

MURAKKAB GEOMETRIYA SHAROITLARIDA HAVO OQIMI VA ZARARLI MODDALARNING TARQALISHINI MODELLASHTIRISH

Daler Sharipov,

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqolada murakkab shahar geometriyasi sharoitida havo oqimi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini modellashtirish uchun matematik model taqdim etilgan. Shahar qurilishining arxitektura xususiyatlari ta'sirini hisobga olgan holda ko'cha kanyonlarida havo oqimlari va ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasining xatti-harakati o'rganilgan. Binolarning balandligi va kengligi nisbatining turbulensiya hamda zarrachalarning cho'kish jarayoniga ta'siri tahlil qilingan. Cheklangan fazoda havo tezligi va bosim maydonlarini hisoblash uchun Navye–Stoks tenglamalaridan foydalanish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Modelning boshlang'ich va chegaraviy shartlarini aniqlashda OpenWeatherMap tizimidan olingan shamol ma'lumotlari kabi haqiqiy meteorologik omillarning ta'siri hisobga olingan. Tadqiqot natijalari tor ko'chalar va baland binolar kabi murakkab geometrik obyektlar ifloslantiruvchi moddalar tarqalish samaradorligiga sezilarli darajada ta'sir qilishini ko'rsatdi. Masalaning sonli yechimi chekli ayirmalar yoki chekli elementlar usullari yordamida shakllantirilgan bo'lib, bu notekis diskretlash sharoitida hisoblashlarning barqarorligini ta'minlaydi. Haqiqiy shahar muhitida ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini oldindan bashorat qilish imkonini beruvchi kompyuter simulyatsiyasi ishlab chiqilgan. Olingan modeldan ekologik xavfsizlikni baholash va shahar infratuzilmasini rejalashtirishda foydalanish asoslab berilgan. Shuningdek, matematik tenglamalar va hisoblash algoritmlarini o'z ichiga olgan metodologiyaning batafsil tavsifi keltirilgan.

Kalit so'zlar: konsentratsiya, atmosfera, adveksiya-diffuziya, Navye–Stoks tenglamalari, ifloslantiruvchi moddalar tarqalishi, shahar geometriyasi, turbulensiya, sonli modellashtirish, ko'cha kanyonlari, havo oqimi.

Аннотация. В данной статье представлен математический модель для описания распространения воздушных потоков и загрязняющих веществ в условиях сложной городской геометрии. Исследовано поведение воздушных потоков и концентрации загрязняющих веществ в уличных каньонах с учётом влияния архитектурных особенностей городской застройки. Проанализировано влияние соотношения высоты и ширины зданий на процессы турбулентности и оседания частиц. Рассмотрены возможности применения уравнений Навье–Стокса для расчёта полей скорости и давления воздуха в ограниченном пространстве. При определении начальных и граничных условий модели учтено влияние реальных метеорологических факторов, таких как данные о ветре, полученные из системы OpenWeatherMap. Результаты исследования показали, что сложные геометрические объекты, такие как узкие улицы и высокие здания, существенно влияют на эффективность распространения загрязняющих веществ. Численное решение задачи реализовано с использованием методов конечных разностей или конечных элементов, что обеспечивает устойчивость вычислений при неравномерной дискретизации. Разработана компьютерная симуляция, позволяющая прогнозировать распространение загрязняющих веществ в реальной городской среде. Обосновано использование полученной модели для оценки экологической безопасности и планирования городской инфраструктуры. Также приведено подробное описание методологии, включающей математические уравнения и вычислительные алгоритмы.

Ключевые слова: концентрация, атмосфера, адвекция-диффузия, уравнения Навье–Стокса, распространение загрязняющих веществ, городская геометрия, турбулентность, численное моделирование, уличные каньоны, воздушный поток.

Abstract. This article presents a mathematical model for describing the dispersion of airflow and pollutants in complex urban geometric conditions. The behavior of airflow and pollutant concentration in street canyons is studied, taking into account the influence of architectural features of urban development. The impact of the building height-to-width ratio on turbulence processes and particle

deposition is analyzed. The applicability of the Navier–Stokes equations for calculating air velocity and pressure fields in a confined space is considered. In defining the initial and boundary conditions of the model, the influence of real meteorological factors, such as wind data obtained from the OpenWeatherMap system, is taken into account. The results of the study show that complex geometric objects such as narrow streets and high-rise buildings significantly affect the efficiency of pollutant dispersion. The numerical solution of the problem is implemented using finite difference or finite element methods, ensuring computational stability under non-uniform discretization. A computer simulation has been developed to predict pollutant dispersion in a real urban environment. The use of the proposed model for environmental safety assessment and urban infrastructure planning is substantiated. A detailed description of the methodology, including mathematical equations and computational algorithms, is also provided.

Keywords: concentration, atmosphere, advection-diffusion, Navier–Stokes equations, pollutant dispersion, urban geometry, turbulence, numerical modeling, street canyons, airflow.

Kirish. Murakkab shahar muhitlarida, xususan, ko‘cha kanyonlarida ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini o‘rganish atmosfera havosi sifatini boshqarishning muhim masalalaridan biridir. Binolar va boshqa to‘siqlar ta‘sirida yuzaga keladigan turbulent havo oqimlari bunday hududlarda ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasini bashorat qilishni murakkablashtiradi. Ko‘cha kanyonlari va boshqa murakkab shahar geometriyalarida turbulent havo oqimlari hamda moddalarning ko‘chish jarayonlarini modellashtirish Navye–Stoks tenglamalari va adveksiya-diffuziya nazariyasiga asoslangan kompleks yondashuvni talab qiladi. Mazkur yo‘nalishning dolzarbligi shahar muhitida atmosfera ifloslanishini modellashtirish bo‘yicha turli sonli usullar, fizik modellar va yondashuvlardan foydalangan holda olib borilgan ko‘plab nazariy hamda amaliy tadqiqotlar bilan tasdiqlangan.

Adabiyotlar tahlili. So‘nggi yillarda murakkab shahar geometriyasida havo oqimi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini modellashtirish bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar olib borilgan. Asosiy yondashuvlar Navye–Stoks va adveksiya–diffuziya tenglamalariga asoslangan CFD (Computational Fluid Dynamics) usullaridan iborat. Ferziger va Hirsch ishlari oqimlarni sonli modellashtirishning nazariy asoslarini yaratgan [1–2]. Chekli hajmlar va chekli elementlar usullari murakkab geometrik hududlarda samarali yechim berishi bilan ajralib turadi [4]. Weil va boshqalar atmosfera chegara qatlamida ifloslanish tarqalishini o‘rganib, shamol va diffuziyaning muhim rolini ko‘rsatgan [5]. Turbulent oqimlarni modellashtirishda RANS, LES va DNS yondashuvlari keng qo‘llanilib, ularning har biri aniqlik va hisoblash resurslari bo‘yicha farqlanadi [6–10]. So‘nggi tadqiqotlarda real meteorologik ma‘lumotlardan foydalanish model aniqligini oshirishi ta‘kidlangan [13]. Umuman, adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, shahar muhitida ifloslanish tarqalishini aniq baholash uchun Navye–Stoks asosidagi sonli modellar va turbulentlik yondashuvlarining integratsiyasi eng samarali hisoblanadi.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda Navye–Stoks va adveksiya–diffuziya tenglamalariga asoslangan matematik model qo‘llanildi. Havo oqimi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishi turbulent siqilmaydigan oqim sifatida qaraldi. Masalani yechishda chekli ayirmalar va chekli elementlar usullari yordamida sonli diskretlashtirish amalga

oshirildi. Turbulensiya effektlari RANS yondashuvi orqali hisobga olindi. Boshlang'ich va chegaraviy shartlar real meteorologik ma'lumotlar (shamol tezligi va yo'nalishi) asosida berildi. Hisoblashlar vaqt bo'yicha bosqichma-bosqich bajarilib, natijalar konsentratsiya, tezlik va bosim maydonlari orqali tahlil qilindi.

Tahlillar va natijalar. Navye–Stoks tenglamalari shahar hududlaridagi havo oqimlarini sonli modellashtirishning asosini tashkil etadi. Ushbu tenglamalarni diskretlashtirish chekli hajmlar, chekli ayirmalar va chekli elementlar usullari yordamida samarali amalga oshirilishi mumkin [1–3]. Bir qator fundamental tadqiqotlarda batafsil tahlil qilingan chekli hajmlar usuli bosim va tezlikning keskin o'zgarishlari kuzatiladigan masalalarni yechishda yuqori barqarorlikni namoyon etgan [4,5]. Ko'cha kanyonlarida aralashmalar tarqalishiga ta'sir etuvchi asosiy omillardan biri bo'lgan turbulensiya turli yondashuvlar asosida faol o'rganilmoqda. Ular Reynolds bo'yicha o'rtachalashtirilgan Navye–Stoks modellari (RANS), to'g'ridan-to'g'ri sonli modellashtirish (DNS) va yirik girdoblarni modellashtirish (LES) usullarini o'z ichiga oladi. O'rtachalashtirilgan modellar barqaror va hisoblash nuqtai nazaridan iqtisodiy yechimlarni olish imkonini beradi [6,7], biroq ular turbulensiya parametrlarini, ayniqsa devorlar yaqinidagi oqimlarni to'g'ri hisobga olishni talab qiladi. Bu vazifa Spalart–Allmaras turidagi turbulensiya modellari yordamida amalga oshiriladi [8]. DNS va LES usullaridan foydalangan holda o'tkazilgan tadqiqotlar murakkab turbulent tuzilmalarni qayta tiklashda yuqori aniqlikni namoyish etgan [9,10]. Ushbu usullar katta hisoblash resurslarini talab qilsa-da, ular shahar obyektlari yaqinidagi turbulent aralashish jarayonlari dinamikasini chuqurroq tushunish imkonini beradi. Chegaraviy qatlam rivojlanishini o'rganishga bag'ishlangan yuqori aniqlikdagi DNS tadqiqotlari turbulent girdoblarning tuzilishi va masshtablarini aniqlashga katta hissa qo'shgan [11,12]. Shunday qilib, zamonaviy tadqiqotlar atmosfera ifloslanishini modellashtirishda ilg'or sonli usullarni, ko'p masshtabli turbulensiya modellarini hamda real vaqt rejimidagi meteorologik ma'lumotlarni birlashtiruvchi integrallashgan yondashuvni namoyon etmoqda. Bu esa shahar muhiti xususiyatlarini hisobga oluvchi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishining fazoviy hamda vaqt bo'yicha o'zgarishini aniq bashorat qila oladigan ishonchli modellarni ishlab chiqish uchun mustahkam asos yaratadi. Murakkab geometriyaga ega hududlarda, masalan, shahar ko'cha kanyonlarida, turbulent siqilmaydigan havo oqimida ifloslantiruvchi moddalarning tarqalishi differensial tenglamalarga asoslangan matematik modellar yordamida tavsiflanadi. Ushbu modellar havo oqimi, bosim taqsimoti va ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasini hisoblash uchun Navye–Stoks hamda adveksiya–diffuziya tenglamalarini o'z ichiga oladi. Adveksiya–diffuziya tenglamasi ifloslantiruvchi moddalarning havo harakati, turbulent yoki molekulyar diffuziya va emissiya manbalari ta'sirida ko'chishini tavsiflaydi. Adveksiya–diffuziya tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S_C \quad (1)$$

Bu yerda:

- C — ifloslantiruvchi moddaning konsentratsiyasi (kg/m^3);
- t — vaqt (s);
- x, y, z — fazoviy koordinatalar (m);
- u, v, w — mos ravishda x, y va z yoʻnalishlaridagi shamol tezliklari (m/s);
- D — diffuziya koeffitsienti (m^2/s);
- S_C — ifloslantiruvchi modda manbai ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$).

Tenglamaning chap qismi modda konsentratsiyasining vaqt boʻyicha oʻzgarishi va havo oqimi taʼsiridagi koʻchishini (adveksiyani) ifodalaydi. Oʻng qismi esa diffuziya jarayoni hamda ifloslantiruvchi moddalar manbalari taʼsirini hisobga oladi.

Ifloslantiruvchi manbaning taʼsirini aniqroq tavsiflash uchun Dirak delta funksiyasidan foydalaniladi:

$$S_C = S \delta(x - x_S, y - y_S, z - z_S) \delta(t - t_S)$$

bu yerda (x_S, y_S, z_S) — manbaning koordinatalari, t_S — manbaning ishga tushish vaqti hisoblanadi.

Navye–Stoks tenglamalari

Havo oqimi tezliklarini hisoblashda Nave–Stoks tenglamalari asosiy ahamiyatga ega. Ushbu tenglamalar bosim gradienti, inersiya kuchlari va qovushqoqlik taʼsirini hisobga olgan holda suyuqlik yoki gaz harakatini tavsiflaydi.

Tenglamalarning umumiy koʻrinishi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_u;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_v;$$

$$1. \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_w$$

Bu yerda:

- ρ — havo zichligi;
- P — bosim;
- ν — kinematik qovushqoqlik koeffitsienti;
- F_u, F_v, F_w — tashqi kuchlar taʼsiri.

2.

Tenglamalarning chap qismi vaqt bo'yicha tezlik o'zgarishi va konvektiv tezlanishni ifodalaydi. O'ng qismi esa bosim gradienti ta'siri, qovushqoqlik kuchlari va tashqi ta'sirlarni hisobga oladi.

Uzluksizlik tenglamasi

Havo oqimining siqilmasligini ta'minlash uchun uzluksizlik tenglamasidan foydalaniladi:

$$3. \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

shbu tenglama havo zichligi doimiy ekanligini va oqim hajmi saqlanishini ko'rsatadi.

4. Bosim uchun Puasson tenglamasi

Bosim taqsimotini aniqlash uchun Puasson tenglamasidan foydalaniladi. Bu tenglama bosimning fazoviy taqsimotini tezlik maydoni bilan bog'laydi va siqilmaslik sharti bajarilishini ta'minlaydi.

Boshlang'ich va chegaraviy shartlar

Boshlang'ich tezlik:

$$5. \quad \begin{aligned} u(x, y, z, 0) &= u_0(x, y, z), \\ v(x, y, z, 0) &= v_0(x, y, z), \\ w(x, y, z, 0) &= w_0(x, y, z) \end{aligned}$$

Boshlang'ich bosim va konsentratsiya:

$$\begin{aligned} P(x, y, z, 0) &= P_0(x, y, z); \\ C(x, y, z, 0) &= C_0(x, y, z) \end{aligned}$$

6. Hududga kiruvchi havo oqimi uchun chegaraviy shartlar::

$$7. \quad u(0, y, z, t) = u_{\text{inlet}}(t), \quad v(0, y, z, t) = v_{\text{inlet}}(t), \quad w(0, y, z, t) = w_{\text{inlet}}(t)$$

Ushbu ma'lumotlar haqiqiy vaqt rejimidagi shamol tezligi ma'lumotlaridan (masalan, OpenWeatherMap ma'lumotlar bazasidan) olinadi.

Hududdan chiquvchi oqim uchun Neyman tipidagi chegaraviy shartlar qabul qilinadi. Ular chegarada oqim barqarorligini ta'minlaydi.

Murakkab geometriya ta'siri. Shahar ko'chalari, binolar orasidagi tor yo'laklar kabi murakkab geometrik ob'ektlar havo oqimi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Binolar havo harakatini to'sib, turbulent girdoblarni hosil qiladi. Bu esa Nave–Stoks tenglamalaridagi konvektiv tezlanishlar va qovushqoqlik kuchlarining murakkablashishiga olib keladi. Turbulentlik darajasi oshgan sari diffuziya koeffitsienti ham ortadi. Natijada moddalarning tarqalish tezligi o'zgaradi, ba'zi hollarda esa tor hududlarda konsentratsiyaning to'planib qolishi kuzatiladi.

Murakkab shahar muhitlarida Navye–Stoks tenglamalarini yechish notekis geometrik shakllar va dinamik havo oqimlari ta'siri sababli ilg'or sonli usullarni qo'llashni

talab qiladi. Shu boisdan chekli ayirmalar usuli yoki chekli elementlar usuli kabi zamonaviy hisoblash yondashuvlaridan foydalaniladi. Ushbu usullar murakkab geometriyaga ega hududlarda havo oqimi va ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini yuqori aniqlik bilan modellashtirish imkonini beradi.

Tadqiqotda qo'llanilgan matematik model Navye–Stoks va adveksiya–diffuziya tenglamalariga asoslangan bo'lib, ifloslantiruvchi moddalarning tarqalish jarayonini quyidagi omillarni hisobga olgan holda tavsiflaydi:

- adveksiya (havo oqimi bilan ko'chish);
- diffuziya (molekulyar va turbulent tarqalish);
- turbulensiya;
- bosim maydonining ta'siri.

Modelning aniqligini ta'minlash uchun boshlang'ich va chegaraviy shartlar ehtiyotkorlik bilan tanlangan. Jumladan, meteorologik ma'lumotlar va real vaqt rejimida olinadigan shamol parametrlaridan foydalanilgan. OpenWeatherMap (OWM) kabi manbalardan olingan ma'lumotlar modelning amaliy qiymatini oshiradi hamda real sharoitlarga yaqin natijalarni olish imkonini beradi.

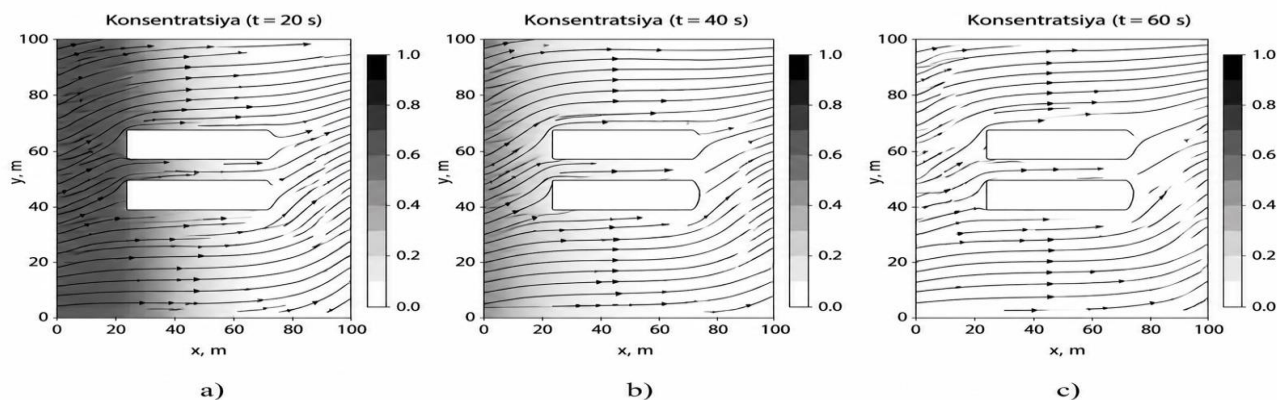
Murakkab geometriya mavjud bo'lgan hududlarda, masalan, baland binolar va tor ko'chalar oralig'ida, turbulensiya kuchayadi va havo oqimlarining tabiiy harakati sezilarli darajada o'zgaradi. Bunday sharoitlarda:

- girdobli oqimlar hosil bo'ladi;
- havo tezligi notekis taqsimlanadi;
- bosim maydonlarida keskin o'zgarishlar yuz beradi;
- ifloslantiruvchi moddalarning to'planishi ehtimoli ortadi.

Shu sababli hisoblash jarayonida barqaror va ishonchli natijalarni olish uchun maxsus sonli algoritmlar qo'llaniladi. Ushbu algoritmlar murakkab geometriya sharoitlarida ham modelning barqaror ishlashini va hisoblashlarning aniqligini ta'minlaydi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, real meteorologik ma'lumotlar bilan boyitilgan matematik model shahar hududlarida ifloslantiruvchi moddalar tarqalishini samarali prognoz qilish imkonini beradi. Bundan tashqari, model ekologik monitoring tizimlarini yaratish, shahar infratuzilmasini rejalashtirish va atmosfera havosi sifatini baholashda qo'llanilishi mumkin.

Yuqorida keltirilgan tenglamalar tizimi asosida hisoblash tajribalari o'tkazildi. Hisoblashlarda shamol tezligi, uning yo'nalishi va bosimning boshlang'ich qiymatlari OpenStreetMap ochiq ma'lumotlar bazasidan olindi [13].



1-rasmning (a, b, c) qismlarida shahar muhiti, xususan binolar bilan chegaralangan ko'cha kanyonlarida shamol ta'siri ostida zararli moddalarning tarqalishi matematik model asosida tahlil qilindi.

Hisoblashlar uchun maydonga kirish qismidagi shamol tezligi mos ravishda:

- 3 m/s;
- 0,7 m/s;
- 0,01 m/s

qiymatlarda qabul qilindi.

Bosim atmosfera bosimiga teng deb olindi.

Hisoblash sohasi quyidagicha belgilandi:

- $L_x = 100$ m;
- $L_y = 100$ m;
- $L_z = 40$ m.

Insonning nafas olish balandligiga mos ravishda hisoblash balandligi:

- $H = 2$ m

deb qabul qilindi.

Ifloslantiruvchi moddaning boshlang'ich konsentratsiyasi:

- $Q = 1000$ mg/m³
- qiymatida belgilandi.

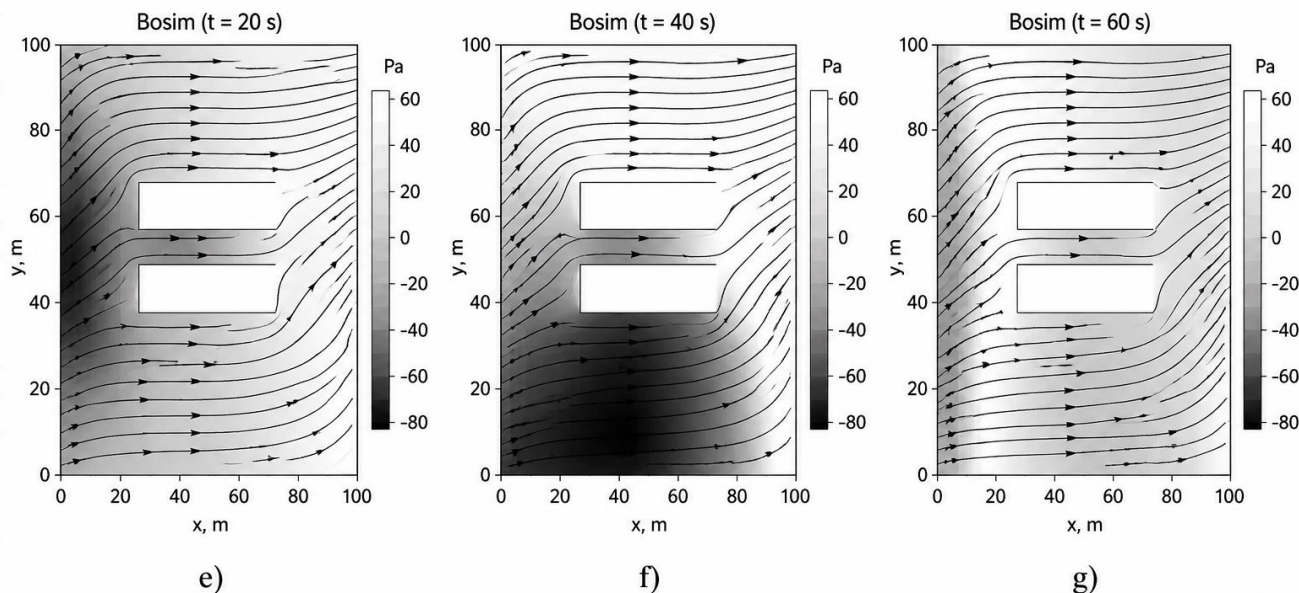
Zararli moddalar tarqalishining tahlili.

1-rasm (a) da hisoblashning dastlabki bosqichida ($t = 20$ s) zararli moddaning asosiy qismi manba atrofida yuqori konsentratsiyada saqlanib qolishi kuzatiladi.

1-rasm (b) da ($t = 40$ s) ifloslantiruvchi moddaning konsentratsiyasi sezilarli ravishda o'zgarganligi ko'rinadi. Shamol oqimi ta'sirida zararli moddalar binolar ustidan va ularning atrofi bo'ylab harakatlanishi kuzatiladi.

1-rasm (c) da vaqt o'tishi bilan zararli moddalar hisoblash sohasi bo'ylab kengroq tarqalishi va konsentratsiyaning asta-sekin kamayishi kuzatiladi. Bu holat shamol oqimi va turbulent diffuziyaning qo'shma ta'siri bilan izohlanadi.

Bosim maydonining taqsimlanishi



2-rasmning (e, f, g) qismlarida shamol ta'siri ostida hudud bo'ylab bosimning taqsimlanishi va uning vaqt bo'yicha o'zgarishi tasvirlangan.

Tahlil davomida:

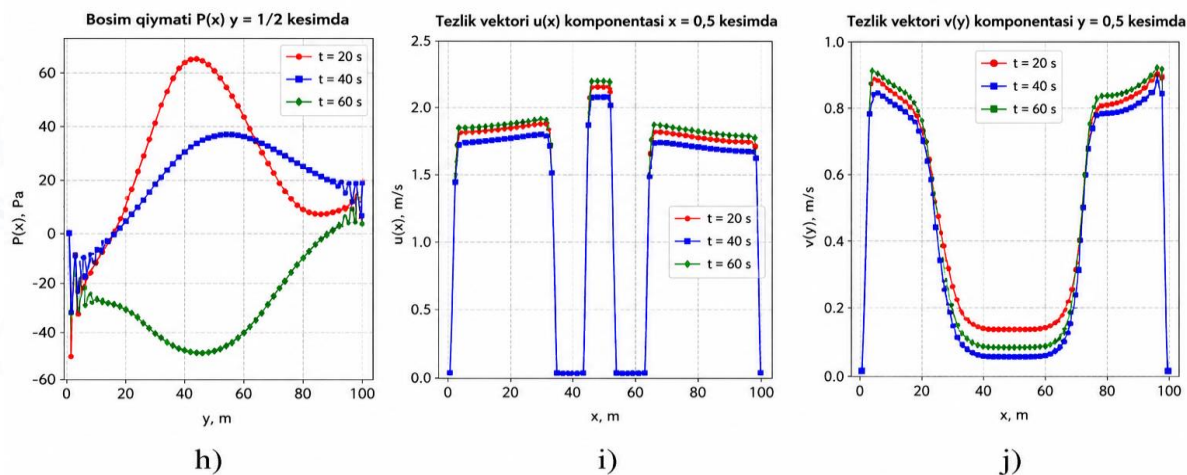
- $t = 20$ s;
- $t = 40$ s;
- $t = 60$ s

vaqt oralig'idagi havo oqimlari va bosim maydonining o'zgarishlari ko'rib chiqildi.

2-rasm (e) da $t = 20$ s vaqt momentida bosimning keskin o'zgarishi kuzatiladi. Bunday holat shamol oqimining binolar bilan o'zaro ta'siri natijasida yuzaga keladigan aerodinamik qarshilik bilan bog'liq.

Vaqt o'tishi bilan bosim maydoni barqarorlashib boradi, biroq binolar yaqinida yuqori va past bosimli zonalar saqlanib qoladi.

Tezlik komponentlarining tahlili



3-rasmning (h, i, j) qismlarida $t = 60$ s va $H = 20$ m balandlikda maksimal bosim tezligi komponentlarining yo'nalishi hamda gorizontol tezliklarning proyeksiyalari tahlil qilingan.

3-rasm (i) da vertikal tezlikning $x = 0,5$ m kesimidagi y o'qi bo'ylab taqsimlanishi ko'rsatilgan.

Barcha vaqt kesimlarida:

$$20 < y < 80$$

oraligida tezlikning keskin kamayishi kuzatiladi. Bu hudud binolar ta'sirida hosil bo'ladigan "shamol soyasi" zonasini ifodalaydi.

$t = 20$ s da vertikal tezlik deyarli o'zgarimas bo'lsa-da, turbulent zonalarda qisqa masofalarda keskin kamayadi.

$t = 40$ s va $t = 60$ s da esa binolar orasidagi tezlik profili barqarorlashadi va deyarli bir xil shaklni saqlab qoladi.

3-rasm (j) da gorizontol tezlikning $y = 0,5$ m kesimdagi taqsimlanishi keltirilgan.

$t = 20$ s da tezlik qiymatlari juda kichik va tartibsiz bo'lib, ayniqsa binolar orasida kuchli turbulensiya kuzatiladi.

$t = 40$ s va $t = 60$ s da gorizontol tezlik deyarli barqaror qiymatlarga ega bo'ladi hamda yon tomondagi to'siqlar ta'siriga qaramay oqimning umumiy yo'nalishi saqlanib qoladi.

Mazkur grafik tahlillar shamol oqimi dinamikasini chuqurroq tushunish imkonini beradi. Bosim va tezlik vektorlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi shamol rejimidagi nomutanosibliklarni, turbulensiyaning ta'sirini hamda to'siqlarning oqimga ko'rsatadigan ta'sirini aniqlashga yordam beradi.

O'tkazilgan tajribalar murakkab shahar geometriyasi sharoitida havo oqimi va zararli moddalarning qanday harakatlanishini, vaqt davomida qanday taqsimlanishini hamda qaysi omillar ta'sirida ma'lum hududlarda to'planib qolishini ko'rsatdi.

Hisoblash tajribalari natijalari quyidagilarni tasdiqladi: murakkab geometriya shamol tezligi komponentlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi; bosim maydonining notekis taqsimlanishiga sabab bo'ladi; ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasining hudud bo'yicha tarqalishini o'zgartiradi; ayrim hududlarda zararli moddalar to'planib qolishi mumkin. Shunday qilib, shahar qurilishining geometrik xususiyatlari atmosfera havosi sifati va ekologik xavfsizlikka sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi.

Xulosa. Ushbu maqolada shahar muhitida zararli moddalarning tarqalishini modellashtirish uchun matematik model ishlab chiqildi hamda ularning havo oqimi ta'siridagi harakatini o'rganish maqsadida sonli tajribalar o'tkazildi. Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, murakkab geometriyaga ega obyektlarning (masalan, binolarning) mavjudligi bosim taqsimoti va havo oqimi tezligiga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. Bu esa, o'z navbatida, ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasining hudud bo'ylab notekis taqsimlanishiga olib keladi.

Hisoblash natijalari vaqt o'tishi bilan zararli moddalar, ayniqsa shamol tezligi past bo'lgan hollarda, binolar orasida to'planib qolishi mumkinligini ko'rsatdi. Shuningdek, ifloslantiruvchi moddalarning tez tarqalishiga sabab bo'luvchi keskin bosim gradientlari aniqlangan.

Tadqiqot davomida olingan natijalar aerodinamik sharoitlar va geometrik xususiyatlar havo oqimi dinamikasi hamda ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasining shakllanishida muhim omil ekanligini tasdiqladi. Binolarning joylashuvi, ko'cha kanyonlarining shakli va shamol oqimining yo'nalishi atmosfera havosining ifloslanish darajasiga bevosita ta'sir ko'rsatishi aniqlandi.

Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki: murakkab geometriya shamol oqimi tuzilishini sezilarli ravishda o'zgartiradi; bosim maydonlarida lokal maksimum va minimumlar hosil bo'ladi; zararli moddalar ayrim hududlarda uzoq vaqt davomida saqlanib qolishi mumkin; shamol tezligi kamayganda ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasi ortadi; turbulent oqimlar moddalarning tarqalish xarakterini sezilarli darajada o'zgartiradi.

Tadqiqot natijalari asosida ishlab chiqilgan matematik model real vaqt rejimida ishlovchi ekologik monitoring tizimlarini yaratishda, shahar hududlarida atmosfera havosi sifatini baholashda hamda ifloslanish darajasini oldindan prognoz qilishda samarali vosita bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Bundan tashqari, mazkur modeldan: ekologik xavfsizlikni baholashda; shahar infratuzilmasini rejalashtirishda; sanoat korxonalarini joylashtirishda; atmosfera ifloslanishini monitoring qilish tizimlarini ishlab chiqishda; aqlli shahar (Smart City) konsepsiyalarini amalga oshirishda foydalanish mumkin.

Shunday qilib, tadqiqot natijalari murakkab shahar geometriyasida havo oqimi va zararli moddalar tarqalishini baholash uchun taklif etilgan matematik modelning samaradorligini tasdiqladi hamda uning amaliy qo'llanish istiqbollari mavjudligini ko'rsatdi. Olingan natijalar kelajakda atmosfera havosining ifloslanishini prognoz qilish va ekologik xavflarni kamaytirishga qaratilgan yanada mukammal modellarni ishlab chiqish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Ferziger J.H., Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Springer, 2002. 423 p.
2. Hirsch C. *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Elsevier, 2007.
3. Ravshanov N., Nazarov Sh., Boborakhimov B. Modeling the process of pollutant spread in the atmosphere with account for the capture of particles by vegetation elements // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024. Vol. 45, No. 3. P. 1213–1226.
4. LeVeque R.J. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 558 p.
5. Weil J.C., Sykes R.I., Venkatram A. Boundary layer dispersion modeling // *Boundary-Layer Meteorology*. 2008. Vol. 128, No. 2. P. 219–236. DOI: 10.1007/s10546-008-9278-7.
6. Durbin P.A. Some recent developments in turbulence closure modeling // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 50, No. 1. P. 77–103. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122316-045020.

7. Berselli L.C., Iliescu T., Layton W.J. *Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows*. Berlin: Springer, 2006. 348 p.
8. Spalart P., Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // *Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. AIAA Paper No. AIAA-92-0439. Reno, Nevada, USA, 1992.
9. Moin P., Mahesh K. Direct numerical simulation: A tool in turbulence research // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 30, No. 1. P. 539–578.
10. Schlatter P., Örlü R. Assessment of direct numerical simulation data of turbulent boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 659. P. 116–126. DOI: 10.1017/S0022112010003113.
11. Vinuesa R., Bobke A., Almeida H., Schlatter P. Turbulent boundary layers around wing sections up to $Re_c = 1,000,000$ // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018. Vol. 72. P. 86–99.
12. Sayidova N.S. Numerical modeling of natural and mixed convection in a confined space // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024. Vol. 45, No. 7. P. 3391–3400.
13. Shafiev T., Bakaev I., Eshankulov Kh., Nazarov Sh. Creation of an information and analytical database based on an intelligent analysis system from online services for monitoring and forecasting the environmental condition of industrial areas // *Proceedings of SPIE*. 2025. Vol. 13651. P. 216–221.
14. Ravshanov N., Tashtemirova N., Eshboyeva N., Boltayev Sh., Sharipov D.K. Modeling air flow and dispersion of harmful substances in conditions of complex geometry // *Proc. SPIE 13803, Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025)*. – 2025. – 138032F. – DOI: 10.1117/12.3078071.

