

УДК 532.546

О ТЕЧЕНИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ОБЪЕКТЫ С ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

© 2011 г.

Н.А. Луценко

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

NickL@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Исследуется движение газа в поле силы тяжести через пористые объекты с источниками энерговыделения, которые могут возникать в результате природных или техногенных катастроф (как аварийный энергоблок Чернобыльской АЭС). Для изучения нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие объекты сложной конфигурации предложена математическая модель и разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем. Исследовано охлаждение нагнетаемым воздухом очага энерговыделения, неравномерно распределенного внутри пористого объекта, а также охлаждение осесимметричных и плоских пористых саморазогревающихся объектов различной конфигурации. Показано, что на разогрев объекта влияет не только конфигурация очага тепловыделения, но и его расположение внутри объекта; выявлена неоднозначная зависимость разогрева пористого объекта от ширины очага энерговыделения. Обнаружено, что возможно качественное отличие в режимах охлаждения осесимметричных и плоских тепловыделяющих объектов.

Ключевые слова: пористая среда, движение газа, тепловыделение, математическое моделирование, метод конечных разностей.

Введение

Многие природные или техногенные катастрофы приводят к возникновению очагов энерговыделения. Такие источники тепла часто появляются в пористых средах, к которым можно отнести завалы разрушенных зданий, горные породы и т.д. Пример аварийного энергоблока Чернобыльской АЭС показал, что может возникнуть очаг тепловыделения в пористой среде (как завал реактора ЧАЭС), стабилизация и ликвидация которого возможны только лишь за счет его охлаждения проходящим через него газом (воздухом) [1]. В настоящей работе исследуется движение газа через пористые объекты с внутренними источниками тепловыделения при известном перепаде давления газа на входе и на выходе из объекта.

Математическая модель и численный метод

Рассматривается пористый тепловыделяющий объект, с боков ограниченный непроницаемыми нетеплопроводными стенками, а сверху и снизу открытый. В результате протекания некоторой «химической» реакции в твердой фазе происходит выделение тепла. В нижнюю часть объекта подается холодный газ с за-

данным давлением, который движется снизу вверх через пористую среду, нагреваясь в результате теплообмена, и вытекает в свободное пространство. Модель строится в рамках модели двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [2] и включает в себя уравнения энергии, движения, неразрывности и состояния для каждого компонента (твердого и газообразного). Интенсивность межфазного теплообмена предполагается пропорциональной разности фазовых температур в рассматриваемой точке среды, тепловыделение прямо пропорционально концентрации реагирующего вещества, скорость убывания которой прямо пропорциональна самой концентрации. В уравнениях энергии компонентов учитывается не только теплопроводность, но и работа внутренних сил в газе. Для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является более корректным, чем классическое уравнение Дарси, и может применяться в большом диапазоне чисел Рейнольдса. Изменения объема и массы конденсированной фазы предполагаются столь незначительными, что ими можно пренебречь; поскольку твердая среда неподвижна и однородна, то уравнения неразрывности и движения для нее вырождаются. Так как в [3, 4] по-

казано, что учет температурной зависимости вязкости при моделировании движения газа через пористую тепловыделяющую среду изменяет решение не только количественно, но и качественно, в настоящем исследовании предполагается, что динамическая вязкость газа зависит от температуры по формуле Сазерленда. Замыкает систему уравнение состояния совершенного газа.

Отличительной особенностью модели является открытость саморазогревающейся пористой среды в атмосферу снизу и сверху, поэтому расход и скорость фильтрации газа на входе в элемент неизвестны и должны определяться при решении задачи.

Система уравнений, моделирующая нестационарное движение газа через пористый тепловыделяющий объект, является нелинейной смешанной гиперболически-параболической системой уравнений и в общем случае не может быть решена аналитически. Поэтому для моделирования нестационарных течений газа через пористые объекты с очагами энерговыделения при известном перепаде давления газа на входе и на выходе из объекта предложен оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем [5, 6].

Уравнения энергии и сохранения импульса преобразовываются в явные конечно-разностные уравнения, из которых определяются температура газа, температура твердой среды и скорость фильтрации газа. Уравнение неразрывности преобразовывается в неявное конечно-разностное уравнение, из которого с учетом уравнения состояния совершенного газа определяется давление газа.

Плотность газа определяется из уравнения состояния совершенного газа. Достоинством предложенного численного метода является отсутствие необходимости решения сложных систем алгебраических уравнений, благодаря чему с использованием геометрической декомпозиции возможно легкое и эффективное распараллеливание алгоритма.

Движение газа через различные пористые тепловыделяющие объекты

С помощью вычислительного эксперимента проведено исследование влияния на процесс охлаждения неравномерности распределения источников тепла в пористом объекте, для чего решена двумерная нестационарная задача о включении принудительной фильтрации в мо-

мент начала тепловыделения в твердой фазе для пористых объектов с различными параметрами тепловыделяющей зоны [7, 8]. Показано, что при увеличении высоты очага выделения тепла разогрев твердой среды нелинейно растет, охлаждение узких, сильно вытянутых по вертикали тепловыделяющих зон осуществляется неэффективно.

Обнаружено, что при удалении очага выделения тепла от входа в пористый объект разогрев твердой среды уменьшается, поэтому эффективнее происходит охлаждение пористых объектов с зонами тепловыделения, расположенными ближе к выходу из объекта. Выявлено, что изменение ширины тепловыделяющей зоны неоднозначно влияет на разогрев пористого объекта: при росте ширины тепловыделяющей зоны разогрев объекта может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Влияние ширины тепловыделяющей зоны на разогрев достаточно мало, поэтому охлаждение узких, сильно вытянутых по горизонтали тепловыделяющих зон происходит эффективно, причем чем ближе к выходу из пористого объекта расположена такая зона, тем эффективнее охлаждение. Показано, что при увеличении интенсивности тепловыделения очага разогрев твердой среды нелинейно возрастает со скоростью, увеличивающейся при росте тепловыделения. Также показано, что чем выше давление газа на входе в пористый объект, тем меньше понижает разогрев очага дальнейшее повышение давления.

Далее исследовано охлаждение нагнетаемым воздухом осесимметричных и плоских пористых саморазогревающихся объектов плавного сужающейся и ступенчато сужающейся формы [5, 6], а также пористых объектов сложной конфигурации с застойными зонами.

Показано, что при охлаждении таких объектов в зависимости от начально-краевых условий и параметров задачи возможны как установление стационарного режима, так и неограниченный разогрев, ведущий к расплавлению твердой фазы.

Выявлено, что форма тепловыделяющего объекта существенно влияет на процесс его охлаждения: как плавное, так и ступенчатое сужение объекта приводит к значительному ухудшению его охлаждения. Общее охлаждение осесимметричных сужающихся объектов хуже, чем охлаждение плоских объектов с аналогичным сужением, что выражается в заметном увеличении температур и в уменьшении расхода газа. Обнаружено, что возможно качественное отли-

чие в режимах охлаждения осесимметричных и плоских сужающихся объектов с одинаковыми параметрами – только лишь изменение конфигурации объекта с плоской на осесимметричную может приводить к нарушению стационарного режима охлаждения, к перегреву и разрушению объекта. При исследовании газового охлаждения пористых объектов с застойными зонами показано, что в застойных зонах более сильный разогрев наблюдается возле тех стенок, которые расположены ближе к выходной части объекта, из которой газ выходит в атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-02-90004-Бел_а), ДВО РАН (проекты № 09-II-CY-03-003, 09-I-ОЭМПУ-04, 11-III-B-01I-011).

Список литературы

1. Маслов В.П., Мясников В.П., Данилов В.Г. // Математическое моделирование аварийного блока Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 1987. 144 с.
2. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
3. Левин В.А., Луценко Н.А. // Горение и плазмохимия. 2005. Т. 3, №2. С. 81–90.
4. Левин В.А., Луценко Н.А. // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79, №1. С. 35–40.
5. Левин В.А., Луценко Н.А. // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, №6. С. 44–58.
6. Левин В.А., Луценко Н.А. // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, №3. С. 26–44.
7. Левин В.А., Луценко Н.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, №3. С. 407–417.
8. Луценко Н.А., Щебеньков Д.А. // Успехи механики сплошных сред: Сб. науч. трудов к 70-летию акад. В.А. Левина. 2009. С. 483–496.

ON GAS FLOW THROUGH POROUS OBJECTS WITH ENERGY-RELEASE SOURCES

N.A. Lutsenko

The movement of gas in the gravity field through porous objects with energy-release sources, which may arise from natural or man-caused disasters (as the exploded unit of the Chernobyl NPP), is investigated. A mathematical model and an original numerical method based on the combination of explicit and implicit finite difference schemes, are proposed for researching the time-dependent gas flows through porous heat-evolutional objects of complicated shape. Cooling the energy-release sources, nonuniform distributed into the porous object, by an enforced gas flow and cooling axisymmetric and plane porous self-heating objects of different shapes are investigated. It is shown that porous object heating is affected not only by the configuration of the heat-evolutional source, but also by its location within the object. An ambiguous dependence of the porous object heating on the width of the heat-evolutional zone is found. It is shown that the qualitative distinction in the cooling process of the axisymmetric and plane heat-evolutional objects is possible.

Keywords: porous media, gas flow, heat-evolution, mathematical modeling, finite difference method.