

УДК 662.642: 621.926.7

К.В. Ходосевич (6 курс, каф. гидроаэродинамики),  
В.В. Калаев, н.с. (ООО “Софт-Импакт”)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Задача конвекции расплава кремния является одной из важнейших проблем при моделировании роста кристаллов методом Чохральского. В современных ростовых установках течение расплава является нестационарным и существенно трехмерным. Для стабилизации течения расплава применяется вращение кристалла и тигля с расплавом, а так же внешнее магнитное поле. Существенное влияние магнитного поля на течение расплава связано с высокой электрической проводимостью жидкого кремния, которая сравнима с проводимостью жидких металлов ( $\sigma = 1.23 \cdot 10^6 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ).

Трехмерные нестационарные расчеты конвекции расплава в области с реальной геометрией проводились для случая однородного осевого магнитного поля с ненулевой компонентой вектора магнитной индукции,  $\vec{B}$ , взятой равной 0.128 Т и 0.064 Т. Для расчета использовалась система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска с учетом силы Лоренца. Плотность тока вычислялась с использованием обобщенного закона Ома:

$$\vec{j} = \sigma [-\nabla\Phi + \vec{V} \times \vec{B}].$$

Здесь  $\vec{j}$  — плотность электрического тока;  $\Phi$  — электрический потенциал. В предположении малости магнитного числа Рейнольдса, магнитное поле, индуцированное расплавом, не учитывалось, что позволяет получить уравнение Пуассона для электрического потенциала:

$$\Delta\Phi = \vec{B} \cdot \nabla \times \vec{V}.$$

Граничные условия для потенциала получены в предположении отсутствия электрических токов через границу расплава.

Для расчета турбулентного течения использовался метод моделирования крупных вихрей, при этом, эффективная вязкость вычислялась с использованием модели одного уравнения [1].

Результаты расчетов свидетельствуют о стабилизирующем воздействии магнитного поля на течение расплава. Мелкие и средние вихри, наблюдаемые при отсутствии магнитного поля, исчезают. Крупные вихревые структуры сосредоточены в подкристалльной области расплава. Можно наблюдать периодическую смену направления течения под кристаллом. Для получения осредненных полей физических величин требуется применять гораздо больший период осреднения по сравнению с расчетами без магнитного поля. Эффективная теплопроводность системы уменьшается с увеличением напряженности магнитного поля, что подтверждается экспериментально [2]. Дальнейшая работа по улучшению модели связана с учетом геометрии индукторов и их расположения. Также вызывает интерес учет обратного влияния течения расплава на магнитное поле.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Abe K., Suga K. Large eddy simulation of passive scalar fields under several strain conditions / In: Proc. Turbulent Heat Transfer-2, Engineering Foundation Int. Conference, Manchester, May 31-June 4, 1998, Vol.1, S.8, pp.15-30.

2. Graebner O, Mueller G. Effects of various magnetic field configurations on temperature distributions in Czochralski silicon melts // *Microelectronic Engineering*, 2001, v. 56, pp 83-88.