

УДК 532.5:519.6

## Моделирование аэродинамических полей при прогнозировании нестационарных аэрационных процессов в массивах разновысотной застройки

А. Д. Головенко, С. А. Довгий, И. А. Клименкова, Д. И. Черний

*Киевский национальный университет им. Т.Г. Шевченко, Украина*

*Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАНУ*

Разработана программно-моделирующая система аэрационных процессов в массивах разновысотной застройки позволяет прогнозировать аэродинамическую ситуацию и нагрузку на отдельные здания и жилые районы. Система базируется на методе дискретных особенностей.

**Ключевые слова:** аэрационный процесс, массив застройки, программно-моделирующая система, метод дискретных особенностей.

Розроблена програмно-модельюча система аераційних процесів в масивах різновисотної забудови дозволяє прогнозувати аеродинамічну ситуацію і навантаження на окремі будівлі і житлові райони. Система базується на методі дискретних особливостей.

**Ключові слова:** аераційний процес, масив забудови, програмно-модельюча система, метод дискретних особливостей.

The developed software-based simulative system of aeration processes in housing estate with different buildings height allows prognostication of the aerodynamic situation and load both for individual buildings and apartment blocks. The system is based on the discrete features method.

**Key words:** aeration process, housing estate, software-based simulative system, discrete singularities method.

### 1. Введение

До настоящего времени проектные и строительные организации при разработке новых зданий и сооружений пользуются справочниками, руководствами и инструкциями, в которых приведены только интегральные динамические характеристики. Сложность новых конструкций и сооружений, обладающих большой внешней поверхностью, значительной высотой, строгими массогабаритными ограничениями требует новых подходов и средств проектирования, базирующихся на уточненных знаниях не только о новых материалах, но и о внешних воздействиях. При проведении эколого-аэрационной и аэродинамической экспертизы [1] высотных сооружений, комплексов высотной городской застройки и промышленных зон, в соответствии с новыми ГСН [2] к системе контрольных характеристик относятся и особенности распределения кинематических и динамических характеристик вызванных аэродинамическим воздействием.

Определение аэрационных и аэродинамических характеристик сводится к решению задачи внешнего обтекания (обтекания отдельных высотных конструкций, обтекания системы высотных конструкций, задаче обтекания вблизи экранирующей поверхности - поперечное обтекание отдельных горизонтальных длинноразмерных конструкций, поперечное обтекание системы горизонтальных длинноразмерных конструкций) и т.д. Разработанная

программно-моделирующая система для определения динамических и кинематических характеристик при обтекании конструкций и сооружений обеспечивает решение вышеперечисленных задач.

## 2. Математическая постановка задачи

Рассматривается движение воздушных масс во внешней части комплекса сооружений, составляющих городскую застройку или промышленную зону Рис.2.1.

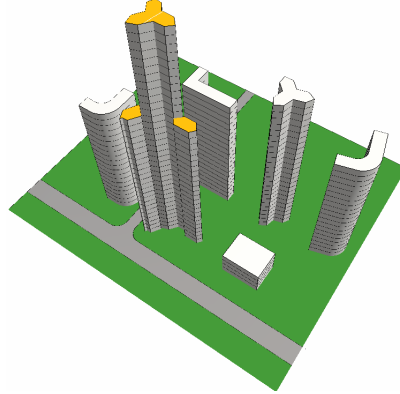


Рис.2.1. Поверхности строений (система детерминированных границ  $L_d$ ) массива городской застройки или промышленной зоны определяют геометрию области аэрации.

Для реальных аэрационных процессов воздушная масса может быть представлена как идеальная несжимаемая жидкость. Предполагается, что вихревое движение воздуха, в интегральном смысле аппроксимируется циркуляционным течением с разрывным полем скоростей. Тогда для потенциального течения идеальной несжимаемой жидкости внутри области  $D^+$  вне границ:  $L_d$  - детерминированных поверхностей зданий и сооружений,  $L_v$  - вихревых структур вне сооружений, ставится следующая начально-краевая задача для нахождения потенциала,  $\varphi$  для которого скорость  $\vec{V} = \nabla \varphi$ .

$$t \geq t_0 : \Delta \varphi = 0 \text{ в } D^+ \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \text{ на } L_d \quad (2.2)$$

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^+ = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^-, p^+ = p^- \text{ на } L_v \quad (2.3)$$

$$|\nabla \varphi| < \infty \text{ на угловых точках сооружений} \quad (2.4)$$

$$\lim_{|R-R_L| \rightarrow \infty} \nabla \varphi = \vec{V}_\infty \text{ на } \infty \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + \frac{p}{\rho} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{1}{2} V_\infty^2 \quad (2.6)$$

$$t = t_0 : \quad L_0 = L(t_0) = L_d(t_0) + L_v(t_0) \quad (2.7)$$

Решение задачи (2.1-2.7) позволяет определять динамические нагрузки через коэффициент безразмерного давления

$$C_p(x, y, t) = 1 - \frac{(\vec{V}(x, y, t))^2}{\vec{V}_\infty^2} - \frac{2}{\vec{V}_\infty^2} \frac{\partial \varphi(x, y, t)}{\partial t} \quad (2.8)$$

### 3. Структурированная математическая модель

При построении математической модели и анализе решения задачи трехмерного нестационарного обтекания высотных конструкций с высокой степенью эффективности может быть использован метод плоских сечений (Рис.3.1-Рис.3.2) [3-5]:

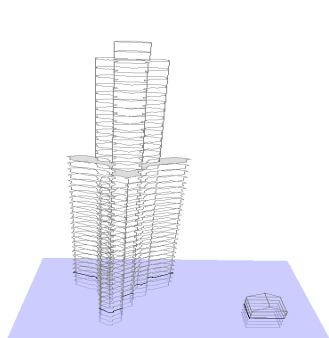


Рис.3.1. Горизонтальное сечение

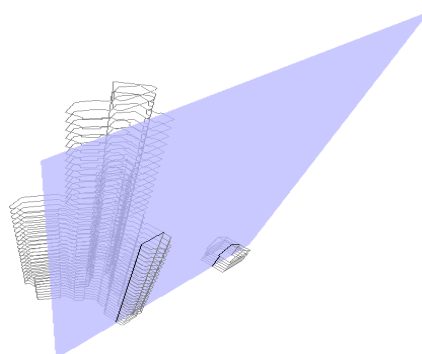


Рис.3.2. Вертикальное сечение

В этом случае, для нахождения комплексных потенциалов течения и комплексно-сопряженной скорости справедливы [6] представления:

$$\begin{aligned} \Phi(z, t) &= \varphi + i\psi = \\ &= z\bar{V}_\infty(t) + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d} f(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} f(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}(z, t) &= \frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial z} = u - iv = \\ &= \bar{V}_\infty(t) + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d} \frac{f(\omega, t)}{z - \omega} d\omega + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \frac{f(\omega, t)}{z - \omega} d\omega \end{aligned} \quad (3.2)$$

Задача (2.1-2.7) расщепляется на две совместные части I и II, требующие одновременного решения, для которого удобно использование алгоритмов распараллеливания вычислений:

Для детерминированной границы  $L_d$ :

$$I \left\{ \begin{array}{l} z = \omega_d(t) \in L_d, \quad t \geq t_0 : \\ \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d} \frac{f(\omega, t) n(\omega_d)}{\omega_d - \omega} d\omega \right\} = - \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \frac{f(\omega, t) n(\omega_d)}{\omega_d - \omega} d\omega \right\} \\ \int_{L_{d_j}} f(\omega_d, t) d\omega_d = - \int_{L_{v_j}(t)} f(\omega_v, t) d\omega_v, \quad j = 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Для вихревой границы  $L_v$ :

$$II \left\{ \begin{array}{l} z = \omega_v(t) \in L_v(t), \quad t > t_0 : \\ \frac{d\bar{\omega}_v(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d} \frac{f(\omega, t) d\omega}{\omega_v - \omega} + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \frac{f(\omega, t) d\omega}{\omega_v - \omega} \\ t = t_0 : L_v(t_0) = L_{v_0} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Изменение безразмерного коэффициента давления для внутренних точек области аэрации ( $z \in D^+$ ) определяется выражением:

$$C_p(z, t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{2(P(z, t) - P_\infty)}{\rho V_\infty^2} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ 1 - \frac{\bar{V}(z, t) \overline{V(z, t)}}{|V_\infty|^2} - \frac{2}{|V_\infty|^2} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(z, t) \right\} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(z, t) = & - \frac{1}{2\pi i} \int_{L(t)} \frac{V(\omega, t)}{z - \omega} \gamma(\omega, t) e^{-i\alpha(\omega)} d\omega + \\ & + \frac{1}{2\pi i} \int_{L(t)} \ln(z - \omega) \left( \frac{d\gamma}{dt} + \frac{\partial V_T}{\partial t} e^{i\alpha(\omega)} \right) e^{-i\alpha(\omega)} d\omega + \\ & + \frac{1}{2\pi i} V^*(\omega_0, t) \gamma(\omega_0, t) \ln(z - \omega_0), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $V$  - скорость перемещения точек границы,

$V_T$  - скорость растяжения точек границы,

$V^*$  - определяет скорость приращения границы.

Следует отметить, что в левой части интегрального уравнения (3.3) и во втором слагаемом правой части дифференциального уравнения (3.4) интегральные представления имеют особенность Коши и должны рассматриваться в смысле главного значения по Коши.

#### 4. Особенности вычислительных технологий

При использовании метода дискретных вихрей (МДВ) [3,5] решение задачи (2.1-2.7) на основании модели (3.1-3.4) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений - численному решению системы интегральных уравнений (3.3) заданных на границах многосвязной области на каждом

временном слое и параллельному численному решению задачи Коши (3.4), для определенной геометрии «вихревого следа» за каждым обтекаемым контуром.

Однако, для плоских начально-краевых аэрогидродинамических задач, решение которых формируется в терминах МДВ, прямое применение выражения (3.5) для определения динамических характеристик невозможно, в силу неоднозначности функций потенциала  $\Phi$  [6] и его производной по времени  $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ . Основная проблема [6] состоит в необходимости однозначного

вычисления производной в (3.5-3.6), учитывающей изменение циркуляции на обтекаемом контуре. Из-за присутствия неоднозначных функций-арктангенсов (в действительной части  $\Phi$  и  $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ ), за контуром произвольной формы

образуется «зона тени» в которой невозможно вычислять поле давления. В [6] на основе метода дискретных особенностей (МДО) [3,5] разработан метод и алгоритм вычисления во внутренних точках области распределенных и интегральных характеристик, неопределяемых ранее определяемых из-за неоднозначности функции. Для производной потенциала  $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$  в (3.5), получено

однозначное представление, в дискретном виде выражаемое через диполи с векторными интенсивностями

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(x, y, t)}{\partial t} = & \sum_{j=1}^M \{ \vec{D}_j \tilde{V}_j(x, y) \} + \sum_p \{ \vec{d}_p \tilde{V}_p(x, y) \} - \\ & - \sum_p \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i^p \vec{V}_i(x, y, x_i^p(t), y_i^p(t)) \bullet \vec{W}(x_i^p(t), y_i^p(t), t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Алгоритм вычисления  $\varphi = \text{Re } \Phi$  и  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{Re } \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ , использован при создании

автоматизированной программно-моделирующей системы (ПМС) для эколого-аэрационной экспертизы проектов массивов городской застройки или системы сооружений промышленных зон [2,7-13].

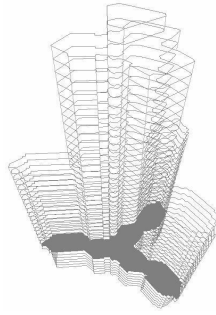
## 5. Результаты вычислительного эксперимента

При проведении проектных работ, важными являются не только интегральные, но и мгновенные распределенные нагрузки на элементы конструкций и сооружений [14]. Так, для реального высотного строения (Рис.5.1) разработана модель ее конструкции (Рис.5.2). Для верификации модели было проведено моделирование аэрационных процессов вблизи нового высотного дома в Киеве, массив «Осокорки». В рамках вычислительного эксперимента для дома были получены распределенные и интегральные нагрузки на здание на нескольких уровнях (этажах). Для заданного направления ветра представлены распределенные нагрузки на контуре сооружения (Рис.5.3). Результаты продувки данного высотного здания в аэродинамической трубе ТАД-2 (аэродинамического комплекса Национального авиационного университета), любезно предоставленные кафедрой аэродинамики и трубных

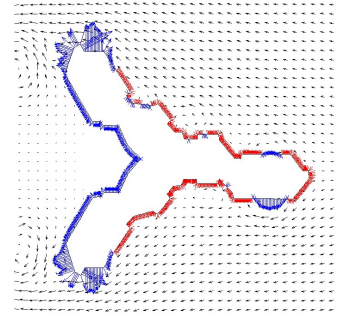
испытаний, продемонстрировали не более чем 20% отклонение от результатов данного вычислительного эксперимента.



*Рис.5.1.  
Высотный дом, массив  
Осокорки, г. Киев*



*Рис.5.2.  
Модель высотного дома*

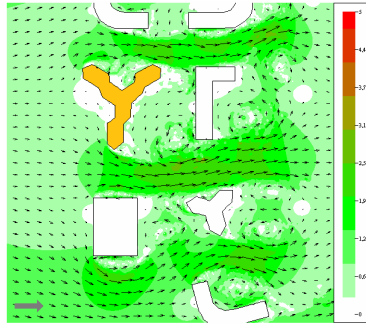


*Рис.5.3.  
Этюры распределенных  
нормальных нагрузок на  
контур высотного дома на  
высоте до 30 метров.*

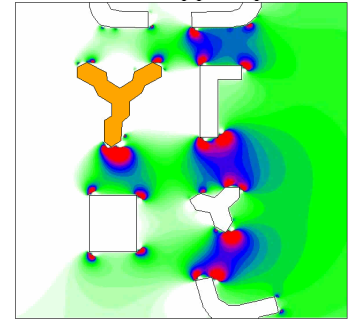
Возможности ПМС позволяют моделировать аэрационные процессы - движение воздушных масс во внешней части целого комплекса высотных сооружений, составляющих городскую застройку или промышленную зону (Рис.5.4). Прогнозируется влияние интерференции сооружений на проявления экстремального аэродинамического воздействия на прилегающие территории.



*Рис.5.4  
Массив городской  
застройки «Осокорки»,  
г. Киев*



*Рис.5.5.  
Прогноз влияния аэродинами-  
ческой интерференции на  
интенсивность порывов ветра  
между строениями.*



*Рис.5.6.  
Выявление зон  
экстремального  
аэродинамического  
воздействия.*

Пример выделения экстремальных зон в территориальном комплексе высотных сооружений, составляющих городскую застройку или промышленную зону (I-зона застойности и II-зона дискомфорта ускорения ветра), при доминирующих направлениях ветра представлен на Рис.5.7-Рис.5.8.

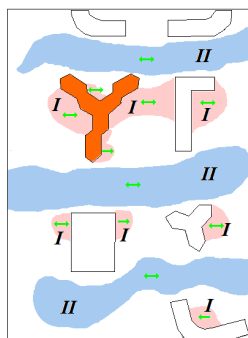


Рис.5.7.

Экстримальные зоны  
для восточного и западного  
ветра.

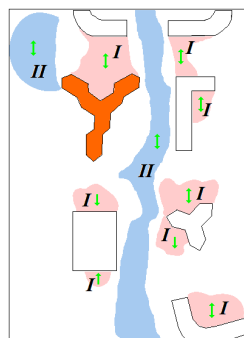


Рис.5.8.

Экстримальные зоны  
для северного и южного  
ветра.

Результаты моделирования (с помощью ПМС) эколого-аэрационных процессов в массивах разноэтажной застройки позволили выявить существенное влияние аэродинамической интерференции на распределение давлений вне сооружений. На Рис.5.9-Рис.5.10 представлено поле мгновенных распределенных кинематических и динамических характеристик в вертикальном сечении системы разновысотных строений.

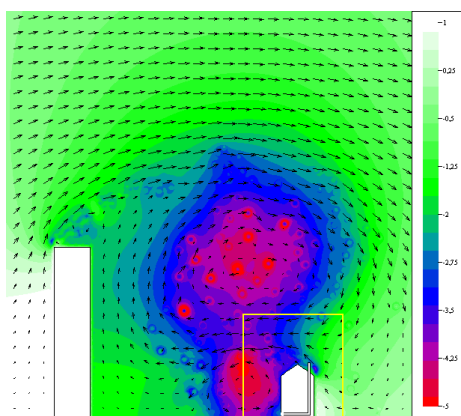


Рис.5.9.

Распределение давления, вызванное  
вихревой структурой за высотным  
строением.

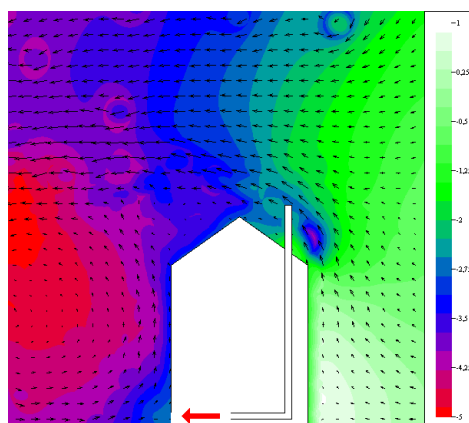


Рис.5.10.

Условия возникновения реверсного  
режима.

Анализ результатов моделирования показал, что расположение высотного сооружения в массиве малоэтажной застройки может приводить к существенному изменению мгновенных распределенных кинематических и динамических характеристик над малоэтажными строениями [2,10].

Особую опасность данный эффект представляет для функционирования вентиляционных коммуникаций в строениях с индивидуальными системами отопления (и газовыми колонками). На Рис.5.9 и Рис.5.10 видно, что периодическое формирование крупномасштабного вихря за высотным

сооружением, и его эволюция над малоэтажными строениями, приводит к достаточно протяженному во времени изменению поля давления вне строений так, что перепад давления в системе естественно – вытяжной вентиляции способен вызвать реверсный режим ее работы (Рис.5.10), что представляет значительную опасность для систем индивидуального (газового) отопления.

Подобный реверсный режим возможен при произвольном размещении высотных сооружений вблизи малоэтажных, независимо от конструкций обеих сооружений. При направлении ветра от высотного дома к малоэтажному реверсный режим является периодическим (с периодом схода вихря, от десятка секунд до нескольких минут), что может составлять до 50% времени всего периода. Предполагается, что данный эффект является причиной «эффекта запираания» в вентиляционных коммуникациях, что вызывает тушение горелок и, как следствие, «необъяснимых» взрывов и пожаров в малоэтажных жилых сооружениях расположенных вблизи высотных строений и оснащенных индивидуальными системами отопления или газовыми колонками..

## **6. Выводы**

Разработан комплекс математических моделей, являющихся ядром программно-моделирующей системы (ПМС).

Технические возможности ПМС позволяют выполнить:

Прогноз опасных аэрационных и аэродинамических процессов;

Прогноз изменений структуры ветровых потоков под воздействием высотных сооружений;

Прогноз эволюции вихревых потоков и вихревых зон;

Выявление эффектов аэродинамической интерференции конструкций и сооружений;

Выявление зон в градостроительных территориях с опасно повышенным аэродинамическим влиянием на сооружения;

Прогноз изменений аэрации территории под воздействием нового высотного сооружения;

Определение распределенных и интегральных нагрузок на элементы конструкций и сооружений;

Определение мгновенных и усредненных кинематических и динамических характеристик, определяющих аэродинамическую нагрузку при аэрационных процессах в зонах застройки;

Выявление опасных эколого-аэрационных процессов;

Выявление процессов переноса загрязнений атмосферным воздухом;

Выделение экстремальных и опасных эколого-аэрационных зон в городской застройке;

Прогноз последствий эволюции зон накопления экологически опасных веществ на территории (города или промзоны)

Выявление причин и прогноз последствий аэрационных процессов, вызывающих опасность в аэрационном, экологическом и динамическом смысле.

Показано, что распределенные и интегральные аэродинамические характеристики зависят, как от формы обтекаемых строений, так и от их относительных размеров и размещения. Появление в массиве застройки



сооружения, превосходящего все остальные по своим размерам, вследствие эффекта аэродинамической интерференции, способно изменить распределение полей скоростей и давления вне строений, изменить структуру аэрационных процессов над прилежащими территориями и породить явления нарушающие работу естественно-вытяжных вентиляционных систем в малоэтажных строениях.

С помощью ПМС выявлена принципиальная возможность нарушения «тяговых» характеристик в вентиляционных коммуникациях, что представляет опасность для малоэтажных строений с индивидуальными системами отопления или водонагревательными газовыми колонками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наконечный О.Г., Трофимчук О.М., Трофимова І.В., Черній Д.І. Моделювання та аналіз глобальних біосферних процесів // Київ: ВПЦ «Київський університет» – 2002, 92с.
2. А.Д.Головенко, С.О.Довгий, В.В.Єфімчук, І.А.Клименкова, Д.І Черній Автоматизована програмно-моделююча система прогнозування аераційних та аеродинамічних процесів поблизу висотних споруд. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Нові технології в будівництві», Тема: «Надійність та безпека висотних будинків і споруд», 28-29 травня 2009р., Київ, НДІБВ,-с.81-84.
3. Белоцерковский С.М., Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел.- М.:Наука,-1988,-232с.
4. Гутников В.А., Кирякин В.Ю., Лифанов И.К., Сетуха А.В. Математическое моделирование аэродинамики городской застройки.-М.:Пасва,-2002,-244с.
5. Довгий С.А., Лифанов И.К. Методы решения интегральных уравнений. Теория и приложения.- К.: Наукова думка, 2002. – 344с.
6. Черний Д.И. Метод и алгоритм вычисления поля давления при использовании МДО // Труды XIII Международного симпозиума МДОЗМФ-2007, Харьков-Херсон-2007, С.319-322.
7. Витько В.П., Кондратенко О.В., Черній Д.І. Информационно – аналитическая система прогноза и анализа рисков воздействия интенсивных атмосферных вихревых структур типа смерч/торнадо на экологически опасные объекты // Abstract Book of International conference “Problems of Decision Making under Uncertainties” (PDMU-2003), September 8-12, Kyiv-Alushta 2003, p.171-172.
8. Головенко А.Д., Довгий С.А., Гаркуша В.И., Черний Д.И. Программно-моделирующая система для эколого-аэрационной экспертизы промышленных зон и сооружений. // Труды XIII Международного симпозиума МДОЗМФ-2007, Харьков-Херсон-2007, С.117-120.
9. Головенко А.Д., Клименкова, И.А. Черний Д.И. Математическое моделирование опасных аэрационных процессов в массивах разновысотной застройки // Труды XIV Международного симпозиума МДОЗМФ-2009, Харьков-Херсон-2009, с.67-70.

10. Головенко А.Д., Довгий С.О., Клименкова І.О. Черній Д.І. Виявлення небезпечних наслідків прийняття необґрунтованих рішень при розробці містобудівельних проектів та проектів промислових зон // International Workshop “PROBLEMS OF DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTIES” (PDMU-2009), Abstracts, April 27-30, 2009, Skhidnytsia, - с.193-194.
11. Черний Д.И, Довгий С.О., Головенко А.Д. Особенности моделирования аэродинамики высотной застройки и строительных конструкций // Труды XII Международного симпозиума МДОЗМФ’2005, г. Херсон-2005, С.375-377.
12. Черній Д.І., Головенко А.Д. Технологія експрес-прогнозу нестационарних нелінійних аераційних та гідрологічних процесів // International Workshop “PROBLEMS OF DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTIES” (PDMU-2008), Abstracts, September 22-27, 2008, Crimea (Novy Svit),Ukraine, pp.127-128.
13. Головенко А.Д., Довгий С.А., Клименкова И.А., Черний Д.И. Новые технологии обеспечения автоматизированной эколого-аэрационной экспертизы проектов массивов городской застройки и промышленных зон. // Праці 8 Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях, 7-11 вересня 2009, с. Рибаче (Крим), Україна, с. 359-367.
14. Рекомендации по оценке аэрации территории в жилой застройке г. Москвы./Отв. ред. Лифанов И.К.,-М.: «Макс-Пресс», 2006,-160с.

---

Надійшла у першій редакції 21.10.2009, в останній - 15.01.2010.

© А. Д. Головенко, С. А. Довгий, И. А. Клименкова, Д. И. Черний, 2010