Научная статья

УДК 504.062.2:628.51

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ AERMOD И CFD ПРИ ОЦЕНКЕ РАССЕИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ В ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Дахова Екатерина Валерьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, Тихоокеанский государственный университет им. М.П. Даниловского, Россия, Хабаровск, dakhova_e@mail.ru

Аннотация. Размещение промышленных предприятий в условиях плотной городской застройки создает сложную трехмерную аэродинамическую среду, обусловливающую необходимость строгого разграничения сфер применения различных классов моделей рассеивания. Цель исследования состоит в количественном определении геометрических и физических границ применимости регуляторной гауссовой системы AERMOD и методов вычислительной гидродинамики (CFD) при оценке загрязнения атмосферного воздуха в условиях городского каньона. Объектом моделирования выступила дымовая труба котельной, функционирующая в окружении массивной застройки. Расчеты выполнены с использованием алгоритма PRIME в AERMOD и путем численного решения уравнений Навье—Стокса (CFD, модель турбулентности RSM) с проведением верификации и проверки независимости результатов от расчетной сетки. Выявлено, что параметризация аэродинамического подпора в AERMOD обеспечивает удовлетворительное согласование результатов с CFD-моделированием исключительно при отношении высоты устья трубы к высоте доминирующего здания K_h >1,15. Снижение данного отношения ниже указанного порога приводит к потере адекватности гауссова приближения, выражающейся в критическом занижении пиковых приземных концентраций и ошибочной локализации зон максимального загрязнения вследствие недостаточного учета сложных вихревых

структур. На основе полученных данных сформулированы обоснованные критерии выбора расчетного инструмента: применение AERMOD допустимо на этапах предварительной оценки рисков, тогда как проектирование санитарно-защитных зон в условиях соизмеримых высот источников и зданий требует обязательного перехода к микромасштабному гидродинамическому моделированию. Практическая значимость работы заключается в разработке методического подхода к обоснованию выбора программного обеспечения для проведения расчетов рассеивания при государственной экологической экспертизе.

Ключевые слова: рассеивание выбросов; AERMOD; вычислительная гидродинамика; аэродинамический подпор; городская застройка; неопределённость моделирования.

Original article

LIMITS OF APPLICABILITY OF AERMOD AND CFD IN ASSESSING THE DISPERSION OF INDUSTRIAL EMISSIONS IN DENSE URBAN AREAS

Dakhova Ekaterina Valerevna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Pacific National University named after M.P. Danilovsky, Khabarovsk, Russia, dakhova_e@mail.ru

Abstract. The integration of industrial plants into dense urban fabric creates a complex three-dimensional aerodynamic environment, necessitating strict delineation of the applicability of different classes of dispersion models. The objective of this study is to quantitatively establish the geometric and physical applicability limits of the AERMOD Gaussian regulatory system and computational fluid dynamics (CFD) methods for assessing air pollution in an urban canyon. The modeled object was a boiler house chimney operating in a densely populated area. The calculations were performed using the PRIME algorithm (AERMOD) and the numerical solution of the Navier-Stokes equations (CFD, RSM turbulence model) with strict adherence to

verification protocols and grid independence. It was found that the aerodynamic head parameterization in AERMOD provides satisfactory agreement with CFD predictions only when the ratio of the chimney mouth height to the height of the dominant building is Kh > 1.15. Exceeding this threshold leads to a loss of the Gaussian approximation's adequacy, resulting in a critical underestimation of peak ground-level concentrations and erroneous localization of zones of maximum pollution due to the neglect of vortex sheaths. Based on the obtained data, substantiated criteria for selecting a calculation tool were formulated: the use of AERMOD is acceptable at the preliminary risk assessment stages, whereas the design of sanitary protection zones in conditions of comparable source and building heights requires a mandatory transition to microscale hydrodynamic modeling. The practical significance of this work lies in the development of a methodological approach to substantiating the choice of software for dispersion calculations during state environmental assessments.

Keywords: emission dispersion; AERMOD; computational fluid dynamics; building downwash; urban built environment; modeling uncertainty.

Введение. Современная урбанизация неизбежно приводит к формированию промышленных зон, интегрированных в плотную городскую ткань. В таких условиях перенос загрязняющих веществ существенно отличается от процессов, характерных для открытой местности, вследствие возникновения сложных трехмерных вихревых течений [1]. Атмосферный поток, сталкиваясь с массивными строительными конструкциями, формирует зоны отрыва, рециркуляции и аэродинамические тени, которые кардинально меняют картину приземного загрязнения. Традиционные подходы к нормированию качества воздуха зачастую опираются на упрощенные физические модели, что требует уточнения области применимости используемых инструментов прогнозирования. Исследователям и практикам приходится искать баланс между строгостью нормативных требований и физической достоверностью получаемых результатов, поскольку ошибки на этапе расчета рассеивания выбросов ведут к

некорректному проектированию санитарно-защитных зон [2-4].

В международной и отечественной практике экологического контроля широко применяются гауссовские модели шлейфа, к которым относится регуляторная система AERMOD [5-7]. Данный инструмент успешно решает задачи оценки соответствия нормативам, используя параметризованные алгоритмы учета аэродинамического подпора и шлейфового выноса. Однако допущения о стационарности состояния атмосферы и усреднении характеристик турбулентности ограничивают применимость модели в условиях неоднородной застройки. Модель вынуждена заменять реальную геометрию кварталов на эквивалентные шероховатости или упрощенные призмы, что неизбежно снижает точность расчетов в зонах сложного обтекания. Таким образом, область надежного применения регуляторных моделей сужается до задач, где детальная микромасштабная структура потока не является определяющим фактором для принятия управленческих решений.

Альтернативой параметризации выступает прямое численное моделирование, опирающееся на уравнения Навье-Стокса. Методы вычислительной гидродинамики позволяют в явном виде воспроизвести геометрию городских каньонов, учесть влияние тепловых потоков от фасадов и детализировать картину распределения примесей вплоть до отдельных пешеходных зон [8], [9]. Несмотря на очевидные преимущества в описании физики процесса, применение таких расчетов в повседневной экологической практике ограничивается значительными вычислительными затратами. Достоверность прогноза здесь критически зависит от выбора сеточных характеристик, граничных условий и схем дискретизации. Отсутствие устоявшихся протоколов подтверждения точности и соответствия натурным измерениям приводит к тому, что внешне детализированные трехмерные картины распределения концентраций порой содержат скрытые погрешности, неочевидные для конечного пользователя.

Возникает фундаментальное противоречие между нормативной простотой

и физической сложностью описываемых явлений. Применение упрощенных регуляторных систем в условиях плотной промышленной застройки нередко приводит к критической недооценке экологических рисков для населения. В то же время повсеместный переход к микромасштабному гидродинамическому моделированию остается экономически затратным и методологически сложным из-за высокой чувствительности результатов к исходным данным. В сложившейся ситуации требуется четкое разграничение сфер эффективного использования обоих классов программных продуктов. Разработка научно обоснованных критериев выбора расчетного инструмента с учетом морфологии застройки и физико-химических характеристик источника является важным направлением исследований в области загрязнения атмосферного воздуха.

Обзор литературы. Интеграция промышленных предприятий в плотную городскую ткань формирует специфические аэродинамические условия, при которых перенос загрязняющих веществ перестает подчиняться закономерностям открытой местности [10]. Взаимодействие атмосферного потока с массивными строительными конструкциями инициирует формирование зон отрыва, вихревых жгутов и аэродинамических теней. Традиционные регуляторные модели, базирующиеся на гауссовском приближении, в частности AERMOD, учитывают влияние зданий посредством параметризованных алгоритмов [11]. В актуальной версии модели применяется схема PRIME, разработанная на основе данных аэродинамических труб и позволяющая оценивать эффекты аэродинамического подпора [12]. Алгоритм PRIME разделяет факел на две условные части: полость и повторно эмитированный шлейф, что обеспечивает приемлемую точность при оценке максимальных приземных концентраций для изолированных сооружений [13], [14].

Однако в условиях сложной, неоднородной городской застройки параметризация турбулентности и вихревых структур сталкивается с фундаментальными ограничениями. Методы вычислительной гидродинамики (CFD), опирающиеся на численное решение уравнений Навье-Стокса (RANS или

LES), позволяют в явном виде воспроизвести геометрию городских каньонов и детализировать картину распределения примесей. Систематические обзоры, включая работу Pantusheva et al. (2022), указывают на высокую чувствительность CFD-прогнозов к выбору граничных условий, параметров сетки и моделей турбулентности. Несмотря на очевидные преимущества CFD в описании физики процесса, их внедрение в повседневную экологическую практику сдерживается колоссальными вычислительными затратами и отсутствием унифицированных протоколов.

В современной литературе отсутствует четкое количественное разграничение сфер эффективного использования обоих классов программных продуктов [15], [16]. Большинство исследований сводится к констатации факта большей детализации CFD-моделей, что не решает практических задач экологического зонирования. Научная новизна настоящего исследования заключается в установлении точной геометрической границы, при превышении которой параметризованный алгоритм PRIME в составе AERMOD теряет адекватность по сравнению с высокоразрешающим CFD-моделированием, что критически важно для обоснования размеров санитарно-защитных зон.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил стационарный промышленный источник — дымовая труба котельной, функционирующая в условиях плотной городской застройки. Характеристики источника приняты следующими: высота выброса (H_{stack}) — 25 м; внутренний диаметр (D) — 1,2 м; скорость выхода газов (V) — 12 м/с; температура (T) — 420 К; массовый расход загрязняющего вещества (оксиды азота, NOx) — 15 г/с. Рассматривались исключительно квазистационарные режимы работы; моделирование аварийных залповых выбросов в данную постановку не включалось.

Для параметризации взаимного положения источника выброса и окружающей застройки используется безразмерное отношение $K_h = H_{stack}/H_{building}$, где H_{stack} — высота устья промышленной трубы над рассматриваемой опорной

поверхностью, $H_{building}$ — высота прилегающего здания в той же системе отсчёта. В качестве исходного расчётного условия принято H_{stack} = 25 м. Геометрия зданий представлена упрощёнными прямоугольными объёмами, формирующими городской каньон. Моделирование осуществляется при нейтральной стратификации, скорости ветра 5 м/с на высоте 10 м и направлении, перпендикулярном оси каньона.

Подготовка данных для гауссовой модели осуществлялась в строгом соответствии с директивами EPA. Процессор AERMET использовался для формирования профилей метеорологических параметров и расчета характеристик турбулентности пограничного слоя. Модуль AERMAP применялся для обработки рельефа местности (в данной постановке рельеф принят плоским, однако использование препроцессора является обязательным этапом регуляторного протокола). Для учета аэродинамического подпора задействован алгоритм PRIME, требующий ввода направленных габаритов зданий через препроцессор BPIPPRM. Рецепторная сеть включала 144 точки, сгущенные в зоне непосредственного влияния здания.

Трехмерное CFD-моделирование выполнено в среде ANSYS Fluent. Вычислительный домен формировался с соблюдением требований руководства COST 732: расстояние до наветренной границы составило 5H, до подветренной — 15H, что обеспечило коэффициент блокирования менее 3%. На наветренной границе задан профиль атмосферного пограничного слоя (ABL), описываемый логарифмическим законом распределения скорости и турбулентной кинетической энергии с учетом шероховатости подстилающей поверхности (z_0 = 0,8 м для городской застройки).

Особое внимание уделено выбору модели турбулентности. Стандартные модели k-ε и k-ω демонстрируют неудовлетворительные результаты в зонах сильной анизотропии турбулентности, характерных для следов за зданиями. Выбор модели турбулентности осуществляется с учётом необходимости описания анизотропии потока и рециркуляции за зданиями. Для сопоставления

рассматриваются расчётные результаты RSM и RNG k–ε по критериям NMSE, FB и FAC2.

Построение вычислительной сетки осуществлялось с использованием гексаэдральных элементов в основной области и полигексаэдральных (poly-hexcore) в пограничном слое зданий. Для корректного разрешения пристенных течений применена схема Enhanced Wall Treatment с требованием безразмерного расстояния до первой ячейки $y^+ < 1$. Исследование независимости решения от сетки проведено на трех уровнях: грубая (2,1 млн ячеек), средняя (5,4 млн ячеек) и мелкая (9,8 млн ячеек). Расхождение интегральных параметров между средней и мелкой сетками не превысило 2,4%, что позволило использовать среднюю сетку для дальнейших расчетов.

Валидация проводилась путем сопоставления результатов CFD с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе Halifax (COST 732). В качестве статистических критериев качества использовались: нормализованная средняя квадратичная ошибка (NMSE), фракционное смещение (FB), фактор согласия FAC2 (доля прогнозов, отличающихся от наблюдений не более чем в два раза), а также точность определения положения максимума концентрации.

Результаты исследования. Валидация CFD-модели продемонстрировала высокую степень соответствия эталонным данным. Модель RSM обеспечила значение FAC2, равное 0,92, при NMSE = 0,18 и FB = 0,05. Для сравнения, стандартная модель RNG k-ε показала FAC2 = 0,78 и NMSE = 0,34, что подтвердило некорректность применения изотропных моделей турбулентности для задач городской аэродинамики.

Сравнение пространственного распределения концентраций NOx, полученного с помощью AERMOD (PRIME) и CFD (RSM), выявило существенные различия в зонах рециркуляции. В то время как гауссова модель формирует сглаженный шлейф с завышенными концентрациями непосредственно за зданием и их резким спадом, CFD-модель фиксирует

сложную ячеистую структуру, где зоны максимальных концентраций смещены в боковые части аэродинамической тени из-за влияния вихревых жгутов.

Таблица 1 - Сравнение вычислительных затрат и временных параметров моделирования

Параметр	AERMOD (с модулем PRIME)	CFD (ANSYS Fluent, RSM)
Количество рецепторов / ячеек сетки	144 точки	5 400 000 ячеек
Объем оперативной памяти (RAM)	< 0,5 ГБ	32 ГБ
Время подготовки модели (чел.-часы)	2,5	45,0
Машинное время расчета (1 час метео)	0,8 сек	14,5 часов (на 24 ядра)
Общая стоимость этапа моделирования	Низкая	Критически высокая

Источник: разработано автором.

Анализ зависимости расхождения моделей от геометрического параметра K_h позволил выявить критическую границу применимости гауссова приближения.

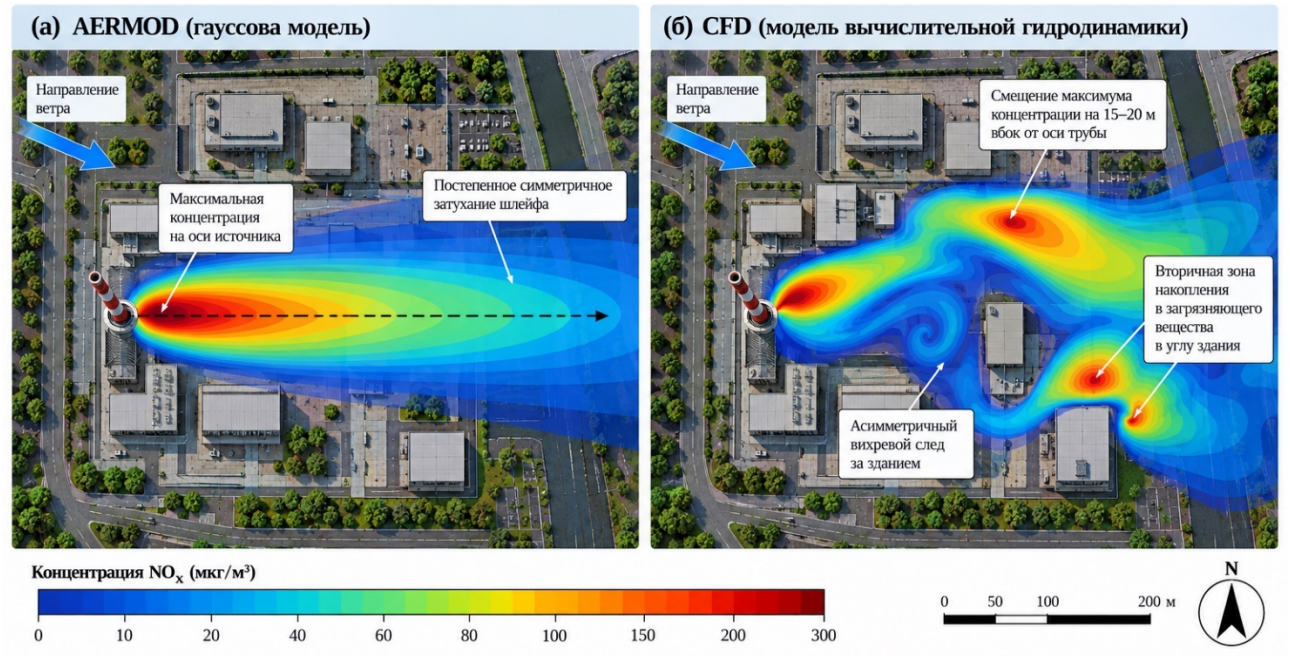


Рисунок 1 - Концептуальная схема пространственного распределения концентраций NOx (вид сверху) (источник: разработано автором)

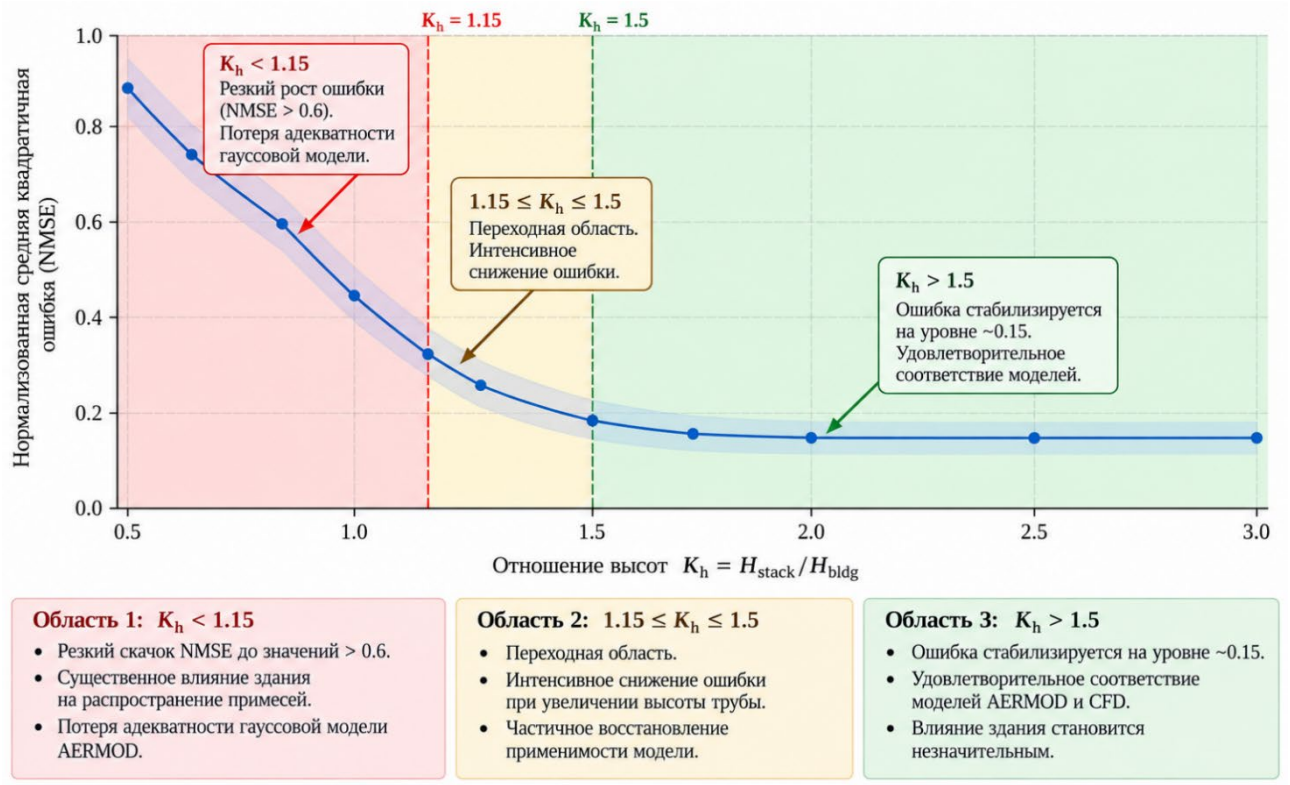


Рисунок 2 - Зависимость нормализованной средней квадратичной ошибки (NMSE) модели AERMOD относительно CFD от отношения высот K_h (источник: разработано автором)

Таблица 2 - Статистические показатели расхождения AERMOD и CFD в зависимости от высоты источника

Отношение K_h	NMSE	FB	Ошибка в положении максимума (м)	Превышение выбранного расчётного порога концентрации в сценарии (CFD/AERMOD
0,8	0,68	0,45	24,5	Да / Нет
1,0	0,52	0,31	18,2	Да / Да
1,15	0,28	0,12	9,0	Да / Да
1,5	0,16	0,05	3,5	Да / Да
2,0	0,14	-0,02	1,2	Нет / Нет
3,0	0,12	-0,05	0,5	Нет / Нет

Источник: разработано автором.

Обсуждение результатов исследования. Полученные данные позволяют количественно обосновать границы применимости регуляторных гауссовых моделей в условиях городской застройки. Алгоритм PRIME, реализованный в AERMOD, базируется на эмпирическом разделении факела на полостную и повторно эмитированную части. Такой подход адекватно описывает

усредненную картину подпора, однако не способен воспроизвести тонкую структуру анизотропной турбулентности, формирующейся при взаимодействии наветренного потока с кровлей и фасадами зданий.

Как следует из представленных результатов, при отношении высот K_h >1,5 труба располагается выше основной зоны рециркуляции здания. В этом случае факел свободно переносится над застройкой, и эффекты аэродинамического подпора носят второстепенный характер. Расхождение между моделями минимально (NMSE < 0,16), а вычислительная стоимость CFD делает его применение неоправданным для рутинных экологических расчетов.

Ситуация кардинально меняется при снижении K_h ниже критического значения 1,15. В этом диапазоне источник оказывается внутри или в непосредственной близости от зоны отрыва потока. В рассматриваемой численной постановке AERMOD и CFD формируют различающиеся пространственные распределения расчётных концентраций в области аэродинамической тени зданий. CFD позволяет описывать локальную структуру рециркуляционных течений более детально, чем параметризованная гауссова модель. Вместе с тем CFD также зависит от выбора модели турбулентности, сеточного разрешения, граничных условий и параметров турбулентной диффузии.

Необходимо также отметить вычислительный аспект. Переход от AERMOD к CFD увеличивает время подготовки и расчета на порядки (Таблица 1). Это диктует необходимость разумного компромисса. Использование CFD для каждого источника в городе экономически нецелесообразно. Однако для промышленных площадок, интегрированных в жилую застройку, где высота труб сопоставима с высотой окружающих зданий, применение гауссовых моделей может приводить к некорректным решениям при нормативной оценке.

Сопоставление AERMOD с алгоритмом PRIME и CFD-моделирования показывает зависимость расхождений между расчётными полями концентраций от отношения высоты источника к высоте прилегающей застройки. В

представленных сценариях наиболее выраженные различия наблюдаются при расположении источника в области существенного аэродинамического влияния зданий. Значение $K_h = 1,15$ может рассматриваться как ориентировочная граница в рамках изученной геометрической постановки. На положение указанной границы могут влиять ширина улицы, соотношение высот соседних зданий, направление ветра, стратификация атмосферы и характеристики выброса.

Выводы. Проведенное сопоставление гауссовой регуляторной системы и методов вычислительной гидродинамики позволило количественно обозначить пределы адекватности упрощенных алгоритмов при расчетах в условиях городского каньона. Ключевым критерием, определяющим выбор расчетного инструмента, выступает геометрическое соотношение высот источника выброса и доминирующей застройки. Установлено, что пока труба возвышается над кровлями зданий более чем на 15% (коэффициент $K_h > 1,15$), параметризованные схемы учета аэродинамического подпора, заложенные в модуль PRIME, работают удовлетворительно. Однако при снижении этого показателя ниже указанной границы параметризованное описание становится неадекватным: модель начинает критически занижать приземные концентрации, игнорируя сложные вихревые жгуты, которые надежно фиксирует трехмерное моделирование.

Исходя из этого, применение AERMOD следует считать оправданным на этапах предварительной оценки рисков и при оформлении разрешительной документации для предприятий, расположенных на периферии промышленных зон или в районах с разреженной, малоэтажной застройкой. В этих условиях основными преимуществами модели являются ее применение в нормативной практике и высокая скорость расчетов. Инженер-эколог может оперативно рассмотреть десятки сценариев метеорологических условий, опираясь на стандартизированные препроцессоры AERMET и AERMAP. Тем не менее, некритичное использование результатов AERMOD в условиях плотной городской застройки, особенно когда дымовые трубы котельных или

технологических установок соизмеримы по высоте с жилыми корпусами, приводить к необоснованной оценке экологической безопасности. Гауссово приближение принципиально не способно описать эффект бокового сноса и захват шлейфа наветренной рециркуляционной зоной.

Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) становится необходимым при проектировании санитарно-защитных зон в условиях сложного рельефа застройки или при оценке рассеивания токсичных примесей в зонах пешеходного пребывания. Как справедливо отмечается в систематическом обзоре Pantusheva et al., точность таких прогнозов в значительной степени зависит от корректности построения расчетной области. Чтобы получить физически достоверную картину, исследователю приходится тщательно настраивать граничные условия атмосферного пограничного слоя, контролировать коэффициент блокирования домена (удерживая его ниже 3%) и применять модели турбулентности, учитывающие анизотропию напряжений Рейнольдса, такие как RSM. Подобный подход требует значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации пользователя, однако такой подход позволяет воспроизвести пространственное распределение загрязняющих веществ во дворах-колодцах и за экранирующими зданиями.

При формулировании практических рекомендаций для специалистов в области охраны атмосферного воздуха целесообразно использовать дифференцированный подход к выбору модели. Для стандартных задач инвентаризации выбросов и оценки фоновых нагрузок на селитебные территории вдали от непосредственного влияния промзон вполне достаточно применения гауссовых моделей. Если же промышленный объект интегрирован в существующую городскую ткань, а высота источников не превышает полутора высот окружающих зданий, заказчик и надзорные органы должны требовать проведения трехмерного гидродинамического моделирования. При этом результаты CFD должны проходить обязательную процедуру оценки достоверности с привлечением натурных замеров или данных аэродинамических

труб, а не ограничиваться визуальным сопоставлением изолиний концентраций.

В перспективе дальнейшее развитие технической аэроэкологии видится в разработке гибридных протоколов. Введение в отечественную нормативную базу четких геометрических и физических критериев, определяющих необходимость перехода от упрощенных моделей к CFD-анализу, позволит снизить неопределенность нормативного регулирования. Это позволит обеспечить баланс между затратами на проектирование и необходимым уровнем качества атмосферного воздуха в условиях непрерывной урбанизации.

Список литературы

1. Ницкая С. Г., Геренштейн А. В., Дрозин Д. А., Замышляева А. А., Елсаков С. М., Сурин В. А., Оленчикова Т. Ю., Басманов А. П. Некоторые подходы к моделированию рассеивания загрязняющих веществ в условиях городской застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2024. Т. 16. № 3. С. 171–181. DOI: 10.14529/chem240312.

2. Antuña-Yudego E., Fernández-Pacheco V. M., Álvarez-Álvarez E., Carús-Candás J. L., Suárez-López M. J. A CFD-Based Methodology for Impact Assessment of Industrial Emissions and Evaluation of Mitigation Measures for Regulatory Purposes // Processes. 2023. Vol. 11. No. 7. Art. 2039. DOI: 10.3390/pr11072039.

3. Tominaga Y., Wang L., Zhai Z., Stathopoulos T. Accuracy of CFD Simulations in Urban Aerodynamics and Microclimate: Progress and Challenges // Building and Environment. 2023. Vol. 243. Art. 110723. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110723.

4. Блащинская О. Н., Патрушев К. Ю. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 177–180. DOI: 10.36629/2686-777X-2023-1-17-177-180.

5. Martín F., Janssen S., Rodrigues V., Sousa J., Santiago J. L., Rivas E., Stocker J., Jackson R. et al. Using Dispersion Models at Microscale to Assess Long-Term Air Pollution in Urban Hot Spots: A FAIRMODE Joint Intercomparison Exercise for a Case Study in Antwerp // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 925. Art.

171761. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171761.

6. Rich T., Vanderwel C. Pollutant Dispersion Around a Single Tall Building // Boundary-Layer Meteorology. 2024. Vol. 190. Art. 34. DOI: 10.1007/s10546-024-00874-w.

7. Badach J., Wojnowski W., Gębicki J. Spatial Aspects of Urban Air Quality Management: Estimating the Impact of Micro-Scale Urban Form on Pollution Dispersion // Computers, Environment and Urban Systems. 2023. Vol. 99. Art. 101890. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890.

8. U.S. Environmental Protection Agency. Guideline on Air Quality Models: 2024 Appendix W Final Rule. Washington, DC: U.S. EPA, 2024.

9. Shirzadi M., Tominaga Y. Computational Fluid Dynamics Analysis of Pollutant Dispersion Around a High-Rise Building: Impact of Surrounding Buildings // Building and Environment. 2023. Vol. 245. Art. 110895. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110895.

10. Ruda Sarria F., Guerrero Delgado M. C., Monge Palma R., Palomo Amores T., Sánchez Ramos J., Álvarez Domínguez S. Modelling Pollutant Dispersion in Urban Canyons to Enhance Air Quality and Urban Planning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 4. Art. 1752. DOI: 10.3390/app15041752.

11. Егоркин А. А., Самойлов С. Ю., Евстигнеев В. П. Оценка негативного воздействия на окружающую среду приморской территории с использованием данных анализа сводных расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе // Системы контроля окружающей среды. 2025. № 1. С. 120–128. DOI: 10.33075/2220-5861-2025-1-120-128.

12. Ding Y., Chu J. Y. L., Ng E. K. W., Ng J. W. Y., Ngan K. Estimating the Time Evolution of Urban Pollutant Concentrations Using Offline CFD // Urban Climate. 2025. Vol. 63. Art. 102586. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102586.

13. Wang C., Wang W., Qu J., Wang Q., Wang X., Liu X. Multi-Scale Validation of CFD Simulations for Pollutant Dispersion Around Buildings // Processes. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 4076. DOI: 10.3390/pr13124076.

14. Owkes M., Homan T., Benson M. et al., Banko A. High Fidelity Simulations of

Contaminant Dispersion in an Urban Environment with Comparison to Magnetic Resonance Imaging Measurements // Environmental Fluid Mechanics. 2025. Vol. 25. Art. 5. DOI: 10.1007/s10652-025-10019-3.

15. Zhao J., Guo D., Zhang Z., Guo J., Li Y., Zhang J., Wang X. RANS and LES Simulations of Localized Pollutant Dispersion Around High-Rise Buildings Under Varying Temperature Stratifications // Atmosphere. 2025. Vol. 16. No. 6. Art. 661. DOI: 10.3390/atmos16060661.

16. U.S. Environmental Protection Agency. AERMOD Implementation Guide. EPA-454/B-26-002. Research Triangle Park, NC: U.S. EPA, 2026.

References

1. Niczkaya S. G., Gerenshtejn A. V., Drozin D. A., Zamy`shlyaeva A. A., Elsakov S. M., Surin V. A., Olenchikova T. Yu., Basmanov A. P. Nekotory`e podxody` k modelirovaniyu rasseivaniya zagryaznyayushhix veshhestv v usloviyax gorodskoj zastrojki // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ximiya. 2024. T. 16. № 3. S. 171–181. DOI: 10.14529/chem240312.

2. Antuña-Yudego E., Fernández-Pacheco V. M., Álvarez-Álvarez E., Carús-Candás J. L., Suárez-López M. J. A CFD-Based Methodology for Impact Assessment of Industrial Emissions and Evaluation of Mitigation Measures for Regulatory Purposes // Processes. 2023. Vol. 11. No. 7. Art. 2039. DOI: 10.3390/pr11072039.

3. Tominaga Y., Wang L., Zhai Z., Stathopoulos T. Accuracy of CFD Simulations in Urban Aerodynamics and Microclimate: Progress and Challenges // Building and Environment. 2023. Vol. 243. Art. 110723. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110723.

4. Blashhinskaya O. N., Patrushev K. Yu. Modelirovanie rasseivaniya vy`brosa zagryaznyayushhix veshhestv // Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2023. № 17. S. 177–180. DOI: 10.36629/2686-777X-2023-1-17-177-180.

5. Martín F., Janssen S., Rodrigues V., Sousa J., Santiago J. L., Rivas E., Stocker J., Jackson R. et al. Using Dispersion Models at Microscale to Assess Long-Term Air Pollution in Urban Hot Spots: A FAIRMODE Joint Intercomparison Exercise for a Case Study in Antwerp // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 925. Art.

171761. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171761.

6. Rich T., Vanderwel C. Pollutant Dispersion Around a Single Tall Building // Boundary-Layer Meteorology. 2024. Vol. 190. Art. 34. DOI: 10.1007/s10546-024-00874-w.

7. Badach J., Wojnowski W., Gębicki J. Spatial Aspects of Urban Air Quality Management: Estimating the Impact of Micro-Scale Urban Form on Pollution Dispersion // Computers, Environment and Urban Systems. 2023. Vol. 99. Art. 101890. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890.

8. U.S. Environmental Protection Agency. Guideline on Air Quality Models: 2024 Appendix W Final Rule. Washington, DC: U.S. EPA, 2024.

9. Shirzadi M., Tominaga Y. Computational Fluid Dynamics Analysis of Pollutant Dispersion Around a High-Rise Building: Impact of Surrounding Buildings // Building and Environment. 2023. Vol. 245. Art. 110895. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110895.

10. Ruda Sarria F., Guerrero Delgado M. C., Monge Palma R., Palomo Amores T., Sánchez Ramos J., Álvarez Domínguez S. Modelling Pollutant Dispersion in Urban Canyons to Enhance Air Quality and Urban Planning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 4. Art. 1752. DOI: 10.3390/app15041752.

11. Egorkin A. A., Samojlov S. Yu., Evstigneev V. P. Ocenka negativnogo vozdejstviya na okruzhayushhuyu sredu primorskoj territorii s ispol`zovaniem danny`x analiza svodny`x raschetov rasseivaniya zagryaznyayushhix veshhestv v atmosfernom vozduxe // Sistemy` kontrolya okruzhayushhej sredy`. 2025. № 1. S. 120–128. DOI: 10.33075/2220-5861-2025-1-120-128.

12. Ding Y., Chu J. Y. L., Ng E. K. W., Ng J. W. Y., Ngan K. Estimating the Time Evolution of Urban Pollutant Concentrations Using Offline CFD // Urban Climate. 2025. Vol. 63. Art. 102586. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102586.

13. Wang C., Wang W., Qu J., Wang Q., Wang X., Liu X. Multi-Scale Validation of CFD Simulations for Pollutant Dispersion Around Buildings // Processes. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 4076. DOI: 10.3390/pr13124076.

14. Owkes M., Homan T., Benson M. et al., Banko A. High Fidelity Simulations of

Contaminant Dispersion in an Urban Environment with Comparison to Magnetic Resonance Imaging Measurements // Environmental Fluid Mechanics. 2025. Vol. 25. Art. 5. DOI: 10.1007/s10652-025-10019-3.

15. Zhao J., Guo D., Zhang Z., Guo J., Li Y., Zhang J., Wang X. RANS and LES Simulations of Localized Pollutant Dispersion Around High-Rise Buildings Under Varying Temperature Stratifications // Atmosphere. 2025. Vol. 16. No. 6. Art. 661. DOI: 10.3390/atmos16060661.

16. U.S. Environmental Protection Agency. AERMOD Implementation Guide. EPA-454/B-26-002. Research Triangle Park, NC: U.S. EPA, 2026.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 15.01.2026; approved after peer review 26.02.2026; accepted for publication 01.09.2026.