

УДК 532.5.526

СНИЖЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ШУМОВ РАСТВОРАМИ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В. А. ВОСКОВОЙНИК, В. Т. ГРИНЧЕНКО, А. П. МАКАРЕНКОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 05.04.2007

Представлены экспериментальные оценки влияния подачи высокомолекулярных полимеров в турбулентный пограничный слой тела вращения на гидродинамическое сопротивление и шумы. Исследования проведены для турбулентного режима обтекания гидравлически гладкого удлиненного тела, в носовой части которого через кольцевую щель подавались растворы линейно-цепочного полимера (типа полиоксиэтилена). Изучено влияние угла ввода полимерного раствора, скорости обтекания, молекулярной массы и удельного расхода полимера на гидродинамические характеристики тела. Определены оптимальные условия щелевой подачи раствора, обеспечивающие максимальное снижение гидродинамического сопротивления и шумов обтекания. Исследовано воздействие высокомолекулярных полимеров на распределение спектральных уровней шумов вдоль обтекаемой поверхности и по толщине турбулентного пограничного слоя. Обоснован механизм влияния полимеров на структуру турбулентного пограничного слоя и источники шумообразования в рассмотренной системе.

Наведені експериментальні оцінки впливу подачі високомолекулярних полімерів до турбулентного межового шару тіла обертання на гідродинамічний опір і шуми. Дослідження проведено для турбулентного режиму обтікання гідравлічно гладкого видовженого тіла, у носовій частині якого через кільцеву щілину подавалися розчини лінійно-ланцюгового полімеру (типу поліоксиетилену). Вивчено вплив кута введення полімерного розчину, швидкості обтікання, молекулярної маси й питомої витрати полімеру на гідродинамічні характеристики тіла. Знайдено оптимальні умови щілинної подачі високомолекулярного полімеру, які забезпечують максимальне зменшення гідродинамічного опору й шумів обтікання. Досліджена дія високомолекулярних полімерів на розподіл спектральних рівнів шумів вздовж поверхні, що обтікається, і по товщині турбулентного межового шару. Обґрунтовано механізм впливу полімерів на структуру турбулентного межового шару та джерела шумоутворення в розглянутій системі.

The paper deals with estimating experimentally the effect of high-molecular polymer supply to turbulent boundary layer of the body of revolution on its hydrodynamic drag and noise. The study was carried out for a turbulent flow over a hydraulically smooth slender body, in which fore part the solutions of linearly chained polymers (of the polyoxiethylene type) were fed through the ring slot. The effect of the input angle for polymeric solution, flow-around velocity, molecular mass and discharge intensity of the polymer on the body hydrodynamic characteristics are investigated. The optimum conditions have been found for slot feeding of the high-molecular polymer providing the maximal hydrodynamic drag and flow noise reduction. The effect of high-molecular polymers on distribution of noise spectral levels has been studied along the flowed surface, as well as with respect to thickness of the turbulent boundary layer. For the system under consideration, the mechanism of polymer influence on the turbulent boundary layer structure and noise sources has been substantiated.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, между течением жидкости или газа и генерацией звука существует взаимосвязь, представляющая интерес для физических исследований и прикладных технических задач. На протяжении более семидесяти лет интерес к этой проблеме не снижается, а, напротив, возрастает. Это обусловлено увеличением скорости движения транспортных средств и объектов специального назначения, где вопрос снижения аэрогидродинамического шума весьма актуален. Действительно, шум транспортных средств оказывает нежелательное влияние на экологию среды обитания, а шумы обтекания объектов специального назначения ухудшают эффективность гидроакустических систем, в состав которых они входят.

Гидродинамическим шумом принято называть совокупность акустических явлений, которые обусловлены пульсациями скорости и давления, ге-

нерируемыми турбулентным потоком жидкости, и имеют звуковую и псевдозвуковую природу [1–3]. Источниками гидродинамического шума являются вихревые системы, формируемые в пограничных слоях, сдвиговых и отрывных потоках, следовых течениях, внутри разнообразных углублений и ограничений потока, где возникают резонансные колебания жидкости. Гидродинамический шум зарождается в местах формирования вихревых структур турбулентного пограничного слоя, а также при взаимодействии их как друг с другом, так и с обтекаемой поверхностью, которая, возбуждаясь потоком и совершая колебательные движения, излучает акустические волны в окружающую среду [4, 5]. Это стимулировало исследование по выяснению структуры самого турбулентного пограничного слоя, являющегося основным источником сопротивления трения и гидродинамического шума, и поиск способов управления им [6, 7]. Среди большого количества существую-

пких методов снижения сопротивления и гидродинамического шума в турбулентных потоках [8, 9] одним из наиболее эффективных является введение в них высокомолекулярных линейно-цепочных полимерных добавок.

Эффект уменьшения гидродинамического трения с помощью полимерных добавок был обнаружен Томсом в 1949 г. Его сущность заключается в том, что присутствие высокомолекулярных полимеров в растворителе, движущемся в трубе, приводит к существенному падению сопротивления трения. Позднее установлено, что введение полимерных растворов в пограничный слой движущегося хорошо обтекаемого тела также приводит к снижению его сопротивления трения [10–13]. Как показали результаты последних исследований, величина снижения сопротивления трения может достигать в трубопроводах 90 %, а на поверхности обтекаемых тел – 60 ÷ 65 % [14–16]. Такие данные получены нами при подаче полимерных растворов в турбулентный пограничный слой удлиненных тел вращения [11]. Это послужило основанием для проведения целенаправленных экспериментов по выявлению влияния полимерных растворов на гидродинамические шумы скоростных объектов.

В результате многочисленных исследований [12, 16, 17] выявлены оптимальные концентрации полимерных молекул, которые приводят к пренебрежимо малым изменениям плотности основного потока, но существенно снижают сопротивление трения. При этом определяющими факторами в снижении сопротивления являются молекулярная масса полимеров и их линейно-цепочная структура [14, 17, 18]. Основным недостатком полимерных добавок состоит в том, что они под действием высоких сдвиговых напряжений и с течением времени теряют свою эффективность. В ряде работ [12, 19, 20] показано, что основное влияние полимеров состоит в демпфировании флуктуаций нормальной и поперечной компонент скорости (главным образом, в буферной области пограничного слоя), что ослабляет генерацию турбулентности.

Целями данной статьи являются определение режимов целевой подачи высокомолекулярных линейно-цепочных полимеров, обеспечивающих максимальное снижение гидродинамического сопротивления и шумов обтекания, а также изучение физических особенностей влияния полимеров на структуру турбулентного пограничного слоя тела вращения.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проводились:

- в гидродинамической трубе с сечением 350×350 мм и длиной рабочего участка 2000 мм при скорости потока 10 м/с;
- в скоростном бассейне с размерами 150 м×3 м×1.5 м при скорости обтекания 15 м/с.

В качестве моделей выбирались гидравлически гладкие тела вращения диаметрами 60, 100 и 144 мм и относительным удлинением L/d от 7 до 14. Передняя часть каждой модели выполнялась в виде полуэллипсоида вращения с соотношением осей 1:4, средняя представляла собой цилиндр, а кормовая – параболоид вращения (рис. 1). В носовой части модели устанавливался кольцевой турбулизатор диаметром 3.0 мм, а за ним на расстоянии 25 мм располагалась регулируемая по ширине и углу наклона кольцевая щель для подачи в пограничный слой растворов полимеров. Конструкция щели позволяла дискретно, с шагом 15°, изменять угол ввода полимерных растворов относительно обтекаемой поверхности модели в пределах от 15 до 90°. В кормовой части модели устанавливался хорошо обтекаемый нож, внутри которого располагались трубопроводы для подачи полимерных растворов и электрические кабели, идущие от гидрофонов и тензометрических датчиков. Тензометрические датчики, установленные на тензовесах, размещались внутри модели. Гидродинамическое сопротивление моделей измерялось с помощью тензостанции типа ТА-5М и регистрировалось шлейфовым осциллографом.

Гидродинамические шумы турбулентного пограничного слоя моделей измерялись миниатюрными пьезокерамическими гидрофонами диаметром 1.5 мм, установленными заподлицо с обтекаемой поверхностью (их координаты показаны на рис. 1). Высокоомные выходные сигналы гидрофонов усиливались и преобразовывались в низкоомные эмитерными повторителями, установленными вблизи них, а затем поступали на вход многоканального малошумного усилителя. Регистрация сигналов с гидрофонов и последующая их спектральная обработка выполнялись на аппаратуре фирмы “Брюль и Кьер”, в диапазоне частот от 2 до 12500 Гц.

Измерения пульсаций полного давления в пограничном слое исследуемой модели проводились датчиком пульсаций полного давления, разрабо-

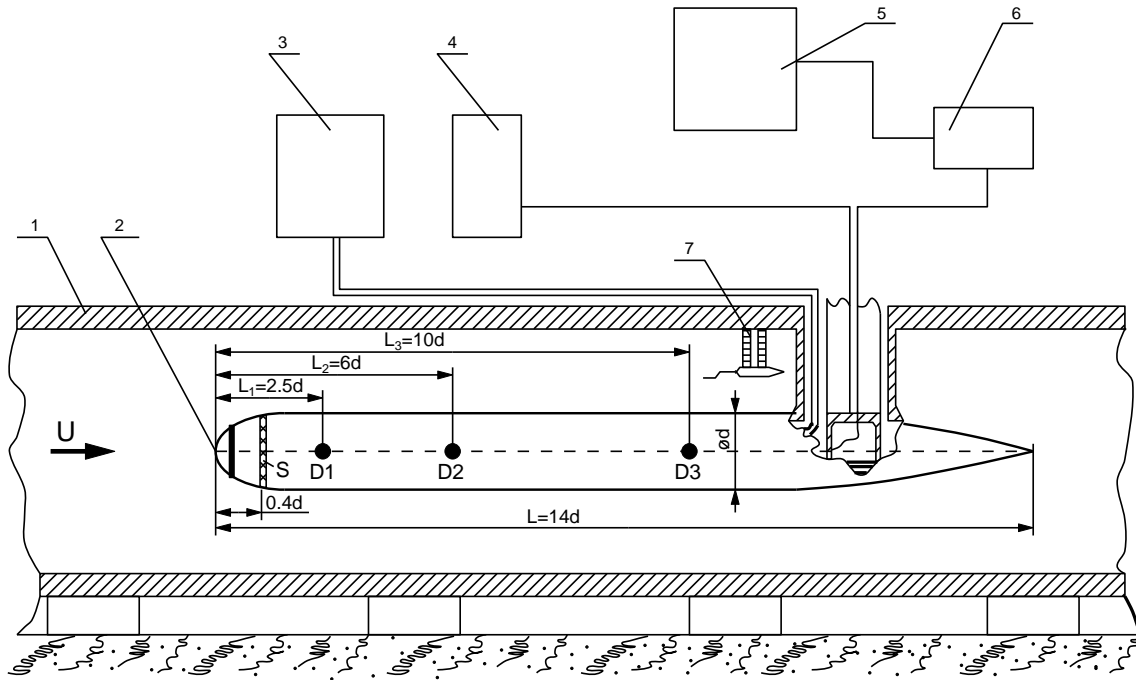


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и расположение датчиков:

- 1 – гидродинамическая труба; 2 – удлиненное тело вращения; 3 – система подачи полимеров; 4 – система тензометрии;
 5 – спектроанализирующий комплекс; 6 – измерительная и регистрирующая аппаратура;
 7 – датчик пульсаций полного давления;
 D1, D2, D3 – гидрофоны; S – кольцевая щель

танного и изготовленного в Институте гидромеханики НАН Украины. Его местоположение показано на рис. 1, а конструкция – на рис. 2. Корпус датчика выполнен в виде хорошо обтекаемого тела, в передней части которого расположен приемник пульсаций полного давления. Приемная часть последнего представляла собой плоскую прямоугольную трубочку высотой 0.6 мм и шириной 0.8 мм. Внутри корпуса датчика находился пьезокерамический цилиндрический приемник, преобразовывающий пульсации полного давления в знакопеременный электрический сигнал. Для того, чтобы исключить влияние статической составляющей давления вблизи преобразователя, в корпусе датчика было сделано отверстие диаметром 0.2 мм.

При проведении исследований использовались водные растворы высокомолекулярных линейно-цепочных полиоксиэтиленов П1 (молекулярная масса $2 \cdot 10^6$), П2 (молекулярная масса $4 \cdot 10^6$) и П3 (молекулярная масса $7 \cdot 10^6$). Применявшаяся методика была основана на сравнении спектральных составляющих гидродинамических шумов, регистрируемых при щелевой подаче чистой воды и растворов полимеров в турбулентный пограни-

чный слой тел вращения. Концентрация полимера в растворе определялась путем взвешивания его в сухом виде на аналитических весах (тип ВЛР-200г, первый класс точности) перед растворением в известном объеме воды. Объемный расход полимерных растворов и чистой воды, подаваемых в турбулентный пограничный слой модели, контролировался с помощью роторного расходомера.

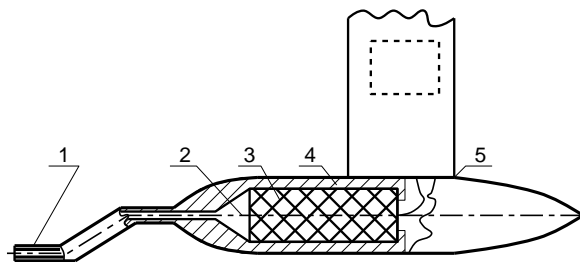


Рис. 2. Конструкция датчика пульсаций полного давления:

- 1 – приемная трубка; 2 – рабочая камера;
 3 – пьезокерамический преобразователь;
 4 – корпус датчика; 5 – хорошо обтекаемый нож

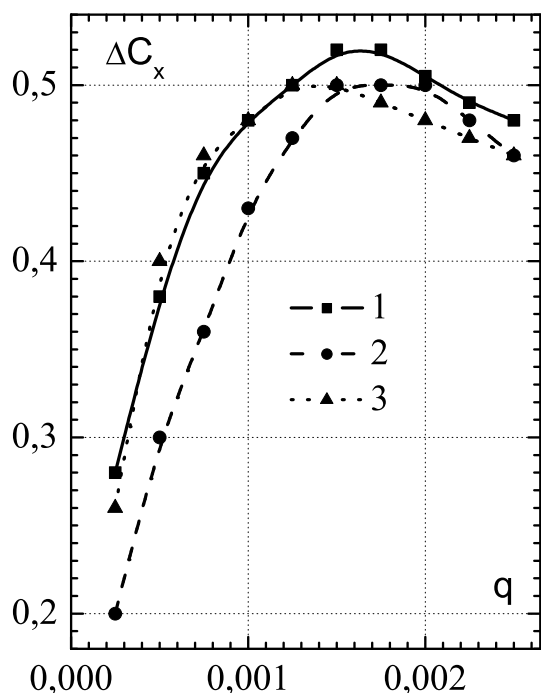


Рис. 3. Изменение гидродинамического сопротивления модели в зависимости от удельного расхода полимера для различных углов его щелевой подачи

Перед проведением исследований, в ходе их и после окончания работ все измерительные датчики и гидрофоны, созданные в Институте гидромеханики НАН Украины, градуировались и калибровались абсолютным и относительным методами. Тензометрические весы градуировались посредством контролируемого нагружения эталонными разновесами первого класса точности. Градуировка гидрофонов и датчика пульсаций полного давления проводилась на специальном стенде для динамической тарировки датчиков давления [21]. Полученные результаты использовались при определении чувствительности приемников, а также учитывались при обработке и анализе экспериментальных данных.

Погрешность измерений пульсаций давления, регистрируемых гидрофонами и датчиком пульсаций полного давления, не превышала 2 дБ в частотном диапазоне от 2 до 12500 Гц. Гидродинамическое сопротивление модели измерялось с погрешностью, которая не превышала 2 % при достоверности 0,995 или 3σ .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

С целью уменьшения собственных помех гидродинамической трубы перед проведением экспериментальных исследований были выполнены специальные мероприятия [11, 22], которые включали изготовление и установку устройства безотрывного малощумного истечения воды из рабочего участка в резервуар. Оно представляло собой прямоугольный канал, выполненный из дерева, и обшитый внутри 8 мм слоем пористой резины. С помощью такого сливного устройства было получено снижение собственных шумов в районе рабочего участка трубы на 20 дБ на частотах от 20 до 4500 Гц.

На первом этапе исследований изучалось влияние геометрических параметров щелевой подачи растворов высокомолекулярных полимеров и удельного расхода полимера на величину гидродинамического сопротивления тела вращения. Максимальное его снижение (52 %) было получено при подаче раствора полимера ПЗ. Гидродинамическое сопротивление модели регистрировалось при подаче через кольцевую щель шириной 1 мм как полимерных растворов, так и чистой воды. На рис. 3 представлены значения снижения гидродинамического сопротивления обтекаемой модели в виде $\Delta C_x = (C_x - C_{xp})/C_x$ в зависимости от удельного расхода вводимого полимера, где C_x – гидродинамическое сопротивление модели при подаче чистой воды, а C_{xp} – сопротивление при подаче полимерного раствора. Кривая 1 получена для угла подачи полимера относительно обтекаемой поверхности $\alpha = 15^\circ$, кривая 2 – $\alpha = 45^\circ$ и кривая 3 – $\alpha = 90^\circ$. Из графика следует, что максимальное снижение гидродинамического сопротивления наблюдается при щелевой подаче полимера под углом 15° при удельном его расходе $q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м²·с. Подача в пограничный слой чистой воды для этих же условий обтекания и в объемах, равных объемам, подаваемых полимерных растворов, вызвала незначительное снижение сопротивления модели – $2 \div 3$ %.

Исследование действия полимерных растворов на гидродинамические шумы вдоль обтекаемой поверхности модели осуществлялось путем измерения шумов гидрофонами, расположенными по ее длине (см. рис. 1). На рис. 4 представлено отношение спектральных уровней шумов $\Delta P = 20 \lg(P_p/P_w)$, полученных для щелевой подачи полимеров и чистой воды, в зависимости от безразмерной частоты $\omega^* = 2\pi f \delta^*/U_0$. Здесь P_p и P_w – спектральные уровни шумов при подаче полимеров и чистой воды соответственно; f – частота;

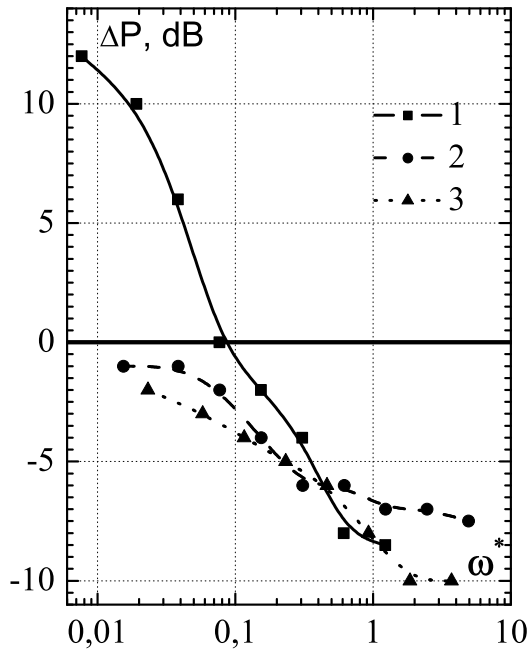


Рис. 4. Отношение спектральных уровней шумов вдоль образующей модели при щелевой подаче растворов полимеров

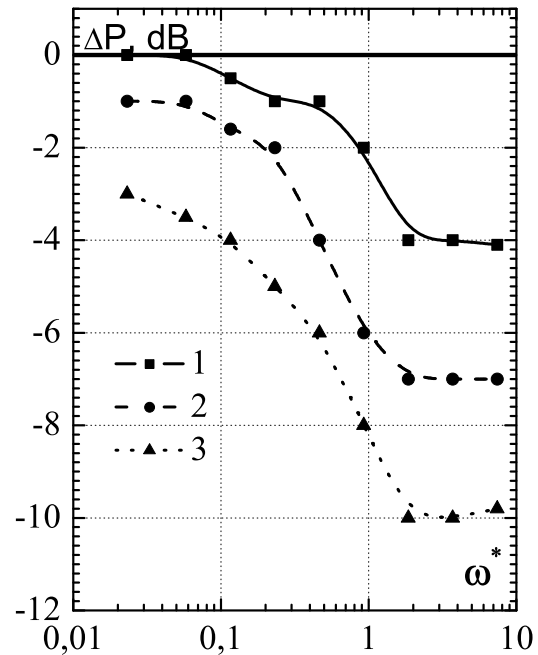


Рис. 5. Отношение спектральных уровней гидродинамических шумов при подаче растворов полимеров с различной молекулярной массой

δ^* – толщина вытеснения; U_0 – скорость набегающего потока. Отрицательным значениям ΔP соответствует снижение шумов, а положительным – увеличение. Кривая 1 отвечает данным, измеренным гидрофоном N 1, кривая 2 – гидрофоном N 2 и кривая 3 – гидрофоном N 3. Из графика следует, что гидродинамические шумы претерпевают трансформацию вдоль обтекаемой поверхности модели. Гидрофон, расположенный вблизи места ввода полимерных растворов, зафиксировал существенное увеличение гидродинамических шумов (на $6 \div 12$ дБ) в диапазоне низких частот – $\omega^* = 0.002 \div 0.08$ – и снижение на $6 \div 8$ дБ в диапазоне $\omega^* = 0.3 \div 2$. Гидрофоны, удаленные от места ввода (NN 2 и 3), выявили значительное снижение гидродинамических шумов во всем исследуемом частотном диапазоне. При этом с удалением вниз по потоку от места ввода полимера эффективность шумоподавления возрастает.

Как установлено многими исследователями, степень снижения гидродинамического сопротивления определяется величиной молекулярной массы, которая характеризует длину молекул линейно-цепочных полимеров [10–12, 17, 20]. Мы же основное внимание уделили изучению влияния молекулярной массы полимеров на снижение гидроди-

намических шумов. С этой целью в пограничный слой модели вводились растворы трех полимеров (П1, П2, П3) с различной молекулярной массой. На рис. 5 вновь представлены разности спектральных уровней ΔP , но для разных полимеров (номера кривых соответствуют условным номерам полимерных растворов). Измерения проведены при скорости обтекания модели $U_0 = 10$ м/с и удельного расхода полимера $q = 1.5 \cdot 10^{-3}$ кг/м² с, подаваемого через щель с углом ввода 15° . Результаты получены с помощью гидрофона N 3, который выявил максимальное снижение шумов. График показывает, что наиболее эффективно гидродинамические шумы снижает полимер П3, имеющий самую высокую молекулярную массу из исследуемых. Особенно это заметно на частотах $\omega^* = 1 \div 8$, где ΔP достигает значений от -8 до -10 дБ. Следовательно, введение в пристеночную область турбулентного пограничного слоя растворов линейно-цепочных полимеров с большой молекулярной массой существенно ослабляет высокочастотные давлениеобразующие источники гидродинамических шумов. При этом их низкочастотные компоненты лишь незначительно теряют свою интенсивность. Так, наиболее эффективный из исследуемых полимер П3 уменьшает гидроди-

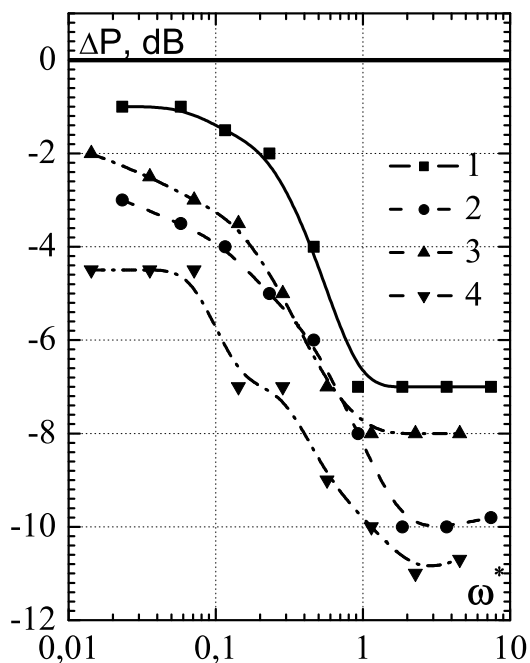


Рис. 6. Влияние скорости обтекания на эффективность снижения гидродинамических шумов при щелевой подаче различных растворов полимеров

намический шум в области низких частот не более, чем на $3 \div 4$ дБ (см. кривую 3 на рис. 5).

При увеличении скорости обтекания от 10 до 15 м/с фиксируется практически одно и то же снижение гидродинамического сопротивления модели (для полимера ПЗ – приблизительно 52 %). Отметим однако, что эффект снижения гидродинамических шумов усиливается и проявляется в еще более широком частотном диапазоне. Это видно из рис. 6, иллюстрирующего результаты измерений с помощью гидрофона N 3. Здесь кривые 1 и 2 получены при скорости обтекания 10 м/с, а кривые 3 и 4 – при 15 м/с. При этом кривые 1 и 3 соответствуют подаче раствора полимера П2, а кривые 2 и 4 – полимера ПЗ. Таким образом, к более существенному снижению гидродинамических шумов, особенно в области высоких частот, приводит рост как скорости обтекания, так и молекулярной массы используемого водного раствора полимера. Конечно, с увеличением скорости обтекания в экспериментах возрастал уровень P_w .

Механизм взаимодействия полимерных растворов с когерентными вихревыми структурами турбулентного пограничного слоя по его толщине исследовался посредством анализа пульсаций полного давления. На рис. 7 представлены уровни их

волновых спектров по толщине пограничного слоя для двух случаев – при подаче полимера ПЗ и воды. Измерения проводились над гидрофоном N 3 при скорости обтекания 10 м/с. На графике кривые 1 и 2 – спектры, соответствующие измерениям, проведенным над обтекаемой поверхностью на расстоянии $y/\delta=0.06$, а кривые 3 и 4 – $y/\delta=0.86$, где δ – толщина пограничного слоя. Кривые 1 и 3 получены при подаче воды, а кривые 2 и 4 – полимерного раствора ПЗ. Установлено, что основное действие полимеров на гидродинамический шум и вихревые структуры пограничного слоя, порождающие его, происходит во внутренней области пограничного слоя. Кроме того, абсолютные значения уровней пульсаций полного давления во внешней области погранслоя существенно (почти на 15 дБ) ниже, чем вблизи стенки. Следует отметить, что высокомолекулярные полимеры в большей степени демпфируют высоковольтные пульсации полного давления, особенно в пристеночной области турбулентного пограничного слоя.

Практическое использование эффекта снижения гидродинамических шумов полимерными растворами было осуществлено при подаче растворов на подкилевой обтекатель эхолота рыболовного траулера 504 проекта. Система ввода полимеров и методика применения их на данном судне были разработаны в Институте гидромеханики НАН Украины. Растворы полиоксизетилена с молекулярной массой $4 \cdot 10^6$ вводились в турбулентный пограничный слой перед обтекателем через щель шириной 1.5 мм под углом 15° к поверхности обтекателя. Скорость хода судна изменялась от 3 до 6 м/с, а удельный расход полимера был $q=1.5 \cdot 10^{-3}$ кг/м² с. Проведенные на Черном море испытания показали, что подача водных растворов высокомолекулярных линейно-цепочных полимеров в турбулентный пограничный слой обтекателя антенны эхолота снижала гидродинамические шумы на рабочей частоте 3000 ± 300 Гц на $6 \div 10$ дБ.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для более полного понимания механизма снижения гидродинамических шумов на поверхности тела, обтекаемого турбулентным пограничным слоем, необходимо кратко рассмотреть структуру самого турбулентного пограничного слоя. Это связано с тем, что снижение сопротивления трения и гидродинамических шумов полимерными растворами взаимосвязаны и обусловлены одними и теми же физическими процессами.

Известно, что флуктуации псевдозвукового дав-

ления на обтекаемой поверхности в турбулентном пограничном слое возникают в результате зарождения и разрушения вихревых структур внутренней и внешней областей пограничного слоя, которые взаимодействуют между собой и с обтекаемой поверхностью. Первая (внутренняя) область непосредственно прилегает к обтекаемой поверхности. В ней интенсивно зарождаются и разрушаются мелкомасштабные когерентные вихревые структуры. Эта область характеризуется максимальными уровнями генерации турбулентной энергии пограничного слоя и определяет высокочастотные или высокочастотные компоненты спектров гидродинамических шумов. Сюда входят вязкий подслой и буферная зона пограничного слоя. Вторая (внешняя) область более обширна, но менее активна. В ней крупномасштабные когерентные вихревые структуры формируют низкочастотные или низкочастотные компоненты спектров пульсаций псевдозвукового давления [23–25]. В работах [26–28] подробно проанализированы типы вихревых структур, их масштабы и формы, а также рассмотрены механизмы взаимодействия между системами вихрей и обтекаемой поверхностью.

Робинсон в [26, 28] обобщил и классифицировал наблюдаемые в турбулентных пограничных слоях виды и типы вихревых структур. Вихревые структуры в вязком подслое и буферной области, главным образом, представляют собой квазипродольные протяженные противоположно вращающиеся вихревые пары, относящиеся к классу мелкомасштабных когерентных пристеночных вихрей. Их масштаб, нормированный длиной вязкости пограничного слоя ν/u_τ , оценивается, как $\lambda_x^+ = 800 \div 1200$, $\lambda_y^+ = (20 \div 30)$ и $\lambda_z^+ = 80 \div 100$. Там, где вектор окружной скорости вихревых пар направлен от обтекаемой поверхности, между ними формируются низкоскоростные струйки. В зонах, где вектор окружной скорости направлен к обтекаемой поверхности, наблюдаются области высокоскоростного смыва. С удалением от обтекаемой стенки вихревые пары смыкаются и образуют шпилькообразные вихри, головки которых мигрируют во внешнюю часть буферной области пограничного слоя. Ножки этих вихрей, имеющие вид противоположно вращающихся вихревых пар, перемещаются внутри вязкого подслоя и частично в буферной области [26, 27]. При движении вниз по потоку верхняя часть ножек и головки колеблются и периодически выбрасываются в пограничный слой. Колебания верхних частей шпилькообразных вихрей заставляют осциллировать низкоскоростные струйки, которые при со-

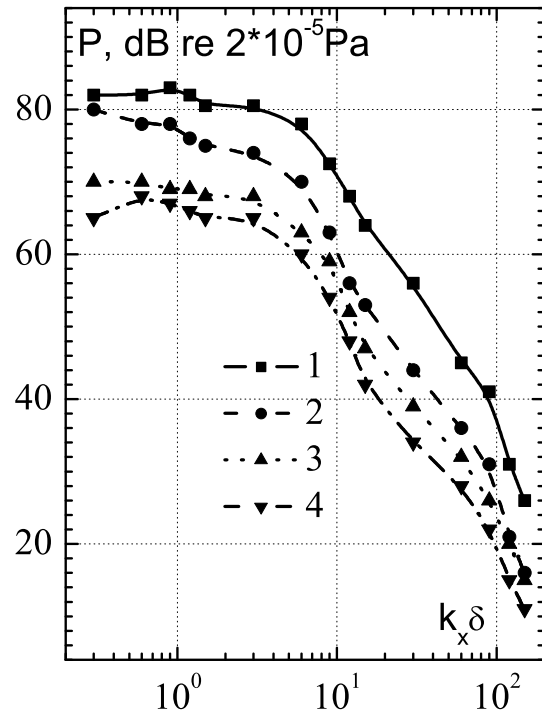


Рис. 7. Изменение уровней волновых спектров пульсаций полного давления по толщине пограничного слоя при подаче полимерных растворов

вершении колебательного движения поднимаются от обтекаемой поверхности. Согласно недавним экспериментальным наблюдениям и численному моделированию вихревого движения в пристеночной области пограничного слоя, обнаружено, что колебания турбулентных неустойчивостей имеют синусоидальную и варикозную моды [29–31], которыми и определяются характерные особенности гидродинамических шумов. Выброс вихревых систем наблюдается во внешней части пристеночной области пограничного слоя и частично в его логарифмической области. Период между выбросами оценивается как $T = (6 \div 7)\delta/U_0$.

Во внешней области турбулентного пограничного слоя формируются трехмерные вихревые системы в виде выпуклостей, имеющих масштаб, близкий к толщине пограничного слоя. Они обуславливают взаимодействие турбулентности с нетурбулентным течением. Через глубокие впадины по краям выпуклостей, в которых отсутствует вращательное движение, жидкость свободного потока устремляется в турбулентную область. Крупномасштабные слабо вращающиеся вихревые системы или аркообразные вихри обычно регистриру-

ются под выпуклостями. Относительно высокоскоростные объемы жидкости ударяются в находящуюся ниже по потоку поверхность крупномасштабной структуры, формируя наклонные сдвиговые слои. Цикл формирования вихревых структур во внутренней области в значительной степени является автотомельным, а структура внешней области турбулентного пограничного слоя имеет модулирующее влияние на процессы, происходящие вблизи поверхности. Это влияние зависит от числа Рейнольдса [26, 28].

Вихревые структуры турбулентного пограничного слоя переносятся вдоль обтекаемой поверхности со скоростями от 0.2 до $0.98U_0$ [26, 27, 32]. Мелкомасштабные пристеночные вихри конвектируют медленно, а крупномасштабные когерентные вихревые структуры – со скоростями близкими к скорости обтекания. Генерируемый при этом псевдозвук, являющийся одной из составляющих гидродинамических шумов, распространяется со скоростями переноса вихревых систем [2, 4, 5, 33, 34].

Как уже отмечалось ранее, ввод высокомолекулярных полимерных добавок, оказался наиболее эффективным способом снижения сопротивления и гидродинамических шумов. Малая концентрация линейно-цепочных полимерных молекул приводит к значительному изменению структуры турбулентного пограничного слоя. Установлено, что полимеры уменьшают турбулентность, подавляя обусловленное пристеночными вихрями низко- и высокоскоростные перемещения жидкости вверх и вниз относительно обтекаемой поверхности [13, 16]. Как мы полагаем, подача высокомолекулярных полимерных растворов под углом 15° , близким к углу подъема ножек пристеночных шпилькообразных вихрей (порядка 18° [27]), обеспечивает максимальную эффективность снижения сопротивления (см. рис. 3). Посредством визуализации течения в потоках с уменьшенным сопротивлением и шумом обнаружено увеличение поперечного разделения между низкоскоростными струйками и уменьшение частоты их выбросов [35]. Поэтому эффект падения гидродинамических шумов в большей степени проявляется в высокочастотной или высоковольтной частях соответствующих спектров. Это подтверждено результатами, представленными на рис. 5 и 7.

В то же время, обнаружено увеличение уровня гидродинамических шумов вблизи места ввода полимерных растворов в турбулентный пограничный слой (см. рис. 4). По нашему мнению, это объясняется взаимодействием концентрированного раствора полимера с чистой водой в пограни-

чном слое, что вызывает дополнительную турбулизацию последнего. Как следствие, повышаются пульсации скорости и давления, а значит, и гидродинамические шумы. Следует отметить, что подача менее концентрированного раствора полимера (но при неизменном его удельном расходе) позволяет значительно (до 6 дБ) понизить уровни гидродинамических шумов в низкочастотной области $0.008 < \omega^* < 0.08$. В процессе диффузии растворов по мере продвижения их вдоль обтекаемой поверхности концентрация полимеров в пристеночной области пограничного слоя становится более однородной, их молекулы под действием рейнольдсовых напряжений деформируются и приобретают линейную форму, стабилизируя и частично подавляя когерентные пристеночные вихри. При этом происходит увеличение поперечного масштаба шпилькообразных вихрей и уменьшение касательных напряжений на стенке. Это приводит к замедлению процессов порождения турбулентности пограничного слоя, а следовательно, к снижению сопротивления и гидродинамических шумов.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что полиоксиэтилены с большей молекулярной массой эффективнее снижают гидродинамические шумы (см. рис. 5). Причиной этого следует считать то, что под действием сдвиговых напряжений линейно-цепочные молекулы с большей молекулярной массой при своем перемещении в пристеночной области пограничного слоя вытягиваются в длину. Таким образом, увеличение продольного масштаба полимерных молекул пролонгирует их пространственно-временное воздействие на мелкомасштабные высокочастотные пристеночные вихри – источники псевдозвуковых пульсаций.

Как видно из рис. 6, увеличение скорости обтекания приводит к более эффективному снижению гидродинамических шумов. Действительно, с ростом скорости обтекания профиль скорости становится более заполненным, а толщина пограничного слоя уменьшается. При этом спектр псевдозвуковых пульсаций давления расширяется, а его спектральные уровни возрастают, особенно в области высоких частот или волновых чисел [1, 24, 33]. Вводимые же в пограничный слой высокомолекулярные полимеры воздействуют преимущественно на когерентные мелкомасштабные вихревые структуры, обуславливающие высокочастотные пульсации давления.

Известно, что в потоках полимеров пик в профилях продольных пульсаций скорости перемещается вверх от обтекаемой поверхности [15, 36]. Дело в том, что наиболее эффективно полимерные ра-

створы воздействуют на мелкомасштабные вихревые структуры, имеющие высокие волновые числа, особенно в пристеночной области (см. рис. 7). В то же время, во внешней области турбулентного пограничного слоя пульсации полного давления определяются крупномасштабными вихревыми структурами, их уровни значительно ниже, чем в пристеночной области и эффективность действия полимерных добавок невелика. Это согласуется с результатами, наблюдавшимися в [10, 37].

ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований установлено, что щелевая подача в турбулентный пограничный слой растворов высокомолекулярных линейно-цепочных полимеров типа полиоксиэтилена позволяет существенно снижать уровни гидродинамических шумов и сопротивления обтекаемого удлиненного тела вращения в широком диапазоне частот. Этот эффект наблюдается не только в интегральном, но и в спектральном представлении, особенно в области высоких частот и волновых чисел. При этом полимеры существенно изменяют структуру турбулентного пограничного слоя, воздействуя, главным образом, на когерентные мелкомасштабные высокочастотные пристеночные вихри.

Установлено, что сопутствующее уменьшение уровней спектральных составляющих гидродинамического шума, регистрируемого на поверхности хорошо обтекаемого гидравлически гладкого удлиненного тела вращения зависит от угла подачи и удельного расхода полимера, его молекулярной массы, скорости обтекания и расстояния от места ввода до точки регистрации. Максимальный эффект снижения гидродинамических шумов (до 10 дБ) получен при подаче полимера ПЗ под углом 15° с удельным расходом $1.5 \cdot 10^{-3}$ кг/м² с при скорости обтекания 15 м/с в диапазоне безразмерных частот $\omega^* = 1 \div 8$.

Обнаружено, что при наличии высокомолекулярных полимеров в турбулентном пограничном слое происходит существенное снижение пульсаций полного давления во внутренней области погранслоя (до 12 дБ или в 4 раза) Во внешней области этот эффект менее выражен – до 5 дБ. Это указывает на то, что линейно-цепочные молекулы полимера преимущественно воздействуют на буферную область турбулентного пограничного слоя, где происходит наиболее интенсивный процесс генерации турбулентности и шумообразования.

Исследования, проведенные в натурных усло-

виях, показали, что при указанных оптимальных условиях щелевая подача растворов полиоксиэтилена на подкилевой обтекатель эхолота рыболовного траулера снижает уровни гидродинамического шума до 10 дБ в рабочей полосе частот 3000 ± 300 Гц.

Ряд технических решений по снижению гидродинамических шумов и сопротивления с помощью ввода растворов высокомолекулярных полимеров в турбулентный пограничный слой обтекаемых тел запатентован нами и на них получены авторские свидетельства на изобретения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны и выражают свою благодарность научному сотруднику ИГМ НАНУ Г. П. Виноградному за подготовку и участие в проведении экспериментальных исследований.

1. *Blake W. K.* Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols.– New York: Academic Press, 1986.– 974 p.
2. *Ffowcs Williams J. E.* Aeroacoustics // *J. Sound Vib.*– 1996.– **190**, N 3.– P. 387–397.
3. *Миниович И. Я., Перник А. Д., Петровский В. С.* Гидродинамические источники звука.– Л.: Судостроение, 1972.– 478 с.
4. *Bull M. K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // *J. Sound Vib.*– 1996.– **190**, N 3.– P. 299–315.
5. *Смольяков А. В.* Шум турбулентного пограничного слоя на гладкой и шероховатой пластине при малых числах Маха // *Акуст. ж.*– 2001.– **47**, N 2.– С. 264–272.
6. *Dowling A. P.* Underwater flow noise // *Theor. Comput. Fluid Dynam.*– 1998.– **10**.– P. 135–153.
7. *Dhanak M. R., Dowling A. P., Si C.* Coherent vortex model for surface pressure fluctuations induced by the wall region of a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids.*– 1997.– **9**, N 12.– P. 2716–2731.
8. *Bushnell D. M., Moore K. J.* Drag reduction in nature // *Ann. Rev. Fluid Mech.*– 1991.– **23**.– P. 65–79.
9. *Kim J.* Control of turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.*– 2003.– **15**, N 5.– P. 1093–1105.
10. *Семенов Б. Н., Амиров А. И., Кулик В. М.* Снижение турбулентного сопротивления путем совместного использования податливого покрытия, газовых микропузырьков и полимерных добавок // *Теплофиз. аэромех.*– 1999.– **6**, N 2.– С. 225–234.
11. *Макаренков А. П., Виноградный Г. П., Скрипачев В. В., Канарский М. В.* Влияние полимерных добавок на пульсации давления в пограничном слое // *ИФЖ.*– 1973.– **25**, N 6.– С. 1006–1009.
12. *Ptasinski P. K., Nieuwstadt F. T. M., Van den Brule B. H. A. A., Hulsen M. A.* Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction // *Flow, Turbulence Combust.*– 2001.– **66**, N 2.– P. 159–182.

13. *Dubief Y.* Numerical simulation of high drag reduction in a turbulent channel flow with polymer additives // Annual Research Briefs.– Center for Turbulence Research, 2003.– P. 439–448.
14. *Корнилов В. И.* Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофиз. аэромех.– 2005.– **12**, N 2.– С. 183–183.
15. *Dubief Y., Terrapon V. E., White C. M., Shaqfeh E. S. G., Moin P., Lele S. K.* New answers on the interaction between polymers and vortices in turbulent flows // Flow, Turbulence Combust.– 2005.– **74**, N 3.– P. 311–329.
16. *Yang S.-Q., Dou G.* Drag reduction in a flat-plate boundary layer flow by polymer additives // Phys. Fluids.– 2005.– **17**, N 6.– P. 065104-1–14.
17. *Warholic M. D., Massah H., Hanratty T. J.* Influence of drag-reducing polymers on turbulence: Effects of Reynolds number, concentration and mixing // Exp. Fluids.– 1999.– **27**, N 4.– P. 461–472.
18. *De Angelis E., Casciola C. M., Piva R.* DNS of wall turbulence: Dilute polymers and self-sustaining mechanisms // Comp. Fluids.– 2002.– **31**, N 4.– P. 495–507.
19. *De Angelis E., Casciola C. M., L'vov V. S., Piva R., Procaccia I.* Drag reduction by polymers in turbulent channel flows: Energy redistribution between invariant empirical modes // Phys. Rev. E.– 2003.– **67**, N 5.– P. 056312-1–11.
20. *Kulik V. M.* Drag reduction change of polyethylenoxide solutions in pipe flow // Exp. Fluids.– 2001.– **31**, N 5.– P. 558–566.
21. *Виноградный Г. П., Канарский М. В., Макаренков А. П.* Устройство для динамической тарировки датчиков давления: а. с. 1029021 СССР // БИ.– 1983.– N 5.– С. 47–48.
22. *Виноградный Г. П., Макаренков А. П., Скрипачев В. В.* Пульсации статического и полного давления в пограничном слое в присутствии полимеров // Докл. Симпоз. по физике акустико-гидродинамических явлений.– Сухуми.– 1975.– С. 289–292.
23. *Farabee T. M., Casarella M. J.* Spectral features of wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // Phys. Fluids.– 1991.– **3**, N 12.– P. 2410–2420.
24. *Voskoboinick V. A., Makarenkov A. P.* Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder // Int. J. Fluid Mech.– 2004.– **31**, N 1.– P. 87–100.
25. *Largeau J. F., Moriniere V.* Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward-facing step // Exp. Fluids.– 2007.– **42**, N 1.– P. 21–40.
26. *Robinson S. K.* The kinematics of turbulent boundary layer structure.– NASA Tech. Memor N 103859.– 1991.– 490 p.
27. *Cantwell B. J.* Organized motion in turbulent flow // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1981.– **13**.– P. 437–515.
28. *Robinson S. K.* Coherent motions in the turbulent boundary layer // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1991.– **23**.– P. 601–630.
29. *Литвиненко Ю. А., Чернорай В. Г., Козлов В. В., Лефдал Л., Грек Г. Р., Чан Х. Х.* Нелинейная синусоидальная и варикозная неустойчивость в пограничном слое // Докл. РАН.– 2005.– **401**, N 2.– С. 189–192.
30. *Hoepffner J., Brandt L., Henningson D. S.* Transient growth on boundary layer streaks // J. Fluid Mech.– 2005.– **537**.– P. 91–100.
31. *Litvinenko Yu. A., Chernoray V. G., Kozlov V. V., Grek G. R., Lufdahl L., Chun H. H.* Adverse pressure gradient effect on nonlinear varicose instability of a streaky structure in an unswept wing boundary layer // Phys. Fluids.– 2005.– **17**, N 11.– P. 118106-1–4.
32. *Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Макаренков А. П.* Скорости переноса когерентных вихревых структур в турбулентном пограничном слое на цилиндре // Акуст. вісн.– 2000.– **3**, N 4.– С. 21–29.
33. *Смольяков А. В.* Вычисление спектров псевдозвуковых флуктуаций пристеночных давлений в турбулентных пограничных слоях // Акуст. ж.– 2000.– **46**, N 3.– С. 401–407.
34. *Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P.* Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow // Int. J. Fluid Mech. Resch.– 2005.– **32**, N 4.– P. 488–510.
35. *White C. M., Somandepalli V. S. R., Mungal M. G.* The turbulence structure of drag reduced boundary layer flow // Exp. Fluids.– 2004.– **36**, N 1.– P. 62–69.
36. *Brasseur J. G., Robert A., Collins L. R., Vaithianathan T.* Fundamental physics underlying polymer drag reduction, from homogeneous DNS turbulence with the FENE-P model // 2-nd Int. Sympos. Seawater Drag Reduction.– Busan, Korea, 2005.– P. 1–11.
37. *Кутателадзе С. С., Миронов Б. П., Накоряков В. Е., Хабахпашева Е. М.* Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений.– Новосибирск: Наука, 1975.– 166 с.