

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ

А.Ф. Зубков (НИИ механики МГУ), П.С. Чурин (НИУ МГСУ (УНПЛ ААИСК))

Проведено исследование проблемы распространения дыма от каминов и теплоцентрали вблизи жилого комплекса, особенно в его неветилируемой внутренней зоне. Главная задача – изучить влияние на распространение дыма различных конкретных параметров застройки (высота труб, наклон кровли, форма кровли и пр.), а также разработать предложения по возможному уменьшению степени задымленности данного комплекса.

Ключевые слова: аэродинамическое моделирование, ветровые потоки, распределение давления, распространение дымовых загрязнений.

### Введение

Сформулирована задача определить меры минимизации поступления загрязнений во внутренний двор жилого строения. Жилой комплекс представлен достаточно сложными объемно-планировочными и конструктивными решениями, не имеющими близких аналогов. Внутренний двор представляет собой площадку, окруженную со всех сторон одноэтажными строениями с плоской односкатной крышей. Критерием благоприятного климата во внутреннем дворе служит отсутствие или минимизация неприятных запахов от внешнего источника загрязнений.

### Описание конструкции и модели

Исследуемый комплекс жилых зданий фактически состоит из почти прямоугольных (в плане) зданий, вплотную примыкающих друг к другу (рис. 1). Внутренняя зона, образованная стенами этих зданий, образует замкнутый неветилируемый шестиугольник. Модель здания рассматриваемого жилого комплекса изготовлена в масштабе 1:75.

Вблизи конструкций подобной формы могут наблюдаться сложные трехмерные ветровые потоки, особенно в окрестности различных локальных неровностей (около дымовых труб и др.).

Существенное влияние на задымление объекта могут оказывать такие параметры, как угол наклона кровли, высота дымовых и вытяжных труб, сила тяги каминов, направление ветра, а также различные дополнительные устройства (типа спойлеров) [1].

Все указанные факторы были учтены при моделировании задымленности рассматриваемого жилого комплекса и при разработке рекомендаций по ее уменьшению.

Отдельные элементы зданий моделировались в более крупном масштабе (1:37,5) (рис. 2), в частности, с целью более детального изучения влияния угла наклона кровли на задымленность и др.



Рис. 1. Модель здания

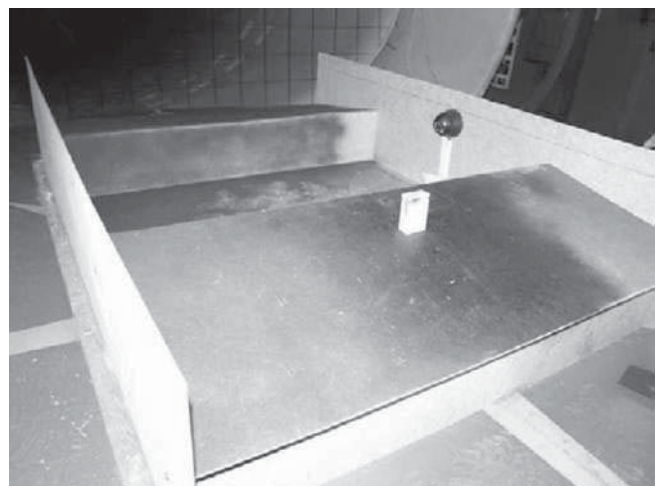


Рис. 2. Модель кровли с изменяемым углом наклона здания

Наклон крыши направлен наружу от внутреннего двора. Модель представляет собой туннельную схему моделирования — два здания с наклонной крышей размещены между параллельными пластинами, распо-

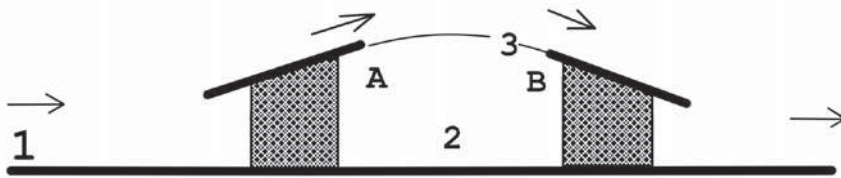


Рис. 3. Идеализованная схема воздушных потоков около сооружения

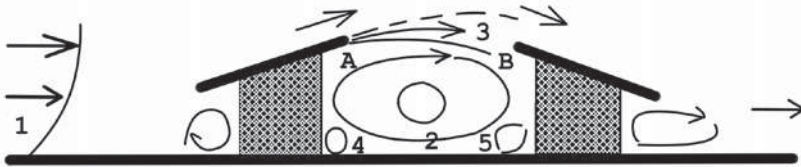


Рис. 4. Возникновение движения воздуха в каверне

ложенными вертикально, вдоль потока. Поток формируется в аэродинамической трубе А-6 института механики МГУ. Измерения параметров потока (скорость) выполнялись термоанемометром фирмы DISA.

Источник загрязнения моделируется испарениями спирта из открытой чашки Петри. Испарения сносятся набегающим потоком в сторону исследуемой модели. Источник загрязнения расположен на расстоянии 1020 мм от передней стенки модели на уровне поверхности земли. Для целей визуализации распространения загрязнения над моделью использовался дым, получаемый из специальной жидкости (сценический дым) с помощью приспособления «дымовая игла». Дымовое моделирование загрязнения регистрировалось на видеокамеру с записью на компьютер.

#### Исследование особенностей визуализации ветровых течений и распространения дымовых загрязнений

При изучении процесса распространения дыма и исследовании различных способов воздействия на этот процесс использовались в основном следующие варианты визуализации.

Первый был связан с фотографированием специальных дымовых добавок, выпускаемых в различных областях исследуемого объекта. Использовались «легкие» и «тяжелые» дымовые добавки различной плотности. Процесс снимался видеоаппаратурой и обрабатывался на компьютере.

При втором способе визуализации использовались тонкие шерстинки, которые «выстраиваются по потоку» и дают представление о поле скоростей.

Для эффективного моделирования процесса распространения дыма был создан специальный ресивер, в котором создавалась сажа (в результате горения). Затем в ресивер подавался воздух под необходимым давлением и интенсивный дым по трубкам подавался в нужные места.

Для проверки влияния угла наклона крыши на распространение дыма во внутреннем дворе была построена отдельная модель, которая учитывала

дома, стоящие друг против друга. Рассматривался первоначальный угол, предусмотренный по проекту и увеличение угла наклона крыши на 5°. Проведенные опыты показали заметное улучшение ситуации при увеличении угла наклона крыши.

Для исследованных вариантов конструкции кровли наблюдаются различные схемы течения и различная интенсивность проникновения внешних загрязнений во внутренний двор.

- Над двором образовался относительно стабильный слой смешения. Проникание примеси во двор минимально.

- Перед вторым зданием наблюдаются значительные вихревые структуры, которые частично размываются в объеме внутреннего двора.

- Не сформирован компактный слой смешения. Перемешивание воздуха происходит практически во всем объеме внутреннего двора. Дым опускается до уровня 1/3 высоты зданий.

- Над двором постоянно присутствует вихрь, который вовлекает в движение весь объем воздуха внутреннего двора. Возвратное течение образовано от стенки до стенки. Проникание примеси во двор значительно.

#### Исследование поступления загрязнения в модель замкнутого двора, окруженного зданиями с наклонной (односкатной) крышей

На рис. 3 показана идеализованная схема воздушных потоков около сооружения: 1 — набегающий поток, 2 — область покоя во внутреннем дворе, 3 — граница внешнего потока между кромками кровли А, В (поверхность тангенциального разрыва скорости потока). По принятой в аэродинамике терминологии [2–4] двор в данном случае представляет собой прямоугольную каверну с отношением длины к глубине около 4.

В действительности из-за влияния вязкости воздуха и неустойчивости тангенциальных разрывов картина неизбежно иная (рис. 4). Главное отличие в том, что поверхность А, В (рис. 3) не может быть бесконечно тонкой, она сильно размывается и турбулизуется, в результате формируется так называемый турбулентный слой смешения (рис. 4). А это неизбежно приводит к возникновению движения воздуха и в каверне (1 — набегающий поток, 2 — основной вихрь, 4, 5 — вторичные вихри, рис. 4).

Но самое главное состоит в том, что по своей природе турбулентные слои смешения проницаемы для внешней примеси. Поэтому, если в окрестности начальной кромки А (на крыше переднего корпуса, рис. 3, 4) имеется загрязненный воздух, то часть этого загрязнения неизбежно окажется внутри двора.

Вопрос, поставленный перед исследователями состоял в следующем: в какой мере с помощью изменения угла наклона кровли в окрестности точки А (за счет установки спойлеров) можно повлиять на уровень попадания загрязнений во двор. Для этого в аэродинамической трубе были проведены эксперименты по обтеканию двумерных макетов сооружения с различными углами наклона кровли в окрестности кромок А и В.

#### Регистрация степени загрязнения

Для контроля состава атмосферы самым точным является метод хроматографии или аналогичный. Данное средство измерений требует использования системы пробоотбора и доступ к дорогостоящему оборудованию. Существует множество индикаторных датчиков, контролирующих содержание определенной примеси в воздухе. Наиболее распространенным является датчик метана, применяемый в шахтах. Такие датчики контролируют количество примеси чрезвычайно опасного газа метана в воздухе. В лабораторных условиях требуется использовать модельный источник загрязнения, не причиняющий вреда здоровью исследователя. Датчик, контролирующий количество загрязнителя в воздухе должен иметь широкий динамический диапазон. Время отклика датчика на изменившуюся концентрацию загрязнений должен быть минимальным, поскольку моделирование ветра вокруг объекта проводится в аэродинамической трубе. Всем перечисленным характеристикам удовлетворяет датчик концентрации паров спирта.

Использование паров спирта в качестве источника "загрязнения" позволяет решить задачу без применения индивидуальных средств защиты для персонала и без процедуры дезактивации лабораторного оборудования.

Измерение концентрации спирта проводилось стандартным датчиком алкоголя HS-130A (компании Sencera, Co. LTD). Источник загрязнения моделируется ватным тампоном, обильно смоченным в эти-

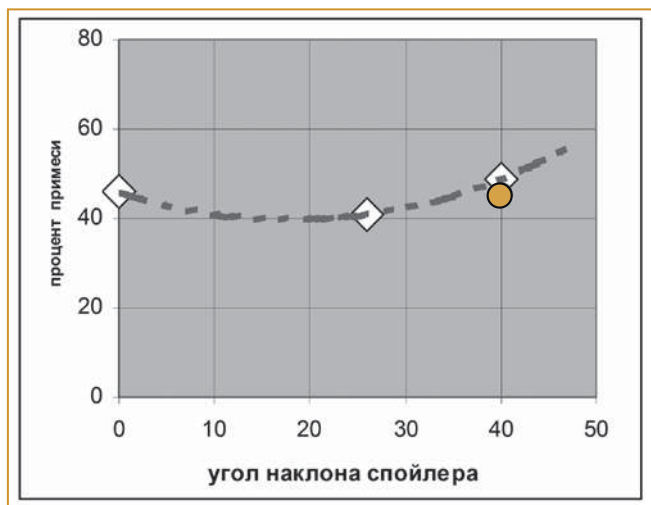


Рис. 5. Влияние угла наклона спойлера на относительную концентрацию примеси

*Нельзя запретить ветер. Застоявшийся ветер становится спёртым воздухом.*  
Эрих Ремарк

ловом спирте. Спирт испаряется в потоке воздуха и «загрязнение» переносится в исследуемую область модели. Проводится регулярная контрольная проверка равномерности поступления паров спирта в воздух

#### Порядок проведения эксперимента

Для градуировки датчика концентрации требуется источник с известным (и регулируемым) содержанием паров спирта в воздухе. Поскольку такого источника при проведении эксперимента не оказалось, то результаты измерений соотносились с показаниями того же датчика в контрольной точке. Источником паров спирта служила открытая чашка Петри с помещенной туда ватой, смоченной спиртом. На дно чашки постоянно подавался чистый спирт в количестве, достаточном для компенсации убыли за счет испарения. Координатное устройство перемещало датчик по рабочей части во время эксперимента. Была выбрана контрольная точка, в которой проводился контроль постоянства концентрации паров спирта. Установлено, что в контрольной точке в диапазоне скоростей 0,95...2.3 м/с показания датчика не меняются. По мере удаления от источника загрязнений происходит перемешивание паров с воздухом потока и показания датчика пропорционально уменьшаются. Поскольку перед исследованием стояла задача найти решение для минимизации поступления загрязнений во внутренний двор, то сравнение показаний датчика для разных конструктивных решений позволяет выбрать оптимальную конструкцию.

По результатам серии экспериментов была предложена следующая кровельная конструкция: высота кровли со всех сторон двора одинаковая, угол наклона ската составляет 20°. Перед верхней кромкой ската устанавливается спойлер. Линия излома крыши (грань угла изгиба) находится на расстоянии 1/3 длины от верхней кромки основной крыши. Спойлер имеет угол наклона 45°. Таким образом, высота кровельной конструкции над внутренней стенкой здания значительно возрастает.

#### Результаты эксперимента

Контрольные точки выбраны за пределами исследуемой области, измерения в контрольных точках позволяют соотносить результаты разных экспериментов. При разных конструкциях кровли вокруг внутреннего двора показания в контрольных точках должны совпадать.

Контрольные точки, расположенные по границе области распространения загрязнения имеют смещение от оси распространения загрязнения на равную величину. Показания в этих точках совпадают при отсутствии скоса потока в эксперименте. Контроль распространения загрязнения проводился в плоско-



сти на высоте человеческого роста (в соответствии с масштабом конструкции), на уровне половины высоты зданий вокруг двора, на уровне верхней кромки кровли и в некоторых точках над кровлей.

На рис. 5 построена зависимость  $Z = f(\theta)$  относительного уровня попадания загрязнений из внешнего потока в окрестности кромки А во двор через слой смешения

$$Z = (KO/KI) 100\%,$$

где  $KO$ ,  $KI$  — измеренные концентрации имитатора примеси соответственно во дворе и во внешнем потоке в окрестности кромки А) от различных углов наклона спойлеров. Оптимальный угол наклона спойлера получился близким к  $25^\circ$ .

#### Анализ результатов, выводы, общие рекомендации

Любое стелющееся по поверхности крыши загрязнение неизбежно попадет в слой смешения над двором и частично проникнет в сам двор. Установка спойлеров под углом  $25 \pm 5^\circ$  позволяет минимизировать это проникание, однако по сравнению с базовой конфигурацией плоской крыши максимальный выигрыш небольшой (<10%). Следует добавить, что этот экспериментальный результат согласуется с общетеоретическими представлениями о механизмах проникания примеси через турбулентные слои смешения: расход примеси через слой смешения пропорционален его длине и толщине, а эти параметры слабо зависят от угла наклона спойлеров [5].

Следовательно, основное внимание следует уделять предотвращению попадания выбросов из дымовых и вытяжных труб на поверхность крыши в слой смешения над двором. По сути, предотвращение попадания выбросов направлено на максимальное удаление источника загрязнения вверх от уровня начала слоя смешения (точка А на рис. 3). В простейшем случае это увеличение длины труб в 2 раза по сравнению с базовыми параметрами. Того же эффекта можно достичь более изощренными способами (отказ от горизонтальных крышек над трубами, использование вертикальных щитков, откидных крышек и т. п.).

#### Общие рекомендации.

1. В случае реализации проекта с кровлями противоположных зданий различной высоты при направлении ветра со стороны низкого здания значительная часть потока загрязненного воздуха будет попадать во внутренний двор. Рекомендуется применение спойлеров на верхних кромках крыш, которые перестраивают ве-

тровые загрязненные потоки в вертикальном направлении и выравнивают верхние кромки крыш зданий [6–8].

2. Для существенного уменьшения задымления внутреннего двора необходимо установить локальные аэродинамические спойлеры, которые поворачивают набегающий ветер в вертикальном направлении вблизи трубы, образуют спутные потоки около дымовой струи и способствуют более высокому ее подъему за счет энергии ветра.

3. В правилах эксплуатации каминов следует отметить, что для существенного уменьшения задымления внутреннего двора желательно эксплуатировать камины, расположенные с подветренной стороны.

#### Список литературы

1. Попов Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки, М., 2000.
2. Айрапетов А.Б. Новые аспекты аэродинамики ветрового нагружения высотных зданий в мегаполисе, новые подходы и методические принципы исследований как источник концепции формирования новых нормативов проектирования и строительства // Строительные науки. №3, 2010. 582-584.
3. Березин М.А., Катюшин В.В Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск, 2003.
4. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леднев П.В. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // Жилищное строительство, №1, 2010, 7-11.
5. Чуринов П.С., Поддаева О.И., Егорычев О.О. Проектирование макетов уникальных зданий и сооружений в экспериментальной аэродинамике // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 332-335.
6. Ляпкало А.А., Дементьев А.А., Цурган А.М. Влияние скорости и направления ветра на уровень загрязнения атмосферного воздуха города продуктами сгорания топлива // Фундаментальные исследования. 2013. №. 7-1.
7. Благодатских Д.В., Дзама Д.В., Сороковикова О.С., Устинов Г.А. Некоторые количественные статистические характеристики результатов верификации модели скорости ветра в условиях сложной трехмерной геометрии городской застройки или промышленного объекта // XVI Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования". Абрау-Дюрсо. 2015.
8. Суслонов В.М. и др. Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности. Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2005.

*Зубков Александр Фёдорович — канд. физ.-мат. наук; старший научный сотрудник НИИ механики МГУ;*

*Чуринов Павел Сергеевич — канд. техн. наук, научный сотрудник УНПЛ ААИСК МГСУ*

*E-mail: 9392998@mail.ru*

#### ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ СТРАН СНГ

С 2018 г. оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:  
через каталоги "Роспечать" 81874 • Редакцию

Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360

Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru