



УДК 32.97+32.973.2  
ББК 004.42

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ<sup>1</sup>

*М.А. Бутенко, Д.В. Бурнос, С.А. Хоперсков, В.С. Холодков, А.Г. Морозов*

Разработана модель информационной системы для решения задач оптимизации и управления системами вентиляции крупных промышленных цехов на основе прямого газодинамического моделирования с применением параллельных технологий. В основе программного комплекса лежит объектно-ориентированный подход. При построении информационной модели использовался язык UML.

Ключевые слова: *информационная модель, системы вентиляции, аспирационные течения, газодинамика, конвекция.*

### Введение

Системы вентиляции обеспечивают выполнение технологических и экологических требований в крупных промышленных цехах металлургической, химической, деревообрабатывающей, цементной и других отраслей промышленности. При проектировании вентиляционной системы ставится задача обеспечения заданных условий в рабочей зоне по температуре, подвижности воздуха, его химическому составу, фракционному составу аэрозолей, влажности. В производственных помещениях имеется большое число разнообразных источников тепла, загрязняющих примесей, устройств воздухообмена. Возникает задача оптимального размещения технических устройств различного рода и управления их работой.

Проектирование приточных и вытяжных систем вентиляции должно быть основано на требованиях, изложенных в работе М.И. Гримитлина, СНИП 41-01-2003 и СНБ 4.02.01-03 [3; 8; 9]. Некоторые методы и подходы для

моделирования течений газа в приложении к различным задачам вентиляции, кондиционирования и аспирации изложены в работах О.А. Аверковой и С.С. Кобылкина [1; 5]. Имеющиеся в настоящее время инструменты оптимизации основаны на простых инженерных расчетах [11], не способных адекватно описывать сложные динамические процессы и реальную геометрию цеха [10].

Задача одновременного определения полей температуры и скорости воздуха для исследования аэродинамики вентиляции внутри существенно трехмерного объекта (крупного цеха объемом порядка  $10^6$  м<sup>3</sup>) при наличии большого числа устройств регуляции воздухообмена может быть решена только в рамках прямого численного газодинамического моделирования на основе эффективных численных алгоритмов интегрирования полных уравнений газодинамики. Близкими по размерам являются карьеры, для которых актуальной является задача проветривания нижних частей глубоких карьеров [2]. Аналогичными по трудности задачами являются расчет аэродинамики сложной урбанизированной территории [14], моделирование вентиляции подземных сооружений и шахт [6], изучение динамики примесей от крупного промышленного объекта, динамики поверхностных вод на

сложном неоднородном рельефе местности [7]. Основной проблемой моделирования динамики воздуха в промышленном цехе с учетом источников тепла и газа от печей и приточно-вытяжных агрегатов для вентиляции представляется необходимость получения решений с очень высоким пространственным разрешением  $l \ll a \ll L$  ( $l \ll a \ll L$  – размер численной расчетной ячейки,  $a$  – характерный размер агрегата для вентиляции,  $L$  – размер цеха). Для типичных параметров  $a = 2$  м,  $L = 300$  м для ячейки имеем не более  $l = 0,2$  м. При использовании равномерных численных сеток получаем число ячеек  $N \approx 10^8 - 10^9$ . Указанные оценки с необходимостью требуют привлечения параллельных технологий.

В последние годы в зарубежной научной литературе появляются первые работы, демонстрирующие возможность прямого численного моделирования динамики воздуха с учетом технологических процессов в приложении к задачам промышленной вентиляции [15, 16]. Это стало возможным в связи с развитием численных методов моделирования динамики газа, а также с доступностью суперкомпьютеров и использованием параллельных технологий.

С одной стороны, наблюдается значительный прогресс в области численного моделирования сложных нестационарных многомерных физических процессов и явлений, в том числе процессов тепло- и массообмена. Однако применение указанных подходов для решения соответствующих прикладных задач, связанных с проектированием и оптимизацией разного рода технологических систем и производственного оборудования, все еще остается весьма ограниченным. В результате в проектно-конструкторской практике традиционно используются инженерные методы расчета, имеющие ограниченные возможности, несмотря на соответствие отраслевым нормативам [8; 9].

Поставим задачу создания программного комплекса для моделирования тепломассообмена внутри цеха размером порядка  $300 \text{ м} \times 60 \text{ м} \times 40 \text{ м}$  с учетом сложной внутренней геометрии, обмена воздуха с атмосферой, работой печей и вентиляционных агрегатов. Важнейшими компонентами представляются модули визуализации и статистичес-

кой обработки результатов моделирования. В отличие от традиционно применяемых инженерных методик [11], основанных на интегральных оценках и полуэмпирических формулах, развиваемый подход позволяет наглядно проанализировать работу самых сложных систем вентиляции и кондиционирования в 3-мерной постановке.

В настоящее время все более распространенным является использование так называемых «коммерческих кодов» (FlowVision, Xflow, ANSYS, HydroGeo, Flometrics и др.), представляющих собой «универсальные» вычислительные программы, предназначенные для решения максимально широкого круга задач гидродинамики и тепломассообмена. Отметим важный недостаток коммерческих кодов, связанный с их максимальной универсализацией, что приводит к достаточно низкой вычислительной эффективности. С этой точки зрения коммерческие коды неизбежно уступают специализированным «научным» программам, базирующимся на моделях и алгоритмах, при разработке которых в гораздо более полной мере учитываются специфические особенности рассматриваемых конкретных задач [13].

## Структура информационной системы

В основе проектирования программного комплекса (ПК) лежит модульный подход и объектно-ориентированное программирование. Для построения более эффективного расчетного модуля он был реализован на языке программирования C++, а модуль визуализации на языке C# платформы Net. Программный комплекс состоит из девяти основных модулей и блоков (см. рис. 1):

1. Интерфейс программного комплекса обеспечивает управление работой всего программного продукта: управляет потоками данных, позволяет работать со всеми модулями и блоками ПК, обеспечивает взаимосвязь между модулями и блоками.

2. База данных входных параметров технических устройств содержит структурированный список физических и технических параметров всех технологических устройств крупного промышленного помещения, включая различного рода аспирационные и вентиляционные устройства, металлургические печи и др.

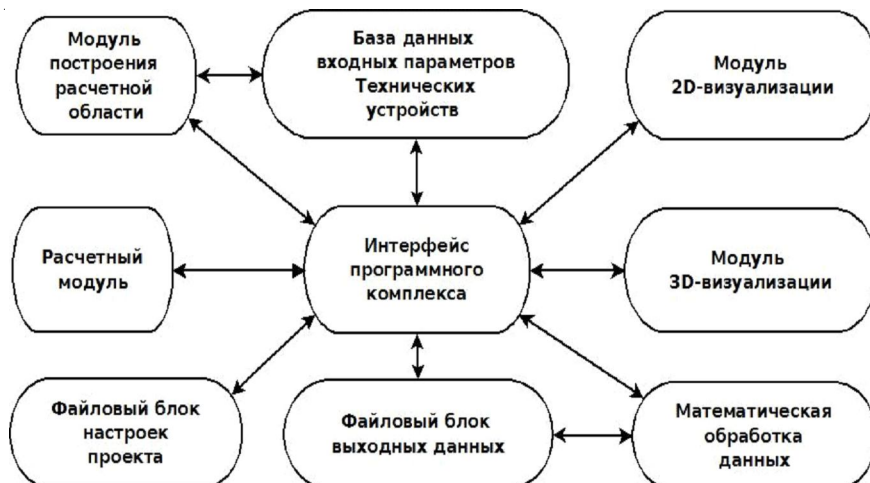


Рис. 1. Схема, отражающая принцип и структуру работы программного комплекса; стрелками указаны направления потока данных

3. Модуль построения расчетной области обеспечивает задание геометрии помещения, описание источников теплообмена и конфигурации вентиляционных устройств. Эти сведения модуль берет из базы данных. На основе этих данных генерируется расчетная область и начальное состояние для расчета дальнейшей эволюции процессов тепло- и массообмена в моделируемом помещении, задаются типы граничных условий.

4. Расчетный модуль обеспечивает проведение расчетов, основанных на программной реализации прямого численного интегрирования уравнений нестационарной гидродинамики применительно к задаче движения воздуха в крупном промышленном цехе с применением параллельных технологий.

5. Файловый блок настроек проекта предназначен для хранения, редактирования и выбора настроек проекта.

6. Файловый блок выходных данных предназначен для хранения файлов состояния газа, полученных в результате моделирования (файлы формата DAT-binary).

7. Модуль 2D-визуализации позволяет просматривать результаты расчетов в двухмерном виде для заданных моментов времени. 2D-данные представляют собой срезы распределений полей скоростей и температуры при заданных технологических режимах работы цеха.

8. Модуль 3D-визуализации предназначен для просмотра и анализа результатов расчетов в трехмерном виде.

9. Блок математической обработки данных включает N-мерный куб данных, полученный при расчетах, обеспечивает математическую обработку для выбранных алгоритмов (усреднение по заданным зонам, дисперсии и асимметрии распределений параметров, аппроксимация). Для нахождения оптимальной конфигурации, согласно критериям оценки, используется итерационный подход.

Созданный ПК имеет модульную архитектуру и состоит из расчетного и управляющего модулей. Отметим следующие ключевые особенности:

1. Расчетный модуль можно запускать отдельно на любом локальном компьютере при наличии непосредственного физического или удаленного доступа.
2. Количество расчетов для отдельно взятой машины ограничено только системными ресурсами.
3. Позволяет работать с изменяющимися во времени трехмерными данными аналогично 4D-подходу, рассмотренному в работе С.С. Храпова и др. [12].

Рассматриваемый программный комплекс для оптимизации и управления системами вентиляции является компьютерным приложением, объединяющим под общим интерфейсом три основных модуля: расчетный блок, модуль визуализации и блок математической обработки расчетных данных. При запуске приложения пользователь может создать новый проект посредством задания входных параметров для нового расчета при

работе с базой данных. Пользователь выбирает устройства с подходящими для его конкретной задачи параметрами, задает геометрию производственного помещения, размещает в нем устройства, тем самым генерируя расчетную область. На следующем этапе необходимо задать газодинамические параметры для формирования начального состояния. После выполнения этих процедур можно начинать новый расчет.

Выходные файлы, содержащие в себе газодинамическое состояние системы в некоторый момент времени  $t$ , представляют собой массивы данных, которые записываются в бинарном виде в файл через определенные промежутки времени  $t$ , определяемые пользователем. Эти файлы сохраняются в определенной директории на дисковом пространстве. Если имеется расчет, который по какой-то причине был прерван до достижения расчетного времени, то пользователь может открыть ранее созданный проект и продолжить незавершенный расчет, считав состояние газодинамической системы из бинарного файла, хранящегося на жестком диске.

Программное выделение расчетного модуля позволяет пользователю обрабаты-

вать полученные ранее расчетные данные, визуализировать их в динамическом режиме. Параллельная визуализация обеспечивает оперативное управление численным экспериментом, меняя условия его проведения в режиме реального времени. Общая диаграмма активности приложения представлена на рисунке 2.

На рисунке 3 изображена диаграмма прецедентов. Эктор-пользователь программного комплекса (ПК) может активировать несколько вариантов использования (ВИ). Во-первых, он может задать начальные данные для подготовки нового расчета, что включает в себя следующие действия: определение свойств источников тепла и массы в моделируемом помещении; генерация расчетной области с определением всех граничных условий; формирование начального состояния, которое будет использоваться непосредственно в дальнейшем расчете. Во-вторых, пользователь может запустить новый расчет, используя полученный файл начального состояния. В-третьих, он может продолжить ранее начатый расчет, если результаты визуализации показали, что стационарное состояние воздуха в промышленном помещении при данной конфигурации вентиля-

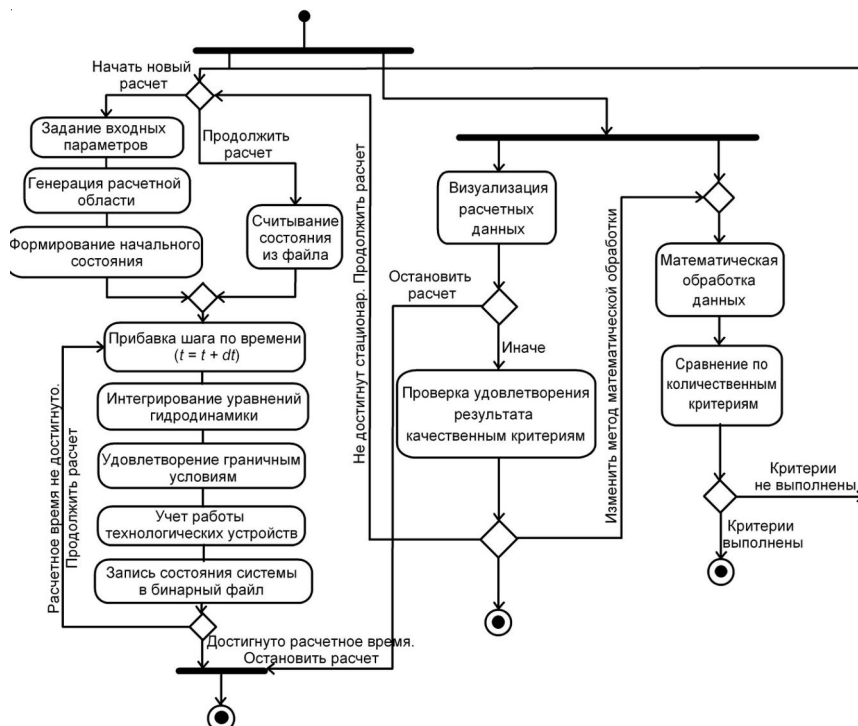


Рис. 2. Диаграмма активности программного комплекса для оптимизации и управления системами вентиляции крупных промышленных цехов



Рис. 3. Диаграмма прецедентов

ционных и прочих технологических устройств не достигнуто или расчет был прекращен по каким-либо причинам, не достигнув расчетного времени. Расчетные данные могут быть визуализированы. Также эктор может произвести математическую обработку ранее полученных расчетных данных с целью дальнейшей оценки результатов по выбранным критериям, в случае отрицательного результата пользователь может вернуться к заданию начальных условий и запуску нового расчета с учетом результатов предыдущей оценки.

В основе модуля расчета динамики газа лежит численный алгоритм, описанный в работе М.А. Еремина и др. [4], показавший адекватность и эффективность для данной задачи. В качестве примера на рисунке 4 показан типичный результат расчета поля скоростей.

Информационные модели и структурные диаграммы ИС были созданы в Microsoft Office Visio 2010.

### Заключение

В работе описана модель информационной системы для численного моделирования динамики воздуха в крупном промышленном помещении для решения задач оптимизации проектирования вентиляционной системы. В основе концепции построения ИС лежит модульный принцип, распараллеливающий процессы проведения численного газодинамического эксперимента и обработки / визуализации результатов расчета. Предусмотрена возможность динамического вмешательства в условия проведения численного эксперимента.

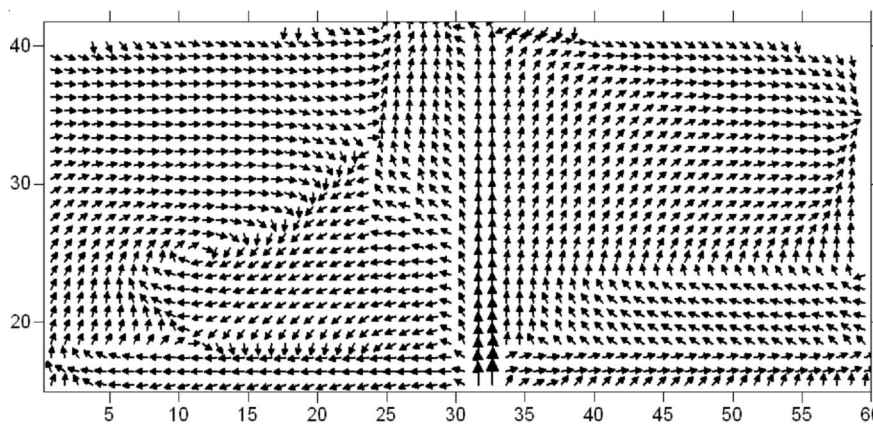


Рис. 4. Поле скоростей для модели металлургического цеха. Вблизи горизонтальной координаты m располагается печь для варки стали, создавая в среднем вертикальный поток горячего воздуха, который уходит в вентиляционный фонарь на крыше

Тестовые расчеты продемонстрировали эффективность работы информационной системы.

На этапе предварительного проектирования системы вентиляции результаты численного моделирования позволяют:

- прогнозировать и объективно сравнивать между собой результаты реализации различных изучаемых конфигураций системы общеобменной и местной вентиляции и кондиционирования (ОВК);
- построить картину пространственных распределений температуры, вредных примесей, влажности и скорости воздуха в заданном помещении для рассматриваемой конфигурации системы ОВК;
- исследовать особенности функционирования систем для выработки рекомендаций по оптимизации конструкции либо режима их функционирования.

**ПРИМЕЧАНИЯ**

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке У.М.Н.И.К (гос. контракт № У-3), темы «Системы мониторинга, диагностики и управления в экологии и медицине на основе информационных технологий и компьютерного моделирования» в рамках государственного задания Минобрнауки, гранта РФФИ 11-07-97025. Тестовые расчеты проведены на суперкомпьютере «Ломоносов» (НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверкова, О. А. Вычислительный эксперимент в аэродинамике вентиляции / О. А. Аверкова. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. – 110 с.
2. Гримитлин, М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – СПб. : АВОК Северо-Запад, 1994. – 320 с.
3. Еремин, М. А. Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики / М. А. Еремин, А. В. Хоперсков, С. А. Хоперсков // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2010. – Т. 6, № 8. – С. 24–27.
4. Кобылкин, С. С. Обзор существующих средств программного обеспечения для моделирования вентиляции подземных сооружений и шахт / С. С. Кобылкин, О. В. Сологуб // Гор. информ.-аналит. бюллетень. – 2009. – Т. 13, № 12. – С. 115–132.

5. Косарев, Н. П. Аэродинамика струйно-всасывающей схемы вентиляции застойных зон глубоких карьеров / Н. П. Косарев [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Гор. журн. – 2005. – № 6. – С. 16–18.

6. Логачев, К. И. Компьютерное моделирование процессов теплогазоснабжения и вентиляции : учеб. пособие / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, О. А. Аверкова. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. – 156 с.

7. Прямое моделирование динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы / А. В. Хоперсков [и др.] // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. – Вып. 3 / под ред. акад. В. А. Садовниченко, акад. Г. И. Савина, чл.-корр. РАН Вл. В. Воеводина. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2011. – С. 93–98.

8. СНБ 4.02.01-03. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Мн., 2004. – 78 с.

9. СНИП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование / ГОССТРОЙ РОССИИ. – М., 2004. – 54 с.

10. Формирование нестационарных режимов при моделировании аспирационных течений: неустойчивость Кельвина – Гельмгольца / А. В. Хоперсков [и др.] // Вестн. ВолГУ, Сер.1, Математика. Физика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 151–155.

11. Хрусталева, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция / Б. М. Хрусталева – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 784 с.

12. 4D-модели в задачах экологического моделирования: проектирование информационной системы / С. С. Храпов [и др.] // Вестн. ВолГУ. Сер.10, Инновационные технологии. – 2011. – № 5. – С. 119–124.

13. Bradshaw, P. Collaborative Testing of Turbulence Models / P. Bradshaw, B. Launder, J. Lumley ; research supported by U.S. Army, U.S. Navy and NASA // AIAA, Aerospace Sciences Meeting, 29th, Reno, NV, 7–10 Jan. 1991. – Standford, 1992. – 7 p.

14. Raji, A. Numerical study of natural convection dominated heat transfer in a ventilated cavity: Case of forced flow playing simultaneous assisting and opposing roles / A. Raji, M. Hasnaoui, A. Bahlaoui // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – Vol. 29. – P. 1174–1181.

15. van Hooff, T. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium / T. van Hooff, B. Blocken // Computers & Fluids. – 2010. – Vol. 39 – P. 1146–1155.

16. Zhao, F.-Y. Multiple steady fluid flows in a slot-ventilated enclosure / F.-Y. Zhao, D. Liu, G.-F. Tang // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – Vol. 29. – P. 1295–1308.

**THE INFORMATION MODEL OF PROGRAM COMPLEX  
FOR OPTIMISATION AND CONTROL OF VENTILATION SYSTEMS BASED  
ON DIRECT GASDYNAMIC SIMULATION**

*M.A. Butenko, D.V. Burnos, S.A. Khoperskov, V.S. Kholodkov, A.G. Morozov*

The model of information system was developed for solving optimization problems and control ventilation systems of large industrial plants. The calculation module was based on the direct gas-dynamic simulations using parallel technologies. In the core of the program complex was object-oriented approach. The information model was constructed by UML language.

**Key words:** *information model, ventilation systems, aspiration flow, gas dynamics, convection.*