

УДК 53.072 : 532 : 533

Д.С.Бровин (асп., каф. ЭФ), С.Н.Колгатин, д.т.н., проф.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ РОСТА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Одним из способов получения чистого поликристаллического кремния является рост из газовой фазы внутри реакторов определенного типа. При этом параметры течения в реакторе оказывают влияние на качество материала. Иногда на растущей поверхности возникают зоны, в которых содержатся примеси. Чтобы понять причины их появления, необходимо, прежде всего, научиться правильно моделировать турбулентное течение в реакторе. Для проверки моделей турбулентности был построен экспериментальный реактор, в котором можно измерять параметры течения. В работе [1] для этого реактора были проведены расчеты с использованием нескольких моделей турбулентности. Наилучшее согласование с экспериментами показала двухслойная модель Чена [2] с использованием переменного турбулентного числа Прандтля, формула для которого была предложена в [3].

Дальнейшее исследование показало, что эта модель значительно занижает турбулентную кинетическую энергию  $k$ , что видно на графике, построенном вдоль линии параллельной оси струи на расстоянии 10 см от нее (рис. 1). Однако на самой оси струи модель хорошо согласуется с экспериментом. В точках, помеченных на графике треугольниками и кругами, имеются данные по актуальным скоростям потока в эксперименте. Из этих данных выяснилось, что в течении присутствуют нестационарные колебания скорости с периодом порядка 10 с, которые не могут быть описаны моделью в стационарной постановке. Если из спектра амплитуды скорости исключить колебания с большим периодом, то соответствующие точки на графике опустятся (см. закрашенные символы). Однако, начальный участок расчетной кривой (2) все равно будет заметно отличаться от эксперимента. По-видимому, в месте наибольшего расхождения имеются зоны рециркуляционного течения, в которых образуются крупномасштабные турбулентные вихри. Чтобы учесть подобную турбулентность, предлагается модифицировать модель, добавив в нее еще одно уравнение для кинетической энергии крупномасштабных вихрей, имеющее вид, аналогичный стандартному уравнению для  $k$ :

$$u_j \frac{\partial k'}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k'}{\partial x_j} \right] + P \cdot F \left( \frac{l}{l_\varepsilon} \right) - \varepsilon'.$$

Отличие этого уравнения от стандартного заключается только в расчете генерационного и диссипативного членов. В последнем выражении  $P$  – генерация турбулентности в стандартной модели;  $F$  – функция, рассчитываемая по формуле

$F \left( \frac{l}{l_\varepsilon} \right) = A \cdot \left( \frac{l}{l_\varepsilon} \right)^B$ , где  $A$  и  $B$  – эмпирические постоянные,  $l$  – размер крупномасштабных

вихрей,  $l_\varepsilon$  – масштаб турбулентности по стандартной модели; диссипация  $\varepsilon'$  определяется

по формуле  $\varepsilon' = \frac{C_\mu^{3/4} k^{13/2}}{l}$ , являющейся аналогом формулы Колмогорова, записанной для

крупномасштабной турбулентности. Турбулентную вязкость в этом случае предлагается

рассчитывать по формуле  $\nu_t = C_\mu \frac{(k + k')^2}{\varepsilon}$ , где  $C_\mu$  – постоянная стандартной модели турбулентности.

Подбором констант  $A$  и  $B$  удается увеличить значения суммарной турбулентной кинетической энергии до нужного уровня в месте расхождения, при этом в зоне интенсивной турбулентности (непосредственно в струе) предложенная поправка оказывается малой по сравнению со значением  $k$  в стандартной модели, и поэтому она не влияет на положение кривой (1).

Авторы работы выражают благодарность А.А.Ловцюсу и Е.М.Смирнову за плодотворные обсуждения.

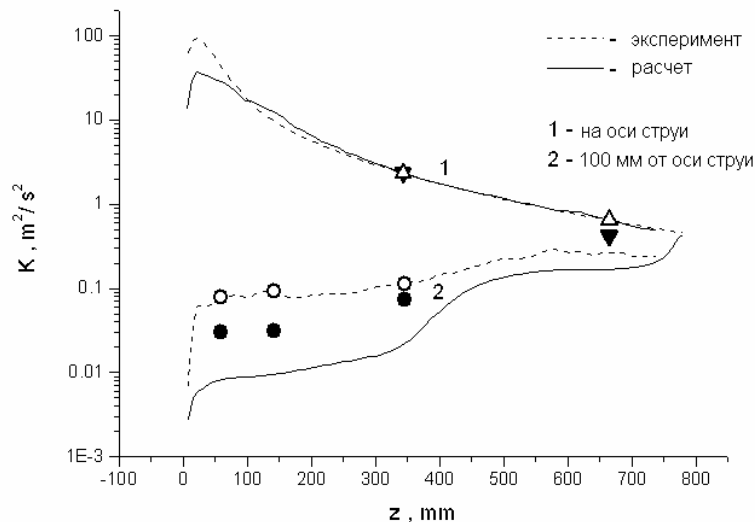


Рис. 1. Зависимость кинетической энергии турбулентных пульсаций от расстояния до сопла

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Д.С.Бровин, А.А.Ловцюс. XXXII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Ч. IV. СПб.: Изд.-во СПбГПУ, 2005. Стр. 121.
2. Chen H.C., Patel V.C. AIAA Journal, vol. 26, Issue 6, 1988, pp. 641-648.
3. Wilke C.R. Chem. Eng. Progr., 1950, v.46, No.2, pp. 95-104.