

УДК 004.42

*Г. В. Копытов*

**ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ  
КРОВОТОКА ЧЕЛОВЕКА  
НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ**

*Описана интеграция разномасштабных по времени моделей кровеносной системы человека на основе разделения кода и синхронизации данных. В основу интеграции положена барьерная синхронизация и обмен данных через базу данных Беркли.*

*This paper describes how multi-scale hemodynamics models can be integrated based on barrier synchronization and Berkeley DB as data exchange mechanism.*

**Ключевые слова:** модели кровообращения, барьерная синхронизация, обмен данными.

**Key words:** hemodynamics models, barrier synchronization, data exchange.

Применение разномасштабных моделей для моделирования задач кровообращения человека приобретает все большую популярность в последнее время. Один из используемых подходов для моделирования глобального кровообращения — это гидродинамический подход, когда кровь считается вязкой несжимаемой жидкостью, протекающей по сети эластичных трубок [1]. Для описания движения жидкости используются уравнения гидродинамики в каждом сосуде. Простота и вычислительная эффективность этой модели позволяет учитывать различные факторы, такие как работу мышц, дыхание, перенос веществ и т. д. Однако в некоторых случаях, например для учета влияния имплантов и различных патологий, она непригодна так как одномерна.



В таких случаях исследователи пытаются применить многомасштабный подход, комбинируя модели разных размерностей [2–4]. Двумерные и трехмерные гидродинамические модели основываются на уравнениях Навье-Стокса и оказываются довольно трудоемкими. Поэтому они используются только в небольших областях, например в месте стыковки сосудов или в окрестностях расположения импланта.

При появлении анизотропных элементов, скажем кава-фильтров, расчеты усложняются. При этом задание корректных граничных условий на стыке областей разных размерностей становится одной из основных трудностей данного подхода. Но данные методы очень эффективны, когда важно знать не только особенности локального кровотока, но и картину глобального кровообращения в целом.

Различие размерности при применении гибридного подхода приводит еще к одной трудности. Временной шаг моделирования в моделях разной размерности зачастую различается на несколько порядков. Дополнительно картину усложняет то, что модели разной размерности описываются совершенно разными системами уравнений, используют разные вычислительные пакеты и могут быть написаны на разных языках программирования.

В этих условиях интеграция разномасштабных моделей в общую модель на основе единого кода представляет определенную трудность. В данной работе будет предложен способ интеграции разномасштабных моделей, основанный на принципе разделения кода и синхронизации данных.

При этом подходе каждая модель исполняется как отдельный процесс в своем адресном пространстве. Поскольку модели обрабатывают общие данные, то необходимы обмен и синхронизация данных в процессе обработки. Однако существующие механизмы, например MPI, здесь не годятся. Система MPI приспособлена для запуска и взаимодействия ансамбля одинаковых процессов. Здесь же взаимодействующие процессы являются совершенно разными.

В основу предложенного метода интеграции положены определенные принципы. Данный метод существенно опирается на одномерную модель глобального кровотока, которая занимает центральное место. Интеграция должна позволять объединять модели, написанные на разных языках программирования и работающих на разных платформах. Существующие модели и их код должны претерпеть минимальные изменения в процессе интеграции.

Для удовлетворения вышеуказанным принципам предлагается механизм, когда каждая модель выполняется в отдельном процессе, а синхронизацию осуществляют совместно управляющий процесс и библиотека функций (в дальнейшем называемая *ядро*), которая включается в код каждой модели. Ядро взаимодействует с управляющим процессом через сокет с использованием TCP/IP.

Обмен данными между процессами происходит с использованием базы данных Беркли [5]. Это не реляционная, очень эффективная, встраиваемая база данных, которая поддерживает различные способы организации данных и методы работы с этими данными, включая простое чтение/запись, транзакционную обработку и распределенную репликацию.

Интегрированные модели имеют доступ к общей базе данных, логическое содержимое которой определяется одномерным процессом глобального кровотока. В настоящее время эта структура состоит из нескольких сосудистых деревьев в которых записаны размер, пространственное положение, диаметры сечения сосудов и другая необходимая информация.

Каждая интегрируемая модель предоставляет ядру процедуры сериализации и десериализации, которые преобразуют данные, находящиеся в памяти процесса в логическую структуру данных в общей базе данных. Для этой цели логическое содержимое базы данных перенумеровано в виде последовательности объектов, каждый из которых имеет уникальный идентификатор и, возможно, дополнительные параметры. Например, логическим элементом базы данных может быть сосуд с номером 10 в дереве с номером 4. Это пространство идентификаторов объектов является пространством ключей базы данных.

Для синхронизации выполнения и обмена данными ядро предоставляет процедуры, похожие на барьеры MPI. Процесс глобального кровотока имеет четкий порядок обработки данных, которого придерживаются интегрируемые модели. В начале каждого этапа обработки модели оповещают управляющий процесс, что они готовы начать обработку этого этапа. Завершив обработку, они также оповещают об этом управляющий процесс, а также сообщают идентификаторы модифицированных общих данных. Управляющий процесс взаимодействует ядрами процессов для синхронизации данных из общей базы с памятью процесса.

Данная система находится в стадии экспериментальной разработки и эксплуатации в Институте вычислительной математики РАН.

#### Список литературы

1. Холодов А. С. Некоторые динамические модели внешнего дыхания и кровообращения с учетом их связности и переноса веществ // Компьютерные модели и прогресс медицины. М., 2001. С. 127 – 163.
2. Papadakis G. Coupling 3D and 1D fluid-structure-interaction models for wave propagation in flexible vessels using a finite volume pressure-correction scheme // Commun. Numer. Meth. Engrg. 2009. Vol. 25. P. 533–551.
3. Urquiza S.A., Blanco P.J., Vernere M.J., Feijero R.A. Multidimensional modelling for the carotid artery blood flow // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2006. Vol. 195. P. 4002–4017.
4. Quarteroni A., Formaggia L., Veneziani A. Cardiovascular Mathematics: Modeling and Simulation of the Circulatory System. Milano: Springer-Verlag Itali, 2009.
5. Yadava H. The Berkeley DB Book. Apress, 2007.

#### Об авторе

Герман Васильевич Копытов — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: gkopytov@yandex.ru

#### About the author

Dr German Kopytov — ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: gkopytov@yandex.ru