

## ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ ПОЛИМЕРОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А. В. Вдовин, А. В. Смольяков

(Ленинград)

В работе [1] экспериментально изучались специфические закономерности диффузии растворов полимеров в турбулентном пограничном слое (ТПС) на сравнительно небольших расстояниях за щелью, через которую полимеры вводились в поток. Результаты относились к так называемой промежуточной области диффузии ТПС [2], в которой гидродинамические эффекты полимеров проявляются наиболее сильно.

Данные настоящей работы охватывают также и конечную область диффузии [2], в которой концентрация полимеров значительно ниже, а гидродинамические эффекты слабее, чем в промежуточной зоне. Обнаружено, что и в конечной области диффузионные процессы обладают интересными особенностями. Новые данные удалось получить в результате усовершенствования экспериментальной установки и применения более точного метода измерения локальной концентрации полимеров в ТПС.

**1. Условия эксперимента.** Опыты проводились в пограничном слое на плоской стенке рабочего участка гидродинамической трубы с поперечным сечением  $0,36 \times 0,15 \text{ м}^2$  и длиной 5 м. Концентрация полимеров измерялась на расстояниях  $x = 0,13-4,5 \text{ м}$ , а касательных напряжений на стенке — на расстояниях  $x = 0,305-4,375 \text{ м}$  от щели. Изменения контролируемых в опыте величин составляли: для скорости потока  $U$  на внешней границе ТПС от 2,5 до 10,0 м/с, для чисел Рейнольдса  $Re^*$  (по толщине вытеснения) от  $4 \cdot 10^3$  до  $1,1 \cdot 10^5$ , для удельного (на единицу длины щели) расхода  $q$  раствора от 0,77 до 15,4  $\text{см}^2/\text{с}$ , для начальной концентрации  $c_0$  подаваемого через щель раствора от  $2,5 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . В опытах использовались водные растворы полиэтиленоксидов WSR-301 и П-31 и сополимера (на основе акриламида) Р-20-77. Щель в обтекаемой поверхности располагалась поперек потока в различных местах рабочего участка гидротрубы на расстояниях  $x_{щ} = 0,4-4,4 \text{ м}$  от эффективного начала ТПС, так что толщина пограничного слоя в месте подачи полимера изменялась от 0,8 до 5 см. Размеры щели на выходе составляли  $0,4 \times 130 \text{ мм}^2$  и  $0,8 \times 130 \text{ мм}^2$ . Наклон щели к обтекаемой поверхности обеспечивал подачу раствора в поток под углом  $\varphi = 20^\circ$  (в опытах [1] этот угол был равен  $7^\circ$ ).

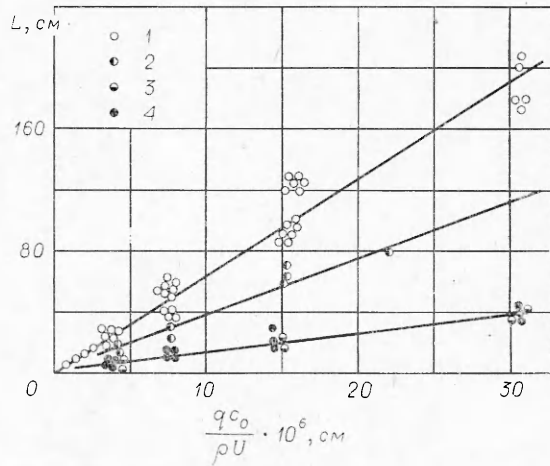
Локальная концентрация полимеров в ТПС измерялась путем отбора проб из потока с последующим их анализом как полярографическим [1], так и вновь разработанным фотометрическим методом. Суть последнего состоит в том, что о концентрации примеси судят по ослаблению узкого монохроматического светового пучка, прошедшего через исследуемый объем раствора. Полимеры предварительно подкрашивались спиртовым раствором черной туши (ТУ 6-15-458-70). Использованный краситель не приводил к изменению эффективности растворов полимеров, но делал их оптически прозрачными зависящей от концентрации. Лазер Spectra Physics model 120 служил источником монохроматического излучения с длиной волны 0,62 мкм. Интенсивность лазерного светового пучка, прошедшего через исследуемый объем раствора, регистрировалась фотомножителем DISA типа 55L10. Нижний предел чувствительности фотометрического метода составлял  $\sim 10^{-7} \text{ г/см}^3$ , что на порядок лучше, чем чувствительность полярографического метода. Фотометрический метод позволил надежно измерять малые концентрации полимерных примесей даже в тех отдаленных от щели областях ТПС, в которых эффект Томса почти исчезает. Касательные напряжения трения измерялись индукцион-

ными преобразователями с плавающими элементами размером  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>, смонтированными в обтекаемую поверхность. Погрешность измерений трения не превышала  $\pm 5\%$ . Все реализованные в опытах величины касательных напряжений трения относятся к интервалу значений, в пределах которого эффект Томса не зависит от числа Рейнольдса [3].

**2. Результаты.** Простейшей характеристикой диффузионного обмена в ТПС может служить продольный масштаб диффузии  $L$  — расстояние от щели, на котором концентрация диффундирующей примеси на стенке уменьшается, например, в  $e$  раз. Чем эффективнее полимер и чем больше его расход или концентрация, тем слабее турбулентное перемешивание в ТПС и тем больше масштаб  $L$ . На фиг. 1 (обозначения приведены в табл. 1) представлены зависимости продольного масштаба диффузии  $L$  от скорости натекающего потока  $U$ , начальной концентрации  $c_0$  и удельного расхода  $q$  для различных полимеров. Зависимости получены при не слишком больших значениях  $qc_0$  и соответствуют линейному участку зависимости масштаба  $L$  от  $qc_0/\mu$ , приведенной на фиг. 3 [1]. Видно, что масштаб диффузии растет пропорционально комплексу  $qc_0/\rho U$ , так что безразмерная величина  $k = L\rho U/qc_0$  ( $\rho$  — плотность растворителя) может служить удобной мерой способности того или иного полимера ослаблять процессы турбулентного обмена. Она учитывает также частичную утрату этой способности в результате естественного «старения» полимера в процессе его длительного хранения или в результате механической деструкции полимера в процессе его использования. Разумеется, что способность полимера влиять на турбулентную диффузию обусловлена в конечном итоге особенностями молекулярного строения полимерных цепей, но в гидродинамических приложениях измерение параметра  $k$  является более простой и надежной процедурой, чем измерения таких «тонких» физико-химических характеристик, как распределение молекулярных весов, параметры конформации макромолекул и т. п. Ниже будет показано, что величина  $k$  однозначно определяет не только интенсивность турбулентной диффузии полимера, вводимого в ТПС через щель, но также и величину эффекта Томса в течениях с постоянной всюду концентрацией (например, в трубах), где средние диффузионные потоки вещества равны нулю.

В табл. 1 показаны величины параметра эффективности для тех полимеров, которые использовались в данном эксперименте (цифра в скобках после марки полимера указывает количество лет, прошедших до опыта после изготовления полимера, в течение которых происходило его старение). В предпоследнем столбце показаны значения  $k_0 = k/k_{эТ}$ , нормированные величиной  $k = k_{эТ} = 6,25 \cdot 10^6$  для полимера WSR-301(2), который выбран здесь в качестве эталона.

Одновременно с опытами, в которых изучалась диффузия в ТПС, проводились опыты, в которых определялась способность тех же самых полимеров снижать сопротивление трения в условиях, когда средний диффузионный обмен отсутствует. Эти опыты выполнялись на простейшей



Ф и г. 1

Таблица 1

Тип (марка) полимера	Год изготовления	$k=L\rho U / qc_0$	$k_0$	Номер точек фиг. 1-3	Тип (марка) полимера	Год изготовления	$k=L\rho U / qc_0$	$k_0$	Номер точек фиг. 1-3
WSR-301 (2)	1976	$6,25 \cdot 10^6$	1,0	1	П-31 (3)	1975	$1,25 \cdot 10^6$	0,2	3
P-20-77 (1)	1977	$3,72 \cdot 10^6$	0,6	2	WSR-301 (9)	1969	$1,25 \cdot 10^6$	0,2	4

гидравлической установке, состоящей из прямолинейной круглой трубки с внутренним диаметром 10 мм и длиной 2,8 м, в которую однородный по концентрации раствор подавался из высоко расположенной напорной емкости, скорость течения в трубке 3 м/с. На фиг. 2 показаны результаты измерений. Относительное уменьшение турбулентного трения  $S_{тр} = (\tau_w - \tau_w) / \tau_w$  представлено в функции от эффективной концентрации  $k_0 c / \rho$ . Здесь  $\tau_w$  и  $\tau_w$  — соответственно трение на стенке в воде и растворе полимера, а обозначения на фиг. 2 (и на последующей фиг. 3) такие же, как и на фиг. 1. Из данных фиг. 2 следует, что с помощью параметра  $k_0$  результаты для различных полимеров и концентраций удовлетворительно совмещаются в одну зависимость

$$(2.1) \quad S_{тр} = 0,35 \lg(k_0 c / \rho) + 2,49$$

для диапазона  $k_0 c / \rho = 0,2-4,0$ .

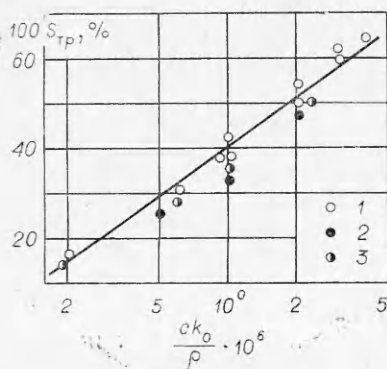
Из (2.1) следует

$$(2.2) \quad k_0 = \frac{\rho}{c} 10^{\frac{S_{тр} - 2,49}{0,35}}$$

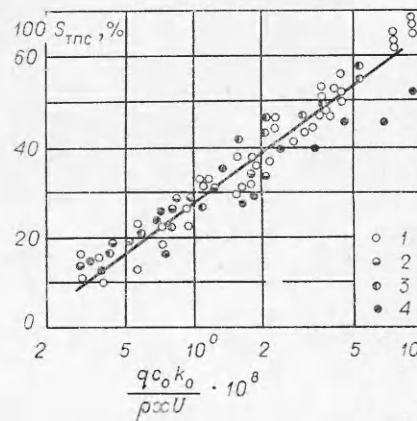
т. е. путем простого гидравлического опыта в трубе с однородным раствором можно определить величину  $k_0$ , характеризующую продольный масштаб диффузии  $L$  в ТПС.

Другой несколько более сложный способ определения  $k_0$ , но также не требующий измерений локальной концентрации диффундирующего в ТПС полимера, состоит в измерении местного напряжения трения в пограничном слое. Из фиг. 3, построенной на основании таких измерений, следует

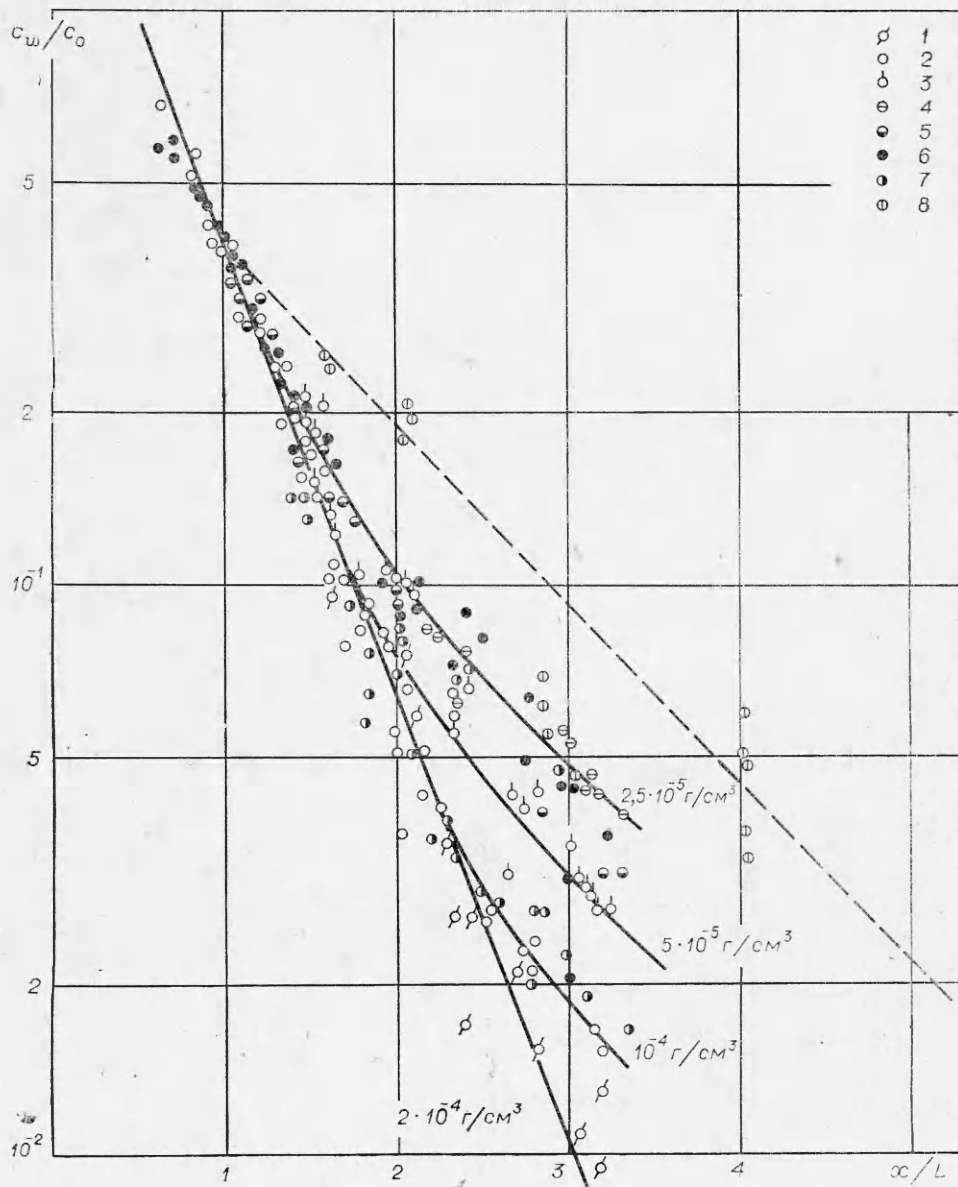
$$(2.3) \quad S_{тпс} = 0,35 \lg\left(\frac{k_0 q c_0}{x \rho U}\right) + 3,08$$



Фиг. 2



Фиг. 3



Ф и г. 4

для  $(k_0 q c_0 / x \rho U) \approx 0,4-10,0$ , откуда

$$(2.4) \quad k_0 = \frac{x \rho U}{q c_0} 10^{\frac{S_{\text{ТПС}} - 3,08}{0,35}},$$

где  $x$  — расстояние от щели вниз по потоку.

Следует отметить, что использование зависимостей (2.2), (2.4) ограничено указанными выше диапазонами изменения безразмерных концентраций и расходов. Чрезмерно большие расходы и концентрации могут привести к «насыщению» эффекта Томса [4], когда величины  $S_{\text{тр}}$  и  $S_{\text{ТПС}}$  перестают следовать законам нарастания (2.1), (2.3), и поэтому зависимости (2.2), (2.4) уже не могут использоваться для определения параметра  $k_0$ .

Эффекты насыщения или близкие к ним возникают в ТПС на отно-

Таблица 2

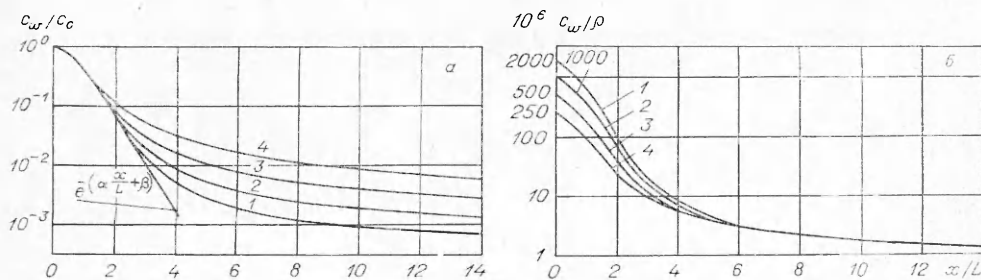
Тип (марка) полимера	$c_0$ , г/см <sup>3</sup>	$k_0$	$\varphi$ , град.	Номер точек фиг. 4	Тип (марка) полимера	$c_0$ , г/см <sup>3</sup>	$k_0$	$\varphi$ , град.	Номер точек фиг. 4
WSR-301 (2)	$2 \cdot 10^{-3}$	1,0	20	1	П-31 (3)	$10^{-3}$	0,2	20	6
	$10^{-3}$	1,0	20	2	Р-20-77 (1)	$10^{-3}$	0,6	20	7
	$5 \cdot 10^{-4}$	1,0	20	3	WSR-301 по данным [5]	$10^{-4}$	1,3	0	8
	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1,0	20	4		$5 \cdot 10^{-4}$	1,3	0	8
WSR-301 (9)	$10^{-3}$	0,2	20	5		$10^{-3}$	1,3	0	8

сительно небольших расстояниях за щелью, т. е. в промежуточной области диффузии, для которой обнаружено [1] экспоненциальное убывание концентрации полимера  $c_w$  на стенке

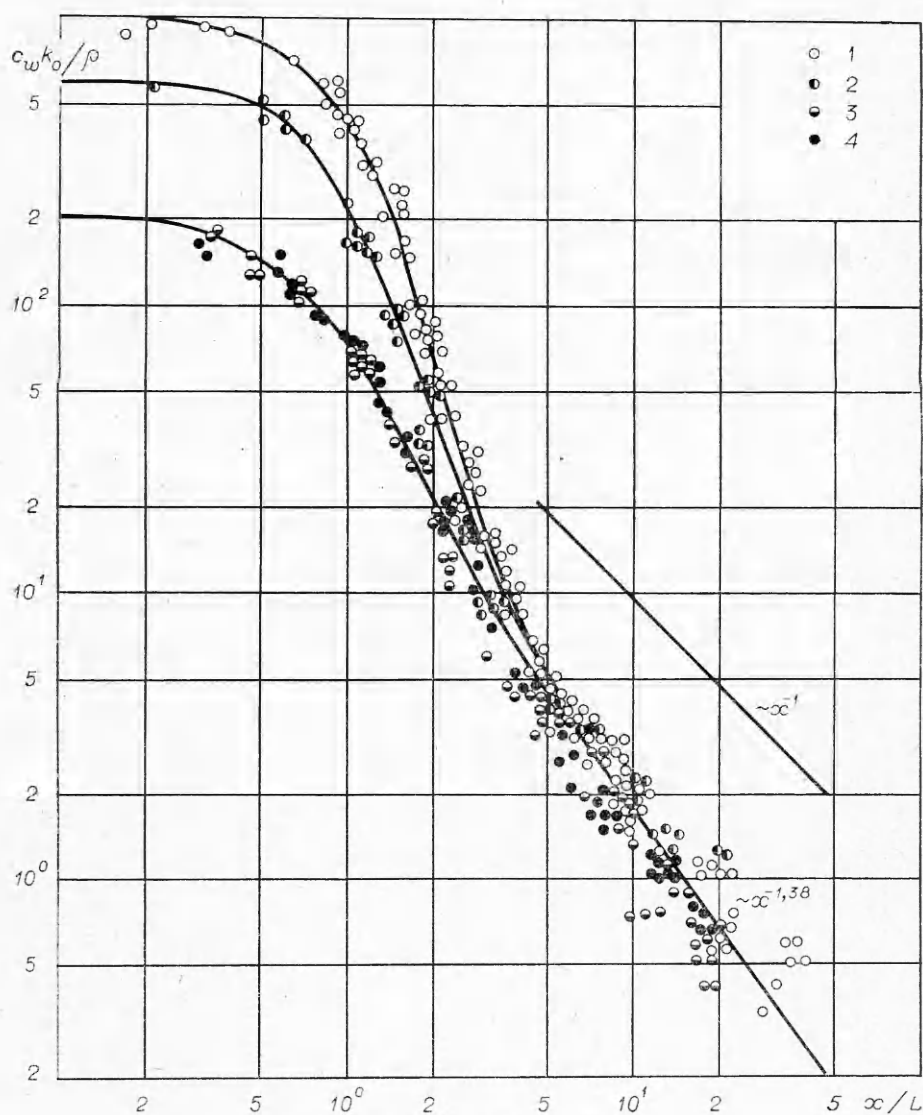
$$(2.5) \quad c_w/c_0 = \exp(-\alpha x/L - \beta),$$

причем из определения масштаба  $L$  следует, что  $\beta = 1 - \alpha$ . Обнаружено также (фиг. 4), что показатель  $\alpha$  в (2.5) зависит от угла  $\varphi$  наклона щели к обтекаемой поверхности и изменяется от  $\alpha = 1,8$  при  $\varphi = 20$  (кривая 1) до  $\alpha = 0,7$  при  $\varphi \leq 7^\circ$  (штриховая линия, по данным [1]). Это свидетельствует о замедлении диффузионного обмена в ТПС при уменьшении угла подачи полимера в поток, по крайней мере, в диапазоне углов  $7^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ . На фиг. 4 показаны также результаты работы [5], полученные при  $\varphi \sim 0$ , которые хорошо согласуются с данными при  $\varphi = 7^\circ$ . Характеристики полимеров и их растворов, использованных при получении данных фиг. 4, сведены в табл. 2. Следует отметить, что при  $\varphi \leq 7^\circ$  исчезает зависимость масштаба диффузии  $L$  от скорости потока (см. фиг. 3 из [1]), в то время как при  $\varphi = 20^\circ$  эта зависимость отчетливо наблюдается (см. фиг. 1). Опыты показали, что изменение положения щели по длине ТПС в пределах  $x_{щ} = 0,4-4,0$  м так же, как и двукратное изменение зазора щели (0,4-0,8 мм), не повлекло за собой изменений в наблюдаемых закономерностях диффузии полимеров.

Как видно из фиг. 4, протяженность промежуточной области с экспоненциальной зависимостью (2.5) для уменьшения концентрации  $c_w$  на стенке увеличивается при увеличении начальной концентрации  $c_0$  полимера и параметра его эффективности  $k_0$ . Кривые 1-4 для полимера WSR-301 (2) при  $c_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $2,5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> соответственно характеризуют начало перехода от закона (2.5) к иной закономерности диффузии в конечной области. На фиг. 5, а, охватывающей большой диапазон безразмерных расстояний  $x/L$  от щели, различия в закономерностях диффузии полимеров в промежуточной и конечной областях видны отчетливо. В конечной области зависимость  $c_w/c_0 = f_1(x/L)$  перестает быть экспоненциальной, а также универсальной в том смысле, что функция  $f_1(x/L)$  описывает не единую кривую, а семейство кривых (даже для



Фиг. 5



Фиг. 6

одного полимера разной начальной концентрации). На фиг. 5, а, б показаны осредненные по многочисленным измерениям результаты для WSR-301 (2), причем кривые 1—4 означают то же, что и на фиг. 4. Если результаты измерений представить в форме  $c_w/\rho = f_2(x/L)$ , то для одного полимера ( $k_0 = \text{const}$ ) их удастся свести к единой зависимости (фиг. 5, б), но такое представление не является универсальным для различных полимеров ( $k_0 = \text{var}$ ). Только форма представления  $k_0 c_w/\rho = f_3(x/L)$  надлежащим образом учитывает различия в диффузионных свойствах разных полимеров и позволяет получить для больших значений  $x/L$  единую универсальную зависимость (фиг. 6)

$$(2.6) \quad \frac{k_0 c_w}{\rho} = 4,16 \cdot 10^{-2} \left( \frac{x}{L} \right)^{-1,38}$$

(обозначения для фиг. 6 взяты из табл. 1, причем для удобства сопоставления данные приведены при одинаковой начальной концентрации  $c_0$ , равной  $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>).

По мере дальнейшего уменьшения концентрации полимера в ТПС его влияние на интенсивность турбулентного обмена постепенно исчезает, и поэтому следует ожидать, что при  $x/L > 30-50$  зависимость (2.6) вырождается в гиперболический закон  $c_w \sim x^{-1}$ , характерный для пассивных примесей [2].

На основании проделанной работы можно отметить следующее.

В промежуточной области диффузии полимеров в ТПС убывание их концентрации вдоль обтекаемой поверхности происходит по экспоненциальному закону (2.5), в котором показатель экспоненты зависит от угла подачи раствора в поток. Закономерность (2.5) учитывает влияние на диффузию начальной концентрации  $c_0$  и (через масштаб  $L$ ) удельного расхода  $q$  раствора полимера, его эффективности  $k_0$  и скорости потока  $U$ .

Протяженность области с экспоненциальным характером убывания концентрации увеличивается с ростом начальной концентрации, расхода и эффективности полимера, и наоборот.

В конечной области диффузии полимеров в ТПС их концентрация убывает вдоль стенки по степенному закону (2.6), который не зависит от начальной концентрации  $c_0$ , но учитывает (через  $L$  и  $k_0$ ) суммарный расход  $qc_0$  полимера, его эффективность и скорость потока  $U$ .

Параметр эффективности  $k_0$  и однозначно связанный с ним масштаб диффузии  $L$ , необходимые для возможности использования универсальных законов диффузии (2.5), (2.6), можно получить по формуле (2.2) на основании простого гидравлического опыта, не прибегая к сложным и трудоемким измерениям локальной концентрации в потоке.

Гидравлические измерения в трубах параметра  $k_0$  позволяют также рассчитать по формуле (2.3) для ТПС при щелевой подаче полимера величину эффекта Томса в конечной области диффузии, т. е. за пределами экспоненциальной области, где уже нет «насыщения» этого эффекта.

Поступила 4 VI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вдовин А. В., Смольяков А. В. Диффузия растворов полимеров в турбулентном пограничном слое.— ПМТФ, 1978, № 2.
2. Poreh M., Cermak J. E. Study of diffusion from a line source in a turbulent boundary layer.— Intern. J. Heat and Mass Transfer, 1964, vol. 7, N 10.
3. Иванюта Ю. Ф., Чекалова Л. А. Экспериментальное исследование слабых растворов полимеров в трубах различного диаметра.— ИФЖ, 1971, т. 21, № 1.
4. Хойт. Влияние добавок на сопротивление трения.— Теор. основы инж. расчетов, 1972, № 2.
5. Fruman D. H., Tulin M. P. Diffusion of a tangential drag-reducing polymer injection on a flat plate at high Reynolds numbers.— J. Ship Res., 1976, vol. 20, N 3.

УДК 532.507

### ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРЯМЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

Б. В. Наумов, О. Г. Шахрай, В. И. Эйдук  
(Ленинград)

1. Для исследования турбулентности все шире применяются приборы, действие которых основано на теневых методах визуализации прозрачных неоднородностей [1—3]. В различных модификациях теневых приборов используются визуализирующие диафрагмы со ступенчатым изменением пропускания