

03

Моделирование механизма снижения сопротивления оболочек тел вращения, обтекаемых вязкой жидкостью

© С.М. Аульченко, В.О. Каледин, Ю.В. Аникина

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
Новокузнецкий филиал-институт Кемеровского государственного
университета
E-mail: aultch@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2007 г.

Рассмотрена задача определения параметров и формы бегущей волны на поверхности тела вращения, минимизирующих его сопротивление в вязкой жидкости. Проанализированы физические эффекты, возникающие при таком управлении течением. Обсуждается возможность проведения численного моделирования обтекания тела вращения в рамках полных уравнений гидроупругости, включающих уравнения Навье–Стокса и уравнения движения линейно-упругой оболочки.

PACS: 47.55.dr

Задача снижения гидродинамического сопротивления всегда представляла большой теоретический и практический интерес. Традиционно исследования в этой области объединены проблемой управления пограничным слоем, основанной на модели Прандтля. Главная особенность пограничного слоя состоит в том, что градиент скорости в нем растет одновременно с увеличением числа Рейнольдса. Этим объясняется не пропорционально медленное убывание коэффициента сопротивления с ростом числа Рейнольдса. Традиционное неуправляемое течение возможности существенного уменьшения сопротивления не предоставляет. И только привлечение некоторых средств управления, например деформируемой по закону бегущей волны границы, позволяет отказаться от пограничного слоя как в физике течения, так и в его математической модели. Теоретически этот путь был обоснован в [1], а в [2–5] путем численного эксперимента проверен механизм перестройки течения, при которой пограничный слой заменяется периодическим течением. Был

получен положительный ответ на вопрос о возможности формирования периодического течения под действием бегущей по поверхности тела волны и установлено, что коэффициент трения для течения с бегущей волной убывает обратно пропорционально первой степени от числа Рейнольдса, а не корню из него, как в пограничном слое. Это уменьшает сопротивление трения на порядок.

Численному эксперименту подвергалась модель осесимметричного тела двадцатипроцентной толщины. Цель — провести параметрические исследования влияния параметров бегущей волны (амплитуды, фазовой скорости, частоты) на управление обтеканием тела вращения для минимизации его гидродинамического сопротивления.

Численное моделирование осуществляется путем решения полных уравнений Навье–Стокса в области „геометрического пограничного слоя“ на подвижном расчетном шаблоне [2]. Этот подход значительно сокращает время расчета при гарантированном уровне численной диссипации решения, так как характерное число Рейнольдса определяется по длине волн, согласно которым осуществляется декомпозиция области. Нижняя граница области в проведенных расчетах деформировалась по закону бегущей волны с переменной амплитудой $y_0(x, t) = A(x) \sin(\omega t - kx)$. Длина волны изменялась на каждом участке области течения, так как определялась значением фазовой скорости. Фазовая скорость выбиралась пропорциональной скорости течения и менялась вместе с ней. Система нестационарных уравнений Навье–Стокса дополняется краевыми условиями на границах. На внешней границе задавалась скорость потенциального обтекания, на поверхности корпуса — совпадение скорости движения жидкости со скоростью движения границы, на левой границе — параметры потока, равные их значениям либо на границе со смежной волной, либо параметрам потенциального обтекания тела для первой волны; на правой границе — „мягкие“ граничные условия.

Решение уравнений Навье–Стокса проводилось методом крупных частиц. За единицу длины принята длина корпуса, а за единицу скорости — скорость набегающего потока. Были проведены параметрические расчеты, в которых варьируемыми параметрами являлись фазовая скорость U_f , амплитуда A , положение максимума амплитуды x^* и круговая частота поверхностной волны ω . Вариация фазовой скорости определялась величинами относительной (нормированной на значение скорости потенциального течения в текущей точке) скорости в начале

Таблица 1. Параметры базового численного эксперимента

Re	ω	x^*	A_0	A^*	U_0	U^*	U_k	S_e
$1.0 \cdot 10^6$	$6.0 \cdot 10^4$	0.35	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.5	1.0	2.0	$-6.56 \cdot 10^{-3}$

корпуса U_0 , в точке $x^* - U^*$, где амплитуда волны достигает максимума, и в корме U_k . Вариация амплитуды задавалась ее значениями в начале корпуса A_0 , в точке $x^* - A^*$ и в конце корпуса, где она всегда равна нулю. Вычисляемыми величинами являлись: суммарная работа сил давления от начала до текущей точки $S_p(x)$, текущий дефицит энергии в потоке $S_e(x)$, работа сил трения $S_f(x)$. Значение дефицита энергии в кормовой точке S_e численно совпадает с половиной коэффициента сопротивления тела [1]. В результате был определен базовый вариант параметров бегущей волны, снижающей сопротивление исследуемого тела вращения на порядок. Он приведен в табл. 1. В первой колонке Re — число Рейнольдса. Распределение вдоль хорды тела параметров бегущей волны, а также вычисляемых при расчете характеристик обтекания тела приведено на рис. 1.

Также были проведены расчеты по изучению влияния формы волны на сопротивление и смоделировано управление обтеканием тела вращения, минимизирующее его гидродинамическое сопротивление. Для определения влияния формы бегущей волны на сопротивление тела форма волн как функция координаты x задавалась по формулам:

$$y_A(x) = \sum_{l=1}^L A(l, n) \sin(lx) \quad \text{и} \quad y_B(x) = \sum_{l=1}^L B(l, n) \sin(lx),$$

где $A(l, n) = \sin(l\pi/n)$, $B(l, n) = n \sin^2(l\pi/n)/l$ — амплитуды гармоник, L — число гармоник в представлении бегущей волны, l — номер гармоники, n — параметр, индексы A, B обозначают тип волны.

В табл. 2 приведены параметры формы волны, результаты базового № 1 и оптимального № 2 режимов обтекания для проведенных численных экспериментов — сопротивление трения, сумма работы сил давления и сопротивление тела. Распределение этих величин как функция x вдоль хорды тела для базового варианта и типичного варианта, уменьшающего сопротивление из серии проведенных расчетов (№ 2, табл. 2), представлено на рис. 2. Анализ результатов показывает, что

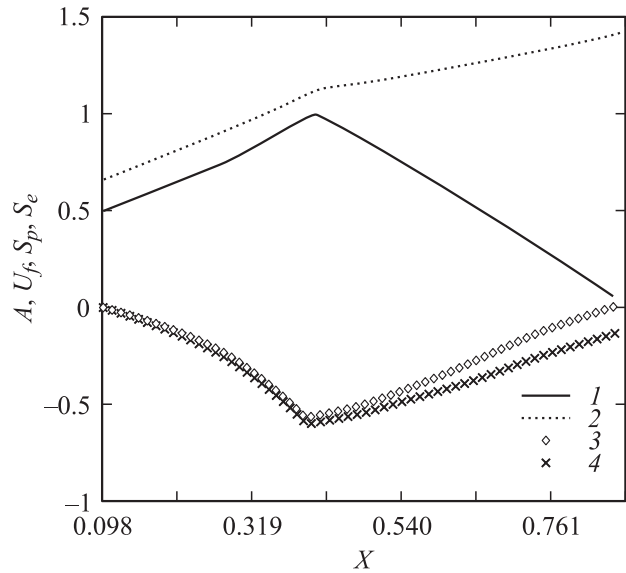


Рис. 1. Распределение вдоль хорды тела амплитуды A (1), фазовой скорости U_f (2), суммы работы сил давления S_p (3), дефицита энергии потока S_e (4). Безразмерные значения указанных величин, отложенные на вертикальной оси, масштабированы следующим образом: $A \times 1000$, $U_f \times 1$, $S_p \times 20$, $S_e \times 20$.

форма бегущей волны слабо сказывается на сопротивлении трения (поэтому на рис. 2 распределение работы силы трения не приводится), тогда как суммарная работа сил давления изменяется в разы, что можно использовать для уменьшения дефицита энергии потока. Волны типа $y_B(x)$, имеющие „насыщенный“ профиль, совершают большую работу над жидкостью, что и приводит к уменьшению сопротивления. И наоборот, „пикообразная“ форма бегущих волн типа $y_A(x)$ приводит

Таблица 2. Результаты численного эксперимента по определению сопротивления тела в зависимости от формы бегущей волны

Вариант	Форма	l	n	S_f	S_p	S_e
1	$y_A(x)$	1	1	$-6.10 \cdot 10^{-3}$	$-4.60 \cdot 10^{-4}$	$-6.56 \cdot 10^{-3}$
2	$y_B(x)$	5	4	$-6.40 \cdot 10^{-3}$	$6.10 \cdot 10^{-3}$	$-3.00 \cdot 10^{-4}$

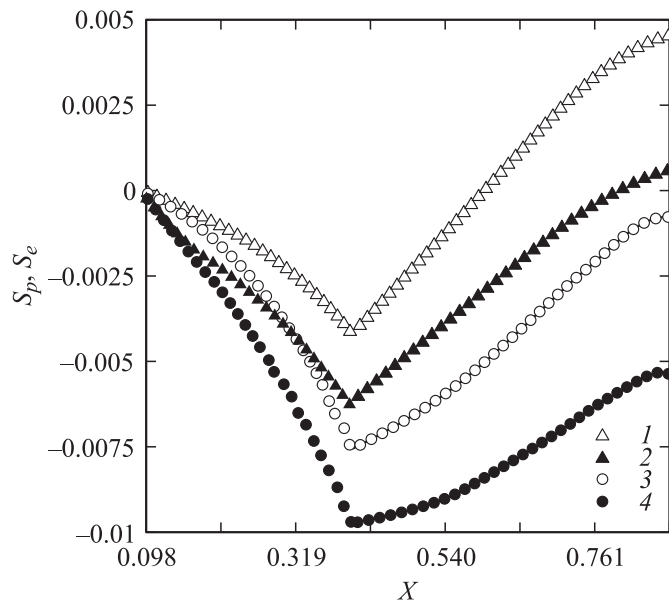


Рис. 2. Распределение вдоль хорды тела: суммы работы сил давления S_p (1), суммарного дефицита энергии потока S_e (2) для варианта № 2 табл. 2 и суммы работы сил давления S_p (3), суммарного дефицита энергии потока S_e (4) для базового варианта.

к большей работе, совершаемой потоком над поверхностью тела по сравнению с базовым вариантом, для которого она практически нулевая, что увеличивает сопротивление.

Поскольку параметры поверхностной волны определяются упругими характеристиками покрытия, то заключение о целесообразности такого способа снижения вязких потерь возможно только после проведения численного моделирования обтекания тела вращения в рамках полных уравнений гидроупругости, включающих уравнения Навье–Стокса и уравнения движения линейно-упругой оболочки. Так как форма бегущей волны определяется нестационарным распределением давления по поверхности оболочки, ее упругими и инерционными свойствами, то для достижения существенного эффекта требуется целенаправленно выбирать соотношения изгибных и мембранных жесткостей, что может привести к использованию материалов с достаточно произвольным

соотношением модулей упругости по различным направлениям. Такую возможность представляют армированные композиционные материалы. Поэтому в дальнейших расчетах будет использоваться оригинальная модель упругого деформирования с произвольной схемой армирования, приводящей к анизотропии общего вида [5]. Результатом этих исследований будет определение амплитудно-частотных характеристик оболочек переменной по длине жесткости, взаимодействующих с потоком обтекающей жидкости. В итоге будет дана оценка возможности передачи энергии от потока к оболочке путем обеспечения резонанса собственных колебаний оболочки с колебаниями давления в жидкости.

Проведенные численные эксперименты позволяют сделать следующие выводы. Волна, бегущая по поверхности корпуса тела вращения конечной длины, перестраивает течение жидкости так, что формируется стационарное периодическое течение с замкнутыми линиями тока, если его рассматривать в подвижной системе координат. Данный режим обтекания характеризуется тем, что не зависит от числа Рейнольдса. Со стороны тела происходит обмен энергией с жидкостью не только за счет вязких сил, но и за счет сил давления, что может быть использовано для разгона жидкости и предотвращения отрыва потока. При подходящем выборе фазовой скорости бегущей волны на начальном участке можно обеспечить поток энергии от жидкости к упругому покрытию и таким образом сохранить энергию потока в виде энергии упругих колебаний, а в кормовой части восстановить импульс в жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-01-00004а.

Список литературы

- [1] Меркулов В.И. Управление движением жидкости. Новосибирск: Наука, 1981.
- [2] Аульченко С.М. // ИФЖ. 2003. Т. 76. № 6. С. 24–28.
- [3] Аульченко С.М. // ИФЖ. 2005. Т. 78. № 3. С. 193–195.
- [4] Аульченко С.М., Каледин В.О., Решетникова Е.В., Аникина Ю.В. // Краевые задачи и математическое моделирование: Сб. трудов 9-й Всероссийской научной конференции. Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2006. С. 8–14.
- [5] Каледин В.О., Решетникова Е.В. // Всерос. школа-семинар по современным проблемам механики деформируемого твердого тела: Сб. докл. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. С. 103–107.