

## Расчет и разработка импеллеров

Как правило, считается, что модели с электрическим двигателем выделяются низким отношением мощности к весу, т.е. относительно невысокой мощностью, но большим весом. Ничего не поделать с тем, что энергия, содержащаяся в обычных Ni-Cd или Ni-MH батареях, выраженная в Дж/кг бывает меньше, чем в метиловом, бензиновом или дизельном топливе того же веса. Примерно 135.000 Дж/кг в Ni-Cd батарее или около 250.000 в лучших Ni-MH элементах – против 20.200.000 Дж/кг в метаноле, т.е. в 80 или даже 150 раз больше энергии на килограмм веса, чем в батарее (последние разработки в области литиевых батарей, несколько улучшили ситуацию). Однако это соотношение улучшается, если учесть, что самые современные электромоторы гораздо более эффективны, чем любой старый ДВС. КПД электромотора – около 80%, а ДВС – примерно 10%, да и то не всегда. Но несмотря на это преимущество, счет обычно бывает от 1:10 до 1:18 в пользу шумных ДВС. В подсчетах допускаем, до некоторой степени оправданно, что моторы и «топлива» сами по себе имеют сходную силу, чтобы взвесить соотношения.

Однако, в абсолютных цифрах, мощность, необходимая небольшому самолету, удивительно мала, теоретически (в идеальных условиях) мощность, нужная самолету любого размера, зависит только от его веса, угла планирования и скорости полета. Поскольку угол планирования можно выразить также через отношение лобового сопротивления к подъемной силе, а подъемная сила в полете по прямой равна весу самолета, необходимая мощность может быть легко представлена следующей формулой:

$$P_{\text{flight}} = W \cdot g \cdot D / L \cdot v$$

Вес самолета в кг (точнее – масса) переводится в собственно вес умножением на ускорение свободного падения ( $g=9,8 \text{ м/с}^2$ ). Сокращая правую сторону уравнения, получаем совсем простую формулу:

$$P_{\text{flight}} = D \cdot v \text{ (Вт)}$$

Еще проще, когда речь идет о самолетах с импеллерами (или реактивными двигателями), если мы сравним тягу и сопротивление через скорость полета, тогда правильным будет равенство:

$$D = T$$

Иначе самолет будет ускоряться или терять скорость, пока равновесие не восстановится, или пока он не ударится о землю.

### Примечание:

Обозначения физических величин часто создают трудности. Здесь приведены пояснения к используемым обозначениям в соответствии с системой СИ:

Мощность –  $P$  (обычно в Вт)

Масса –  $W$  (обычно в г. или кг.)

Ускорение свободного падения –  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

Вес –  $W_a$  (в ньютонах Н)

Лобовое сопротивление –  $D$  (всегда в Н)

Подъемная сила –  $L$  (всегда в Н)

Скорость –  $w$  или  $v$  (обычно в м/с)

Тяга –  $T$  (всегда в Н)

Другие обозначения по мере необходимости объясняются в тексте.

### Примерный расчет 1

Чтобы проиллюстрировать применимость приведенных выше рассуждений, рассмотрим на примере:

Вес модели – 1 кг. (9,81 Н)

Коэффициент скольжения на  $v=15$  м/с – 1/7

Тяга импеллера на  $v=15$  м/с – 1,4 Н (143 г.)

Лобовое сопротивление на  $v=15$  м/с –  $D=W*a^{1/7}=1,4$  Н

Требуемая мощность –  $P_{\text{flight}} = W*a*D/L*v = 1*9,81*1/7*15=21$ Вт

*(Это – то, что обычно называют «поглощенной мощностью». Подводимая мощность всегда больше из-за потерь в подводящей цепи.)*

Возможно, что некоторые узнают в этом примере печально известные ранние импеллерные модели знаменитого производителя моделей из пенополистирола.

Очевидно, что на скорости около 15 м/с тяга равна лобовому сопротивлению. Поэтому на дальнейший набор высоты или ускорение мощности не остается, из-за полной неэффективности импеллера и его приспособленности под эту скорость.

При нагрузке на крыло около 65 г/дм<sup>2</sup> и выбранной конфигурации (отклоненное назад крыло и профиль) минимальная скорость – уже около 10-12 м/с. Таким образом, возможный диапазон скорости очень узок и самолет с трудом поддается управлению.

Однако, если сравнить действительно необходимую мощность лишь в 21 Вт с заявленной производителями мощностью примерно в 130 Вт, то нельзя не заметить явного несоответствия, которое требует анализа. КПД подобного тому, который вычислен в этом примере, т.е. 16% у электролетов быть не должно.

Как же возникает такое несоответствие? Случай, приведенный выше, является скорее исключительным, хотя и типичным, часто повторяющимся примером. Не хочется думать, что производители намеренно обманывают своих клиентов. Скорее здесь играет гораздо большую роль, чем это обычно считается незнание тех тончайших изменений, которые претерпевает модель на пути от конструирования до запуска в серию.

Так что немного четкой и физически точной информации по импеллерам от основных принципов действия до разработки моделей, теперь публикуется в виде, понятном любому моделисту и производителю, поскольку великое множество проектов часто заканчивались пустыми надеждами и разочарованием заказчиков.

И в этом тексте будет предпринята попытка разъяснить основные принципы действия и разработки импеллеров!

Это сложный предмет, который практически невозможно объяснить без использования простейших математических знаний (как было показано выше). Одних слов недостаточно, если мы собираемся использовать величины. Итак, дилетанты предупреждены, заинтересованные моделисты могут приступить к чтению.

Существуют удобные программы расчета авиамоделей со многими изменяемыми параметрами. Они годны для всех типов моторов и частично для импеллеров. С их помощью любой обладатель компьютера может опробовать свои идеи, даже не имея математических талантов.

## Немного физики, чтобы вникнуть в суть дела

Теперь рассмотрим упрощенную до предела схему импеллера, чтобы понять принцип его действия.

Рис. 1 показывает импеллер в его простейшей форме как открытый двигатель.

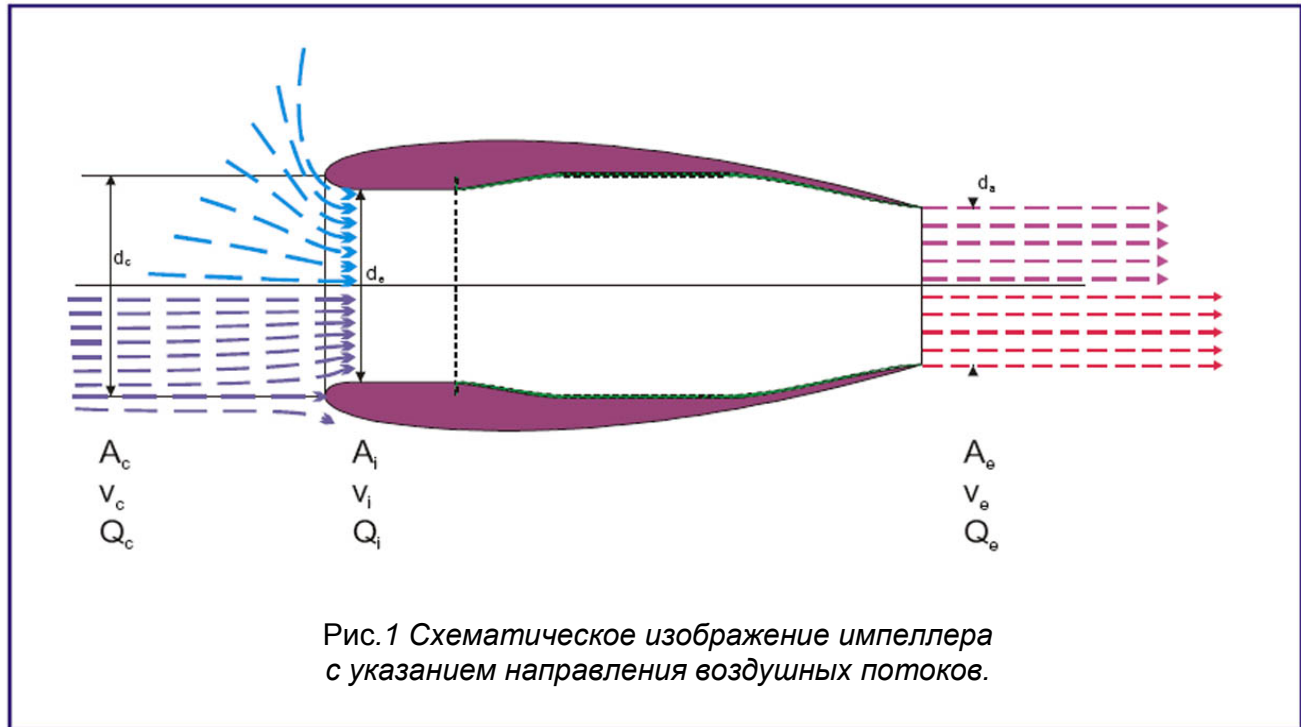


Рис.1 Схематическое изображение импеллера с указанием направления воздушных потоков.

Когда он встраивается в модель, внешнего обтекателя уже нет, поэтому воздухозаборники и выходные каналы должны быть длиннее и разветвленнее. В данный момент не будем учитывать эти детали, потому что интересует сам принцип, а он здесь остается неизменным. Сложные внутренние детали не рассматриваем совершенно сознательно, они не играют роли в общих соображениях, которые сейчас нам нужны.

Верхняя половина рис.1 показывает импеллер в состоянии покоя при скорости полета  $w=0$ . Линии возле входа изображают потоки воздуха, проходящие в импеллер равномерно со всех сторон, без разделения потока на входе и скорости  $v_i$  в горловине. Линии на выходе изображают идеализированный воздушный поток, исходящий из сопла с возросшей скоростью  $V_e$ .

Нижняя половина рис 1. Изображает импеллер в полете на скорости  $w \approx v_i$ .

Тот же воздушный поток на входе изображается почти прямыми линиями, а возросшая скорость воздушного потока по сравнению с состоянием покоя показана некоторым удлинением линий (скорее похожих на векторы). Строго говоря, эта иллюстрация неточна, поскольку не показаны завихрения в потоке воздуха, замедления у стенок импеллера, и возможные замедления потока и перебои на выходе.

Несмотря на эту сверхупрощенность, принцип работы импеллера, понятный для каждого, здесь передан верно:

Весь воздух входит спереди и выходит сзади.

Однако, нужно также отметить, что количество воздуха, входящего в импеллер в состоянии покоя, не обязательно должно быть таким же, что и в полете.

Количество воздуха  $Q$ , упомянутое здесь – это объем воздуха, проходящий через импеллер за одну секунду. Его нужно отличать от массы воздухопотока – термина используемого обычно в литературе по большим моторам – которая есть объем в секунду умноженный на плотность воздуха.

В специальной литературе над  $Q$  в качестве объема в секунду часто ставят черту или точку, в этом тексте ее опустим.

Уравнение

$$Q_i = Q_e \quad [1]$$

Демонстрирует закон непрерывности, сформулированный швейцарским математиком и физиком Бернулли (1700-1782), с которым мы еще встретимся здесь.

Можно легко представить себе количество проходящего воздуха в секунду в качестве столба воздуха, где площадь поперечного сечения «А» выводится из диаметра, а длина из расстояния, которое воздух проходит за секунду, представленное в виде скорости движения «v». Тогда сможем написать:

$$Q = A \cdot v = d^2 \cdot \pi / 4 \cdot v \quad [2]$$

Где  $d$  измеряется в метрах, а  $v$  – в м/с.

Объединяя [1] и [2], мы получим:  $d_i^2 \cdot \pi / 4 \cdot v_i = d_e^2 \cdot \pi / 4 \cdot V_e$  [3]

Это показывает, что скорость входного потока и скорость выходящего потока воздуха в импеллере, показанном на рис.1 обратно пропорциональна соответствующим площадям поперечного сечения, или площадям, которые соответствуют их диаметрам.

Например.

Импеллер, изображенный выше, имеет входной диаметр  $d_i = 70$  мм, а выходное сопло диаметром  $d_e = 70$  мм. Скорость полета примем  $w = 30$  м/с, так что  $v_i$  также будет равна 30 м/с. Скорость воздушного потока, выходящего из импеллера тогда рассчитывается так:

$$V_e = v_i \cdot d_i^2 \cdot d_e^{-2} \quad [4]$$

$$= 30 \text{ м/с} \cdot 70^2 \cdot 60^2 \approx 41 \text{ м/с}$$

Пока подсчитываем соотношение диаметров в квадрате, нет разницы, измерять ли их в метрах или в миллиметрах, результат будет тот же самый. В приведенном примере он равен примерно 1,36

Кстати, во всех наших подсчетах постараемся не использовать слишком много знаков после запятой, чтобы не претендовать на точность, которая не соответствует действительности.

В приведенном выше примере рассчитано, что скорость воздуха на выходе из импеллера примерно на 11 м/с больше, чем на входе. Разницу в скорости в дальнейших расчетах обозначим как  $\Delta v$  (от греческого «дельта»); это – та самая скоростная разность, которая во многом обуславливает увеличение мощности и КПД, достигаемое с помощью импеллеров.

Теперь давайте попробуем записать, с расчетами, мощность импеллера и его поведение на разных скоростях в соответствии с ранее оговоренными величинами – объем воздуха  $Q$ , входная скорость  $v_i$  и выходная скорость  $V_e$



## Расчет тяги

Принцип работы импеллера, как мы уже видели выше, на самом деле совсем несложен; воздух входит спереди и выходит сзади с возросшей скоростью. Это означает, что воздух разгоняется и в результате этого возникает движущая сила, которую можно измерить, и которую мы называем тягой. Согласно третьему закону Ньютона, этот процесс может быть описан простым равенством:

$$T = M \cdot \Delta v \quad [5]$$

Или, попросту говоря: Тяга (T) равна Массе потока (или массе за секунду), умноженной на разницу скорости ( $\Delta v$ ). Над M тут нужна точка или черта (см. пояснения по поводу Q выше).

Массу потока легко высчитать из значения Q, определенного ранее, умноженного на плотность воздуха.

Можно спорить по поводу значения плотности воздуха, которое может варьировать в зависимости от температуры, влажности и, разумеется, от высоты, на которой ее измеряют. Во всех, приведенных здесь примерах плотность воздуха  $\rho$  (греческое «ро») принята в 1,2 кг/м<sup>3</sup>. Эта величина обычна в наших широтах на уровне моря, она легко запоминается и удобна в расчетах с немногими знаками после запятой (см. прим. выше).

Таким образом наше уравнение [5] превращается в

$$T = Q \cdot 1,2 \cdot \Delta v \quad [6]$$

Где тяга измеряется в ньютонах (Н) по системе СИ

Для нашего прежнего примера значения будут следующими:

$$T = d^2 \cdot \pi / 4 \cdot v_i \cdot 1,2 \cdot \Delta v = 0,070^2 \cdot \pi / 4 \cdot 30 \cdot 1,2 \cdot 11 = 1,52 \text{ Н (или ок. 150 г.)}$$

Мы видим, что наш небольшой импеллер дает примерно 150 г тяги на скорости около 30 м/с (108 км/ч или  $\approx 67$  миль в час). Это не слишком вдохновляет. Но если принять, что хорошо спроектированная и построенная модель на этой скорости имеет соотношение лобового сопротивления к подъемной силе 1/9, то этого вполне достаточно, чтобы двигать на этой скорости самолет весом 1 кг.

Но как можно добиться увеличения мощности на упомянутой скорости движения?

Решение, согласно уравнению [6] показывает две возможности. Увеличение либо Q (для чего требуется больший диаметр входного отверстия), либо  $\Delta v$  (для этого нужно уменьшение диаметра на выходе). Или, может быть, и то и другое?

Импеллер на рис.1 действительно показывает правильный путь. Если внимательнее приглядеться к переднему краю, можно заметить закругление краев входного отверстия, и обозначение диаметра  $d_c$ , которое относится к наибольшей входной окружности. Так же, как и в мертвой точке на конце профиля, так и здесь, воздушный поток разделяется и течет либо в импеллер, либо снаружи вокруг него. Полностью это можно изобразить в трех измерениях симметрично вращающимся вокруг центральной оси. Плоскость сечения через  $d_c$  можно назвать также «площадью захвата».

Рис. 2 показывает пример технологии импеллера BR 715, которые используют Grumman Gulfstream. Здесь показано, как должно выглядеть эффективное впускное устройство. Также здесь можно совершенно четко заметить, что входное отверстие существенно больше выходного сопла.



Поскольку действующий входной диаметр слегка увеличивается за счет закругления краев входного отверстия, действующий поток воздуха и разница скоростей на входе и выходе возрастают.

Примем закругление примерно за 2,5 мм, тогда  $d_c$  будет 75 мм. Точный вид закругления – эллиптический, параболический, круглый или иной, нас пока интересоваться не будет.

Чистый эффект от закругления выражается в увеличении воздушного потока и тем самым увеличении скорости полета. В нашем примере на скорости  $w = 30$  м/с входной поток увеличивается благодаря этому фактору  $d_c^2/d_i^2 = 75^2/70^2 \approx 1,15$ . По этим меркам не только воздухопоток возрастает, но и скорость воздуха на выходе из сопла тоже, поскольку по закону непрерывности воздух уже «ускорен» тем же фактором, когда он входит в отверстие сечения  $A_i$ . Это означает, что входная скорость также увеличивается с примерно 41 м/с до  $\approx 47$  м/с. Новый подсчет согласно уравнению [6] будет таким:

$$T = 0,075^2 \cdot \pi / 4 \cdot 30 \cdot 1,2 \cdot 17 \approx 2,7 \text{ Н}$$

Как это ни удивительно, мы увеличили потенциальную тягу более чем на 77% просто закруглив края входного отверстия с радиусом 2,5 мм.

Этот простой арифметический пример очень ясно показывает, насколько важно уделять внимание правильному конструированию входного отверстия импеллера.

Разумеется, такое чудесное увеличение тяги импеллера не может продолжаться и дальше, поскольку за ускорение воздушного потока приходится платить заметным расходом

мощности. И, как часто бывает в реальной жизни, приходится платить преимуществом в мощности, чтобы добиться сравнительно небольшого увеличения ускорения.

Так что очевидно, главную роль в конструировании импеллера играют: полное сечение входа  $S_i$  (и форма края входного отверстия) – для размера воздушного потока, и соотношение между входным и выходным сечением – для ускорения воздушного потока.

### Потеря и обретение мощности

Как уже упоминалось выше, ускорение воздушного потока требует затрат мощности. Эта «использованная» мощность, однако потом обнаруживается в воздушном потоке, и поэтому называется «потеря импульса», она может быть выражена как произведение половины массы воздушного потока в секунду и квадрата скорости воздушного потока на выходе. Проще написать это в виде равенства:

$$I_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} = M/2 * V_e^2 \quad [7]$$

В физических обозначениях это дает нам следующий расчет для нашего примера:

$$Q = d_c^2 * \pi / 4 * w = 0,075^2 * \pi / 4 * 30 = 0,133 \text{ м/с, откуда}$$

$$M = Q * \rho = 0,133 * 1,2 = 0,16 \text{ кг/с, и}$$

$$V_e^2 = 47^2 = 2209 \text{ м}^2/\text{с}^2:$$

$$I_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} = M/2 * V_e^2 = 0,16 \text{ кг/с} / 2 * 2209 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 177 \text{ Вт.}$$

*(Прим. автора: приведенные выше величины подразумевают в конечном итоге кг/с \* м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> = кг \* м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>. В данном случае у нас есть масса, а не вес потока, так что результат надо умножить на ускорение свободного падения, чтобы получить правильную величину Н\*м/с для Вт. Поскольку 1 кг\*м/с = 9,81 Вт трансформация нормально сохраняется, так как ведет к тому же числовому значению. Другая причина такого разнобоя в величинах исходит от обычая использовать в расчете воздуха плотность  $\rho$  в 1,2 кг/м<sup>3</sup>, чтобы получить результат в Н(Ньютонах). Строго говоря, можно разделить плотность на 9,81 м/с<sup>2</sup>, чтобы получить «плотность массы». Так что точная величина  $\rho$  на самом деле 1,2 кг/м<sup>3</sup>/м/с<sup>2</sup> = кг\*с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>, и с учетом этого величины будут снова верными).*

Так что наш импеллер, встроенный, или прикрепленный к модели снаружи, движется через воздух со скоростью  $w=30$  м/с, и поэтому испытывает напор встречного ветра того же размера. Из-за этого встречного ветра происходит то, что большинство моделистов (и даже «импеллерных гуру») считают несущественным, неважным и незначительным. В действительности этот эффект значителен, очень важен, а иногда играет решающую роль в успехе или провале модели, оснащенной импеллерами. И если мы обсуждаем разработку этих устройств, нужно рассматривать и этот эффект.

Мы имеем в виду возврат энергии или импульса на входе.

Так же, как мы прежде рассматривали потерю импульса на выходе воздушного потока, по тому же принципу мы можем с полным правом принять, что воздушный поток, входящий в импеллер, несет некоторое количество энергии относительно самолета, когда тот движется сквозь воздух. В состоянии покоя, когда воздух засасывается в импеллер, прибавка энергии, естественно быть не может.

Таким образом мы можем по аналогии с равенством [7] написать:

$$I_{\text{gain}} = P_{\text{gain}} = M/2 * w^2 \quad [8]$$



Для нашего импеллера с рисунка, при уже приведенных выше значениях, это будет:

$$M=0,16 \text{ кг/с}$$

$$w^2=30^2=900 \text{ м}^2/\text{с}^2$$

$$\text{а возврат } P_{\text{gain}}=0,16/2*900=72 \text{ Вт}$$

Это равняется 40% от необходимой мощности импеллера и, по-моему, эту величину нельзя назвать незначительной.

Давайте подытожим все значения в примере:

Входной диаметр  $d_i=70 \text{ мм}$ , 2,5 мм – закругление краев, т.е.  $d_c=75 \text{ мм}$ .

Выходной диаметр сопла  $d_e=60 \text{ мм}$

Скорость полета  $w=30 \text{ м/с}$

Воздушный поток  $Q=0,13 \text{ м}^3/\text{с}$  (при  $w=30 \text{ м/с}$ )

Масса потока  $M=0,16 \text{ кг/с}$

Тяга на  $30 \text{ м/с}=2,7 \text{ Н}$

Потерянная мощность = 177Вт

«Возврат мощности» (при  $w=30 \text{ м/с}$ ) = 72 Вт

Если теперь вычесть возвращенную мощность из потерянной, можно вычислить мощность, которую импеллер отдает воздушному потоку, чтобы тот мог вырабатывать упомянутую тягу на соответствующей скорости:

$$P_{\text{fan}} = P_{\text{loss}} - P_{\text{gain}} \quad [9]$$

В нашем примере:

$$P_{\text{fan}} = 177-72 = 105 \text{ Вт.}$$

Противостоит этому сила, которую движущее устройство передает модели (или, которую получает модель), когда оно продвигает модель вперед с постоянной скоростью и преодолевает сопротивление.

В самом начале этой главы мы уже знакомились с ней, не обозначая ее в уравнении, и вот она появилась снова:

$$P_{\text{flight}} = D*w = T*w \quad [10]$$

Это означает, что мощность, отданная модели при полете на постоянной скорости равна произведению тяги (Т) на скорость (w)

$$\text{В нашем примере мы получаем: } P_{\text{flight}} = T*w = 2,7\text{Н}*30 \text{ м/с} = 81 \text{ Вт.}$$

### Импеллер и его эффективность

Теперь дилемма импеллерной мании буквально бросается в глаза (хотя и не так явно, как в нашем начальном примере, но тем не менее):

Мощность, передаваемая импеллером воздушному потоку, и мощность, используемая для передвижения самолета – это две разные силы, этот факт прекрасно видят энтузиасты электрических импеллеров, и они научились его принимать. Пока кто-нибудь не переделает все известные законы физики, нам остается лишь пытаться уменьшить неизбежные потери мощности разумным проектированием.



Соотношение между двумя мощностями  $P_{\text{flight}}$  и  $P_{\text{fan}}$  обычно называют идеальными или внешним КПД тяги. В англоязычной литературе он часто называется КПД Фроуда в честь известного британского физика Вильяма Фроуда.

Теперь представим приведенное выше утверждение в виде равенства:

$$\text{КПД тяги } \eta_{\text{propulsion}} = P_{\text{flight}} / P_{\text{fan}} \quad [11]$$

Если выразить это в цифрах, которые мы вычислили для нашего импеллера:

$$\eta_{\text{propulsion}} = 81/105 \text{ Вт} = 0,77 \text{ или } 77\%$$

И это только КПД Фроуда. Он может еще увеличиваться благодаря «внутреннему» КПД и КПД электрической тяги (каждый примерно 0,8 при удачном стечении обстоятельств) достигая размеров предельных для нашего двигателя. Об этом мы будем говорить чуть позже.

У нас возникают совершенно невероятные цифры. Если честно, они наверняка отпугнут здравомыслящих моделистов от использования электрических импеллеров. Кстати, после первого воодушевления, эти неизбежные факты привели к отказу от импеллеров как движителей в мире настоящей авиации — из-за их низкой мощности и низкой скорости. В 1970-х было несколько интересных разработок, на память приходят Fan Islander от Britton-Norman и Fantrainer. Но в этой области обычные пропеллеры имели явное преимущество благодаря более высокому КПД. Когда дело доходит до гигантских мощных двигателей коммерческой и военной авиации, ситуация становится иной, поскольку в дело вступают очень высокие мощности и скорости.

Но для нас, моделистов, импеллерная система тяги (особенно электрическая), — это лишь способ достижения особых целей, а именно — двигать модели самолетов, которые лишь внешне похожи на настоящие реактивные самолеты. И, поскольку КПД двигателя сам по себе играет незначительную роль в экономическом смысле (нам не нужно перевозить полезный груз на установленное расстояние за уплаченные деньги — и получать прибыль), мы можем поэкспериментировать с решениями, которые подходят к нашим целям, и наслаждаться теми из них, которые могут работать.

Рассчитанный выше примерный импеллер — это, конечно, удачное изделие, тщательно подогнанное по размерам. Влияние других размеров на другие критерии легко вычислить, введя соответствующие данные в сопутствующие компьютерные программы. Эти программы позволят вам, читатели, рассматривать различные варианты и их влияние на характеристики импеллера.

Теперь же мы поглядим, как наш импеллер будет вести себя на иной скорости, чем принятая прежде 30 м/с

### Отличная/отвратная статическая тяга

Для этого мы попробуем решить уравнения для импеллера на скорости  $w = 0$  м/с. Эти условия показывает верхняя половина рис.1. Согласно нашим предыдущим соображениям, мы можем с уверенностью сказать, что потерянная мощность не может быть снова рассчитана по формуле [7], а возвращенная мощность по формуле [8], поскольку скорость полета равна нулю.

В итоге, уравнение, уже приведенное выше, будет таким:

$$I_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} = M/2 \cdot V_e^2$$

Трудность здесь в том, что насколько мы можем видеть из уравнения, практически все переменные неизвестны, и потому формула кажется бесполезной. Тут мы используем хитрый прием, предположив, что мощность импеллера останется такой же, что и в преды-

дущем случае, на скорости  $w=30$  м/с, т.е. 105 Вт. Это предположение подтвердится, так как можно ожидать, что мощность импеллера, достигаемая в полете и используемая для ускорения воздушного потока, также доступна и в неподвижном состоянии. Разумеется, мощность на валу больше, чем мощность разогнанного воздушного потока, поскольку КПД импеллера не достигает 100%, и эти потери происходят при вращении.

Геометрических различий между двумя этими состояниями импеллера нет, так что соотношения здесь будут такими же, что и в условиях полета.

Теперь, согласно уравнению [6] тяга рассчитывается как  $T = Q \cdot 1,2 \cdot \Delta v$ , а  $\Delta v$  равно скорости воздушного потока на выходе  $V_e$ , поскольку воздушный поток разгоняется с 0 м/с до  $V_e$ . Назовем статическую тягу, как особый случай  $T_0$ , и придадим индекс 0 всем остальным величинам, тогда мы получим измененную формулу [6]

$$T_0 = Q_{e0} \cdot 1,2 \cdot v_0 \quad [12]$$

Воздушный поток  $Q$ , как мы уже видели прежде, зависит от скорости и диаметра (по формуле [2]), и потому

$$Q_{e0} = d_e^2 \cdot \pi / 4 \cdot v_{e0}$$

Подставим это в формулу [12] и получим

$$T_0 = d_e^2 \cdot \pi / 4 \cdot v_{e0} \cdot 1,2 \cdot v_{e0} = 1,2 \cdot \pi / 4 \cdot d_e^2 \cdot v_{e0}^2 = 0,9425 \cdot d_e^2 \cdot v_{e0}^2$$

Единственным неизвестным останется  $v_{e0}$ , которое мы получим после расширения и переработки формулы потери энергии [7]:

$$P_{\text{loss}} = M/2 \cdot v_{e0}^2 = (1,2 \cdot \pi / 4 \cdot d_e^2 \cdot v_{e0} / 2) \cdot v_{e0}^2 = 0,471 \cdot d_e^2 \cdot v_{e0}^2$$

И отсюда:  $v_{e0}^3 = P_{\text{loss}} / 0,471 \cdot d_e^2$ , а значит

$$v_{e0} = \sqrt[3]{P_{\text{loss}} / 0,471 \cdot d_e^2} \quad [13]$$

Теперь мы можем рассчитать скорость воздуха на выходе из сопла в неподвижном состоянии для этого же импеллера

$$v_{e0} = \sqrt[3]{105 / 0,471 \cdot 0,060^2} = 39,5 \text{ м/с}$$

Странно это или нет, но эта скорость существенно (в данном случае на 19%) меньше, чем рассчитанная скорость воздушного потока на выходе для полета на скорости 30 м/с. В этих условиях принимается, что отдача мощности мотора и внутренние потери должны быть одинаковыми.

Если игнорировать мелкие отклонения, то тут ясно демонстрируется тот факт, что скорость воздушного потока на выходе  $v_e$  в неподвижном состоянии меньше и увеличивается с увеличением скорости полета (для одного и того же импеллера и одинаковой мощности, но не для одной и той же скорости вращения мотора).

Между тем мы можем ввести  $v_{e0}$  в формулу [12] и после нескольких перемножений и подстановок получить:

$$T_0 = 1,52 \cdot d_e^2 \cdot (P_{\text{loss}} / d_e^2)^{2/3} \quad [14]$$

(Коэффициент 1,52 в начале – это округление, в попытке уменьшить количество знаков после запятой. Точное значение лежит между 1,471 и 1,558 в зависимости от плотности воздуха, и потому варьируется с изменением давления, температуры и влажности.)

Однако, из приведенных выше вычислений видно, что результат этот выведен логически и основан на строгом применении основных законов физики.

Эта формула важнейший ключ для всех расчетов по импеллерам. Она позволяет изменением всего двух переменных – диаметра выходного отверстия и потерянной мощности – рассчитывать ожидаемую тягу в имеющемся устройстве. Форма и тип движущей силы на этом раннем этапе значения не имеют.

Давайте посмотрим теперь, как это равенство послужит нам в нашем примере:

Диаметр выходного отверстия  $d_e=60$  мм, а потерянная мощность от мощности  $P_{fan}=105$  Вт.

Подставим эти значения в формулу [14] и получаем:

$$T_0 = 1,52 \cdot 0,060^2 (105/0,060^2)^{2/3} = 1,52 \cdot 0,003600 \cdot (105/0,003600)^{0,666} = 5,2 \text{ Н} = 530 \text{ г.}$$

(Здесь в виде исключения мы оставили цифры после запятой, потому что использовали очень малые величины, иначе точность сильно пострадала бы. Карманный калькулятор легко справляется с этими расчетами.)

Для тех, у кого есть компьютер, существуют программы, способные проверить самые безумные фантазии, а также установить после необходимых измерений, соответствует ли заданным требованиям приобретенный импеллер.

### Еще большая эффективность

Сейчас для нас самый животрепещущий вопрос - как потерянная мощность связана с мощностью мотора, чтобы можно было использовать реальную вещь, а не воображаемый воздушный поток, сила которого не слишком будет интересовать нас в дальнейших расчетах. Нас интересует лишь простейший метод определения тяги на основе физических величин и мощности мотора.

Отношение мощности импеллера (а это то же самое, что и потерянная мощность относительно воздушного потока) к мощности мотора может быть определено как внутренний КПД устройства, т.е.  $\eta_i = P_{fan} / P_{mot}$

Потери внутри импеллера состоят из трех основных компонентов:

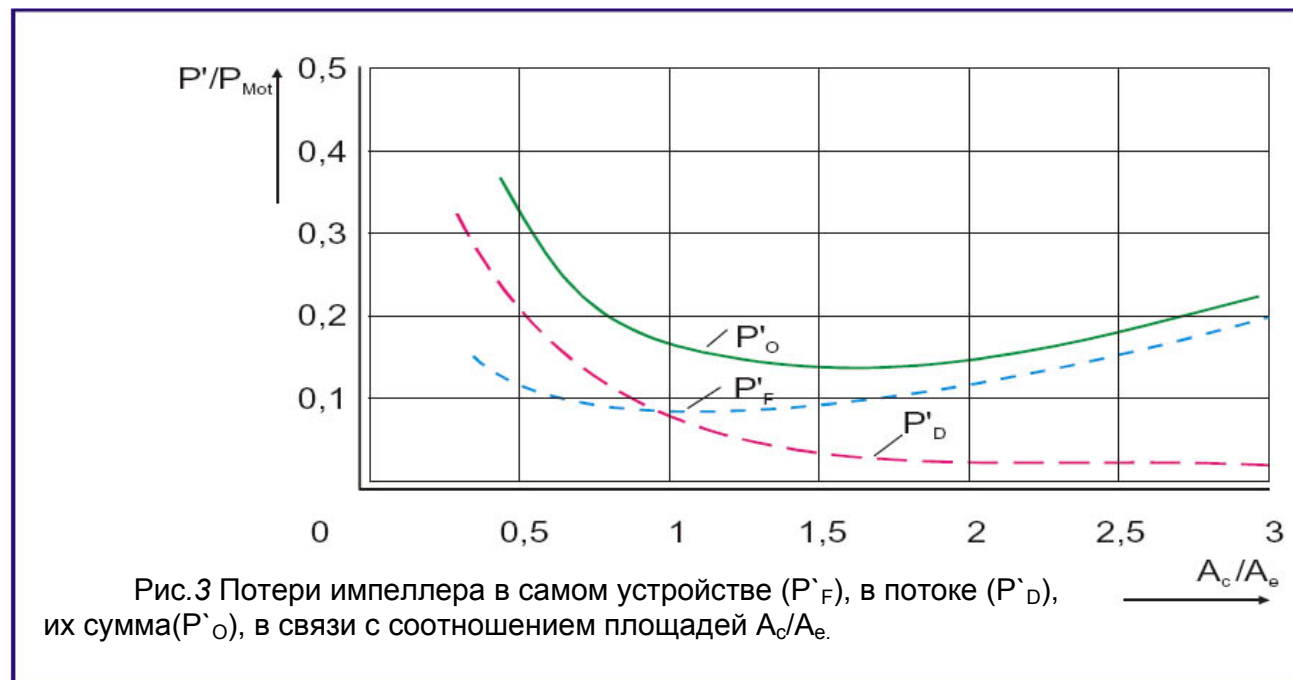
- 1) в самом импеллере, т.е. в лопастях ротора и статоре;
- 2) во время преобразования давления в скорость и наоборот;
- 3) из-за трения воздуха о внутренние стенки импеллера. Пока без доказательств (они будут позже) мы пренебрежем потерями из-за трения (3). Эти потери слишком малы для импеллеров, изображенных на рис.1 и 2. Как правило, они составляют лишь единицы процентов от затраченной энергии.

Потери в роторе и статоре могут быть куда более существенными, если его геометрия неудачна, но если инженерная разработка правильна (что и является целью нашей работы, и будет подробно разъяснено здесь) – потери удерживаются в рамках от 15 до 8%, где последнее значение является минимальным, какое только может быть достигнуто, по нашему мнению.

Остается второй источник – превращение скорости в давление (прохождение через рассекатель), или наоборот давления в скорость, как это происходит в сопле. Оба превращения сопровождаются потерями, которые согласно всем наблюдениям (и законам физики) больше при проходе через лопасти, чем при выходе из сопла. Минимально возможные потери в 1 и 2 пунктах зависят, прежде всего, от соотношения между сечением входного и выходного отверстий, т.е. площади захвата и сопла.

Они показаны на рис.3.





Для расчета кривых использованы особые критерии для импеллеров, обычные законы для воздушного потока и некоторые подтвержденные практикой данные для разработки импеллеров.

Мы поговорим о происхождении этих кривых чуть позже. Здесь же представлена основная тенденция без претензий на абсолютную точность. В некоторых случаях могут быть отклонения от показанных здесь кривых, но они не влияют на результаты, обрисованные здесь.

Из графика мы видим, что потери импеллера, обозначенные здесь как  $P'_F$  меньше всего при соотношении площадей  $A_c/A_e=1$ , и возрастают лишь немного, когда соотношение  $A_c/A_e$  увеличивается. При соотношении меньше единицы, т.е. когда площадь захвата становится меньше площади сопла, потери возрастают пропорционально уменьшению. При  $A_c/A_e=0,5$  общие потери импеллера возрастают более чем до 30%.

Кривая «трансформационных потерь», обозначенных здесь  $P'_D$  имеет вид гиперболы и на рисунке падает от очень высоких значений при малых соотношениях площадей практически до нуля при соотношении больше 3.

Добавив «трансформационные потери» к потерям в импеллере, мы получим «внутренние потери» импеллера, обозначенные  $P'_O$  (о – значит «общие»).

Кривая общих внутренних потерь достигает наименьших значений в 15-18% при соотношении площадей от 1,2 до 2. Это показывает, что при таких условиях импеллер (как правило) может достичь наибольшего КПД – около 80-85%.

Этот график также убедительно демонстрирует, что площадь захвата  $A_c$  должна быть больше, чем площадь сопла  $A_e$ , для того, чтобы достичь разумного КПД импеллера (малых внутренних потерь). Многие моделисты отыскивали эти основные правила эмпирически, методом проб и ошибок.

В модели с импеллерами, описанной в начале этой главы, основной принцип не был замечен так поразительно ярко (возможно из-за особенностей производства или обычного невежества).

К несчастью, предложенные усовершенствования в специальных журналах сводятся в основном к установкам повышенной мощности, в соответствии с правилом «спасение только в мощности». Лишь одно предложение вошло в правило – изменение соотношения  $A_c/A_e$  установкой стаканчика от йогурта с отрезанным дном на сопле. Это предложение было опубликовано в EFI – журнале для продвинутых моделистов.

Однако, мы можем наконец ответить на вопрос о мощности двигателя, заданный выше: поскольку внутренние потери импеллера составляют около 15% согласно рис.3 (в хорошо спроектированной и построенной машине), то ее КПД может достигать 85%, а  $\eta=0,85$ , отсюда:

$$P_{fan} = P_{mot} * 0,85$$

Таким образом, в формуле статической тяги мы можем теперь написать:

$$T_0 = 1,52 * d_e^2 (P_{mot} * 0,85 / d_e^2)^{2/3} \quad [14.1]$$

И поскольку потерянная мощность в нашем примере была равна 105 Вт, мощность мотора (также называемая мощностью на валу) рассчитывается как  $105/0,85=123$  Вт.

Это немногим менее 125 Вт, отметки, с которой мы начинали свои первоначальные вычисления. Расхождение примерно в 1% - результат округления чисел.

Если мы примем КПД мотора равным 0,6 (60%), то подводимая электрическая мощность высчитывается примерно в 200 Вт, что очень удобно для моторов класса "Speed 600".

Таким образом, наш импеллер с соплом диаметра 60 мм. и правильно закругленным входом диаметра 70 мм – как раз то, что надо для моторов этого класса. Внешний диаметр импеллера должен быть 80 мм, а втулки – 40 мм, но тут я забегаю вперед.

Позже будет показано, что с более мощным мотором (до 1200 Вт), тот же самый импеллер в том же самом корпусе может дать статическую тягу до 20 Н.

Это, разумеется, невозможно, если импеллер установлен внутри фюзеляжа, с длинной входной и выходной трубой. В таких устройствах потери в трубе будут очень высокими, достигая 10-15% от общей мощности мотора.

Рис.4 показывает технические характеристики продвинутого импеллера. Он также демонстрирует, что свыше некоего определенного уровня мощности (в данном случае около 1,5 кВт) дальнейшее возрастание скорости вращения импеллера вряд ли достижимо из-за того, что потребление энергии возрастает в кубической пропорции по отношению к числу оборотов импеллера.

Теперь мы можем посмотреть, как выглядит наш примерный импеллер.

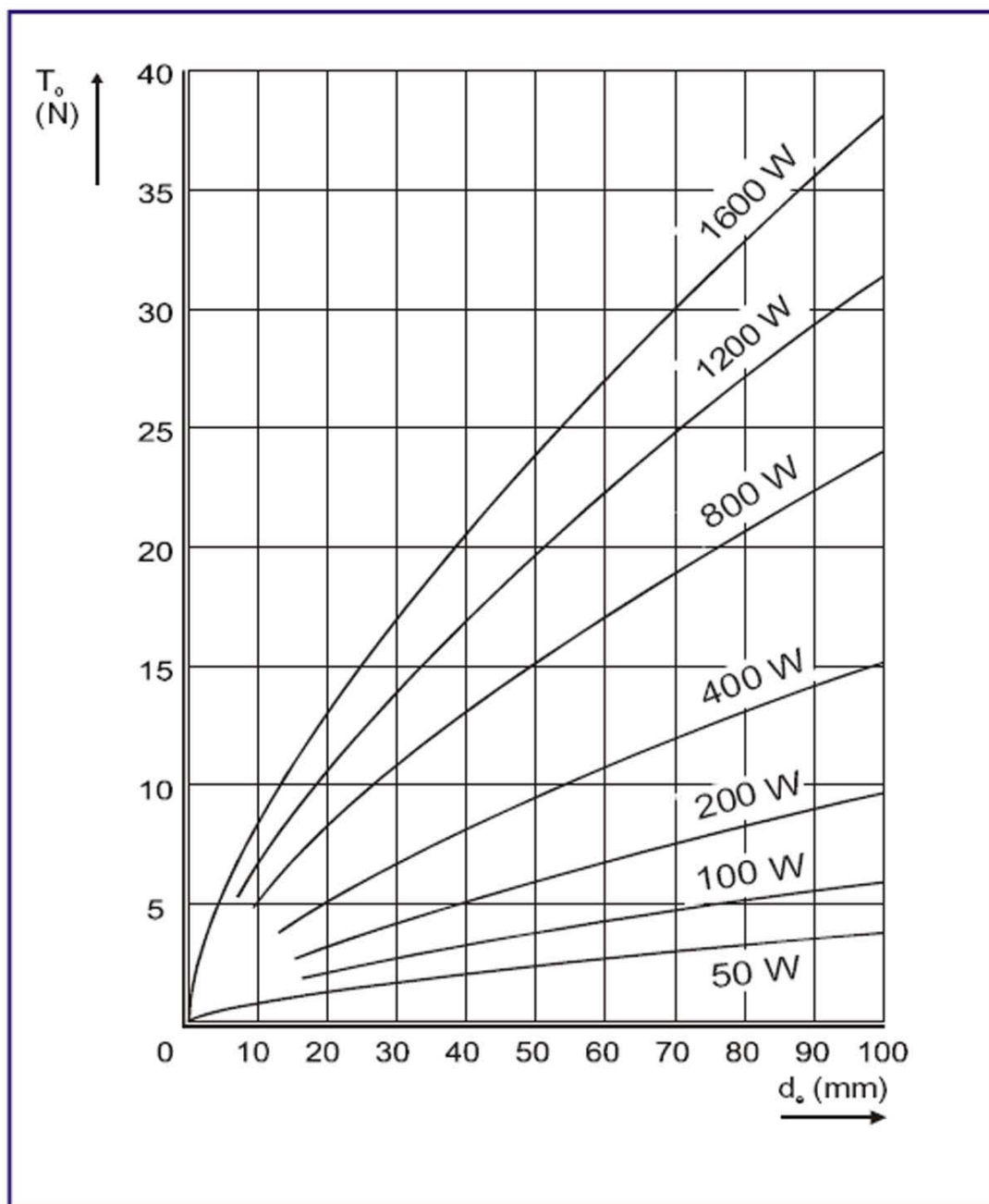
Preliminary sketch II Scale 1:1

EDF WM 600

Electric Ducted Fan for 600 size motors  
static thrust :

11.5N~40oz at 500W and 23500rpm

7.1N~25oz at 200W and 18000rpm



На графике показаны результаты выведенные из формулы [14.1]. Здесь мы можем видеть несколько кривых, начинающихся из нулевой отметки, которые показывают отношение возрастания статической тяги к увеличению диаметра сопла при различных уровнях мощности. Как и можно было ожидать, низкий уровень мощности дает невысокие значения статической тяги, но, что удивительно, тяга при увеличении диаметра сопла на этих уровнях мощности тоже увеличивается медленно, т.е. кривые получаются очень пологими. Однако, когда мы имеем избыток мощности – скажем, более 400 Вт, прирост статической тяги уже гораздо значительнее даже при небольшом увеличении диаметра сопла. При действительно высоких мощностях стоит выбрать самый большой диаметр сопла, какой только доступен для этой модели (он, скорее всего еще меньше размеров нынешних импеллеров – но это уже другая тема).

При уровне мощности более 1000 Вт небольшое увеличение диаметра сопла дает огромный прирост тяги. Однако, удвоение мощности мотора в том же самом импеллере дает увеличение статической тяги не более чем на 63%.