

УДК 539.3, 519.683

*В. О. Каледин, Я. С. Крюкова, Н. В. Нагайцева, Е. В. Равковская***Программная система для алгоритмизации численного решения задач механики сплошной среды***V. O. Kaledin, Y. S. Kryukova, N. V. Nagaytseva, E. V. Ravkovskaya***Software Systems for Algorithmization of Numerical Solution of Continuum Mechanics Problems**

Рассматриваются сопряженные и связанные задачи механики сплошной среды, решаемые при оценке физико-механических и теплофизических параметров процессов в конструкциях машин и аппаратуры. Описана программная реализация математических моделей на базе исследовательского пакета прикладных программ «Композит-НК», обеспечивающего сопряжение моделей разнородных физических процессов при решении связанных задач. При создании прикладных программ использована технология визуальной сборки программы из заготовленных объектов, так как численное моделирование разных процессов основано на схожих алгоритмах. Графические представления алгоритмов автоматически транслируются в последовательность операций вычисления. Поддержка развития открытого кода программ осуществляется с помощью справочной подсистемы, автоматически анализирующей тексты программных модулей и обеспечивающей доступ к их структурным составляющим. Такая технология позволяет существенно сократить сроки создания вычислительной программы для решения нестандартной задачи. Приведены примеры решений задач тепломассопереноса в вязкой среде, расчета микроструктурных напряжений в пространственно армированной оболочке, фильтрации пароводяной смеси в пористой среде применительно к задаче огнестойкости бетона.

**Ключевые слова:** сопряженные задачи, механика сплошной среды, вычислительный эксперимент, технология визуального программирования.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-36

Создание наукоемкой продукции требует применения вычислительного эксперимента для обоснованного выбора проектных параметров. Однако в технологии вычислительного эксперимента существует ряд проблем: сложность и дороговизна программного обеспечения, высокая трудоемкость использования универсальных программ и недостаток специализированных программ для решения частных задач. Особенности моделируемых объектов позволяют адаптировать к ним существующие программ-

We consider solutions of adjoint and self-adjoint continuum mechanics problems for evaluation of physical, mechanical, and thermophysical properties of various structures and media. A software implementation of mathematical models for self-adjoint problems is developed using scientific application software package «Composite-NK» which provides coupling and modeling of diverse physical processes. Visual design techniques are used for assembling the necessary application programs from prearranged code blocks, since numerical simulations of different processes are based on similar algorithms. Flowcharts are automatically translated into a sequence of operations. Open source software development is supported by reference help system with automatic analysis of modules source codes and access provisioning to modules structures. This technique is time reducing and especially helpful for solving non-standard problems with computers. In the paper, examples are provided for solving several problems: (a) heat and mass transfer in a viscous medium; (b) microstructure stress calculation for spatially reinforced membrane; (c) steam water mixture filtration in a porous medium (for the problem of concrete fire resistance).

**Key words:** adjoint problems, continuum mechanics, numerical experiment, visual programming technology.

ные средства, что требует более высокой квалификации, чем использование готовых программ.

Таким образом, задача автоматизации вычислительного эксперимента, позволяющая сократить трудоемкость и снизить квалификационные требования, актуальна.

Предлагаемая для этого программная система [1, с. 27–30; 2, с. 14–20; 3, с. 3–8] имеет частично открытый код, включающий средства визуального программирования, справочно-информационную систему

поддержки открытого кода, библиотеку функциональных объектов, а также средства подготовки исходных данных и представления результатов расчета. Разработанные программы ориентированы на математическое моделирование физических процессов в пространственных конструкциях из композиционных материалов. Особенность пакета в том, что он предоставляет инструментарий для гибкого конструирования прикладных программ с использованием технологии визуального программирования.

Алгоритм расчета представляется как последовательность шагов вычисления значений функциональных объектов, одни из которых являются ар-

гументами других. Функциональная зависимость между объектами интерпретируется как отображение прямого произведения множеств значений аргументов на множество значений функции. Композиция функциональных объектов представлена в виде ориентированного графа. Вершины графа соответствуют функциональным объектам, а дуги — свободным аргументам и подстановкам значений других объектов в качестве аргументов.

На рисунке 1 приведена архитектура программы. Визуальный слой объектов изображает граф функциональных зависимостей. На функциональном слое находятся объекты, реализующие алгоритм вычислений.

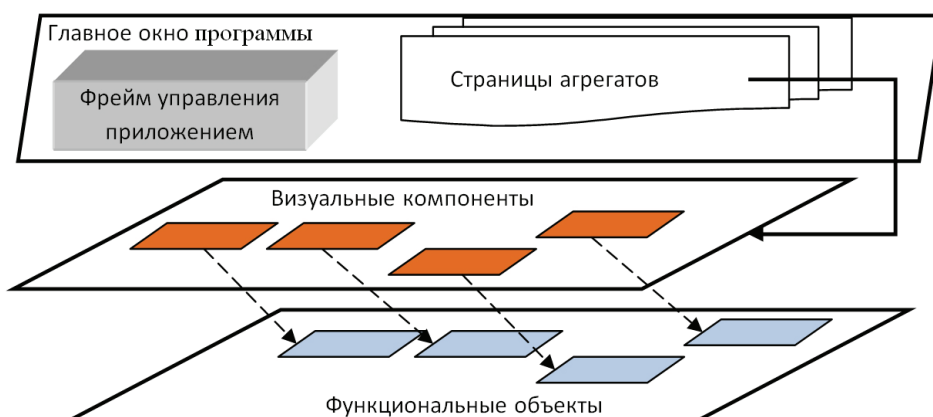


Рис. 1. Объектная архитектура типового приложения

Процесс вычисления состоит в выполнении команд: «Вычислить», «Принять значение из аргумента» и др. Последовательность команд формируется путем трансляции графического представления функционально-объектной схемы. Пользователь может их конструировать используя готовые классы объектов интерполяции, численного интегрирования, матричной алгебры, решения систем линейных алгебраических уравнений высокого порядка, типовые разностные и конечно-элементные схемы. Программирование решений нестандартных задач требует написания новых классов объектов, взаимодействующих с существующими.

Изложенный подход апробирован при решении задач механики конструкций [4, с. 146–149; 5, с. 57–61; 6, с. 170–173; 7, с. 58]. Приведем некоторые примеры, иллюстрирующие возможности разработанных программно-алгоритмических решений.

**Микроструктурные напряжения в пространственно армированной оболочке.** Напряжения в оболочке из композиционных материалов, армированной волокном по траекториям, пересекающим срединную поверхность, могут быть рассчитаны путем решения трехмерной задачи теории упругости. Однако идеализированные граничные условия в эксперименте

не воспроизводятся. Поэтому искомым результатом оказывается «зашумленным» (рис. 2). Более устойчиво к вариации граничных условий численное решение в рамках модели [5, с. 57–61].

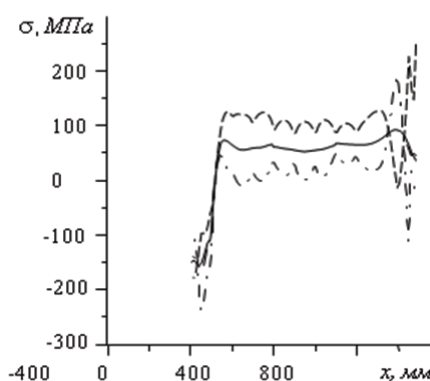


Рис. 2. Зависимость микроструктурных напряжений в пространственно-армированной оболочке вращения от осевой координаты: сплошная линия — «Композит НК», штриховые — NASTRAN (трехмерная задача)

**Тепломассоперенос в вязкой среде.** Использовалась модель ламинарного течения [6, с. 170–173].

Одновременно моделируется теплопередача. На рисунке 3 приведены поле скоростей и поле температур в цилиндрическом сосуде, над дном которого расположен нагреватель в виде горизонтального кольца.

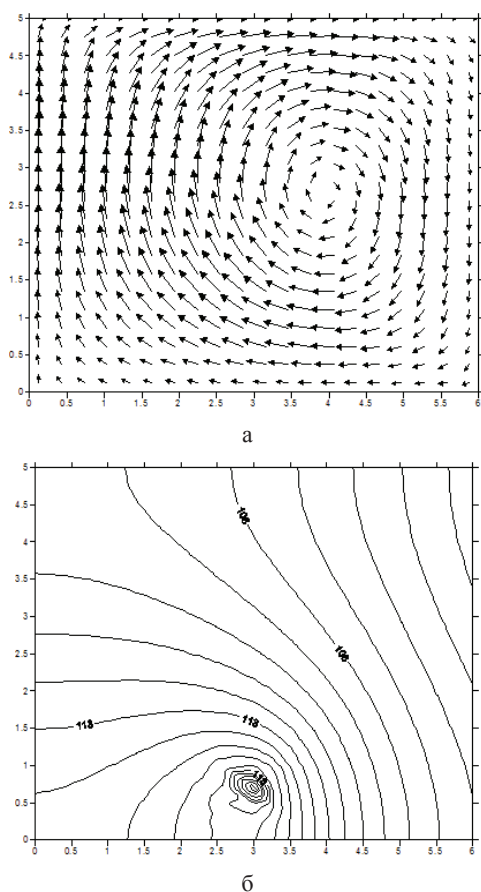


Рис. 3. Решение задачи теплопереноса: *а* — поле скоростей; *б* — поле температур (половина симметричного продольного сечения)

Таким образом, предложен подход к автоматизации программирования алгоритмов вычислительного эксперимента, основанный на объектной декомпозиции математической модели и графическом представ-

**Фильтрация пароводяной смеси в бетоне.** Моделировались взаимосвязанные явления в бетоне при огневом воздействии: теплопередача, термическая деструкция, испарение и конденсация воды в порах и фильтрация пароводяной смеси [6, с. 170–173].

На рисунке 4 приведены результаты расчета температурного поля в бетоне при одностороннем обогреве. Точками представлены известные данные огневого эксперимента, сплошными кривыми — зависимости температуры от времени на различных расстояниях от обогреваемой поверхности, полученные решением несвязанной задачи, а пунктиром — результаты решения связанной задачи. Учет дегидратации и фильтрации пароводяной смеси позволяет описать наблюдаемые «площадки» температуры в диапазоне 100–150 °С, обусловленные потерями тепла на дегидратацию и испарение.

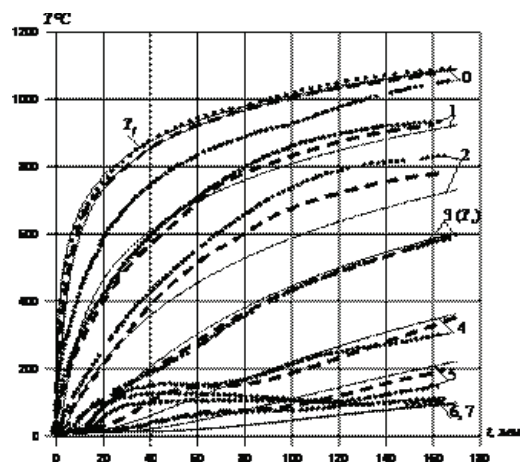


Рис. 4. Зависимости температуры от времени на обогреваемой поверхности (кривая 0), на расстоянии 8 мм (кривая 1), 17 мм (кривая 2), 34 мм (кривая 3), 62 мм (кривая 4), 84 мм (кривая 5), 118 мм (кривая 6) и 120 мм (кривая 7)

лении функциональных зависимостей между объектами модели, и разработан пакет инструментальных программных средств, позволяющий сократить трудоемкость решения связанных и сопряженных задач.

## Библиографический список

1. Миткевич А.Б., Каледин В.О., Каледин Вл.О., Марченко А.Ю. Среда визуального формирования исходной модели для конечно-элементных расчетов // Информационные технологии и программирование. — М., 2004. — Вып. 1 (10), ч. 2.
2. Каледин В.О., Глечиков Д.И., Локтионов В.Д. Открытая архитектура программ для математического моде-

лирования в механике конструкций // Вестник Московского энергетического института. — 2008. — №4.

3. Бурнышева Т.В., Каледин В.О., Равковская И.В., Эптешева С.В. Развитие пакета программ математического моделирования сопряженных задач механики неоднородных конструкций // Вестник Кемеровского государственного университета. — 2010. — №1.

4. Бурнышева Т. В., Каледин В. О., Крюкова Я. С. Эффективные коэффициенты электропроводности кусочно-однородной среды // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 2.

5. Каледин В. О. Осесимметричное термоупругое деформирование спирально армированных оболочек // Динамика сплошной среды. — 2001. — Вып. 119.

6. Аульченко С. М., Васильева Е. И., Каледин В. О. Моделирование ламинарного течения вязкой сжимаемой жид-

кости при малых скоростях // Вестник Кемеровского государственного университета. — 2013. — № 2/1.

7. Давыдкин Н. Ф., Страхов В. Л., Каледин В. О., Каледин Вл. О. Расчет огнестойкости железобетонных конструкций при стандартных и реальных температурных режимах пожара // Подземное пространство мира. — 2006. — № 1/2.