

УДК 532.517.4, 532.526

## БЕЗИМПУЛЬСНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ ПОДАЧА РАСТВОРА ПОЛИМЕРА В ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. Ф. ДИМИТРИЕВА

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев  
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4  
vga@tbl.kiev.ua

Получено 11.10 2013

Исследован турбулентный пограничный слой при безимпульсной подаче раствора полимера. Предложена математическая модель, учитывающая зависимость характеристик потока от параметров и условий подачи добавок полимера, в основе которой лежит модель переноса напряжений Рейнольдса. На основании представленной модели численно исследовано влияние расположения источника полимера в турбулентном пограничном слое на снижение сопротивления трения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** турбулентный пограничный слой раствора полимера, дискретный вдув полимера, снижение сопротивления

Досліджено турбулентний прирежовий шар при безімпульсному додаванні розчину полімеру. Запропоновано математичну модель, що враховує залежність характеристик потоку від параметрів та умов додавання домішок полімеру, в основі якої є модель переносу напружень Рейнольдса. На основі представленої моделі чисельно досліджено вплив розташування джерела полімеру в турбулентному прирежовому шарі на зниження опору тертя.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** турбулентний прирежовий шар розчину полімеру, дискретний вдув полімеру, зниження опору

Turbulent boundary layer with non-impulse supply of polymer solution is investigated. The mathematical model considering dependence of flow characteristics on supply conditions and properties of polymer additives is proposed. The Reynolds stress transport model for turbulent flow underlies it. An influence of the polymer source in a turbulent boundary layer on the drag reduction is numerically investigated on the basis of the presented model.

**KEY WORDS:** turbulent boundary layer of a solution of polymer. Discrete having blown polymer. Drag reduction

### ВВЕДЕНИЕ

Возможность снижения сопротивления трения при турбулентном режиме течения разбавленного раствора полимера является определяющей для разрешения многих прикладных проблем. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований [1-7], пока нет единой точки зрения на механизм изменения структуры турбулентности в растворах полимеров. Поэтому остается открытым вопрос построения адекватной математической модели, учитывающей свойства среды и обтекаемой поверхности, энергетический обмен между "средним" течением и возмущениями скорости и давления, создающими структуру неизотропной турбулентности пристенного течения.

В работе [8] предложена математическая модель турбулентного течения разбавленного раствора полимера с постоянной концентрацией добавок в каждой точке потока. В ее основе лежит модель переноса напряжений Рейнольдса для турбулентного течения чистого растворителя (ньютоновской жидкости). Данная модель построена

на гипотезе о влиянии физических свойств молекул полимера на изменение механизма турбулентной диффузии и перераспределения пульсационной энергии между компонентами тензора напряжений Рейнольдса.

Одним из важных вопросов, которые возникают при исследовании эффекта Томса в турбулентном пограничном слое, являются вопросы диффузии полимерной примеси. При этом характер распределения макромолекул полимера по всему объему жидкости определяется параметрами турбулентного потока. В то же время, полимер оказывает непосредственное влияние на структуру турбулентного течения и, в частности, на скорость диффузии примеси поперек потока. В работе [9] показано, что добавка полимера в вытекающую из щели пассивную примесь приводит к резкому подавлению уноса примеси во внешнюю область течения. Взаимная обусловленность указанных выше факторов является причиной меньшей изученности диффузии гидродинамически активных добавок в турбулентных течениях по сравнению с диффузией пассивных примесей, не влияющих на структуру потока.

Проведенные экспериментальные исследования

[10] показали, что в потоке с переменной концентрацией полимерных добавок в растворе распределения средней и пульсационных составляющих скорости такие же, что и в случае течений с постоянной концентрацией. Степень изменения этих характеристик существенно зависит от условий ввода добавок в поток. В разное время многими исследователями рассматривались различные способы введения полимерных добавок в пограничный слой, как например, смыв полимера с обтекаемой поверхности, подача через пористую пластинку, локальная инжекция через щель при различных размерах щели, углах и скорости вдува [11-13].

В работе [14] исследовался турбулентный пограничный слой на плоской пластине с инжекцией полимерного раствора вблизи ее передней кромки. Оценки эффективности выпуска полимерных добавок в пристенную область показали, что при той же величине снижения турбулентного трения (34%) расход полимерного вещества приблизительно в шесть раз ниже, чем в однородном растворе. Данные о распределении полимерных добавок при выпуске через узкую щель получили также авторы работ [4, 8]. Ими предложены эмпирические зависимости между продольным распределением концентрации полимера в пристенной зоне потока и параметрами вдува.

В результате исследований [15-18] установлено, что при щелевой подаче примесей процесс диффузии в турбулентном пограничном слое характеризуется наличием трех областей вдоль по потоку. В ближайшей к щели начальной зоне примесь распространяется от стенки до верхней границы вязкого подслоя. В следующей промежуточной области диффузионный слой постепенно заполняет динамический пограничный слой. После смыкания диффузионного и динамического пограничного слоя начинается диффузия в конечной зоне. При изучении диффузии пассивной примеси первыми двумя зонами пренебрегают в связи с пренебрежимо малыми размерами и ограничиваются только конечной, характеризующейся простыми асимптотическими зависимостями. Экспериментальные данные [15] показали, что в растворе полимера протяженность промежуточной зоны во много раз больше, чем для пассивной примеси, поэтому ее наличием уже пренебрегать нельзя.

В настоящей работе представлены результаты теоретических исследований турбулентного течения разбавленного раствора полимера в зависимости от условий подачи добавок в поток.

## 1. МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА НАПРЯЖЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ

Система определяющих уравнений для несжимаемого раствора полимера записывается в следующем виде [8].

1. Уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u_i u_j} - \frac{1}{\rho} \overline{\Pi_{ij}} \right),$$

где  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости растворителя;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $U_i$  – осредненная скорость;  $\overline{u_i u_j}$  – тензор турбулентных напряжений;  $\overline{\Pi_{ij}}$  – дополнительный тензор напряжений, обусловленный наличием макромолекул полимера в растворе [19].

2. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0.$$

3. Модельное уравнение переноса скорости диссипации  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = C_\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{K}{\varepsilon} \overline{u_i^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + \nu \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_k^2} + \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon_1} f_1 P_\Sigma - C_{\varepsilon_2} f_2 [\varepsilon - \varepsilon_0]),$$

где  $K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{u_i u_i}$  – энергия турбулентности;

$P_\Sigma = \sum_{i,j=1}^3 -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$  – порождение турбулентной

энергии;  $\varepsilon_0 = \nu \frac{\partial^2 K}{\partial x_2^2} |_{x_2=0}$  – скорость диссипации на

стенке;  $f_1 = 1 + 0.8 \exp(-R_t)$ ,  $f_2 = 1 - 0.2 \exp(-R_t)$

– пристенные функции;  $R_t = \frac{K^2}{\nu \varepsilon}$  и  $R_k = \frac{K^{1/2} x_2}{\nu}$

– турбулентные числа Рейнольдса;  $x_2$  – координата, нормальная к обтекаемой поверхности;  $C_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon_1}$ ,  $C_{\varepsilon_2}$  – модельные константы (табл. 1).

4. Система модельных уравнений переноса четырех компонент тензора напряжений Рейнольдса  $\overline{u_i u_j}$ :

$$\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_j p'} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i p'} \right) +$$

Табл. 1. Константы модели переноса напряжений Рейнольдса для турбулентного течения однородной ньютоновской жидкости

$C_1$	$C_2$	$C'_1$	$C'_2$	$C'_3$	$C_t$	$C_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
1.34	0.8	0.36	0.45	0.036	0.12	0.15	1.45	1.9

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\rho} p' \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left( \overline{u_k u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u_k u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right) + \\
 & + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i u_j}}{\partial x_k^2} - 2\nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} - \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j u_k} + \\
 & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{u_j \Pi'_{ik}} + \overline{u_i \Pi'_{jk}} \right) - \frac{1}{\rho} \left( \overline{\Pi'_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} + \overline{\Pi'_{jk} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}} \right),
 \end{aligned}$$

где замыкающие условия записываются в следующем виде:

– для механизма турбулентной диффузии:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1}{\rho} \overline{p' u_i \delta_{jk}} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u_j \delta_{ik}} - \overline{u_i u_j u_k} + \\
 & + \frac{1}{\rho} \overline{u_j \Pi'_{ik}} + \frac{1}{\rho} \overline{u_i \Pi'_{jk}} =
 \end{aligned}$$

$$= C_{tp} \frac{K}{\varepsilon} \left( \overline{u_i u_2} \frac{\partial \overline{u_j u_k}}{\partial x_2} + \overline{u_j u_2} \frac{\partial \overline{u_i u_k}}{\partial x_2} + \overline{u_k u_2} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_2} \right);$$

– для механизма перераспределения энергии турбулентности между компонентами тензора напряжений Рейнольдса:

$$\begin{aligned}
 Per_{ij} &= \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho} \left( \overline{\Pi'_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} + \overline{\Pi'_{jk} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}} \right) = \\
 &= C_{1p} \varepsilon \left( \frac{\overline{u_i u_j}}{K} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) - C_{2p} \left( P_{ij} - \frac{2}{3} P_\Sigma \delta_{ij} \right) + \\
 &+ \pi'_{ij,1} + \pi'_{ij,2} + \pi'_{ij,3}; \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\pi'_{ij,1} = C'_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u_2^2} \delta_{ij} - \frac{3}{2} (\overline{u_2 u_i} \delta_{j2} + \overline{u_2 u_j} \delta_{i2}) \right) f_a,$$

$$\pi'_{ij,2} = C'_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} P_\Sigma \delta_{ij} \right) f_a,$$

$$\pi'_{ij,3} = C'_3 (P_{ij} - D_{ij}) f_a,$$

где  $P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}$  – тензор порождения;  $D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i}$  – тензор диффузии;  $f_a = \frac{R_t}{R_k} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2}{R_t}} \right)$  – функция влияния стенки.

Учет влияния добавок высокомолекулярных полимеров в слабokonцентрированных растворах в уравнениях для компонент тензора напряжений Рейнольдса осуществляется заменой модельных

констант  $C_l$  функциями, которые отражают влияние полимера на изменение механизма перераспределения энергии турбулентности между компонентами тензора напряжений Рейнольдса [20]:

$$C_{lp} = C_l \cdot \left( 1 + \alpha_l \frac{\varphi^\gamma}{\varphi_0 + \varphi^\gamma} \right), \tag{2}$$

где  $C_l$  – константы модели переноса напряжений Рейнольдса для турбулентного течения ньютоновского растворителя, апробированные для широкого круга течений (табл. 1);  $\varphi = \frac{C \cdot M^3}{C_m M_m^3}$  – безразмерный параметр, который учитывает неодинаковое влияние концентрации  $C$  и молекулярной массы  $M$  полимера на изменение характеристик турбулентности;  $C_m$  и  $M_m$  – значения  $C$  и  $M$ , при которых достигается максимальный эффект снижения сопротивления для данного раствора полимера;  $\varphi_0 = 0,08$ ,  $\gamma = 2/3$ ,  $\alpha_1 = 0,20$  и  $\alpha_2 = 0,15$  – эмпирические константы.

## 2. УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Изменение концентрации примеси  $C$  в турбулентном потоке вязкой несжимаемой среды при отсутствии внутренних источников описывается уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} - \frac{\partial (\overline{u_i C'})}{\partial x_i}, \tag{3}$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии, который для макромолекул полимера с молекулярной массой  $M \sim 10^6$  принимает значения  $D \sim 10^{-12} \div 10^{-10}$  [21];  $-\overline{u_i C'}$  – плотность турбулентного потока вещества в направлении  $i$ -ой оси, которая определяет дополнительный турбулентный перенос, пропорциональный градиенту концентрации в данном направлении (гипотеза Буссинеска). Знак "минус" указывает на уменьшение концентрации в направлении переноса. Таким образом, уравнение (3) приобретает вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (D + D_t) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right],$$

где  $D_t$  – коэффициент турбулентной диффузии, введенный по аналогии с коэффициентом турбулентной кинематической вязкости  $\nu_t$ . Этот параметр не является физико-химической характеристикой вещества, он связывает поток массы при турбулентном режиме течения жидкости с градиентом осредненной скорости. Стоит отметить, что  $D_t \gg D$  практически по всей толщине турбулентного пограничного слоя, и только вблизи границы раздела фаз молекулярная диффузия становится преобладающей.

На сегодняшний день  $D_t$  не может быть определен чисто теоретическим путем. Моделирование различных физических процессов исходит из подобия рассматриваемых явлений. В работе [22] показано, что механизм турбулентного перемешивания в основном одинаков для внутреннего трения, тепло- и массопроводности. Различие состоит лишь в особых свойствах переносимой пульсационным течением субстанции: количества движения, вещества или теплоты. Исходя из аналогии Рейнольдса, коэффициенты турбулентной диффузии и вязкости равны друг другу:  $D_t \approx \nu_t$  [22]. Согласно модели переноса напряжений Рейнольдса, профиль скорости и турбулентные напряжения являются результатом прямого расчета. Коэффициент турбулентной вязкости получен как отношение касательных напряжений Рейнольдса к градиенту осредненной скорости  $\nu_t = \frac{-\overline{u_1 u_2}}{\partial U_1 / \partial x_2}$ .

В непосредственной близости от стенки величину коэффициента турбулентной диффузии часто представляют первым нулевым членом разложения в ряд Тейлора [9]:

$$\frac{D_t}{\nu} = B y^{+n},$$

где  $\frac{D_t}{\nu}|_{y^+=1}$ ;  $y^+ = \frac{u_* x_2}{\nu}$ ;  $u_*$  – динамическая скорость;  $n \approx 3$  – показатель степени затухания коэффициента турбулентной диффузии в направлении к обтекаемой поверхности, найденный из эксперимента по переносу пассивной примеси при больших числах Прандтля. Данная асимптотика хорошо согласуется с поведением касательных напряжений Рейнольдса, а следовательно, и турбулентной вязкости вблизи стенки  $\frac{\nu_t}{\nu} \sim y^{+3}$  (рис. 1), что косвенно подтверждает обоснованность применения аналогии Рейнольдса при определении диффузии полимерных добавок в турбулентном пограничном слое. При этом коэффициент  $B$  определяется значением концентрации полимера у стенки.

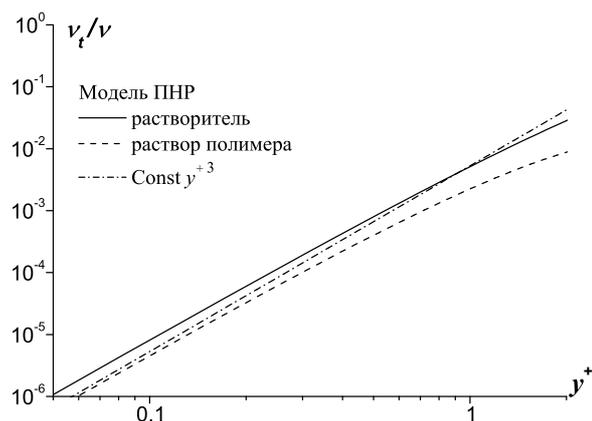


Рис. 1. Изменение коэффициента турбулентной вязкости для растворителя и раствора полимера

### 3. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Граничные условия зависят от физических условий задачи. Если рассматривается нанесенный на поверхность полимер, который постепенно растворяется в потоке, то в качестве граничного условия задается постоянная величина концентрации на всей границе тела либо на том участке, где нанесен полимер. При локальной (щелевой) инжекции задается мощность локального источника в определенном месте, на остальной части границы концентрация равна нулю. Таким образом, значение концентрации полимера в растворе по толщине пограничного слоя не является постоянной величиной, что обуславливает разную степень обратного влияния полимера на турбулентный градиентный поток.

На обтекаемой поверхности при  $x_2 = 0$  задано условие прилипания и непротекания, скорость диссипации на стенке равна значению вязкой диффузии турбулентной энергии. На внешней границе турбулентного пограничного слоя при  $x_2 = \delta$  продольная скорость равна скорости набегающего потока  $U_0$ , градиенты компонент тензора напряжений Рейнольдса, скорости диссипации и концентрации равны нулю.

В начальном сечении задана виртуальная толщина пограничного слоя  $\delta_0$ . Разбавленный раствор полимера с молекулярной массой  $M = 7 \cdot 10^6$  г/моль и концентрацией  $C_0 = 50$  ppm безимпульсно подавался в начальном сечении через щель на разных расстояниях от обтекаемой поверхности. Таким образом, значение концентрации полимера в растворе по толщине пограничного слоя не является постоянной величиной, что обуславливает разную степень обратного влияния полимера на

турбулентный градиентный поток.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании решения стационарной плоской задачи турбулентного обтекания участка пластины длиной  $L = 2$  м со скоростью  $U_0 = 10$  м/с исследовано влияние расположения источника полимера в турбулентном пограничном слое на снижение сопротивления трения.

В табл. 2 представлены параметры дискретной подачи раствора полимера в турбулентный пограничный слой при двух значениях  $\delta_0$ . Одинаковый расход  $Q$  полимера достигался за счет уменьшения размеров щели с удалением от стенки.

Для сравнения представлены результаты расчета для однородного раствора полимера с концентрацией 1 и 3 ppm – такой, при которой достигается эквивалентный эффект снижения сопротивления DR (drag reduction). Необходимо заметить, что при дискретной подаче расход полимера в 3-4 раза меньше для достижения эквивалентной концентрации в пристенной области пограничного слоя, чем в однородном растворе.

На рис. 2 представлены профили концентрации полимера в растворе в различных сечениях пограничного слоя по продольной координате  $x_1$  при подаче полимера на различных расстояниях от обтекаемой поверхности. Начальная толщина турбулентного пограничного слоя  $\delta_0 = 0.008$  м. При удалении от места подачи полимера на расстояние, равное нескольким толщинам пограничного слоя, распределение концентрации полимера в пограничном слое сохраняет максимум на высоте, соответствующей распределению полимера в начальном сечении (рис. 2, а). При  $x_1 > 80\delta_0$  максимум концентрации полимера перемещается к обтекаемой поверхности (рис. 2, б), а при  $x_1 > 200\delta_0$  практически не зависит от расположения источника подачи добавок полимера (рис. 2, в).

Ввод полимера при различных расстояниях щели от стенки слабо влияет на скорость роста толщины пограничного слоя вниз по потоку (рис. 3). Скорость роста  $\delta$  при вдуве полимера меньше, чем в потоке растворителя, но больше, чем в однородном растворе полимера такой же исходной концентрации.

При подаче полимерного раствора в поток непосредственно у стенки ( $x_2/\delta_0 = 0, 0 \div 0, 1$ ) наблюдается резкое снижение сопротивления за источником, практически доходящее до значений коэффициента сопротивления однородного раствора с концентрацией  $C = 50$  ppm (рис. 4). Таким обра-

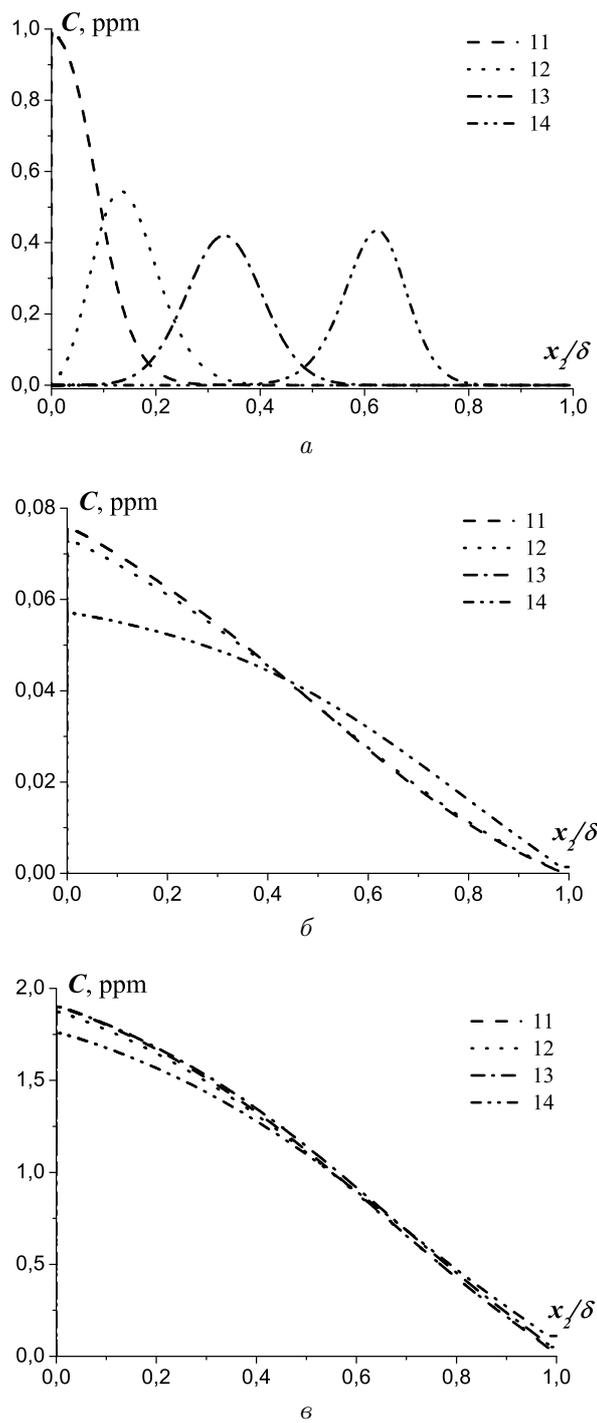
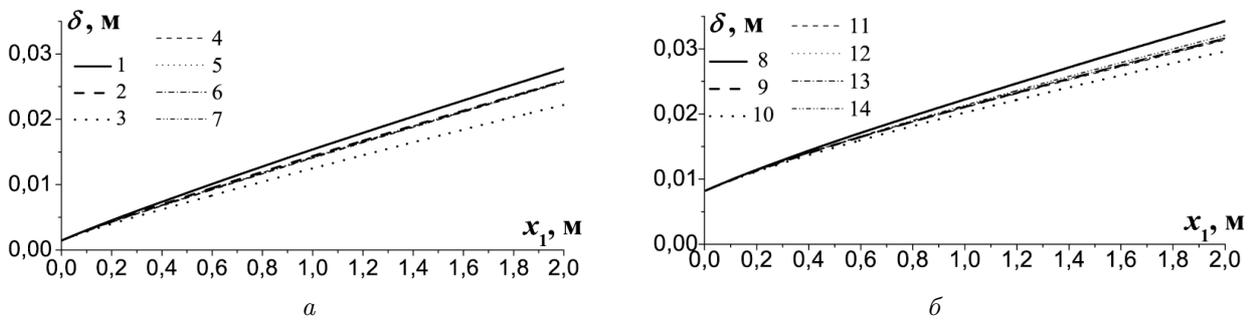


Рис. 2. Распределение концентрации полимера по толщине пограничного слоя для различных сечений по продольной координате (номера кривых в соответствии с табл. 2):  $x_1/\delta_0 = 3$  (а),  $x_1/\delta_0 = 80$  (б) и  $x_1/\delta_0 = 200$  (в)

Табл. 2. Параметры дискретной подачи раствора полимера в турбулентный пограничный слой

N	$\delta_0$ , м	C, ppm	$x_2/\delta_0$	$Q, \cdot 10^{-8}$	DR, %
1	0.02	0	–	–	–
2	0.02	1	–	2,2	9,5
3	0.02	50	–	94,0	26,9
4	0.02	50	0,00 ÷ 0,10	0.5	9,5
5	0.02	50	0,10 ÷ 0,16	0.5	9,4
6	0.02	50	0,30 ÷ 0,35	0.5	9,1
7	0.02	50	0,60 ÷ 0,64	0.5	8,6
8	0.08	0	–	–	–
9	0.08	3	–	8,1	15,3
10	0.08	50	–	130,0	27,4
11	0.08	50	0,00 ÷ 0,10	2,7	15,9
12	0.08	50	0,10 ÷ 0,18	2,7	15,5
13	0.08	50	0,30 ÷ 0,37	2,7	14,9
14	0.08	50	0,60 ÷ 0,66	2,7	13,2

Рис. 3. Изменение толщины пограничного слоя вдоль потока (номера кривых в соответствии с табл. 2):  $\delta_0 = 0.002$  м (а),  $\delta_0 = 0.008$  м (б)

зом, можно добиться локального снижения сопротивления трения при существенно меньших расходах полимера. Однако этот эффект ослабевает с удалением от источника, так как концентрация полимера в пристенной области заметно падает за счет диффузии полимера по толщине пограничного слоя.

При удалении щели от обтекаемой поверхности структура турбулентности непосредственно за источником практически не изменяется по сравнению с течением чистого растворителя. Это объясняется тем, что в пристенную область, где происходит основное перераспределение турбулентной энергии между компонентами тензора напряжений Рейнольдса, поступает меньшее количество полимера. Вниз по потоку локальные эффекты снижения сопротивления сравниваются.

В турбулентном пограничном слое раствора полимера энергию от осредненного движения за счет механизма порождения получает только продоль-

ная компонента напряжений Рейнольдса  $\overline{u_1 u_1}$ , как и в случае турбулентного течения чистого растворителя. Нормальная  $\overline{u_2 u_2}$  и трансверсальная  $\overline{u_3 u_3}$  компоненты тензора напряжений Рейнольдса, в свою очередь, получают энергию от продольной  $\overline{u_1 u_1}$  через механизм перераспределения. Компоненты перераспределения энергии между нормальными компонентами турбулентных напряжений  $Per_{ii}$ , найденные с помощью модели переноса напряжений Рейнольдса из уравнения (1) с учетом функции влияния полимерных добавок (2), представлены на рис. 5.

Однако количество перераспределенной энергии турбулентности для раствора полимера существенно меньше, чем для чистого растворителя. Особенно это заметно в вязкой и переходной областях турбулентного пограничного слоя, при этом максимальные значения компонент перераспределения смещаются от стенки. Таким образом, добавки полимера в турбулентном потоке препят-

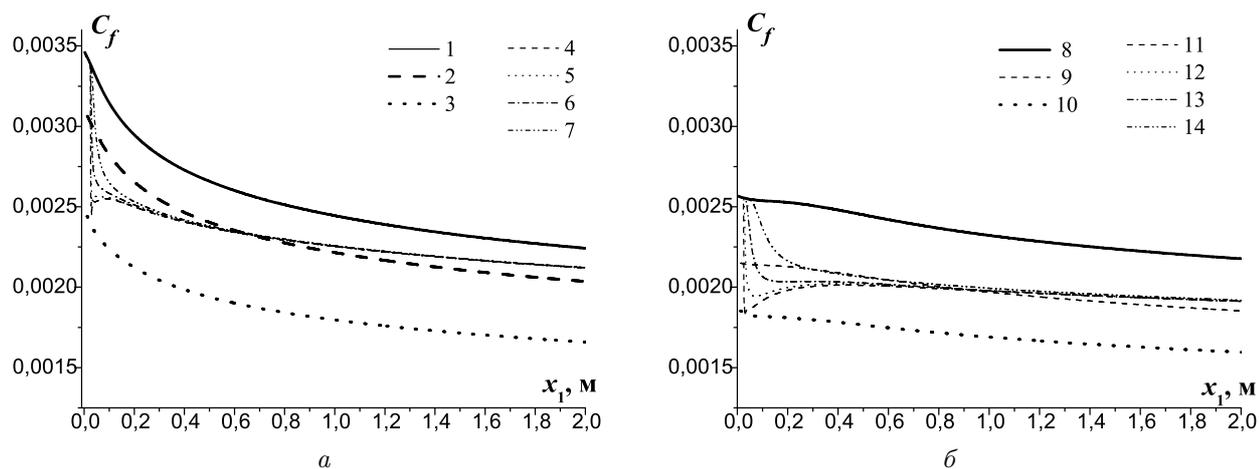


Рис. 4. Значение коэффициента сопротивления трения вдоль обтекаемой поверхности для растворов полимеров при изменении условий подачи полимера в пограничный слой (номера кривых в соответствии с табл. 2):  $\delta_0 = 0.002$  м (а),  $\delta_0 = 0.008$  м (б)

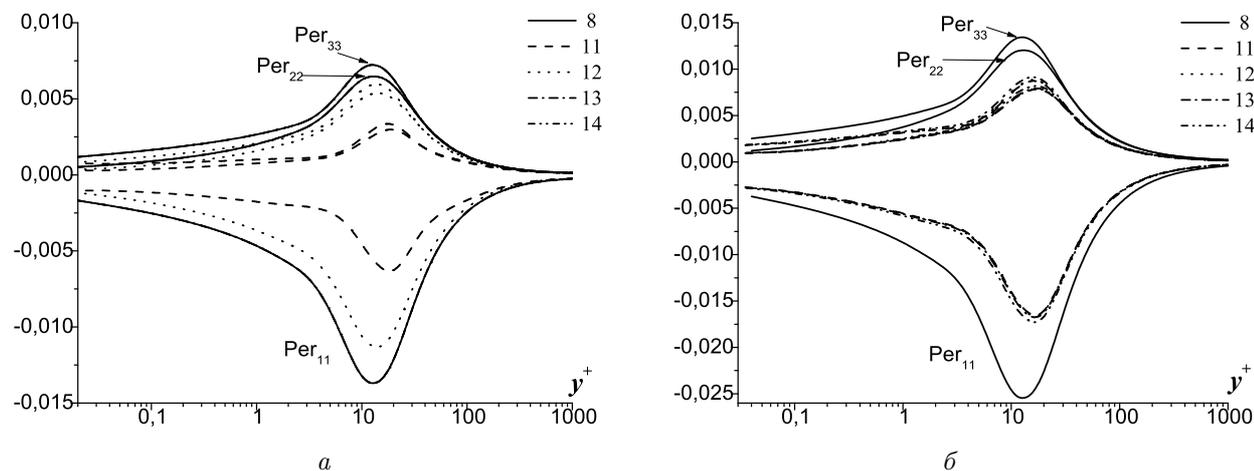


Рис. 5. Перераспределение энергии между компонентами турбулентных напряжений по толщине пограничного слоя для растворителя и неоднородного раствора полимера при безимпульсной подаче добавок полимера (номера кривых в соответствии с табл. 2):  $x_1/\delta_0 = 3$  (а),  $x_1/\delta_0 = 80$  (б)

ствуют механизму перераспределения, тем самым, влияя на анизотропию турбулентности. Это связано с деформацией полимерной макромолекулы и ее расположением в пространстве под действием градиентных напряжений в турбулентном потоке.

Из рис. 5, а видно, что если щель расположена вблизи стенки (в области наибольших значений перераспределения), молекулы полимера оказывают существенное воздействие на механизм перераспределения, изменяя структуру потока непосредственно за источником (кривая 11). Если же щель находится на высоте, выходящей за рамки пере-

ходной области турбулентного пограничного слоя, полимер не оказывает никакого влияния на турбулентность при том же расходе полимера (кривая 14).

Вниз по потоку при  $x_1 > 80\delta_0$  все кривые сходятся в одну независимо от расположения источника полимера вследствие диффузии добавок в турбулентном пограничном слое (рис. 5, б).

Изменения компонент тензора напряжений Рейнольдса оказывают существенное воздействие на профиль осредненной скорости  $U^+ = U_1/u_*$  (рис. б). Снижение сопротивления трения в потоке с

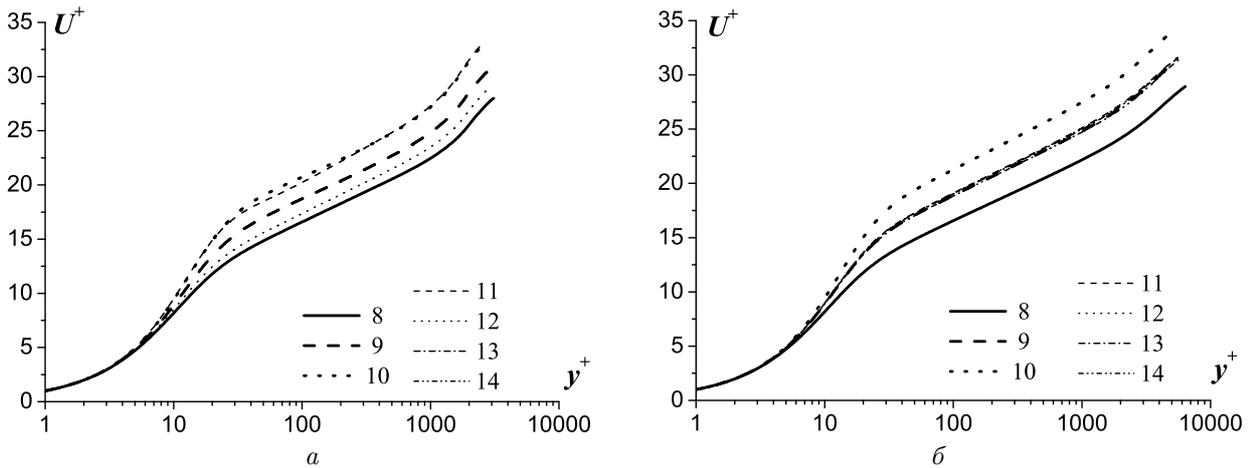


Рис. 6. Профили осредненной скорости при  $\delta_0 = 0.008$  м (номера кривых в соответствии с табл. 2):  $x_1/\delta_0 = 3$  (а),  $x_1/\delta_0 = 80$  (б)

добавками высокомолекулярных полимеров сопровождается увеличением толщины пристенной области течения, включающей вязкий подслой и переходную зону, в то время как относительные размеры турбулентного ядра уменьшаются.

При подаче раствора полимера в турбулентный пограничный слой вблизи стенки ( $x_2/\delta_0 = 0, 0 \div 0, 1$ ) непосредственно за источником логарифмическая часть профиля осредненной скорости практически совпадает с профилем однородного раствора полимера с концентрацией 50 ppm (рис. 6, а). Однако этот эффект ослабевает с удалением источника от стенки. Если щель находится на высоте, где значения компонент перераспределения малы, полимер не оказывает влияния на турбулентность и профиль скорости раствора полимера совпадает с профилем растворителя.

Далеко от щели вниз по потоку вследствие диффузии молекул полимера в турбулентном пограничном слое профили осредненной скорости для дискретной подачи раствора полимера сходятся в одну независимо от расположения источника. При этом наблюдается полное совпадение с профилем скорости однородного раствора полимера с концентрацией  $C = 3$  ppm (рис. 6, б).

Таким образом, дискретная инъекция концентрированного полимерного раствора в пристенную область турбулентного пограничного слоя ( $y^+ < 150$ ) по эффекту снижения сопротивления на расстоянии до 10 толщин пограничного слоя эквивалентно применению однородного раствора полимера той же концентрации. Однако затраты полимерных добавок при локальной подаче почти в 4 раза меньше необходимого количества полимера

для насыщения раствора по всей толщине турбулентного пограничного слоя.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика определения коэффициентов модели, зависящая от локальной концентрации полимера, адекватно описывает процесс перераспределения турбулентной энергии между компонентами тензора напряжений Рейнольдса в рассмотренном диапазоне концентраций и чисел Рейнольдса.

2. Дискретная инъекция полимера высокой концентрации, распределенная по обтекаемой поверхности с шагом, кратным толщине турбулентного пограничного слоя, т.е. зависящая от числа  $Re_{x_1}$ , может быть эквивалентна по эффективности снижению сопротивления однородным раствором полимера, но при существенно меньшем расходе полимера.

3. Инъекция полимера наиболее эффективна в подслое постоянного напряжения турбулентного пограничного слоя ( $y^+ \sim 50 \div 150$ ). Максимальный эффект такой инъекции сохраняется на расстоянии до  $10\delta_0$ . Вдали от места подачи полимера ( $x/\delta_0 > 80$ ) характеристики турбулентного пограничного слоя соответствуют характеристикам слабokonцентрированного однородного раствора независимо от расстояния источника полимера от обтекаемой поверхности внутри пограничного слоя.

1. Пилипенко В. Р. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения // В кн.: Итоги науки и тех-

- ники. ВИНТИ АН СССР, Сер. : Механика жидкости и газа.– 1980.– **15**.– С. 156–257.
2. Hoyt J. W. Polymer drag reduction – a literature review // Pap. 2nd Int. Conf. of Drag Reduct. Cambridge, Cranfield.– 1977, A1.– P. 1-19.
  3. Virk P. S. Drag reduction fundamentals // AIChE Journal.– 1975, **21**.– P. N 4.625-656
  4. Berman N. S. Drag reduction by polymers // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1978.– **10**.– P. 47–64.
  5. Lumley J. L. Drag reduction by additives // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1969.– **1**.– P. 367–384.
  6. Den Toonder J. M. J. TDrag Reduction by Polymer Additives in a Turbulent Pipe Flow: Laboratory and Numerical Experiments.– Technische Universiteit Delft., Netherlands: FOM, 1995.– 153 p.
  7. Elbing B. R., Perlin M., Dowling D. R., Ceccio S. L. Modification of the mean near-wall velocity profile of a high-Reynolds number turbulent boundary layer with the injection of drag-reducing polymer solutions // Phys. Fluids.– 2013, **25**.– P. N 8.085103
  8. Воропаев Г. А., Димитриева Н. Ф. Модель переноса напряжений Рейнольдса для турбулентных течений слабоконцентрированных растворов полимеров // Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки.– 2009.– N 2.– С. 111–117.
  9. Нестеров А. К., Покрывайло Н. А., Прокопчук Д. А., Шульман З. П. Конвективный массообмен и закон затухания турбулентной диффузии в полимерных растворах, снижающих сопротивление // В сб. : Механика турбулентных потоков.– М.: Наука.– 1980.– С. 337–344.
  10. Ванин Ю. П., Ходаев А. М. Исследование характеристик пристенной турбулентности в потоке с переменной концентрацией полимерных добавок // В сб.: Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность.– Новосибирск: Ин-т теплофизики.– 1978.– С. 16–23.
  11. Ванин Ю. П., Мигиренко Г. С. Экспериментальное исследование распределения полимерных добавок в пограничном слое за местом вдува // В сб. : Исследования по управлению пограничным слоем.– Новосибирск.– 1976.– С. 86–91.
  12. Мамонов В. Н., Миронов Б. П., Панов С. В. Снижение сопротивления трения при подаче раствора полиэтиленоксида в турбулентный пограничный слой через перфорированный участок // В сб. : Пристенные и свободные турбулентные течения.– Новосибирск.– 1988.– С. 5–20.
  13. Коробов В. И. Комплексное влияние податливости поверхности и высокомолекулярных полимерных добавок на турбулентное трение // Прикл. гідромеханіка.– 2000.– **2(74)**, N 2.– С. 59–63.
  14. Иоселевич В. А., Пилипенко В. Н. О сопротивлении плоской пластины в потоке полимерного раствора переменной концентрации // Изв. АН СССР, МЖГ.– 1974.– N 1.– С. 63–68.
  15. Вдовин А. В., Смольяков А. В. Диффузия растворов полимеров в турбулентном пограничном слое // ПМТФ.– 1978.– N 2.– С. 66–73.
  16. Poreh M., Cermak J. E. Study of diffusion from a line source in turbulent boundary layer // Int. J. Heat and Mass Transfer.– 1964.– **7**.– P. N 1.1083–1095
  17. Walker D. T., Tiederman W. G. Turbulent structure in a channel flow with polymer injection at the wall // J. Fluid Mech.– 1990.– **218**.– P. 377–403.
  18. Walker D. T., Tiederman W. G., Luchik T. S. Optimisation of the injection process for drag reducing additives // Exp. Fluid.– 1986.– **4**.– P. 114–120.
  19. Воропаев Г. А., Димитриева Н. Ф. Тензор напряжений полимерного раствора в пристенных течениях // Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки.– 2008.– N 2.– С. 150–156.
  20. Воропаев Г. А., Димитриева Н. Ф. Моделирование механизма перераспределения турбулентной энергии в разбавленных растворах полимеров // Инж.-физ. ж.– 2013.– **86**, N 1.– С. 126–137.
  21. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. Изд. 2-е.– М.: Химия, 1968.– 536 с.
  22. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. Пер с англ.– М.: Энергия, 1979.– 408 с.