

УДК 539.2.532.696

**ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПАРАДОКСА,  
ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ  
ПЕРФОРИРОВАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБОЛОЧКИ**

*Э. И. Баранов, ассистент;*

*С. И. Якушко, канд. техн. наук, доцент,*

*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Проведен анализ расчета пропускной способности полых перфорированных вращающихся оболочек. Рассмотрена сущность гидродинамического парадокса, возникающего при их вращении. Обоснованы физические и математические причины, обуславливающие существование гидродинамического парадокса данной оболочки. Разработана методика расчета пропускной способности полых перфорированной вращающейся оболочки.*

***Ключевые слова:** полые перфорированные вращающиеся оболочки, центробежные грануляторы, пропускная способность, гидродинамический парадокс.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В современной химической технике широкое распространение получили полые перфорированные вращающиеся оболочки, являющиеся главным рабочим органом, например, центробежных грануляторов плава аммиачной селитры, карбамида, сложных минеральных удобрений, а также вращающихся распылителей жидкости тепло- и массообменных аппаратов и роторов фильтрующих центрифуг.

Разработке теоретических основ работы полых перфорированных вращающихся оболочек посвящено достаточно много трудов ученых и исследователей. Однако до последнего времени уровень этих работ был недостаточен, так как не позволял составить правильное представление о физической картине, имеющей место при работе указанных оболочек и разработать научно обоснованную методику их расчета.

Так, при расчете пропускной способности (производительности) таких оболочек предлагалось использовать эмпирические зависимости, полученные для условий относительного покоя жидкости в оболочке [1]. На практике во многих случаях используются полые перфорированные вращающиеся оболочки, в которых жидкость движется со скоростью, меньшей скорости вращения оболочки [2]. Поэтому вышеуказанные зависимости не отражают в целом физическую сущность внутренней гидродинамики данных оболочек и могут применяться лишь в случаях, ограниченных рамками экспериментов.

Значительный вклад в развитие теории полых перфорированных вращающихся оболочек внес своими трудами Б.Г.Холин, открывший и теоретически обосновавший существование явления гидродинамического парадокса перфорированного вращающегося распылителя жидкости [3, 4]. Им исследованы закономерности внутренней гидродинамики этих оболочек, а также разработаны конструкции и методы расчета грануляторов плава и распылителей жидкости на их основе.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сущность гидродинамического парадокса полый перфорированной вращающейся оболочки заключается в том, что пропускная способность, т.е. расход жидкости через отверстия этой оболочки, в определенной области скоростей вращения не увеличивается, как считалось ранее, а уменьшается. В работах Б.Г.Холина исследованы границы области и условия существования данного парадокса, приведены приближенные расчетные уравнения для сжатия струи  $\varepsilon$ , скорости истечения  $v_2$  и расхода жидкости через отверстия оболочки  $Q$ , отвечающие физическому смыслу картины истечения:

$$\varepsilon = \frac{f_{cmp}}{f_{oms}} = \frac{P(\alpha_2 + \xi)}{\left( \alpha_1^2 R_1^2 + 2P/\rho \right)}, \quad (1)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2P/\rho + \alpha_1^2 R_1^2}{\alpha_2 + \xi}}, \quad (2)$$

$$Q = f_{oms} v_2 = \frac{f_{oms} P}{\rho} \sqrt{\frac{\alpha_2 + \xi}{\alpha_1^2 R_1^2 + 2P/\rho}}, \quad (3)$$

где  $P$  - гидростатическое давление на внутренней поверхности оболочки у отверстия истечения, Па;

$\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициент неравномерности распределения скоростей в пристеночном слое жидкости и в вытекающей струе соответственно;

$\xi$  - коэффициент местного сопротивления при входе потока жидкости в отверстие истечения;

$\Omega_1$  - угловая скорость вращения оболочки, рад/с;

$R_1$  - внутренний радиус оболочки, м.

Уравнения (1)–(3) получены с использованием законов сохранения энергии и количества движения при допущениях, что диаметр отверстий значительно меньше расстояния между центрами двух ближайших отверстий, толщина пристеночного слоя, в котором происходит потеря угловой скорости жидкости пренебрежимо мала в сравнении с диаметром отверстий истечения и толщина стенки оболочки есть величина одного порядка с диаметром этих отверстий. Схема движения жидкости в перфорированной вращающейся оболочке в пристеночной области, положенная в основу при выводе уравнений (1)–(3), показана на рис. 1.

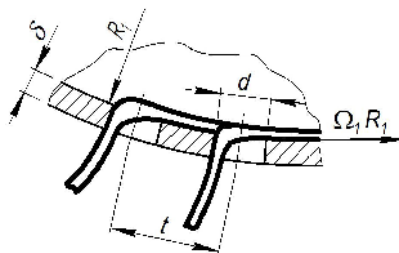


Рисунок 1 – Схема движения жидкости в перфорированной оболочке в пристеночной области

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К сожалению, уравнение (3) не может быть использовано для практических расчетов пропускной способности рассматриваемой оболочки, так как оно не учитывает влияния целого ряда факторов на процесс истечения. Очевидно, чисто теоретическим путем получить зависимость для искомой пропускной способности не представляется возможным. Здесь следует отметить, что при теоретическом обосновании возникновения гидродинамического парадокса при истечении жидкости из полый перфорированной вращающейся оболочки Б. Г. Холиным выдвинута гипотеза о механизме формирования турбулентного граничного слоя у внутренней поверхности оболочки [4]. В соответствии с этой гипотезой при входе жидкости в отверстие истечения при наличии большого градиента скорости жидкости на внутренней поверхности оболочки имеет место взаимодействие потока жидкости, направленного почти перпендикулярно к оси отверстия, со стенками этого отверстия. После удара о стенки отверстия поток жидкости разделится на два потока: одна часть в виде струи вытечет через отверстие оболочки, а другая часть отразится внутрь и смешается с жидкостью в оболочке. В результате смешивания с отраженной жидкостью в пристеночной области оболочки образуется слой жидкости, имеющий значительную скорость вращения. Толщина такого слоя будет тем больше, чем больше глубина проникновения отраженной струи жидкости внутрь оболочки и больше расстояние между соседними отверстиями. Схема образования турбулентного пограничного слоя в оболочке в пристеночной области представлена на рис. 2.

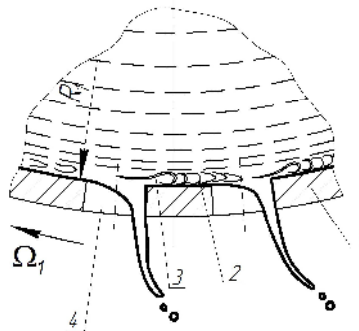


Рисунок 2 – Схема образования турбулентного пограничного слоя в пристеночной области оболочки:

- 1 – перфорированная оболочка; 2 – зона смешивания;  
3 – отраженная струя; 4 – отверстие истечения

На основании изложенной гипотезы автор [4] делает вывод о том, что гидродинамический парадокс в полый перфорированной вращающейся оболочке объясняется сжатием струи жидкости при истечении из отверстия (см. уравнение (1)) при больших значениях  $Re = \frac{m R_1}{\mu}$ , здесь  $m$  – массовый расход жидкости, отнесенный к единице площади внутренней поверхности перфорированной оболочки радиусом  $R_1$ .

При полном согласии с описанием внутренней гидродинамики полый перфорированной вращающейся оболочки нельзя согласиться с таким выводом, так как функция  $\psi = \psi(R_1)$  не имеет экстремума.

По нашему мнению, пропускная способность данной оболочки есть результат слияния в отверстии истечения двух потоков жидкости с разнонаправленным градиентом объемной скорости. Первый поток

составляет жидкость, поступающая в отверстие истечения под действием импульса  $P_c f_{ome} dt$ , сообщаемого ей в направлении оси отверстия силой гидростатического давления столба жидкости в оболочке. С увеличением скорости вращения оболочки значение этого импульса непрерывно уменьшается, так как сокращается время  $dt$  действия сил гидростатического давления на жидкость, находящуюся над отверстием. Соответственно этому будет непрерывно уменьшаться количество жидкости, поступающей в отверстие оболочки под действием импульса сил гидростатического давления.

Второй поток составляет жидкость, поступающая в отверстие истечения под действием импульса  $P_\partial f_{ome} dt$ , сообщаемого в направлении оси отверстия центробежными силами, возникающими в турбулентном пограничном слое в пристеночной области оболочки. Значение этого импульса с увеличением скорости вращения оболочки непрерывно увеличивается, начиная с нуля, так как непрерывно растет толщина указанного пограничного пристеночного слоя. Одновременно с этим растет и количество жидкости, поступающей в отверстие истечения. Здесь  $P_c$  и  $P_\partial$  – гидростатическое давление и давление центробежных сил в пристеночном слое соответственно.

Оба указанных потока, достигнув равнозначного значения, в сумме дают минимальное значение производительности вращающейся оболочки  $Q_{min}$ .

Для наглядности приводим графическую иллюстрацию картины изменения объемной скорости потоков жидкости в отверстии перфорированной оболочки в зависимости от скорости ее вращения (см. рис. 3).

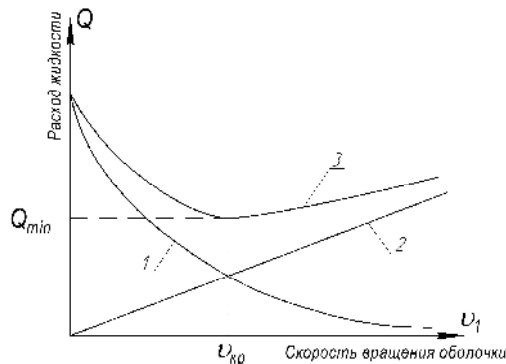


Рисунок 3 – Графическое представление зависимости объемной скорости потоков жидкости в отверстии оболочки от скорости ее вращения:

- 1 – поток от импульса силы гидростатического давления;
- 2 – поток импульса центробежных сил в турбулентном пристеночном слое;
- 3 – суммарный поток

Описанная выше гидродинамика потоков жидкости при ее истечении из отверстий вращающейся перфорированной оболочки и объясняет возникновение гидродинамического парадокса.

Исходя из предложенной физической картины процесса истечения жидкости из отверстий перфорированной вращающейся оболочки, разработана математическая модель этого процесса и, опираясь на экспериментальные данные, получена эмпирическая зависимость для вычисления пропускной способности указанных оболочек. Данная разработка позволит существенно повысить точность расчетов при

конструировании грануляторов плавов, распылителей жидкости и других устройств, имеющих в своей конструктивной основе такие оболочки.

В основу математического описания данного процесса положена функция, содержащая два слагаемых:

$$y = \frac{1}{1 + a x} + b x . \quad (4)$$

В этом уравнении первое слагаемое с увеличением  $x$  непрерывно уменьшается, а второе слагаемое с увеличением  $x$  пропорционально увеличивается.

Тогда зависимость для определения пропускной способности исследуемых оболочек  $Q$  можно представить в виде

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{1}{1 + a Re \cdot 10^{-5}} + b Re \cdot 10^{-5}, \quad (5)$$

где  $Q_0$  – пропускная способность неподвижной оболочки, м<sup>3</sup>/с;

$Re$  – число Рейнольдса относительного тангенциального движения

оболочки:  $Re = \frac{1 R_1^2}{\nu}$ ;

$a$  – коэффициент влияния гидростатического давления на производительность оболочки;

$b$  – коэффициент влияния давления центробежных сил в турбулентном пристеночном слое жидкости на производительность оболочки;

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (5) универсально по форме для оболочек с различными геометрическими параметрами. Однако коэффициенты  $a$  и  $b$  индивидуальны для каждой оболочки.

Для обеспечения возможности производить расчеты величин этих коэффициентов были проведены экспериментальные исследования пропускной способности четырнадцати оболочек с внутренним диаметром ( $2R_1$ ), равным 147 и 208 мм, диаметром отверстий истечения  $d = 1 - 14$  мм, шагом между осями соседних отверстий по окружности оболочки  $t = 3 - 115$  мм, толщиной стенки оболочек  $\delta = 2,5 - 3,5$  мм. В ходе экспериментов варьировались следующие геометрические параметры:  $\delta = d/t$  и  $\delta = d/\delta$ . Границы варьирования данных параметров были следующими:  $\delta = 0,0693 - 0,3247$  и  $\delta = 0,4 - 5,6$ .

Эксперименты проводились на воде и водных растворах различных химических соединений, т.е. на маловязких жидкостях.

Математическая обработка результатов экспериментов показала, что минимум пропускной способности исследованных оболочек наблюдался при критическом значении числа Рейнольдса:

$$Re_{кр} = 16 \cdot 10^{-5} \delta^{0,8} t^{-0,04}, \quad (6)$$

а значение минимальной (критической) пропускной способности этих оболочек можно с достаточно высокой степенью точности определять по следующей зависимости:

$$\frac{Q_{\min}}{Q_0} = \frac{Re_{кр} 10^{-5}}{43 t^{0,16}}. \quad (7)$$

Подставив выражение (6) в (7), получим

$$\frac{Q_{\min}}{Q_0} = 0,372 (t)^{-0,2}. \quad (8)$$

Вычислив значения  $Re_{кр}$  и  $Q_{\min}$  для конкретной оболочки, приступаем к расчету коэффициентов  $a$  и  $b$  для уравнения (5):

$$a = \frac{2 Q_0 / Q_{\min} - 1}{Re_{кр} 10^{-5}}, \quad (9)$$

$$b = \frac{Q_{\min}}{2 Q_0}. \quad (10)$$

Подставив числовые значения  $a$  и  $b$  в уравнение (5), получим уравнение для расчета пропускной способности конкретной оболочки.

Вычислив величину  $Q$  для ряда текущих значений числа Рейнольдса с помощью уравнения (5), можно построить графическую зависимость  $Q = (Re)$ .

Такая графическая зависимость для некоторых из числа исследованных оболочек приведена на рис. 4.

Совпадение этих кривых с кривыми, построенными по экспериментальным данным, достаточно хорошее. Максимальная погрешность (отклонение точек кривой, построенной по уравнению (5), от точек экспериментальной кривой при данном числе Рейнольдса) не превышает 7 % по ординате.

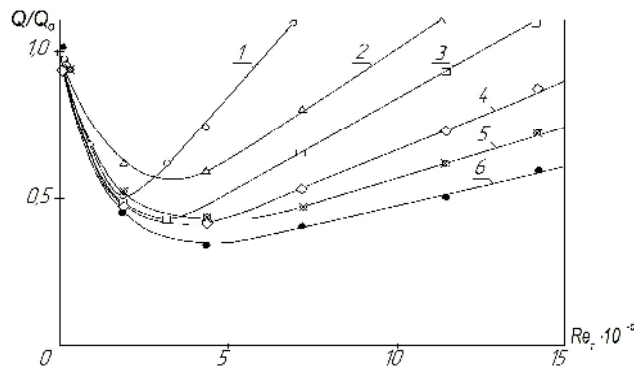


Рисунок 4 – Графическая зависимость пропускной способности оболочки от числа  $Re_t$  в пристеночном турбулентном слое жидкости:

- 1 – оболочка с отверстиями  $d = 8$  мм и  $t = 0,0693$ ;
- 2 – оболочка с отверстиями  $d = 2,2$  мм и  $t = 0,143$ ;
- 3 – оболочка с отверстиями  $d = 8$  мм и  $t = 0,139$ ;
- 4 – оболочка с отверстиями  $d = 6$  мм и  $t = 0,195$ ;
- 5 – оболочка с отверстиями  $d = 4$  мм и  $t = 0,26$ ;
- 6 – оболочка с отверстиями  $d = 14$  мм и  $t = 0,2426$

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета пропускной способности полый перфорированной вращающейся оболочки.
2. Данная методика может быть использована при конструировании центробежных грануляторов плавов, распылителей жидкости и других устройств на основе этой оболочки.
3. Предложенный метод отличается простотой и точностью, которая достигается благодаря более точному физическому и математическому обоснованию причин, обуславливающих существование гидродинамического парадокса данной оболочки.

## ОБҐРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПАРАДОКСУ, ЩО ВИНΙΚАЄ ПРИ ВИТІКАННІ РІДИНИ З ОТВОРІВ ПЕРФОРОВАНОЇ ОБОЛОЧКИ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ

*Е. І. Баранов, С. І. Якушко,  
Сумський державний університет, м. Суми*

*Проведений аналіз розрахунку пропускної здатності порожнистих перфорованих оболонок, що обертаються. Розглянута суть гідродинамічного парадоксу, що виникає при їх обертанні. Обґрунтовані фізичні і математичні причини, що обумовлюють існування гідродинамічного парадоксу даної оболонки. Розроблена методика розрахунку пропускної здатності порожньої перфорованої оболонки, що обертається.*

*Ключові слова: порожністі перфоровані оболонки, що обертаються, відцентрові гранулятори, пропускна спроможність, гідродинамічний парадокс.*

## GROUND AND CALCULATION OF HYDRODYNAMIC PARADOX, ARISING UP AT EXPIRATION OF LIQUID FROM OPENINGS OF THE PERFORATED REVOLVED SHELL

*Е. І. Baranov, S. I. Yakushko,  
Sumy State University, Sumy,*

*The analysis of the calculation of the capacity of the hollow rotating perforated shells. The essence of the hydrodynamic paradox arising in their rotation. Reasonable physical and mathematical reasons for the existence of hydrodynamic paradox given shell. The method for calculating the capacity of a rotating perforated hollow shell.*

*Key words: hollow perforated revolved shells, centrifugal granulator, carrying capacity, hydrodynamic paradox.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Соколов В. И. Современные промышленные центрифуги. – М. : Машиностроение, 1967. – 524 с.
2. Холин Б. Г. К теории движения жидкости в полый перфорированной вращающейся оболочке // Вісник Харківського політехнічного інституту. – Харків: Вид-во ХДУ, 1966. - № 12 (60).
3. Холин Б. Г. О гидродинамическом парадоксе центрифуги // Интенсификация технических процессов в химической и машиностроительной промышленности. – Харьков: Изд-во Харьковского политехнического института, 1970. – С. 7-13.
4. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. – М. : Машиностроение, 1977. – 182 с.

*Поступила в редакцию 16 октября 2012 г.*