

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ИМПУЛЬСНОГО УПЛОТНЕНИЯ

**Кузнецов Э. Г., Нагорный В. В.**

*Украина, г. Сумы, Сумской государственной университет,  
факультет „Электроника и информационные технологии”*

## DISTRIBUTION OF PRESSURE IN AN OPERATING GAP OF PULSE SEAL

**Kuznetsov E. G., Nahorni V. V.**

*Ukraine, Sumy, Sumy State University,  
Faculty of Electronic and Information Technologies*

### Abstract

*In article the relevance and results of researches of pulse face seal with buffer gas supply into an operating gap. Features of working process of seal are revealed and the analysis of results of experimental researches is given. The technique of definition of pressure distribution in an operating gap of seal is offered.*

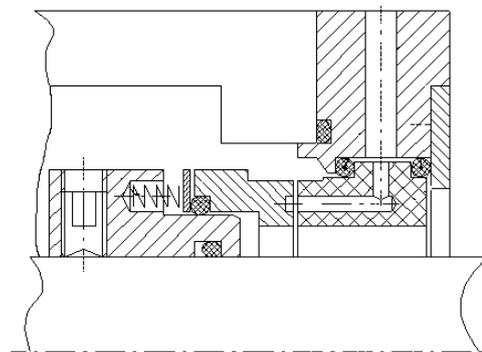
**Keywords:** distribution of pressure, face gap, Reynolds's equation, method of physical analogy, method of boundary elements, pulse seal, flow of gas.

### ВВЕДЕНИЕ

Насосное оборудование широко применяется практически во всех отраслях промышленности для перекачивания разнообразных по своим химическим свойствам сред, характеризующихся высокой коррозионной активностью, токсичностью, взрыво- и пожароопасностью. На практике для отсечения утечки уплотняемой среды по валу насоса широко применяются двойные торцевые уплотнения с буферной жидкостью. Однако, за последнее десятилетие эти уплотнения заметно потеснены двойными бесконтактными, в которых в качестве буферной среды используется нейтральный к перекачиваемому продукту газ [1 - 3]. Несмотря на преимущества, эти уплотнения не получают достаточно широкого распространения в первую очередь из-за их значительной дороговизны по сравнению с уплотнениями других типов и сложности изготовления профилированных колец торцевой пары.

В результате поиска альтернативной конструкции уплотнения, в которой отсут-

ствуют перечисленные недостатки, было создано торцевое импульсное газозатворное уплотнение, в котором запираение утечки уплотняемого продукта достигается с помощью одной торцевой пары (фиг. 1). По конструкции оно похоже на описанное в [4, 5] импульсное уплотнение на жидкостной смазке, однако, в нём в качестве рабочего тела в торцевом зазоре используется не уплотняемая жидкость, а подводимый через специальные каналы (питатели) в зазор затворный буферный газ.



**Фиг. 1.** Торцевое импульсное газозатворное уплотнение

## ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проектировании импульсных уплотнений на жидкостной смазке принимают, что при достаточно большом количестве камер на рабочих поверхностях уплотнения расстояния между ними в окружном направлении невелико, поэтому давление на кольцевом участке зазора между камерами можно считать равным осредненному давлению в камерах.

Проведенные ранее экспериментальные исследования импульсного уплотнения на газовой смазке с целью изучения влияния на характеристики уплотнения количества питателей и камер показывают, что расходная характеристика уплотнения не только количественно, но и качественно зависит от количества камер и питателей на рабочих поверхностях уплотнения, что отражается на жесткости газового слоя в рабочем зазоре, определяющей надежность работы уплотнения.

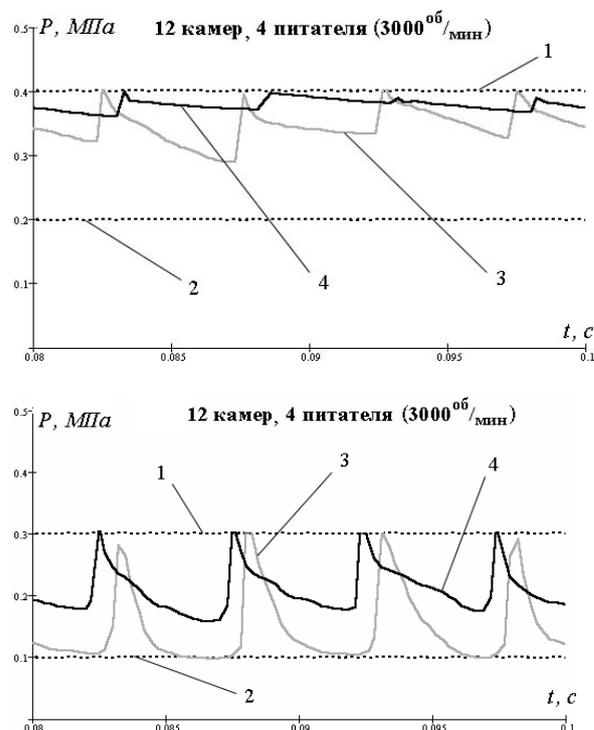
С учетом этого, а также того, что вязкость и сжимаемость газового смазочного слоя значительно отличаются от вязкости и сжимаемости жидкостного, указанное допущение о распределении давления на межкамерном участке зазора становится неприменимым для проектирования газозатворных уплотнений и встает вопрос об изучении истинного распределения давления газового слоя в рабочем зазоре уплотнения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПЛОТНЕНИЯ

Для детального исследования процессов, происходящих в торцевом зазоре работающего уплотнения спроектирован и собран специальный стенд, позволяющий во время испытаний экспериментального уплотнения специальными пьезо-резистивными датчиками производить замер давления в замкнутой камере и в межкамерном промежутке торцевого зазора. Для отображения, обработки и записи поступающих с датчиков сигналов использовался компьютер. С помощью описанного оборудования проведено большое количество испытаний, во время которых варьировались сочетание значений уплотняемого давления (от 0,05 до 0,45 МПа), давления затворного газа (от

0,1 до 0,5 МПа) и частоты вращения приводного вала (от 1000 до 3000 об/мин). В качестве уплотняемой среды использовались вода и воздух.

В результате исследований изучено влияние режимных параметров на изменение эпюры распределения давления затворного газа непосредственно в камерах и на кольцевом участке рабочего зазора между соседними камерами. Данные исследований показывают, что при неизменной величине перепада между затворным и уплотняемым давлениями с ростом частоты вращения ротора или величины уплотняемого давления амплитуда колебаний давления затворного газа в камере и в пространстве между камерами уменьшается. Увеличение перепада между уплотняемым и затворным давлениями приводит к увеличению амплитуды колебания давления в камерах и между камерами, что может стать причиной прорыва уплотняемой среды через торцевой зазор (фиг. 2). Применение торцевых колец с уменьшенным количеством камер позволяет уменьшить амплитуду колебания давления в местах установки датчиков при одинаковых рабочих параметрах.



**Фиг. 2.** Графики изменения давления в местах установки датчиков: 1 – давление затворной среды; 2 – давление уплотняемой среды; 3 – давление в межкамерном промежутке; 4 – давление в камере импульсного газозатворного уплотнения

Полученные экспериментальные данные показывают, что при достаточно большом количестве камер (т.е. когда окружное расстояние между соседними камерами меньше окружной протяжённости собственно камеры) работа уплотнения может быть описана традиционной матмоделью жидкостных импульсных уплотнений, адаптированной для газовых сред, что и подтверждается удовлетворительным совпадением экспериментальных данных с расчётными. При использовании в уплотнении колец с уменьшенным количеством камер (когда расстояние между отдельными камерами значительно больше окружной протяжённости самих камер) в математическую модель газозатворного импульсного уплотнения необходимо необходимо вводить учёт окружных течений газа в рабочем зазоре. Для этого целесообразно получить решение задачи о распределении давления в рабочем зазоре уплотнения. [6].

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА В УПЛОТНЕНИИ

Построение математической модели торцевого импульсного газозатворного уплотнения основано на численном решении задачи о нахождении распределения давления в газовом слое, заключённом в рабочем зазоре между торцевыми кольцами уплотнения. Для нахождения распределения давления затворного газа  $p(y, z)$  в торцевом зазоре рассматривается уравнение течения газовой смазки – уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \frac{\partial(pxU)}{\partial y} + 12\mu \frac{\partial(px)}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление,  $x$  – толщина газового слоя;  $U$  – скорость движения одной из поверхностей, ограничивающих смазочный слой,  $\rho$  – плотность и  $\mu$  – вязкость газа.

Решение этого уравнения выполнено численным методом граничных элементов [7]. Согласно сути применяемого метода исходная краевая задача для (1) – уравнения Пуассона в частных производных –

приводится к интегральному по границе исследуемой области. В общем виде интегральное уравнение для области с границей  $\Gamma$  имеет вид:

$$c(\xi)P(\xi) + \int_{\Gamma} P(\eta) q^*(\xi, \eta) d\Gamma(\eta) = \int_{\Gamma} q(\eta) P^*(\xi, \eta) d\Gamma(\eta) - \int_{\Omega} W(y) P^*(\xi, \eta) d\Omega(\eta) \quad (2)$$

Здесь  $\xi$  – произвольная точка на границе области;  $c(\xi)$  – функция, учитывающая особенности, возникающие при интегрировании по границе области;

$P^*(\xi, \eta) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}$  – фундаментальное решение уравнения Лапласа для двумерного случая;  $q^*(\xi, \eta) = \frac{\partial P^*(\xi, \eta)}{\partial n(\eta)}$ ;  $r$  – расстояние

между точками  $\xi$  и  $\eta$  на границе области;

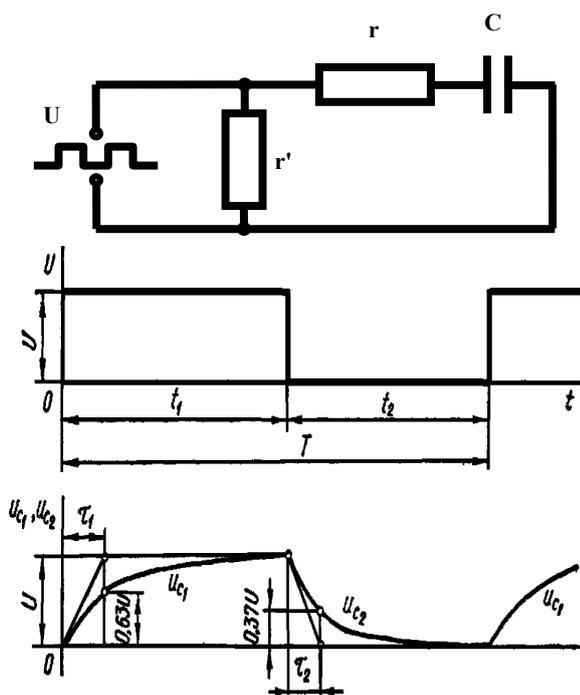
$$W(y) = 6\mu \left( \frac{1}{\kappa} + 1 \right) \frac{\partial}{\partial y} \left( U p^{\kappa} x \right).$$

В качестве области для определения поля давления смазки выбран объём газа на участке торцевого зазора уплотнения ограниченном наружным и внутренним радиусами торцевых колец и радиальными секущими, проходящими через середины соседних камер. В ходе решения граница области разбивается на отдельные элементы, на каждом из которых задаются граничные условия типа Дирихле – значение давления  $P$ . Численное интегрирование по границе выполняется методом механических квадратур Гаусса.

Величина торцевого зазора  $x$  находится из условия равновесия подвижного в осевом направлении торцевого кольца под действием рабочих давлений и усилия со стороны упругих элементов уплотнения [8].

Задание граничных условий на границе в местах расположения камер сопряжено с определёнными трудностями, так как со временем давление в камерах изменяется. Приведенные на фиг. 2 графики изменения давления в местах установки датчика в общем случае аналитически описать довольно

сложно. С точки зрения физики процесса, форма кривых на графиках характеризует величину и интенсивность истечения накопленного в замкнутой камере (или в канале датчика давления) затворного газа через рабочий зазор уплотнения в уплотняемую полость роторной машины и в атмосферу. Причём, чем зазор больше, тем истечение газа из камеры (падение давления газа в камере) происходит быстрее, так как сопротивление самого рабочего зазора меньше. Подобный процесс в физике называется переходным и хорошо изучен, например, в электротехнике в разделе линейных электрических цепей. С целью приведения задачи о нахождении закона истечения затворного газа из камер уплотнения к известным в физике процессам найдены соответствия между физическими величинами механики газа и электротехники и построена следующая физическая аналогия процесса.



Фиг. 3. Схема электрического аналога переходного процесса и график изменения переходного напряжения на обкладках конденсатора

Наиболее близким к рассматриваемому представляется процесс заряда-разряда электрического конденсатора  $C$  и характер изменения напряжения  $U$  на его обкладках (фиг. 3). График изменения переходного напряжения на обкладках конденсатора приводится в соответствие с графиками на

фиг. 2, если учесть, что время заполнения камеры затворным газом в момент её совмещения с питателем (время  $t_1$  и участок  $uc_1$  на фиг. 3) значительно меньше времени её последующего опорожнения (время  $t_2$  и участок  $uc_2$  на фиг. 3).

Переходные процессы в электрических цепях с сосредоточенными параметрами описываются уравнениями Кирхгофа применительно к мгновенным напряжениям и токам. В данном случае переходное напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону:

$$u_{c1} = U \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right), \quad (3)$$

$$u_{c2} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

где  $\tau_1 = rC$  и  $\tau_2 = (r + r')C$  – постоянные времени системы.

Применить этот закон для определения давления затворного газа в камерах уплотнения позволили следующие физические соответствия:

- в электротехнике физической величиной взаимодействия является заряд; в газовой механике ему соответствует  $\rho \cdot dV = dm$  (или  $dV$  в механике жидкости);

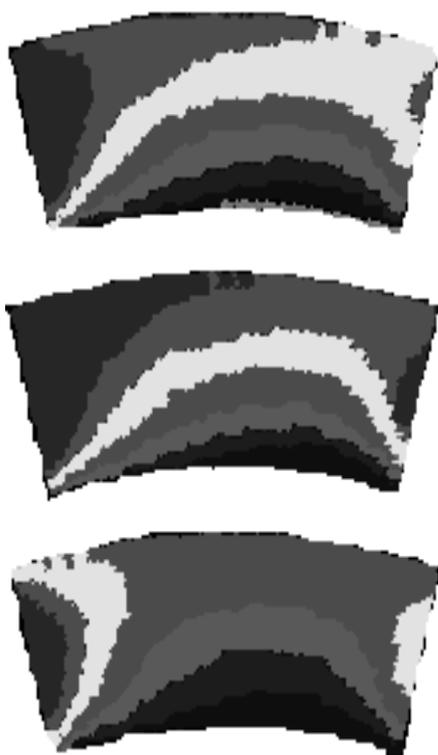
- аналогами разности потенциалов  $U$  и тока  $I$  в электротехнике являются аэродинамический потенциал  $\Delta P/\rho$  и расход газа  $Q$  в газодинамике;

- аналогом электрического сопротивления  $R$  является гидравлическое сопротивление дросселей (каналов и зазоров), по которым протекает затворный газ.

Использование данной физической аналогии и метода граничных элементов позволило получить аналитические зависимости для нахождения давления затворного газа в каждой замкнутой камере торцевого кольца и определить распределение поля давления в рабочем зазоре уплотнения в любой момент времени.

На фиг. 4 представлена тоновая визуализация результатов численного решения уравнения Рейнольдса и моделирования найденного поля давления в рабочем зазоре

уплотнения для трёх различных режимов работы.



**Фиг. 4.** Визуализация поля давления в рабочем зазоре уплотнения

Приведенный алгоритм численного нахождения поля давления позволяет:

а). находить несущую способность газового слоя в рабочем зазоре уплотнения и определять его основные характеристики;

б). проводить численные исследования распределения давления газа в рабочем зазоре с целью проверки работы уплотнения с точки зрения прорыва уплотняемой среды через участки торцевого зазора между отдельными камерами, не прибегая к натурным экспериментам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанные выше экспериментальные исследования и полученные с их помощью результаты позволили получить картину рабочего процесса в торцевом импульсном газозатворном уплотнении. Благодаря выявленным особенностям тече-

ния газа в рабочем зазоре уплотнения установлена необходимость разработки математической модели уплотнения, отличной от существующих.

Использование в матмодели уплотнения численного решения уравнения Рейнольдса для течения газа в тонких зазорах позволяет прогнозировать работу уплотнения на номинальных и нештатных режимах работы.

Интервал частот вращения вала, в котором уточнённая методика расчёта характеристик уплотнения проверена и даёт приемлемые результаты расчетов, находится в границах до 3000 об/мин; диапазон давлений затворной и уплотняемой сред – до 0,6 МПа.

## REFERENCE

- [1] Dry-running double seal for process pumps.\ BW/IP, Sealing Technology Newsletter No. 16, April, 1995, pp.2-3.
- [2] William V. Adams. Innovative technology uses gas in place of liquid to lubricate double mechanical seals.\ Sealing Technology Newsletter No. 11, November, 1994, pp. 9-12.
- [3] Patrick M. Flatch. Dry-running seal technology for emission containment.\ Sealing Technology Newsletter No. 10, October, 1994, pp. 8-11.
- [4] Martsynkovskij V. A. Beskontaktnye uplotneniya rotornyh mashyn. Moskva: Mashinostroenie, 1980. – 200 p.
- [5] Martsynkovskij V. A. Vorona V. P. Nasosy atomnyh electrostantsij. Moskva: Energoatomizdat, 1987.– 256 p.
- [6] Kuznetsov E. G. Raschyot staticheskikh harakteristik gazozatvornogo tortsovogo uplotneniya impulsnogo tipa. // Izvestiya OryolGTU №4 (282) 2010, Seriya Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, – 2010. – pp. 28-35.
- [7] Metody granichnyh elementov: perevod s anglijskogo yazyka. / Brebbia C., Telles J., Wrobel L. Moskva: Mir, 1987. – 524 p.
- [8] Issledovanie davleniya v rabochem zazore gazozatvornogo impulsnogo tortsovogo uplotneniya. // Effektivnost i kachestvo v mashinostroenii i priborostroenii. – Oryol: OryolGTU, 2010 – 200 p.