

ным газовым теплогенератором.

Выводы

Исследования подтвердили возможность повышения тепловой эффективности процесса распылительного высушивания за счет рекуперации теплоты отработанного в сушилке теплоносителя, а также при утилизации дымовых газов автономных теплогенераторов. В технологический цикл при использовании рекуператоров может быть возвращено до 15...20% теплоты уходящих газов. Внедрение рекуператоров может существенно повысить энергетическую эффективность работы технологических линий распылительной сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цагала М., Полонский А., Петренко П.С. Модернизация сушильных установок. - "Мясная и молочная промышленность", 1990, №1. - С.17-18.
2. Мертин П., Кузнецов П. Модернизация распылительных сушильных установок.

"Молочная промышленность", 2000, № 11. - С. 46-47.

3. Долинский А.А., Шморгун В.В., Шморгун А.В. Підвищення ефективності роботи розпилювальних сушарок. Аспекти енергозощадження. - Київ: ВД "Академперіодика", 2006. - 141с.

4. Ходос А.И., Кириенко М.А. Снижение себестоимости производства сухих молочных продуктов. Мы вам в этом поможем. - "Молочная промышленность", 2002, №9. - С. 49-51.

5. Грабов Л.Н., Шморгун В.В., Чалаев Д.М., Карповец А.А. Рекуперация теплоты отработанного в сушилке теплоносителя с использованием теплообменника на тепловых трубах. Труды II Междунар. научн.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)» Москва, 2005, Т. 2. - С. 78-80.

6. Шморгун В.В., Чалаев Д.М., Гершуни А.Н. Пути уменьшения энергозатратных показателей технологий распылительной сушки. "Промышленная теплотехника», Киев, 2007, Т.29. - № 7.С. 190-193.

УДК 532.5: 536.24

Тыринов А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОТЕЧЕНИЙ

Описано модель для чисельного розрахунку гідродинамічних процесів на основі рівняння Больцмана методом решітчатого газу.

Описана модель для численного решения гидродинамических процессов на основе уравнения Больцмана методом решетчатого газа.

The numerical solution of the hydrodynamical processes by a lattice gas method on the basis of the Boltzmann equation is described.

Трудность исследования микромасштабного тепло- и массопереноса состоит в том, что расчет по формулам, традиционно используемых в теплопередаче и гидрогазодинамике, не отражает истинное поведение системы в режиме микромасштаба. На результаты микропереноса значительное влияние оказывает уменьшение масштаба течений. Поэтому уравнение Навье-Стокса не всегда применимо для моделирования микроканальных течений.

Другой подход к описанию микротечений предлагает статистическая физика. Можно рассматривать не поведение каждой частицы в от-

дельности, а их вероятностное распределение. Предложенное Больцманом уравнение описывает функцию распределения молекул $f(\vec{x}, \vec{v}, t)$ по скоростям \vec{v} и координатам \vec{x} в зависимости от времени t . Тогда количество частиц в объеме, ограниченном координатами \vec{x} и $\vec{x} + d\vec{x}$ со скоростями в диапазоне \vec{v} и $\vec{v} + d\vec{v}$ в момент времени t определяется выражением $f(\vec{x}, \vec{v}, t) d\vec{x} d\vec{v}$.

Уравнение Больцмана с учетом оператора столкновений $H(f)$ и скорости \vec{F} , действующей на частицы массой m , можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} \cdot \vec{v} + \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} \cdot \frac{\vec{F}}{m} = H(f), \quad (1)$$

Значения плотности, скорости и плотности внутренней энергии определяются следующими интегралами:

$$f(\vec{x}, t) = \int m f(\vec{x}, \vec{v}, t) d\vec{v}, \quad (2)$$

$$f(\vec{x}, t) \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) = \int m \vec{v} f(\vec{x}, \vec{v}, t) d\vec{v}, \quad (3)$$

$$f(\vec{x}, t) \cdot \vec{e}(\vec{x}, t) = \frac{1}{2} \int m \|\vec{v} - \vec{u}\|^2 f(\vec{x}, \vec{v}, t) d\vec{v}. \quad (3)$$

Основной проблемой использования уравнения Больцмана является математическое описание оператора столкновений. Одна из первых моделей поведения текучих сред основывалась на клеточных автоматах и называлась «модель решетчатого газа». Она имитирует поведение системы частиц одинаковой массы, передвигающихся с фиксированными скоростями по гексагональной решетке.

Метод Lattice-Boltzmann (LBM) [1,2], являющийся развитием идеи клеточных автоматов, появился в конце 20-го века. Одним из его достоинств является возможность выбора оператора столкновений, отражающего особенности микродинамики исследуемой среды. Таким образом, удается моделировать явления, с которыми плохо справляются традиционные методы, основанные непосредственно на имитации макроскопических свойств жидкости. Чаще всего на практике используется оператор BGK, названный по именам создателей (Бхатнагар - Гросс - Крук). Он описывается следующим выражением:

$$H(f) = -\frac{1}{\tau} \left(f(\vec{x}, \vec{v}, t) - \bar{f}(\vec{x}, \vec{v}, t) \right), \quad (5)$$

где τ – скорость релаксации, определяющие интервал времени между столкновениями, а \bar{f} – равновесное распределение, соответствующее распределению Максвелла-Больцмана.

$$\bar{f} = -\frac{\rho}{m} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[\frac{-m(\vec{v} - \vec{u})^2}{2kT} \right], \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана.

При дискретизации в LBM используются обозначения решеток в виде $D_x Q_y$, где x – размерность решетки, а y – количество скоростных ка-

налов. В данном случае использована двумерная решетка $D_2 Q_9$, с девятью скоростными каналами (рис. 1).

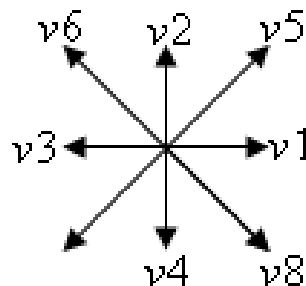


Рис. 1. Скоростные каналы решетки $D_2 Q_9$.

Если принять, что $f_i(\vec{x}, t)$ – плотность частиц в i -м скоростном канале ячейки \vec{x} в момент времени t , то значения плотности и скорости для ячейки:

$$\rho = \sum_i f_i(\vec{x}, t),$$

$$u = \frac{1}{\rho} \sum_i v_i f_i(\vec{x}, t). \quad (7)$$

Оператор BGK запишем в следующем виде:

$$H_i = -\frac{1}{\tau} \left(f_i(\vec{x}, t) - \bar{f}_i(\vec{x}, t) \right).$$

Согласно работе [3] вязкость ν зависит от скорости релаксации τ следующим образом $\nu = (\tau - 0,5)/3$. Таким образом в данной модели можно устанавливать вязкость жидкости.

Для вычисления функции $\bar{f}_i(\vec{x}, t)$ в формуле (7) использовано выражение:

$$\bar{f}_i(\vec{x}, t) = K_i \rho \left(1 + 3(\vec{v}_i \cdot \vec{u}) + \frac{9}{2} (\vec{v}_i \cdot \vec{u})^2 - \frac{3}{2} \vec{u}^2 \right). \quad (8)$$

Приняты следующие значения коэффициентов K_i в (8) $K_0 = 4/9$, $K_{1,2,3,4} = 1/9$ и $K_{5,6,7,8} = 1/36$.

Используя указанный алгоритм было промоделировано обтекание цилиндра в плоском канале при значении числа Рейнольдса $Re = 100$. Изображение полученного поля скоростей представлено на рис. 2.



Рис. 2. Поле скоростей при обтекании цилиндра в плоском канале.

Выводы

Представленная в работе модель достаточно адекватно описывает гидродинамические процессы и может быть использована для числен-

ного моделирования гидродинамики микротечений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Brian J.N. Wylie* Application of two-dimensional cellular automaton lattice-gas models to the simulation of hydrodynamics. – University of

Edinburgh. – 1990.

2. *Maxwell J.B.* Lattice Boltzmann methods for interfacial wave modeling. –University of Edinburgh, 1997.

3. *Wolf-Gladrow D.A.* Lattice-gas cellular automata and Lattice-Boltzmann models. – Springer, 2000.

Круковский П.Г., Яцевский В.А., Полубинский А.С., Хуторный В.М.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ CFD — МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ МАСЛА

В работе рассмотрены и проанализированы проблемы теоретического анализа теплового состояния и гидродинамики силовых масляных трансформаторов при естественном охлаждении масла. CFD-модели и технологии позволяют наиболее полно анализировать как традиционно используемые конструкторами усреднённые превышения температур поверхностей и объёмов обмоток и масла, так и достаточно точно определять локализацию и значение температуры наиболее нагретой точки. Последнее, как известно, определяет интенсивность термической деструкции целлюлозной изоляции и суммарный срок службы трансформатора.

Современные силовые трансформаторы являются довольно сложными конструкциями, состоящими из приблизительно ста узлов, имеющих внушительную массу (сотни т.) и габариты. Поэтому детальное создание цифровой модели и её дальнейший расчёт является сложной научно-технической проблемой и может занимать довольно много времени. Это обстоятельство не даёт возможности широко использовать современные полевые технологии в условиях конструкторских и проектных подразделений. С помощью построения иерархически упорядоченной взаимосогласованной системы компьютерных моделей предлагается оперативно получать требуемые с необходимой степенью

детализации интегральные и/или локальные характеристики по тепловому и гидравлическому состоянию трансформатора. Применительно к трансформаторостроению вводятся два класса CFD-моделей:

1) макромоделей, используются при упрощённом геометрическом представлении отдельных узлов внутри бака с целью максимально точного получения расхода и температуры масла на входе в бак и отдельные охлаждающие каналы;

2) микромоделей, используются при последующем более детальном расчёте гидродинамики и локального теплообмена в обмотках и каналах охлаждения трансформатора, но при более детальном описании геометрии.

Одновременно с анализом теплового состояния активных элементов маслonaполненных трансформаторов, помещённых в бак, определяется количество теплоты, отводимой радиаторами внешней системы охлаждения и поверхностью бака, возможен анализ и выбор вариантов конструктивного исполнения и расположения таких радиаторов.

В докладе продемонстрировано работоспособность подхода на примере расчётной модели группы катушек для силового трансформатора с учётом наличия внешних теплообменников естественной системы охлаждения.