

снабжении самого предприятия и прилегающего жилого поселка.

В результате реализации предлагаемого проекта снижение годовой потребности в импорте природного газа в РБ составит от 5 до 14 тысяч тонн условного топлива для каждой технологической линии ОАО "Доломит" при использовании когенерационных комплексов соответственно на базе ГТУ и ГПА.

В связи с неполной загрузкой производства, для увеличения числа часов использования ДВС целесообразно создание когенерационных модулей, в которых с одним комплектом энергогенерирующего оборудования сопряжено не менее 2-х технологических линий. Реализация потенциала комбинированной выработки электроэнергии на базе объемов производства, определяемых существующим стабильным спросом на рынке сбыта продукции ОАО "Доломит", позволяет в течение всего года вырабатывать поток электроэнергии мощностью  $\approx 3 \cdot 10^1$  МВт. Удельный расход условного топлива на киловатт-час электроэнергии оказывается ниже 150 грамм. Снижение потребности импорта природного газа в РБ, в этом случае, имеет величину порядка 50 тысяч тонн условного топлива в год.

ОАО "Доломит" может полностью обеспечить свои потребности в электроэнергии. При цене природного газа до 70\$ за тысячу кубических метров, себестоимость мегаватт-часа не превысит 20\$, что может кардинально изменить финансовое положение предприятия. Снижение себестоимости доломитовой муки, — основной продукции предприятия, — в результате реализации рассмотренного проекта не вызывает сомнений.

УДК 536.2

### **Решение краевой задачи тепломассообмена в движущихся расплавах**

Есьман Р.И.

Белорусский национальный технический университет

В ряде специальных теплотехнологий объектом изучения являются потоки расплавов, обладающие свойствами реологических сред. Эффекты тепломассопереноса в движущихся расплавах исследуются при течении и затвердевании жидких ме-

печей и сплавов в специальных технологиях литья (жидкая штамповка, литье выжиманием, центробежное и непрерывное литье, и т.д.), в физико-химических технологиях двойного назначения при лазерной и плазменной обработке изделий, при движении вулканической лавы и других процессах.

В процессе движения расплава в полости формы происходят охлаждение жидкого металла и затвердевание за счет теплоотвода в стенку металлической формы (матрицы) и в неметаллическую форму. Вследствие этого вязкость металла непрерывно изменяется по времени, что определяет нестационарный характер течения. Другой особенностью рассматриваемой задачи является наличие фазового перехода в жидком металле (затвердевания). Благодаря теплоотдаче в форму температура расплава непрерывно уменьшается, а вязкость возрастает. При дальнейшем охлаждении на поверхностях формы образуется твердая корочка затвердевшего металла и происходит перемещение фронта кристаллизации в глубину отливки.

В качестве объекта исследования рассмотрим наиболее характерное сечение сложной осесимметричной отливки. Расчетная область представляет собой полость переменного сечения с внутренним выступом, в которой происходит движение и затвердевание расплава при несимметричных условиях охлаждения: на внутренней поверхности металл затвердевает за счет теплоотвода в песчаный стержень, на наружной поверхности — за счет теплоотвода в металлическую форму.

При расчете затвердевания металла теплоту кристаллизации введем в теплоемкость в точках, занятых областью фазового превращения. При этом предполагаем, что заполнение формы осуществляется сплошным ламинарным потоком: в начальный момент времени вязкость, плотность, температура расплава имеют постоянные значения по всему объему, а между потоком и поверхностью формы имеется плотный контакт. По мере охлаждения металла вязкость будем рассматривать как переменную величину во всей области течения  $\mu = \mu(T)$ . С этой целью воспользуемся зависимостью эффективной вязкости от температуры для высокопрочного алюминиевого сплава ВАЛ10, полученной экспериментально.

При конечно-разностной аппроксимации уравнений переноса (движения) воспользуемся методом контрольного объема

(рис.1), широко применяемым при решении задач течения и конвективного переноса. Разбивка расчетной области на контрольные объемы производится следующим образом. Вначале наносится нерегулярная сетка с узлами на пересечении координатных линий. Затем каждый узел связывают с контрольным объемом, грани которого проходят посередине между двумя смежными узлами. Исходная система дифференциальных уравнений интегрируется по каждому объему при замене подынтегральных выражений соответствующими интерполяционными многочленами, которые описывают изменение параметров между узловыми точками. В результате для данной системы находят дискретный аналог, который связывает значение параметра в данной узловой точке с его значениями в соседних узлах. Точность конечно-разностной схемы в значительной степени зависит от вида интерполяционного полинома.

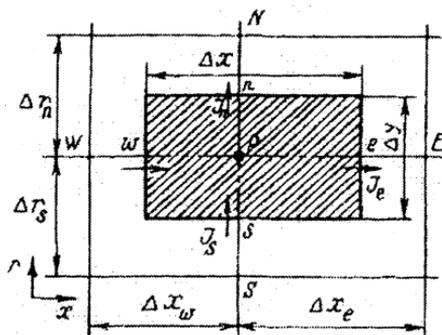


Рис. 1. Схема контрольного объема

Отметим также, что точность, с которой рассчитываются гидродинамические параметры потока при разностном решении уравнений переноса, зависит не только от метода разностной аппроксимации, но и от того, какие переменные в уравнениях выбраны в качестве искомых функций. Для двумерных уравнений движения в качестве зависимых параметров могут быть выбраны физические переменные (составляющие скорости  $u$ ,  $v$ , давление  $p$ , функция тока  $\psi$  и т.д.).

Запишем уравнения, определяющие течение жидкого металла и теплообмен во всей расчетной области. Уравнение энергии в цилиндрических координатах имеет вид

$$\mu \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_x T}{\partial x} + \frac{\partial v_r T}{\partial r} \right) \right] = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

В левой части члены, стоящие в круглых скобках, определяют конвективный теплоперенос. Эти члены следует учитывать только в области, занятой каналом с движущимся жидким металлом. Во всей остальной расчетной области для металлической формы, стержня и затвердевшего металла следует положить  $\partial v_x T / \partial x + \partial v_r T / \partial r = 0$ .

Если бы течение происходило при постоянных теплофизических свойствах жидкости, то для его описания следовало бы воспользоваться уравнениями Навье – Стокса. Изменение вязкости от температуры можно учесть, применяя форму уравнений количества движения в направлениях. С учетом сказанного в цилиндрической системе координат уравнения движения запишем следующим образом:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

уравнение изменения количества движения в проекции на ось  $z$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \tau_{rr} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{rx} = \frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r}, \quad (3)$$

уравнение изменения количества движения в проекции на ось  $x$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \tau_{rx} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx}. \quad (4)$$

Для ламинарного режима течения напряжения, входящие в уравнения (3), (4), выражаются таким образом:

$$\tau_{rx} = \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right), \quad \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad (5)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \tau_{\varphi\varphi} = 2\mu \frac{v_r}{r}.$$

С учетом переменной вязкости  $\mu$  в выражениях (5) перепишем уравнения неразрывности и количества движения в виде

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial r} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial ruv}{\partial x} + \frac{\partial rv^2}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( r\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + Q_v, \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial ru^2}{\partial x} + \frac{\partial ruv}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( r\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + Q_u, \quad (8)$$

где источниковые члены  $Q_v$  и  $Q_u$  соответственно равны

$$Q_v = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (9)$$

$$Q_u = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial x}.$$

При записи выражений (5) – (9) использованы безразмерные переменные

$$(\bar{x}, \bar{r}) = (x, r) / R, \quad u = v_x / u_0, \quad v = v_r / u_0, \quad (10)$$

$$\bar{t} = t u_0 / R_1, \quad \bar{\mu} = \mu / (\rho_f u_0 R_1), \quad \bar{p} = p / (\rho_f u_0^2),$$

черточки над которыми в уравнениях (6) – (10) и в дальнейшем опущены.

Введем также безразмерную температуру  $\Theta = (T - T_\infty) / T_\infty$ , где  $T$  – температура окружающей среды, и перепишем выражение (1) в виде

$$\rho u_0 R_1 c \left[ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial r u \Theta}{\partial r} \right) \right] = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( r \lambda \frac{\nabla \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) \right]. \quad (11)$$

Начальные условия по скорости получаются из решения стационарных уравнений движения в канале при изотермическом процессе  $T = T_{01}$ . Для этого стационарные уравнения количества движения, которые получаются из выражений (7), (8) при приравнивании нулю локальных производных по времени  $\partial u / \partial t = 0$ , решаются при постоянных физических свойствах жидкости, соответствующих начальной температуре  $T - T_{01}$  и полученные поля скорости и давления принимаются за начальные условия. Формулировка граничных условий для давления будет дана при рассмотрении численного метода.

УДК 536.7+66.047

### **Экспериментальные исследования процессов сушки теплозащитных композиционных материалов и покрытий**

Есьман Р.И., Шевцов В.Ф.

Белорусский национальный технический университет

В рамках ГППИ "Сушка" был разработан экспериментальный универсальный стенд и проведены исследования процессов сушки и термообработки композиционных материалов и покрытий, обладающих теплозащитными свойствами.

Рабочая камера экспериментального стенда для исследования процессов сушки композиционных материалов и покрытий позволяет подвергать исследуемые образцы воздействию терморadiационного потока при использовании источника излучения мощностью до 500 Вт. С целью исследования пространственного распределения потока излучения исследуемых обогревателей выполнены калориметрические измерения среднего интегрального потока теплового излучения и облученности нормальной к оси поверхности с использованием калориметра излучения ИМО-2. Калориметр излучения ИМО-2 имеет диапазон чувствительности в области длин волн 0,33-10,6 мкм, позво-