

628
Б44

Н.Н. Беляев,

Депозитне
зберігання

В.В. Беляева, З.Н. Якубовская

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ



Днепропетровск
2015

Н. Н. Беляев, В. В. Беляева, З. Н. Якубовская

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ
В ПОМЕЩЕНИЯХ**



Днепропетровск
Акцент ІІІ
2015

УДК 628.83: 504:519.6
ББК 38.762.2в631
Б 48

Рецензенты:

Савин Л. С., доктор технических наук, профессор
Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.
Петренко В. Д., доктор технических наук, профессор
Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна.
Полищук С. З., доктор технических наук, профессор
Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.

*Рекомендовано к печати Ученым советом
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна*

Н. Н. Беляев, В. В. Беляева, З. Н. Якубовская

Б 48 Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях
Монография / Н. Н. Беляев, В. В. Беляева, З. Н. Якубовская. – Днепропетровск:
Акцент ПП, 2015. – 123 с.
ISBN 978-617-7109-83-8

В монографии рассмотрены математические модели для прогноза химического загрязнения воздушной среды в помещениях. Для прогноза используется метод вычислительного эксперимента. Рассмотрено построение численных моделей на основе конечно – разностных методов. Приведены результаты решения ряда проблемных задач из области экологической и промышленной безопасности.

Для студентов, аспирантов, научных работников, специализирующихся в области экологической безопасности, охраны окружающей среды, гидродинамики, прикладной математики.

Ил. 90. Табл. 15. Библиограф. 104 наим.

**УДК 628.83:504:519.6
ББК 38.762.2в631**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
імені академіка В.Лазаряна**

ISBN 978-617-7109-83-8

**© Беляев Н. Н., Беляева В. В.,
Якубовская З. Н., 2015**

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ	5
1.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ	5
1.2. ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ	10
1.3. МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИКИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОМЕЩЕНИИ	12
1.4. МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ПОМЕЩЕНИИ	15
1.5. МОДЕЛЬ РАССЕЙВАНИЯ НЕЙТРАЛИЗАТОРА В ПОМЕЩЕНИИ	19
1.6. 2-D МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ПОМЕЩЕНИИ	22
1.7. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ	29
1.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ	31
2. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ	33
2.1. ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛА СКОРОСТИ	33
2.2. ИНТЕГРИРОВАНИЕ 2-D УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕНОСА	37
2.3. ИНТЕГРИРОВАНИЕ 3-D УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕНОСА	41
3. CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ	45
3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ ВЫБРОСЕ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА	45
3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ УТЕЧКЕ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА	53
3.3. СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОРБИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ	66
3.4. ПРИМЕНЕНИЕ РЕАГЕНТА ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА В ПОМЕЩЕНИИ	69
3.5. СНИЖЕНИЕ ЗАГАЗОВАННОСТИ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОДАЧЕ РЕАГЕНТА ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА	89
3.6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ЗАЛПОВЫХ ВЫБРОСАХ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ	93
3.7. ТЕПЛОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ АВАРИИ	100
3.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ УТЕЧКЕ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА	105
3.9 ПРОГНОЗ ВОЗДУШНОГО И АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз качества воздушной среды в помещениях является важной задачей в области экологической и промышленной безопасности, охраны труда. Задачи данного класса чрезвычайно разнообразны, но, в самом общем случае, их можно разбить на две основные группы:

1. Прогноз качества воздушной среды при чрезвычайных ситуациях на производстве – аварийные выбросы, разливы опасных веществ в помещениях и т.п.
2. Прогноз качества воздушной среды при нормальных условиях работы (например, оценка, на этапе проектирования объекта, уровня загрязнения воздушной среды в рабочей зоне возле технологического оборудования).

Используемые в настоящее время методики прогноза качества воздушной среды в помещениях [6, 23, 24, 31, 45, 46, 75, 72, 78] основываются, как правило, на аналитическом решении одномерного уравнения переноса примеси либо на применении балансового соотношения «приток – отток – накопление массы» для помещения. Область применения таких методик достаточно ограничена, так как данные методики не учитывают влияние оборудования в помещении, мебели, различного положения отверстий вентиляции на процесс массопереноса примеси. Инженерные методики также не позволяют учесть многообразие ситуаций, возникающих в производственных помещениях. Поэтому большую важность приобретает разработка эффективных методов прогнозирования качества воздушной среды в помещениях, позволяющих оперативно решать разнообразные задачи прогноза с минимальными затратами компьютерного времени и максимальным учетом факторов, влияющих на процесс формирования зон загрязнения в помещениях.

В данной книге рассмотрено построение численных моделей позволяющих решать комплекс задач, связанных с прогнозом качества воздушной среды в помещениях, а именно:

1. Прогноз уровня загрязнения воздушной среды при аварийных выбросах химически опасных веществ.
2. Прогноз теплового загрязнения воздушной среды в помещениях при аварийных ситуациях.
3. Прогноз аэроионного и воздушного режимов в помещениях.

Рассмотренные в монографии численные модели обладают универсальностью, широким рабочим диапазоном и позволяют в режиме реального времени проводить исследование сложных процессов химического и теплового загрязнения воздушной среды в помещениях.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ

В данной главе рассмотрено построение математических моделей, ориентированных на решение задач прогноза качества воздушной среды в помещениях. В основу всех рассмотренных моделей положены базовые законы гидродинамики – закон сохранения массы вещества, закон сохранения энергии. Рассмотренные модели отвечают современным требованиям, предъявляемым к моделям класса «diagnostic»

- Модели учитывают основные физические факторы, влияющие на процесс массопереноса примеси в помещениях.
- Для реализации моделей необходима стандартная исходная информация.
- Для реализации моделей требуются малые затраты компьютерного времени.
- Модели могут быть реализованы с применением компьютеров малой и средней мощности.
- Низкая стоимость расчета;
- Модели имеют широкий рабочий диапазон – т.е. могут быть использованы для решения различных задач, связанных с прогнозом качества воздушной среды в помещениях.

1.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Прогнозирование качества воздушной среды в помещениях относится к числу особо важных проблем, как в области экологической, так и промышленной безопасности. Для решения конкретных задач в рамках этой проблемы используются различные подходы. Одним из наиболее распространенных подходов является применение метода физического моделирования. Для исследования закономерностей рассеивания примеси в помещениях, воздушных потоков были проведены многочисленные физические эксперименты, как на моделях, так и в натуральных условиях. Значительный вклад в исследование закономерностей переноса примесей, движения воздушных потоков в производственных помещениях сделан в работах Батурина В. В., Бахарева В. А., Дунского В. Ф., Клячко Л. С., Ляховского Д. Н., Садовского Н. Н., Трояновского В. Н., Шепелева И. А., Христиановича С. А., Эльтермана В. М. и других авторов. Эксперименты, проведенные данными авторами, касались изучения движения свободных струй в ограниченных пространствах, определения величины коэффициентов турбулентной диффузии, закономерностей движения нагретых струй в помещениях, исследования истечения струй из различных насадок, исследования процессов оседании частиц примесей, анализу

распространения аэрозолей в помещениях при обработке объектов, исследования поля скорости у всасывающих отверстий. На основе этих физических экспериментов были разработаны инженерные методы расчета (расчетные формулы, графики, номограммы) для решения различных задач вентиляции, проектировании воздушных завес, душей, местных отсосов, укрытий общеобменной вентиляции различных видов производства и т.д. [6, 7, 31, 46, 73, 75, 78]. Однако, проведение современных физических экспериментов [79, 81, 84, 86, 88, 90, 97] требует:

- дорогостоящей, порой уникальной аппаратуры;
- значительных материальных затрат на постановку и проведение эксперимента.

Необходимо отметить, что при применении метода физического моделирования всегда проводится серия экспериментов, что приводит к большим временным затратам. Следует также иметь в виду, что проведение физических экспериментов с токсичными веществами (аммиак, хлор и т.д.) с целью прогнозирования загрязнения воздушной среды в помещениях, например, при тех или иных аварийных ситуациях практически нереально. Учитывая сложность постановки, проведения физических экспериментов по исследованию процессов загрязнения воздушной среды в помещении исследователи в ряде случаев ограничиваются визуализацией процесса загрязнения на модели. Например, в экспериментальных исследованиях, проводимых в аэродинамической трубе по моделированию задымленности аэропорта при пожаре [86], исследования ограничились лишь визуализацией процесса на модели. По этим данным делались выводы о безопасности в терминале аэропорта. Кроме этого, при проведении физического эксперимента на модели возникает проблема «переноса» результатов, полученных, например, в аэродинамических трубах, на натуру. Например, как отмечается в работе [91] при проведении экспериментов по вентиляции помещений на модели в масштабе 1/15 (реальная высота здания – 10 м) выяснилось, что изменение размера окна в модели на величину равную 3 мм привело к существенному изменению воздушного потока в помещениях модели здания.

Принимая во внимание многообразие возможных аварийных ситуаций на химически опасных объектах, можно утверждать, что метод физического моделирования не может быть «повседневным» инструментом решения задач, связанных с проблемой прогноза уровня загрязнения воздушной среды в производственных помещениях при авариях. В этой связи особую актуальность приобретает задача разработки теоретических методов расчета распространения токсичных веществ в помещении при авариях.

Обзор литературных источников показал, что в рамках проблемы расчета и проектирования систем аварийной вентиляции на химически опасных объектах круг применяемых инженерных методик крайне узок. Здесь можно отметить формулу расчета необходимой кратности воздухообмена в случае аварийной вентиляции при известном значении ПДК токсичного вещества, выбрасываемого при аварии [22, 24]. В работе [72] рассмотрена методика расчета аварийной приточной противодымной

вентиляции зданий, основанная на применении балансовых соотношений для воздушных потоков. На практике для определения величины необходимого воздухообмена при расчете аварийной вентиляции, обеспечивающей снижение концентрации токсичного вещества в помещении, пользуются рекомендациями СНиП [73]. Эти рекомендации определяют величину кратности воздухообмена при выбросе того или иного токсичного вещества. Для токсичных веществ, которые не указаны в СНиПе рекомендуется задавать не менее 8-ми кратного воздухообмена при аварии. С другой стороны, на практике, расчет динамики изменения уровня загазованности помещения при работе аварийной вентиляции осуществляют на базе зависимости [78]

$$C = C_{np} + \frac{\bar{G}}{K_p} + \left[\left(C_i - C_{np} - \frac{\bar{G}}{K_p} \right) \cdot \exp(-tK_p) \right],$$

где C_{np} - концентрация загрязнителя в приточном воздухе, мг/м³;

K_p - кратность воздухообмена;

C - концентрация загрязнителя, мг/м³;

t - время, ч;

$\bar{G} = \frac{G}{V}$ - удельное, часовое выделение загрязнителя;

V - объем помещения, м³;

G - интенсивность выделения загрязнителя в воздушную среду помещения, мг/ч;

C_i - начальная концентрация загрязнителя, мг/м³

Данная зависимость представляет собой аналитическое решение уравнения материального баланса загрязнителя в помещении (нульмерная модель) [78]

$$V \frac{dC}{dt} = LC_{np} + G - LC,$$

где L - воздухообмен, м³/ч.

Относительно данной модели, следует отметить следующее:

- модель определяет концентрацию загрязнителя C не в помещении, а в удаляемом воздухе. Это не дает возможности проектировщику оценить степень загазованности воздуха в помещении, особенно в плохопроветриваемых местах (за технологическим оборудованием) и тем самым дезориентирует проектировщика относительно возможности возникновения вторичной аварии;

- модель не позволяет учесть влияние положения приточных и вытяжных отверстий на организацию движения воздушного потока внутри помещения и, следовательно, на динамику формирования зоны загрязнения в помещении, где произошла авария;

- модель не дает возможности учесть влияние технологического оборудования на процесс рассеивания токсичного газа в помещении.

распространения аэрозолей в помещениях при обработке объектов, исследования поля скорости у всасывающих отверстий. На основе этих физических экспериментов были разработаны инженерные методы расчета (расчетные формулы, графики, номограммы) для решения различных задач вентиляции, проектировании воздушных завес, душей, местных отсосов, укрытий общеобменной вентиляции различных видов производства и т.д. [6, 7, 31, 46, 73, 75, 78]. Однако, проведение современных физических экспериментов [79, 81, 84, 86, 88, 90, 97] требует:

- дорогостоящей, порой уникальной аппаратуры;
- значительных материальных затрат на постановку и проведение эксперимента.

Необходимо отметить, что при применении метода физического моделирования всегда проводится серия экспериментов, что приводит к большим временным затратам. Следует также иметь в виду, что проведение физических экспериментов с токсичными веществами (аммиак, хлор и т.д.) с целью прогнозирования загрязнения воздушной среды в помещениях, например, при тех или иных аварийных ситуациях практически нереально. Учитывая сложность постановки, проведения физических экспериментов по исследованию процессов загрязнения воздушной среды в помещении исследователи в ряде случаев ограничиваются визуализацией процесса загрязнения на модели. Например, в экспериментальных исследованиях, проводимых в аэродинамической трубе по моделированию задымленности аэропорта при пожаре [86], исследования ограничились лишь визуализацией процесса на модели. По этим данным делались выводы о безопасности в терминале аэропорта. Кроме этого, при проведении физического эксперимента на модели возникает проблема «переноса» результатов, полученных, например, в аэродинамических трубах, на натуру. Например, как отмечается в работе [91] при проведении экспериментов по вентиляции помещений на модели в масштабе 1/15 (реальная высота здания – 10 м) выяснилось, что изменение размера окна в модели на величину равную 3 мм привело к существенному изменению воздушного потока в помещениях модели здания.

Принимая во внимание многообразие возможных аварийных ситуаций на химически опасных объектах, можно утверждать, что метод физического моделирования не может быть «повседневным» инструментом решения задач, связанных с проблемой прогноза уровня загрязнения воздушной среды в производственных помещениях при авариях. В этой связи особую актуальность приобретает задача разработки теоретических методов расчета распространения токсичных веществ в помещении при авариях.

Обзор литературных источников показал, что в рамках проблемы расчета и проектирования систем аварийной вентиляции на химически опасных объектах круг применяемых инженерных методик крайне узок. Здесь можно отметить формулу расчета необходимой кратности воздухообмена в случае аварийной вентиляции при известном значении ПДК токсичного вещества, выбрасываемого при аварии [22, 24]. В работе [72] рассмотрена методика расчета аварийной приточной противодымной

вентиляции зданий, основанная на применении балансовых соотношений для воздушных потоков. На практике для определения величины необходимого воздухообмена при расчете аварийной вентиляции, обеспечивающей снижение концентрации токсичного вещества в помещении, пользуются рекомендациями СНИП [73]. Эти рекомендации определяют величину кратности воздухообмена при выбросе того или иного токсичного вещества. Для токсичных веществ, которые не указаны в СНИПе рекомендуется задавать не менее 8-ми кратного воздухообмена при аварии. С другой стороны, на практике, расчет динамики изменения уровня загазованности помещения при работе аварийной вентиляции осуществляют на базе зависимости [78]

$$C = C_{np} + \frac{\bar{G}}{K_p} + \left[\left(C_l - C_{np} - \frac{\bar{G}}{K_p} \right) \right] \cdot \exp(-tK_p),$$

где C_{np} - концентрация загрязнителя в приточном воздухе, мг/м³;

K_p - кратность воздухообмена;

C - концентрация загрязнителя, мг/м³;

t - время, ч;

$\bar{G} = \frac{G}{V}$ - удельное, часовое выделение загрязнителя;

V - объем помещения, м³;

G - интенсивность выделения загрязнителя в воздушную среду помещения, мг/ч;

C_l - начальная концентрация загрязнителя, мг/м³

Данная зависимость представляет собой аналитическое решение уравнения материального баланса загрязнителя в помещении (нульмерная модель) [78]

$$V \frac{dC}{dt} = LC_{np} + G - LC,$$

где L - воздухообмен, м³/ч.

Относительно данной модели, следует отметить следующее:

- модель определяет концентрацию загрязнителя C не в помещении, а в удаляемом воздухе. Это не дает возможности проектировщику оценить степень загазованности воздуха в помещении, особенно в плохопроветриваемых местах (за технологическим оборудованием) и тем самым дезориентирует проектировщика относительно возможности возникновения вторичной аварии;

- модель не позволяет учесть влияние положения приточных и вытяжных отверстий на организацию движения воздушного потока внутри помещения и, следовательно, на динамику формирования зоны загрязнения в помещении, где произошла авария;

- модель не дает возможности учесть влияние технологического оборудования на процесс рассеивания токсичного газа в помещении.

Отметим, что данная модель используется на практике как для прогноза уровня загазованности производственных помещений при авариях и при отсутствии работы аварийной вентиляции, так и при работе аварийной вентиляции. Данная зависимость также применяется для оценки уровня загрязнения воздушной среды в помещениях при инфильтрации в них загрязненного атмосферного воздуха [100].

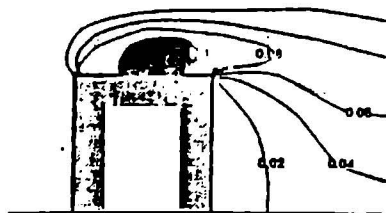
Ввиду значительной сложности рассматриваемого процесса распространения примеси в помещениях можно утверждать, что прогресс в создании математических моделей для данного класса задач основывается на использовании подходов вычислительной гидродинамики (методы CFD – computational fluid dynamics) [91, 94, 95]. Следует отметить, что особенностью задач, связанных с рассеиванием примеси в помещениях является то, что их решение находится в два этапа:

1. Расчет поля скорости воздушного потока в помещении (задача аэродинамики)
2. Расчет рассеивания примеси в помещении (задача массопереноса).

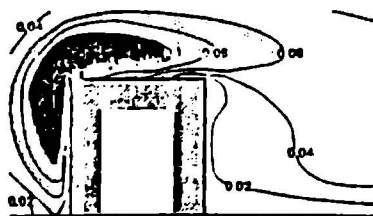
Модели вычислительной гидродинамики, которые используются для расчета поля скорости воздушного потока можно условно разбить на такие классы:

- 1) математические модели расчета, учитывающие нестационарные турбулентные характеристики [10, 89, 94];
- 2) математические модели на базе моделей усредненных турбулентных характеристик (модель RAS, Algebraic Stress Model (ASM)) [83, 94, 95, 96];
- 3) модели течения невязкой жидкости [40, 49, 68].

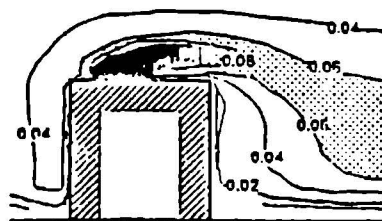
Относительно моделей первого класса необходимо отметить, что они применяются в настоящее время крайне редко из-за недостаточной мощности персональных компьютеров.



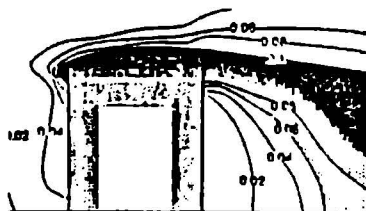
(1) wind tunnel experiment



(2) $k-\epsilon$ EVM



(3) ASM



(4) LES

Рис. 1.1. Обтекание куба: сравнение экспериментальных и расчетных данных [96]. Расчеты выполнены с использованием различных моделей турбулентности.

Модели второго класса широко используются в задачах прикладной аэродинамики - расчет летательных аппаратов, их элементов, лопастей турбомашин, расчет воздушных потоков в помещениях и т.д. Однако для практической реализации моделей первого и второго класса требуется очень мелкая расчетная сетка (например, для расчета обтекания куба с использованием модели DNS потребовалась сетка из 10^{13} узлов [94]). Поэтому время расчета при использовании моделей первого и второго класса, даже для двумерных задач, требует в настоящее время от 1 – 2 и более суток компьютерного времени. Следует отметить, что для практической реализации моделей турбулентности необходимо задание ряда констант, обоснование которых имеется лишь для ограниченного числа задач. Кроме этого для практической реализации моделей первого и второго класса необходимы пользователи высокой квалификации. Ряд трудностей возникает также при расчете течений в областях сложной геометрической формы, типичной для производственных помещений, где размещено различное оборудование. Крайне важно отметить, что даже при использовании самых современных моделей турбулентности проблема расчета гидродинамических характеристик при обтекании тел с «изломом образующей» (bluff body) – остается открытой (рис. 1.1).

Модели третьего класса широко используются в вычислительной гидродинамике, как для задач «внешней» аэродинамики – обтекание профилей, лопаток и т.п., так и для задач «внутренней» аэродинамики. Эти модели часто широко применяются на этапе эскизного проектирования. Но следует отметить, что практическая реализация этих моделей в областях сложной формы также сопряжена с рядом трудностей.

В настоящее время, в Украине существует определенный дефицит расчетных методов, моделей, которые можно было бы применить на практике для решения широкого круга задач аэродинамики и массопереноса примеси в помещениях.

1.2. ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аварийные ситуации в производственных помещениях химически опасных объектов можно классифицировать следующим образом:

1. Аварийные ситуации, при которых в производственных помещениях концентрация вредных веществ повышается не более, чем на один порядок по сравнению с концентрацией, которая имеет место при нормальной работе оборудования.

2. Аварийные ситуации, когда не происходит серьезного разрушения оборудования, коммуникаций, но в помещение поступает большое количество вредного вещества.

3. Аварийные ситуации, приводящие к разрушению оборудования, коммуникаций, но без разрушения здания (как правило, такие ситуации имеют место, если в помещении в результате утечки, выброса вредного вещества создалась пожаровзрывоопасная ситуация).

4. Аварийные ситуации, приводящие к разрушению здания.

Прогноз уровня загрязнения воздушной среды в производственных помещениях при аварийных выбросах и утечках токсических веществ особенно важен в настоящее время, поскольку на многих производствах имеет место значительный износ оборудования, коммуникаций, а с другой стороны, происходит усложнение технологических процессов и создаются условия, при которых аварийные выбросы токсических веществ могут привести к тяжелым последствиям. Обеспечение безопасности в производственных помещениях химически опасных объектов возлагается, в частности, на систему аварийной вентиляции. Аварийная вентиляция должна решать, в первую очередь, две основные задачи [78]:

1. Препятствовать образованию в производственных помещениях точек с высокой концентрацией токсических веществ.

2. Создавать такой воздушный поток в помещении, при котором воздух с пожаро- и взрывоопасными концентрациями двигался в сторону от возможных мест вспышки.

Третьей задачей аварийной вентиляции является обеспечение снижения концентрации вредных веществ в помещении после аварии до установленного минимума за заданный промежуток времени.

Анализ литературных источников [22 – 24, 51, 78] по проблеме загрязнения воздушной среды после аварий в производственных помещениях химически опасных объектов позволяет выделить следующие причины возникновения аварийных ситуаций:

- износ оборудования, нарушение технологических режимов;
- нарушение правил эксплуатации;
- нарушение работы или выход из строя контрольно-измерительной аппаратуры;
- низкая квалификация персонала, халатность;
- внешнее, инициированное воздействие (теракт);
- природные явления (землетрясения и т.д.).

Аварии в производственных помещениях химически опасных объектов могут привести к следующим последствиям:

- залповому выбросу (серии выбросов) газообразных токсичных веществ в воздушную среду производственного помещения;
утечки токсичного вещества (например при разгерметизации аппаратуры, нарушении целостности газопроводов и т.п.);
- разливу токсичных веществ на пол;
- возникновению пожара, горению огненного шара;
- взрыву (или серии взрывов, эффекту «домино»);
- вторичной аварии, если в помещении есть участки с открытым пламенем, сваркой и т.п. и при условии, что концентрация загрязнителя, попавшего в воздушную среду помещения находится в пределах возгорания.

Аварии в производственных помещениях химически опасных объектов могут вызывать:

- токсичное поражение персонала в производственном помещении, где произошла авария, а также в прилегающих помещениях;
- токсичное поражение людей на промплощадке, куда может попасть отравляющее вещество из помещения, где произошла авария;
- термическое поражение людей – ожоги разной степени тяжести;
- разрушение оборудования, систем электроснабжения, водоснабжения, канализации, разрушения конструкции здания;
поражение людей ударной волной;

- химическое загрязнение не только территории, непосредственно прилегающей к объекту, где произошла авария, но и территории за пределами санитарно-защитной зоны.

Ликвидация возникшей аварии, дегазация помещения, вентиляция его с целью максимально быстрого снижения уровня загрязнения являются целым комплексом важнейших мероприятий, направленных на защиту людей от поражения и минимизацию последствий аварий.

В этой связи особое значение приобретает разработка эффективных, экономичных математических моделей, позволяющих на компьютере «проиграть» возможные аварийные ситуации, оценить их последствия и готовность служб обеспечить безопасность.

1.3. МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИКИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОМЕЩЕНИИ

Решение задачи о моделировании распространения загрязняющих веществ в помещениях разбивается на два этапа:

1. Расчет аэродинамики воздушных потоков с учетом наличия препятствий в помещении.

2. Расчет процесса распространения загрязняющих веществ в помещении.

В этой связи в данной главе сначала рассматривается построение модели аэродинамики воздушного потока в помещении, а потом построение моделей распространения загрязняющих веществ в помещении.

Рассмотрим воздушное пространство в производственном помещении. Выделим в воздушном потоке контрольный объем в виде параллелепипеда с сторонами dx , dy , dz (рис.1.2).

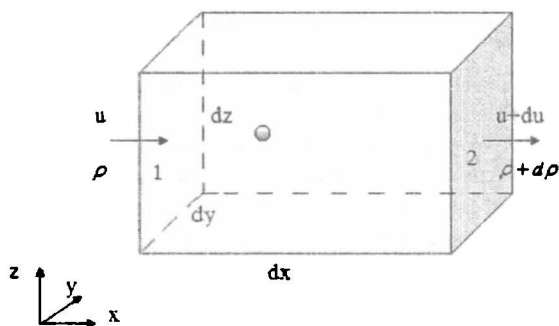


Рис. 1.2. Контрольный объем: 1,2 – грани контрольного объема

Пусть на грани 1 средняя скорость воздушного потока равняется u . Обозначим плотность воздушной среды на этой грани через ρ . Тогда для грани 2, которая расположена на расстоянии dx от грани 1, эти параметры равны:

$$u + du = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$

$$\rho + d\rho = \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx$$

За время dt через грань 1 с потоком внутрь контрольного объема войдет масса:

$$\rho u dy dz dt$$

За то же время через грань 2 из контрольного объема выйдет масса

$$\left(u\rho + \frac{\partial u\rho}{\partial x} dx \right) dy dz dt$$

Изменение массы в контрольном объеме, за счет процесса конвекции в направлении оси OX составит:

$$\left(u\rho + \frac{\partial u\rho}{\partial x} dx \right) dy dz dt - u\rho dy dz dt = \frac{\partial u\rho}{\partial x} dx dy dz dt$$

При выводе этого выражения были отброшены слагаемые второго порядка малости. Аналогично, изменение количества массы в контрольном объеме за счет процесса движения воздушной среды в направлении осей OY и OZ составит:

$$\frac{\partial v\rho}{\partial y} dx dy dz dt$$

$$\frac{\partial w\rho}{\partial z} dx dy dz dt$$

где v , w – компоненты вектора скорости потока в направлении осей OY и OZ

Накопления массы в контрольном объеме $dx dy dz$ за время dt будет равняться:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dt dx dy dz$$

Это накопление, вызванное движением массы через границы контрольного объема за время dt составит

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial u \rho}{\partial x} dx dy dz dt + \frac{\partial v \rho}{\partial y} dx dy dz dt + \frac{\partial w \rho}{\partial z} dx dy dz dt = 0$$

В итоге, уравнение баланса массы принимает вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u \rho}{\partial x} + \frac{\partial v \rho}{\partial y} + \frac{\partial w \rho}{\partial z} = 0$$

Делая предположение, что течение стационарное $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right)$, а воздушная среда – несжимаемая жидкость, $\rho = const$, получаем следующее уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1.1)$$

где u, v, w - проекции вектора скорости воздушной $\vec{V}$ среды на оси декартовой системы координат.

Предположим, что течение – потенциальное, тогда справедлива зависимость [49]

$$\vec{V} = grad P, \quad (1.2)$$

где P – потенциал скорости.

В покомпонентной форме выражение (1.2) можно записать так

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.3)$$

Подставляя выражения (1.3) в (1.1) получим уравнение для определения потенциала

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (1.4)$$

Для уравнения (1.4) ставятся следующие граничные условия [40, 49]:

- на твердых стенках (стены, пол, потолок, технологическое оборудование):

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \text{ где } n - \text{единичный вектор внешней нормали к твердой стенке};$$

- на входной границе: (границы втекания воздушного потока в помещение)

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n, \text{ где } V_n - \text{известное значение скорости};$$

на выходной границе (границы выхода воздушного потока из помещения):

$$P = P_0 + \text{const.} \text{ (условия Дирихле).}$$

Уравнение (1.4) в данной работе будет являться базовой моделью для расчета поля скорости воздушного потока в помещении. В ряде задач для экспресс-расчета будет использоваться двумерное уравнение для потенциала скорости

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (1.5)$$

В этом случае ось Y направлена вертикально вверх. Данное уравнение используется для решения профильной задачи.

1.4. МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ПОМЕЩЕНИИ

Основой для теоретического прогноза качества воздушной среды в помещениях является уравнение массопереноса примеси. Рассмотрим вывод этого уравнения.

Выделим в воздушном потоке контрольный объем в виде параллелепипеда с сторонами dx , dy , dz (рис.1.2). Будем считать, что на грани 1 скорость воздушного потока равняется u , и концентрация загрязнителя (токсичное вещество, попавшее в воздушную среду помещения в результате аварии) в единице объема равна C [г/м³]. Тогда на грани 2, расположенной на расстоянии dx от грани 1, будем иметь:

$$u + du = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$
$$C + dC = C + \frac{\partial C}{\partial x} dx$$

За время dt через грань 1 внутрь контрольного объема войдет масса загрязняющего вещества:

$$C u dy dz dt$$

За это время dt через грань 2 из контрольного объема выйдет следующая масса загрязняющего вещества (пренебрегая величинами второго порядка малости):

$$\left(uC + \frac{\partial uC}{\partial x} dx \right) dy dz dt$$

Будем учитывать диффузионный перенос загрязняющего вещества через грани контрольного объема. Тогда счет диффузии через грань 1 за время dt будет перенесена

масса загрязняющего вещества:

$$q|_l = -\mu \frac{\partial C}{\partial x} dz dy dt$$

а через грань 2

$$q_2 = q|_l + \frac{\partial q}{\partial x} dx = \left(-\mu \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \right) dz dy dt$$

где μ - коэффициент диффузии.

Изменение массы загрязняющего вещества в контрольном объеме, за счет процессов конвекции и диффузии в направления оси OX составит:

$$\left(uC + \frac{\partial uC}{\partial x} dx + q + \frac{\partial q}{\partial x} \right) dy dz dt - (uC + q) dy dz dt = \left(\frac{\partial uC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right) dx dy dz dt$$

Аналогично, изменение массы загрязняющего вещества в контрольном объеме за счет процессов конвекции и диффузии в направлении осей OY и OZ составит:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial vC}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right) dx dy dz dt \\ & \left(\frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right) dx dy dz dt \end{aligned}$$

где v, w - компоненты вектора скорости потока в направлении осей OY и OZ

Накопления загрязняющего вещества в контрольном объеме $dx dy dz$ за время dt будет составит:

$$\frac{\partial C}{\partial t} dt dx dy dz$$

Данное накопление массы загрязняющего вещества в контрольном объеме обусловлено движением загрязняющего вещества через границы контрольного объема за время dt за счет процессов конвекции и диффузии. Таким образом, уравнение баланса массы загрязняющего вещества будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) будет основным моделирующим уравнением, на основе которого будут проводиться исследования по загрязнению воздушной среды в производственных помещениях при аварийных выбросах загрязняющих веществ. Для учета различного значения коэффициентов диффузии по координатным направлениям введем в уравнение (1.6) соответствующие индексы:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1.7)$$

Следует отметить, что при проведении практических расчетов часто полагают $\mu_x = \mu_y = \mu_z = \mu$.

Если рассматриваются процессы загрязнения воздушной среды при распространении пылевых выбросов, капель, то в уравнении (1.7) необходимо включить слагаемое, учитывающее процесс гравитационного осаждения загрязняющего вещества со скоростью w_s . В некоторых случаях необходимо учесть процесс химического распада загрязняющего вещества в воздушной среде. Тогда уравнение переноса загрязняющего вещества будет иметь вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1.8)$$

где σ [1/с] – коэффициент, учитывающий процессы химического распада загрязняющего вещества. Отметим, что для задач, связанных с вентиляцией помещений весьма часто полагают $\sigma = 0$.

В производственных помещениях химически опасных объектов аварийные ситуации, приводящие к выбросу загрязняющих веществ (весьма часто токсичных) очень разнообразны. Для построения универсальной математической модели будем моделировать аварийные выбросы с помощью дельта функции Дирака. Такой подход позволяет в рамках одной математической модели вида (1.6) – (1.8) моделировать самые различные сценарии:

- постоянно действующий выброс;
- кратковременные утечки;
- циклические выбросы;
- загрязнение воздушной среды при испарении токсичного вещества от зоны разлива и т. д.

Использование дельта функций Дирака позволяет моделировать не только характер выброса (полунепрерывный, постоянный и т. д.), но и любое место аварийного выброса в помещении (на полу, на технологическом оборудовании, на потолке и т. д.), что является особенно важным при создании прикладных математических моделей.

Будем считать, что интенсивность аварийного выброса загрязняющего вещества

Наукове видання

**Біляєв Микола Миколайович
Біляєва Вікторія Віталіївна
Якубовська Зінаїда Миколаївна**

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА У ПРИМІЩЕННЯХ

*Монографія
Російською мовою*

Матеріал друкується в авторській редакції

Підписано до друку 10.03.2015 р.

Формат 60х84 ^{1/16}.

Ум. друк. арк. 7.21. Тираж 300 прим.

Зам. №7099.

Видано та віддруковано в ТОВ «Акцент ІПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*