Aironn серии AIR-A-U / 500-6 с объемным расходом 3.2 м<sup>3</sup>/с, если частота вращения вентилятора увеличивается на 10% и используется одна и та же жидкость; насколько изменяется объемный расход, высота давления, динамическое давление, статическое давление, общее давление, крутящий момент и эффективная (вал) мощность в %?

#### Решение:

Поскольку геометрически один и тот же вентилятор задействован  $\lambda = 1$ ;

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} = \frac{1.10n}{n} = 1.10$$

Таким образом, объемный расход вентилятора увеличится на 10 %.

Высота отжима;

$$\frac{H'}{H} = \left( \frac{n'}{n} \right)^2 = \left( \frac{1.10n}{n} \right)^2 = (1.10)^2 = 1.21$$

Таким образом, высота отжима вентилятора увеличится на 21%.

Динамическое давление вентилятора,

$$\frac{P_{df}'}{P_{df}} = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2$$

Поскольку геометрически один и тот же вентилятор задействован  $\lambda = 1$ , и поскольку используется одна и та же жидкость, так как  $p' = p$ ;

$$\frac{P_{df}'}{P_{df}} = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 = \left( \frac{1.10n}{n} \right)^2 = (1.10)^2 = 1.21$$

В тех случаях, когда используется одна и та же жидкость, скорость сходства для динамических давлений равна квадрату кинематического отношения сходства.

Таким образом, динамическое давление вентилятора также увеличится на 21 %.

Если аналогичные операции выполняются для статического давления вентилятора и общего давления вентилятора;

$$\frac{P_{sf}'}{P_{sf}} = \frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \frac{\rho'}{\rho} \mu^2 = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \left(\frac{n'}{n}\right)^2 = \left(\frac{1.10n}{n}\right)^2 = (1.10)^2 = 1.21$$

Таким образом, статическое давление вентилятора и общее давление вентилятора также увеличивается на 21%.

Крутящий момент вентилятора;

$$\frac{M'}{M} \cong \lambda^3 \mu^2 \cong \lambda^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cong \mu^2 \cong \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cong \left(\frac{1.10n}{n}\right)^2 \cong (1.10)^2 \cong 1.21$$

Таким образом, крутящий момент вентилятора также увеличится примерно на 21 %.

Эффективная мощность вентилятора;

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \frac{\rho'}{\rho} \lambda^2 \mu^3$$

Если используется тот же тип жидкости,

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \lambda^2 \mu^3 \cong \lambda^5 \left(\frac{n'}{n}\right)^3$$

Также, если речь идет о том же вентиляторе,  $\lambda = 1$ ,

$$\frac{N_e'}{N_e} \cong \mu^3 \cong \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \cong \left(\frac{1.10n}{n}\right)^3 \cong (1.10)^3 \cong 1.331$$

Таким образом, эффективная мощность вентилятора увеличится примерно на 33,1%. Этот результат-обороты в вентиляторах это показывает, что с регулировкой количества можно добиться значительной экономии энергии. Этот процесс может быть выполнен с известными классическими, но низкоэффективными системами, такими как ременный шкив и коробка передач (редуктор), а также с системой с частотным управлением (инвертором), более современной и высокоэффективной системой управления частотой вращения, как это часто делается в последнее время.

Это также может быть сделано с помощью системы с частотным управлением (с инвертором), которая на практике является системой управления числом. Несмотря на то, что на практике первоначальные инвестиционные затраты превышают, контроль расхода и давления вентилятора с помощью систем с частотным управлением (с контролем частоты вращения) намного ниже, чем контроль расхода и давления вентилятора с использованием впускного демпфера или демпфера) или на выходе (выходной демпфер) демпферов с меньшими первоначальными инвестиционными затратами. Первоначальные инвестиции в результате использование систем с частотным управлением для вентиляторов более экономично с точки зрения «стоимости жизни», поскольку вентиляторы имеют очень большую долю «эксплуатационной (энергетической) стоимости» в рамках «пожизненной стоимости», которая является суммой стоимости и эксплуатационных расходов.

В связи с этим в приложении автоматизации AIRONN J-SMART "Smart fan" все реактивные вентиляторы работают с "частотными инверторами" с функцией режима огня. Таким образом, нет необходимости использовать распределительный материал, такой как контактор/тепловое/вспомогательное реле. Реактивные вентиляторы изготавливаются с одной обмоткой, поскольку они управляются частотным инвертором. Таким образом, вместо двойных оборотов в реактивных вентиляторах возникает возможность запуска с желаемой скоростью от 0% до 100%. Тем не менее, кабель 4x2.5 мм вместо кабеля 7x2.5 мм также экономит кабель и кабельную работу. Поскольку центральный ПЛК на плате общается с используемым частотным инвертором только по одному кабелю, для информации о состоянии, неисправности, управлении реактивным вентилятором также не требуются блоки ввода/вывода ПЛК. Кроме того, с добавлением J-Smart-CO система автоматизации реактивного вентилятора и система сигнализации окиси углерода могут быть представлены в одном пакете. Таким образом, пользователь может подробно увидеть среднее значение окиси углерода для каждой черепицы на экране панели системы автоматизации J-Smart jet fan. Это дает пользователю возможность запускать реактивные вентиляторы зон различной плотности окиси углерода с разной скоростью. Таким образом достигается значительная экономия энергии. С помощью инвертора можно сэкономить энергию на 30 – 50% по сравнению с ступенчатыми реактивными вентиляторами.

**Задача 3.2.** Вентиляция Aironn серии AIR-A-U / 1250-6 с объемным расходом 23 595 м<sup>3</sup>/с если вентилятор работает при 1200 об/мин, его общее давление составляет 3000 Па, а эффективная мощность-128,7 кВт. а) найти общую (общую) эффективность вентилятора? Б) если частота вращения вентилятора уменьшается до 840 об/мин; как насчет его расхода, общего давления и эффективной мощности?

**Решение:**

а) Общая эффективность вентилятора:

$$\eta_g = \frac{Q \cdot \Delta P_t}{N_e} = \frac{23.595 \text{ m}^3/\text{s} \times 3000 \text{ N/m}^2}{128700 \text{ Nm/s}} = 0.55$$

Б) Если законы сходства написаны, признавая, что общая эффективность вентилятора и плотность воздуха не меняются:

$$\frac{n'}{n} = \frac{840}{1200} = 0.7$$

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} = 0.7 \Rightarrow Q' = 0.7Q = 0.7 \times 23.595 \text{ (m}^3/\text{s}) = 16.517 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{\Delta P_t'}{\Delta P_t} = \frac{P_{tf}'}{P_{tf}} = \left( \frac{n'}{n} \right)^2 = (0.7)^2 = 0.49 \Rightarrow \Delta P_t' = 0.49 \Delta P_t = 0.49 \times 3000 \text{ Pa} = 1470 \text{ Pa}$$

$$\frac{N_e'}{N_e} = (0.7)^3 = 0.343 \Rightarrow N_e' = 0.343N_e = 0.343 \times 128.7 = 44.144 \text{ kW}$$

**Задача 3.3.** Вентиляционный вентилятор Aironn серии AIR-A-U/400-6 с диаметром рабочего колеса 300 мм, При работе при 900 об/мин воздух с плотностью 1244 кг/м<sup>3</sup> обеспечивает расход 2000 м<sup>3</sup>/ч и общее давление 3000 па. Другой воздушный вентилятор диаметром крыльчатки 400 мм из той же серии, что и этот вентилятор, при каком расходе и общем давлении будет нажимать тот же воздух при работе со скоростью 1300 об/мин? С какой скоростью мощность вентилятора будет увеличиваться в этом случае?

**Решение:**

1. Используя корреляции (2.74), (2.75) и (2.76) в законе вентилятора:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Q_2}{Q_1} = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^3 \left( \frac{n'}{n} \right)$$

$$Q' = Q_2 = Q_2 \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^3 \left( \frac{n'}{n} \right) = 2000 \left( \frac{400}{300} \right)^3 \left( \frac{1300}{900} \right) = 6848 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\rho'}{\rho}$$

$$P' = P_2 = P_1 \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{\rho'}{\rho} = 250 \left( \frac{400}{300} \right)^2 \left( \frac{1300}{900} \right)^2 \frac{1.244}{1.244} = 928 \text{ Pa}$$

$$\frac{N_e'}{N_e} = \frac{Ne_2}{Ne_1} = \left( \frac{D'_2}{D_2} \right)^5 \left( \frac{n'}{n} \right)^3 \frac{\rho'}{\rho} = \left( \frac{400}{300} \right)^5 \left( \frac{1300}{900} \right)^3 \frac{1.244}{1.244} = 12.7$$