

## **КЛАССИФИКАЦИЯ СООСНЫХ КОНИЧЕСКИХ КАНАЛОВ**

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

### **Введение**

Изучение ламинарных течений в каналах различной геометрии является одной из фундаментальных задач гидродинамики, так как на его основе проводится исследование ряда других проблем, возникающих при конструировании и расчете проточных частей промышленных аппаратов. К таким задачам относится и задача ламинарного течения вязких жидкостей в соосных конических каналах.

Возникает необходимость анализа ламинарных течений при расчете и проектировании машин и аппаратов в различных отраслях техники. Например, при проектировании объемных гидравлических устройств требуется производить расчет переходных соосных конических устройств и расчет конфузورного течения в соосных конических каналах, а также расчет кольцевых конических каналов в системах дроссельного регулирования гидромоторов [1].

Надежность авиационных двигателей во многом зависит от точности расчета их гидравлических систем, в которых также присутствуют конические соосные участки [2].

Наибольшее же распространение получили соосные конические каналы в машинах и аппаратах производства полимеров и изделий из них. Здесь же наблюдается наибольшее разнообразие таких каналов.

Практически все червячные машины имеют в своей компоновке соосные конические каналы, которые, как правило, принадлежат формирующим устройствам или устройствам сопряжения экструзионных головок с экструдером [3]. Например, при гранулировании термопластов погружным способом, устройство погружного гранулирования [4] сопрягается с экструдером соосным коническим каналом, в котором расплав термопласта продавливается между дорном (внутренняя стенка) и матрицей (внешней стенкой канала).

Практически все конструкции трубных экструзионных головок и головок для производства шлангов имеют конические соосные каналы [5]. Во многих трубных головках одновременно присутствуют соосные конические диффузоры и конфузоры [6]. Соосные конические каналы имеют также и экструзионные головки для раздувного формования [7] и головки для производства рукавной пленки и полимерных сеток [6]. Практически все современные конструкции экструзионных кабельных головок, будь то прямоточные, косоугольные и прямоугольные, головки трубного типа, головки давления и головки наложения многослойной изоляции имеют соосные конические каналы.

Многие механизмы пластикации и впрыска у литьевых машин имеют в своей конструкции соосные конические каналы, например, в машинах для многоцветного литья [8].

Перепад давления в соосном коническом канале может составлять значительную часть перепада давления всей экструзионной головки [7] и, следовательно, рабочей характеристики головки, а именно этой величиной определяется рабочая точка экструдера, а значит и его производительность.

Таким образом, изучение ламинарного течения в соосных конических каналах имеет не только академический и теоретический интерес, но также и большое практическое значение.

Результаты исследования ламинарного течения в соосных конических каналах также используются для решения задач теплопередачи в процессах переработки и синтеза полимерных материалов, что также представляет большой практический интерес, поскольку процессы теплообмена в ряде случаев становятся лимитирующими.

Примеры такого использования решения гидродинамических задач можно найти в публикациях автора [9-16]. В этих работах исследован теплообмен в условиях, при которых свойства жидкости, текущей в каналах, можно считать постоянными. Но значение распределения скорости для изотермического ламинарного течения жидкости в каналах важно и при исследовании случаев существенно неизотермического течения высоковязких жидкостей [17-21].

При решении неизотермических задач такое распределение используется в качестве профиля скорости на входе в канал или начального распределения в численных методах исследования. Решения, полученные для изотермических течений, используются также в качестве тестовых задач при создании численных методов.

Выяснив необходимость и значимость исследования ламинарных течений в соосных конических каналах, рассмотрим, какими же могут быть такие каналы, прежде всего для того, чтобы выбрать адаптированное к их геометрии математическое описание течения.

#### **Возможные варианты соосных конических каналов**

Все круглые соосные конические каналы можно разделить на два вида. К первому отнесем каналы, у которых конические поверхности, образующие границы канала, имеют общую вершину (рис. 1). Очевидно, что углы раскрытия конических поверхностей, образующих границы канала, различны. Коническую поверхность с меньшим углом раскрытия будем называть внутренней границей соосного конического канала с общей вершиной границ или внутренней конической поверхностью канала (рис. 1а). На указанном рисунке это коническая поверхность с углом раскрытия, равным  $2\alpha_1$ . Значение  $\alpha_1$  будем называть полууглом раскрытия конической поверхности.

Коническую поверхность с большим углом раскрытия будем называть внешней границей соосного конического канала с общей вершиной границ или внешней конической поверхностью канала. В таких каналах ламинарное течение от вершины является строго расходящимся и обычно называется диффузорным течением, а сам канал можно определить как соосный конический диффузор с общей вершиной границ.

Ламинарное течение к вершине в таких каналах является строго сходящимся течением и обычно его называют конфузорным течением, а сам канал мы будем называть соосным коническим конфузуром с общей вершиной границ.

Ко второму виду соосных конических каналов отнесем каналы, у которых вершины круглых конусов, образующих границы канала, разнесены на некоторые расстояния. Среди таких каналов могут быть каналы с постоянной шириной вдоль течения и с переменной шириной.

Соосные конические каналы постоянной ширины образованы круглыми соосными конусами с одинаковыми углами раскрытия  $2\alpha$  (рис. 1б). В таких каналах сходящиеся и расходящиеся течения, как и в уже рассмотренных каналах, определяются совершенно однозначно, и, также как в каналах с общей вершиной границ, диффузорное течение направлено от вершины конусов, а конфузорное – к вершинам.

Для данного типа каналов определить внутреннюю и внешнюю границы по раз-

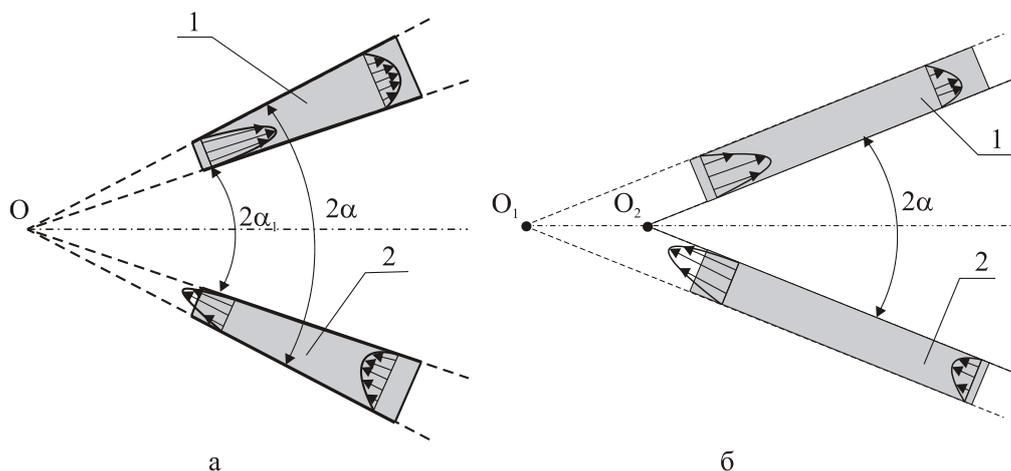


Рисунок 1 – Продольное сечение соосных конических каналов: а – с общей вершиной границ; б – постоянной ширины; 1 – диффузорное течение; 2 – конфузорное течение

ности углов раскрытия не удастся. В дальнейшем, при описании течения в таких каналах, мы определим адаптированную к ним систему координат, в которой даже по значению координат можно будет определить внешние и внутренние границы, а пока, для всех рассматриваемых в данной монографии соосных конических каналов, мы можем считать внешней границей ту, которая охватывает коническую поверхность, являющуюся внутренней границей. Внутренняя же граница соосно вложена во внутреннее пространство конической поверхности, образующей внешнюю границу канала (рис. 1).

Среди каналов с переменной вдоль течения шириной также можно выделить два типа соосных конических каналов. Во-первых, это каналы, в которых вершины, образующие границы поверхностей, лежат с одной стороны канала (рис. 2), и, во-вторых, это каналы, находящиеся между вершинами своих границ (рис. 3).

Общая характеристика каналов, продольными сечениями которых являются области I и III на рис. 2, аналогична характеристике каналов с общей вершиной границ. Течение в сторону от вершин является строго расходящимся (ширина канала увеличивается) и канал является соосным коническим диффузором. Течение к вершинам в этих областях является сходящимся конфузорным течением. Это связано с тем, что угол раскрытия внешней конической поверхности больше угла раскрытия внутренней конической поверхности в указанных каналах.

В канале с продольным сечением II (рис. 2) общая характеристика несколько иная. Здесь угол раскрытия внутренней поверхности канала больше угла раскрытия внешней конической поверхности. Поэтому течения в направлении от вершин происходит в канале с уменьшающейся шириной вдоль течения (рис. 2). И в некоторых случаях средняя скорость течения может возрастать, т.е. в таких случаях течение в сторону от вершины будет проявлять характеристики конфузорного течения, но по аналогии с уже рассмотренными геометриями каналов течение в сторону от вершин, т.е. течение

в сторону раскрытия конических поверхностей, будем считать диффузорным, а течение по направлению к вершинам будем называть конфузорным течением и в каналах, продольным сечением которых является область II (рис. 2), хотя оно и происходит в сторону увеличения ширины канала.

Соосные конические каналы, находящиеся между вершинами своих границ, отличаются от всех уже рассмотренных каналов тем, что углы раскрытия конических поверхностей, образующих границы канала направлены навстречу друг другу (рис. 3). Диффузорным течением в данных каналах будем называть течение, направленное в сторону раскрытия внешней конической границы канала, и, соответственно, конфузорным течением будем называть течение, направленное к вершине конуса, образующего внешнюю границу канала. Например, для области I на рис. 3 диффузорным течением является течение, направленное от  $O_2$  к  $O_1$ , а конфузорным – течение, направленное к  $O_2$ .

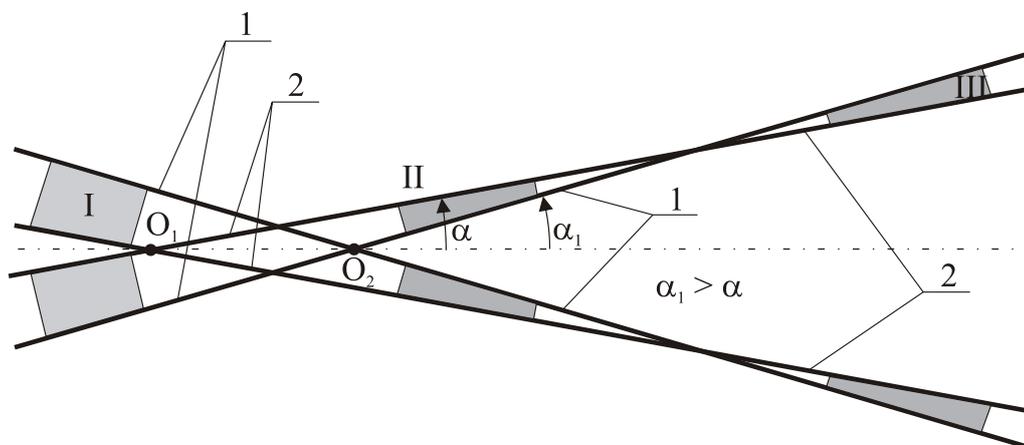


Рисунок 2 – Продольные сечения соосных конических каналов переменной ширины с границами, раскрывающимися в одну сторону: 1 – поверхность с большим полууглом раскрытия; 2 – поверхность с меньшим полууглом раскрытия

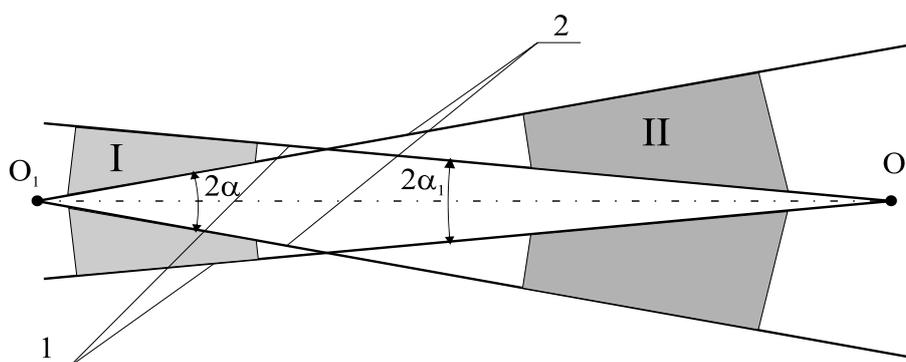


Рисунок 3 – Продольные сечения соосных конических каналов переменной ширины с границами, раскрывающимися на навстречу друг другу: 1 – поверхность с вершиной в точке  $O_1$ ; 2 – поверхность с вершиной в точке  $O_2$

В работах [1-25] достаточно полно была рассмотрена геометрия соосных конических каналов с границами раскрывающимися в одну сторону и практически отсутствует описание каналов с границами раскрытыми навстречу друг другу. Поэтому давайте кратко рассмотрим геометрию таких каналов (рис. 4).

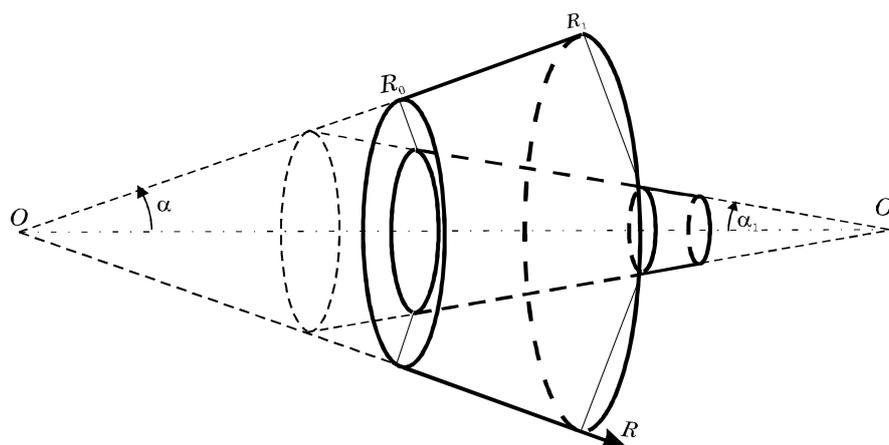


Рисунок 4 – Геометрия соосного конического канала с границами, раскрытыми навстречу друг другу.  $O, O_1$  – вершины конических границ;  $R_0, R_1$  – радиальные координаты входа в канал и выхода из него;  $\alpha, \alpha_1$  – полууглы раскрытия внешней и внутренней конических границ, соответственно

Если в каналах с коническими границами, раскрывающимися в одну сторону, коэффициент  $b$  в линейной зависимости ширины канала от радиальной координаты определялся тангенсом разности полууглов раскрытия границ [22, 23], то, как следует из рисунка 4, в рассматриваемых здесь каналах линейная зависимость ширины канала от  $R$ :  $h = h_0 + b(R - R_0)$ , где  $h_0$  – ширина канала на его входе, будет определяться коэффициентом  $b$ , равным:

$$b = \operatorname{tg}(\alpha + \alpha_1), \quad (1)$$

т.е. как и в соосных конических каналах переменной ширины с границами раскрытыми в одном направлении, в рассматриваемых здесь каналах их геометрия будет определяться тремя параметрами:  $R_0, \alpha$  и  $b$  или эквивалентным набором:  $R_0, \alpha$  и  $\alpha_1$ .

Существует и принципиальное отличие геометрии соосного конического диффузора с раскрытием поверхностей навстречу друг другу от геометрии диффузоров с увеличивающейся шириной вдоль течения, рассмотренных ранее. Как мы отмечали, у последних длина канала может быть неограниченной, в то время как у каналов, показанных на рисунке 4 существует максимально возможная величина радиальной координаты  $R = R_{\max}$ , ограничивающая длину канала.

Для определения максимального возможного значения радиальной координаты  $R_{\max}$  в биконической системе координат [11, 22, 23] рассмотрим рисунок 5.

Длина образующей внутреннего конуса –  $AO_1$  из геометрических соображений может быть определена как:

$$AO_1 = \frac{R_0 \sin \alpha - h_0 \cos \alpha}{\sin \alpha_1}. \quad (2)$$

С другой стороны эта же величина определяется максимально возможной длиной образующей внешней конической границы:

$$AO_1 = \frac{R_{\max} - R_0}{\cos(\alpha + \alpha_1)}, \quad (3)$$

откуда для вычисления  $R_{\max}$  получаем формулу:

$$R_{\max} = R_0 + (R_0 \sin \alpha - h_0 \cos \alpha) \frac{\cos(\alpha + \alpha_1)}{\sin \alpha_1}. \quad (4)$$

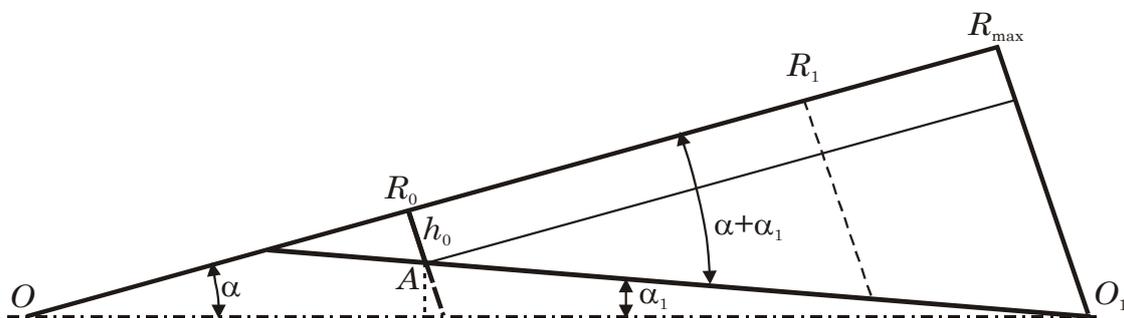


Рисунок 5 – К определению функциональной связи между параметрами соосного конического канала с границами, раскрытыми навстречу друг другу:  $h_0$  – начальная ширина канала;  $O, O_1$  – вершины конических границ;  $R_0, R_1$  – радиальные координаты входа в канал и выхода из него;  $R_{\max}$  – максимально возможное значение радиальной координаты;  $\alpha, \alpha_1$  – полууглы раскрытия внешней и внутренней конических границ, соответственно

### Заключение

Рассмотрены различные возможные варианты соосных конических каналов и выполнена их классификация, которая помогает подобрать систему координат для математической постановки задачи течения жидкостей в таких каналах.

### Литература

1. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. – М.: Машиностроение. 1974. – 608 с.
2. Литвинов В.Г., Иванова Н.И. Задача о движении нелинейно-вязкой среды в осесимметричных каналах // Прикладная механика. 1994. Т. 30. № 11. С. 85 – 90.
3. Тадмор З. Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия. 1984. 632 с.
4. Пономаренко В.Г., Житинкин А.А., Запорожец О.Л., Ульев Л.М. и др. Погружное устройство для гранулирования термопластов // Авторское свидетельство № 1720868 СССР. 23. 03. 92. Бюл. № 11.
5. Каплун Я.Б., Ким В.С. Формующее оборудование экструдеров. – М.: Машиностроение. 1969 – 160 с.
6. Joshi M.V. Dies For plastic extrusion. – Delhi.: Macmillan India Limited. 1984. – 176 p.
7. Технология нанесения покрытий на поверхности / Яхно О.М., Кравченко С.Г., Кривошеев В.С., Польшивный А. П., Бочковский В.С. – К.: Техніка. 1993. – 120 с.
8. Басов Н.И. Казанков Ю.В. Литьевое формование полимеров. – М.: Химия. 1984. – 248 с.
9. Ульев Л.М., Тобажнянский Л.Л. Теплообмен при ламинарном течении между коаксиальными эквидистантными коническими поверхностями. Диффузорное течение // Вестник ХГПУ. Выпуск 10.: Харьков. ХГПУ. 1998. С. 3-12.
10. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки канала // Сб.

научн. трудов. "Авиационно-космическая техника и технология". Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. Харьков. ХАИ. 1999. С. 165-178.

11. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном течении в коаксиальных конических конфузорах для граничных условий первого рода // Интегровані технології та енергозбереження. Харьков. 1999. № 2. С. 40-52.

12. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении в соосных конических зазорах для граничных условий первого рода с линейным изменением температуры стенок вдоль течения // Интегровані технології та енергозбереження. Харьков. 1999. №4. С. 45-59.

13. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении жидкости в коаксиальных конических каналах // // ТОХТ. 2000. Т. 34, №1. С. 16-24.

14. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного теплообмена для диффузорного течения в соосных конических каналах при произвольном непрерывном изменении температуры стенок вдоль течения // Вестник ХГПУ. Выпуск 89. Харьков. ХГПУ. 2000. С. 81-88.

15. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в конической щели для граничных условий первого рода и произвольном распределении температуры на входе // Вестник ХГПУ. Выпуск 105. Харьков. ХГПУ. 2000. С. 113-124.

16. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении жидкости в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки // ТОХТ. 2001. Т. 35, № 1. С. 31-41.

17. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении в соосном коническом канале в случае граничных условий первого рода // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 1. С. 21-26.

18. Ульев Л.М. Течение и теплообмен высоковязкой жидкости в круглом конфузоре // // ТОХТ 1992. Т. 26. №2. С. 243-253.

19. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов термопластичных полимеров в круглых формующих каналах // // ТОХТ. 1995. Т. 29. № 3. С. 233-241.

20. Ульев Л.М. Напорно-расходная характеристика круглых формующих каналов при неизотермическом течении расплавов термопластичных полимеров // ИФЖ. 1996. № 4. С. 606-614.

21. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов термопластичных полимеров в коническо-цилиндрических фильерах // ТОХТ. 1996. Т. 30. № 6. С. 583-590.

22. Ульев Л.М. Медленные конфузорные течения в соосных конических каналах переменной ширины // Вестник НТУ "ХПИ". 2002. № 3. Харьков. НТУ "ХПИ". С. 122-130.

23. Ульев Л.М. Ламинарное диффузорное течение в соосном коническом канале переменной ширины с частичным учетом сил инерции // Вестник НТУ «ХПИ», 2003. Вып. 17. С. 143-153.

УДК 532.5; 678.027

Ульев Л.М.

### **КЛАСИФІКАЦІЯ СПІВВІСНИХ КОНІЧНИХ КАНАЛІВ**

Розглянуто різні можливі варіанти співвісних конічних каналів і виконана їхня класифікація, що допомагає підібрати систему координат для математичної постановки задач плин у таких каналах.