

*Ступников О. А.*

## **ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОТОРНОГО АППАРАТА**

*Работа выполнена под руководством к.т.н., доц. Ковергина А. Д.  
и к.т.н., ст. преп. Галкина П. А.*

*ТГТУ, Кафедра «Технология машиностроения,  
металлорежущие станки и инструменты»*

В настоящее время существует несколько методик расчета роторных аппаратов. Одни из них основаны на закономерностях течения среды в каналах ротора и статора, описываемых с помощью уравнения типа Рикатти [1,2]. Другие методики используют для этого уравнение Бернулли для нестационарного течения среды [3-5]. При этом рассматривается течение среды одновременно в канале ротора и в канале статора, считая канал ротора неподвижным. На самом деле, очевидно, что закономерности движения различны во вращающихся и неподвижных каналах аппарата.

В методика расчета, предложенная в [6] позволяет спроектировать роторный аппарат, осуществляющий наиболее эффективное воздействие на обрабатываемую среду при проведении процессов в системах «жидкость-жидкость», «твердое-жидкость» и «жидкость-газ» в процессах химической технологии.

При этом аппарат работает в условиях возникновения автоколебательного режима и максимально развитой акустической кавитации. Следует отметить, что впервые при расчете, на основании теоретических и экспериментальных исследований, учитываются особенности течения жидкости в модуляторе роторного аппарата, описываемых новой математической моделью, и влияние начального содержания свободного газа в обрабатываемой среде [7].

В предложенной инженерной методике расчета роторного аппарата использован зонный подход для построения моделей течения. Рассматриваются две зоны имеющие размеры одного порядка – каналы ротора и статора. Необходимым условием такого подхода является определение условий сшивки решения задачи для этих зон. В этом случае это условие определяется на основании уравнения неразрывности таким образом, что параметры течения среды на выходе из канала ротора равны параметрам среды на входе в канал статора [8].

Методика расчета основана на комплексе теоретических и экспериментальных исследований гидромеханических, акустических и кавитационных особенностей режимов работы роторного аппарата.

После изучения возможностей производителя в обеспечении точности изготовления деталей, наличии комплектующих – электродвигателей переменного тока и питающих центробежных насосов дополнительно задают следующие параметры, необходимые для расчета режимных и конструктивных размеров роторного аппарата, которые корректируются в процессе расчета:

- частоту вращения ротора принимают равной частоте вращения электродвигателя, обычно её выбирают из стандартного ряда  $\sim 100, 150, 300 \text{ с}^{-1}$ , при этом следует учитывать, что потребляемая мощность пропорциональна  $\sim \omega^{2,5}$ , но с увеличением угловой скорости вращения возрастает эффективность работы роторного аппарата. Обычно предварительно принимают  $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ ;

- величину зазора между ротором и статором  $\delta \approx 10^{-4}$  м, для обрабатываемых сред имеющих вязкость одного порядка с водой, и увеличиваем до  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  м для жидкостей с большей вязкостью;

- форму поперечного сечения каналов принимаем прямоугольной [3];

- толщину стенки ротора из условий прочности и удобства технологии изготовления каналов фрезерованием при составном роторе. Причем для радиальных каналов  $l_p = h_p$ , для наклонных каналов  $l_p = h_p / \cos \gamma$ . Таким образом можно увеличивать длину канала в роторе при постоянной его толщине.

В начале расчета:

- принимаем направление каналов радиальным;

- определяем ряд насосов имеющих производительность равную или близкую к заданной. Определяем давление, создаваемое насосами  $P_{нас}$ ;

- при необходимости назначаем угол наклона каналов в статоре в интервале  $0 \dots 90^\circ$ .

- определяем начальное содержание свободного газа в обрабатываемой среде. Если оно неизвестно, то задаем  $\alpha_0$  по справочным данным.

- задаем ширину канала в роторе и статоре, считая  $a_p = a_c = a$ :

- а) для процесса эмульгирования  $a = 2 \dots 3 \cdot 10^{-3}$  м;

- б) для процесса растворения  $a \geq d_{\max}$ .

С целью получения расчетных и конструктивных параметров роторного аппарата, на основании закономерностей полученных в работах [7-10] предложена методика оптимизационного расчета.

В качестве критерия оптимизации выбран  $\frac{l}{a} \rightarrow \min$  и из равенства величин наибольшего импульса «отрицательного» давления

$$P_m = \frac{2\rho l_p^2 \omega^2 R_p^2}{ShZa^2} \left| \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right|.$$

И величины наибольшего импульса «отрицательного» давления по зависимости связывающей практический критерий кавитации – коэффициент кавитации Стайлса и теоретическое число акустической кавитации:

$$P_m = \frac{P_p}{\chi_a(1 + K_c)}.$$

Существуют следующие методы оптимизации:

1. Методы поиска экстремума функции  $f(x)$  (одномерной оптимизации)
2. Градиентные методы поиска экстремумом функции нескольких переменных.
3. Безградиентные методы поиска экстремума функций многих переменных.
4. Безусловная оптимизация при наличии “оврагов” целевой функции.

При данной оптимизации был выбран градиентный метод поиска экстремума функции многих переменных на основании координатного спуска.

В основу градиентных методов положены вычисление и анализ производных целевой функции. Поскольку в практических задачах найти значения производных аналитически как правило не удается, их вычисляют приближенно:

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \approx \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \delta x_i, \dots, x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\delta x_i}.$$

Выбор величин приращений по координатам  $\delta x_i, i = 1, 2, \dots, n$  зависит от возможностей используемой ЭВМ и необходимой точности вычислений.

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - h \cdot \frac{\frac{\partial f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x_j} \right)^2}}, \quad i=1, 2, \dots, n;$$

$$k=0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

Модификацией метода градиента, является метод координатного спуска с постоянным шагом, позволяющая сократить общий объем вычислений при некотором увеличении числа членов минимизирующей последовательности за счет меньшего количества вычислений частных производных целевой функции. При использовании этого метода аргументы целевой функции изменяются в соответствии с выражением (1), но значения ее частных производных и длины градиента не пересчитываются до тех пор, пока не сложится ситуация  $f(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_n^{(k+1)}) \geq f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ . Дробление шага поиска производится, когда во вновь выбранном направлении (после пересчета значений частных производных) не удается сделать ни одного результативного шага, останов поиска - при выполнении неравенства  $h < \epsilon$ .

Основные этапы поиска  $\min f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  методом наискорейшего спуска:

- 1) выбор начального приближения  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ ;
- 2) определение значений частных производных  $f'(x_1, x_2, \dots, x_n)$  в этой точке;
- 3) изменение значений  $x_i, i=1, 2, \dots, n$  в соответствии с выражением (1) без пересчета частных производных до начала возрастания целевой функции;

- 4) если ситуация  $f(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_n^{(k+1)}) \geq f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$  возникает при

$k > 0$ , то начальным приближением становится предыдущая точка:  $x_i^{(0)} = x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$  и вновь выполняются п.п. 2), 3);

- 5) если  $f(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_n^{(k+1)}) \geq f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$  уже при  $k=0$ , то осуществляется дробление шага  $h=h/p$  ( $p > 1$ ); при  $h \geq \epsilon$  (заданная точность) выполняется п. 3), иначе поиск заканчивается:  $x_i^* = x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$ .

В качестве начальных данных были использованы:

- объемная производительность  $Q$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];
- плотность обрабатываемой среды  $\rho$  [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ];

Разработана программа на языке C++Builder 6.0. На рис. 1 представлена блок-схема программы.

Программа позволяет получить основные конструктивные и режимные характеристики:

$a$  - ширина канала ротора и статора, м;

$b_p, b_c$  - расстояние между каналами ротора и статора, м;

$l_p, l_c$  - длина каналов ротора, статора, м;

$h_p$  - толщина стенки ротора, м;

$P_p$  - давление создаваемое в полости ротора, Па;

$P_m$  - импульс «отрицательного» давления, Па;

$Z$  - количество каналов в роторе и статоре;

$\Delta P$  - перепад давления между ротором и статором, Па;

$\delta$  - радиальный зазор;

$\gamma$  - угол наклона канала ротора, рад;

$\omega$  - угловая частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>;

В качестве примера на рис. 2 приведён интерфейс программы.

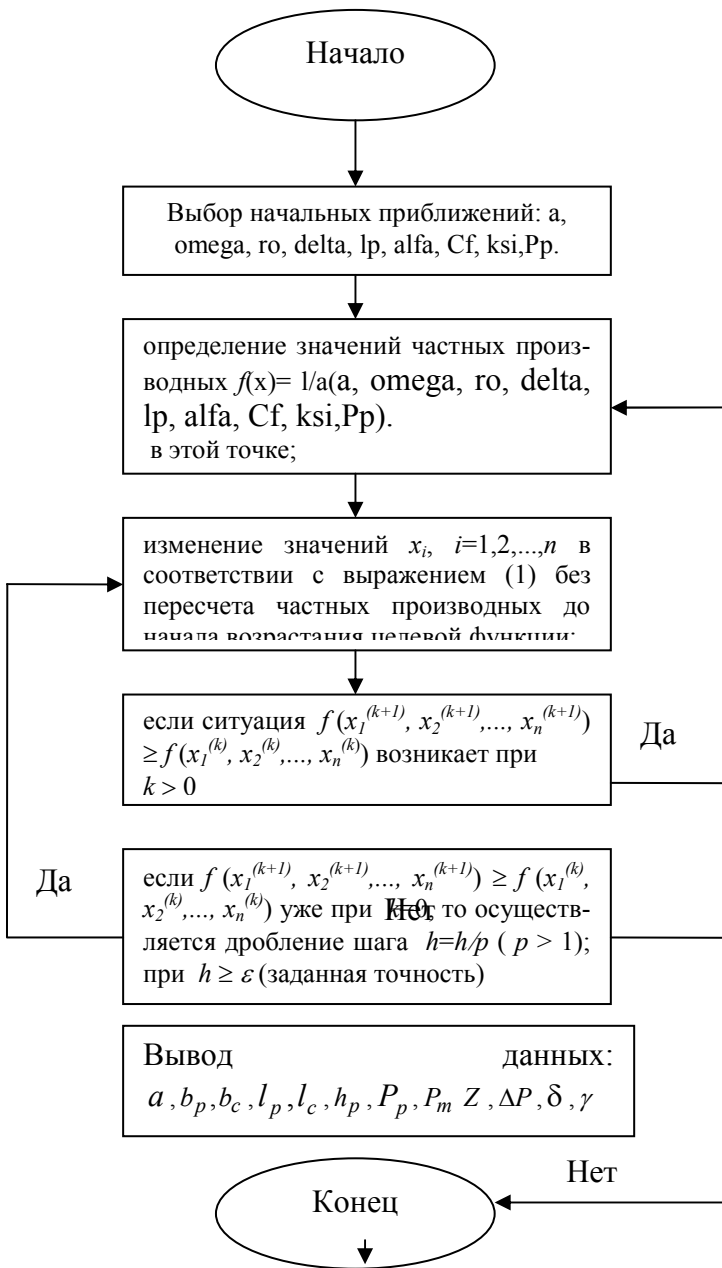


Рис. 1. Блок схема расчета

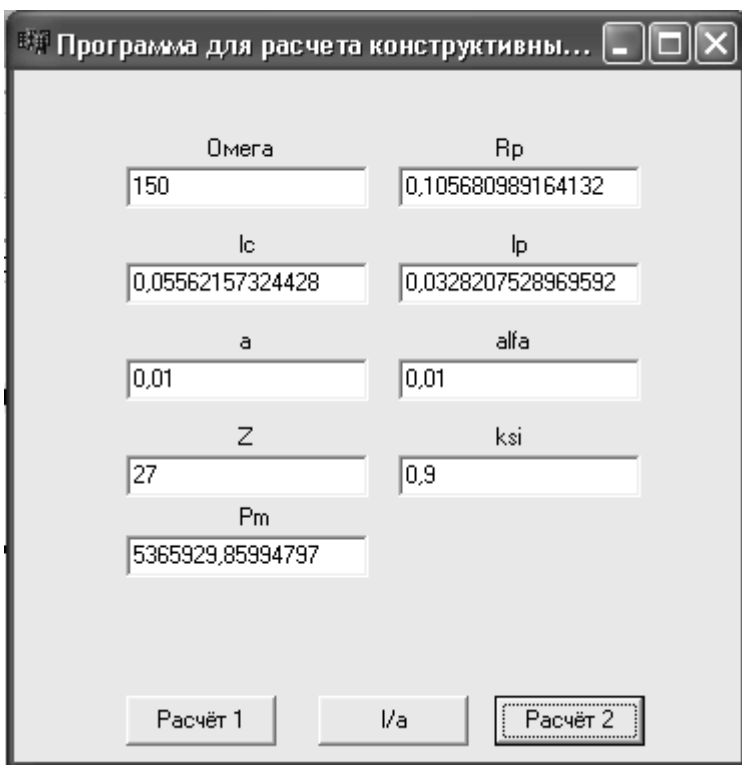


Рис.2. Интерфейс программы с одним из результатов расчета

### Список литературы

1. Юдаев В.Ф. Методическая разработка к курсовому и дипломному проектированию. Роторные аппараты с модуляцией потока /В.Ф. Юдаев.- М.: МИХМ, 1979. – 32с.
2. Серова М.А. Методика расчета роторного аппарата с модуляцией потока./М.А. Серова, В.Ф. Юдаев //Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2003, №1. – С.3-7.
3. Балабышко А.М. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности /А.М. Балабышко, В.Ф. Юдаев. – М.:Наука, 1992. – 176с.
4. Балабышко А.М. Гидромеханическое диспергирование /А.М. Балабышко, А.И. Зинмин, В.П. Ружицкий. – М.:Наука,1998. – 331с.
5. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика /М.А. Промтов. – М.:Машиностроение-1, 2001. – 260с.
6. Червяков В. М. «ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РОТОРНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КАВИТАЦИИ.» / Червяков В.М, Воробьев Ю.В, Юдаев Ю.Ф.// Вестник ТГТУ . – 2005, Т № . – с. ...
7. Червяков В.М. Кавитационные явления в газожидкостной среде /В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004, №4. – С.73-77.

8. Червяков В.М. Нестационарное течение идеальной несжимаемой среды в каналах роторного аппарата /В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев //ТОХТ. – 2005, Т.39, №1. – С.1-7.

9. Юдаев В.Ф. Исследование гидродинамического аппарата сиренного типа и его использование для интенсификации технологических процессов в гетерогенных системах: Автореф. дис. на ... канд. техн. наук: 05.17.08./В.Ф. Юдаев. – М., 1970. – 24с.

10. Червяков В.М. Растворение твердого в жидкости и диспергирование жидкостей в длинноканальном роторном аппарате с модуляцией потока: Дис ... канд. техн. наук: 05.17.08. Защищена 25.11.1982; Утв. 5.09.1983, М., 1982. – 169с.