

Расчет разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций высотных зданий

Ю. А. Табунщиков, доктор техн. наук, профессор, Московский архитектурный институт (Государственная академия)

Н. В. Шилкин, канд. техн. наук, профессор, Московский архитектурный институт (Государственная академия)

Ключевые слова: инфильтрация, аэродинамика, аэродинамический коэффициент, барометрическое давление, ветровое давление

Задача определения расхода теплоты на подогрев инфильтрующегося наружного воздуха включает в себя определение расхода воздуха, поступающего здание в результате инфильтрации через ограждающие конструкции. Этот расход, в свою очередь, зависит от разности давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции.

В монографии «Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий» [1] Ю. А. Табунщиковым предложена формула (1) расчета разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций:

$$\Delta P = P_h \exp \left[\frac{g}{BT_0} (H-z) \varphi(z) \right] + \frac{1}{2} \rho_0 V_0^2 A(z, y, \alpha) - P_R, \text{ Па}, \quad (1)$$

где P_h – давление на высоте h , Па;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

B – газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К);

T_0 – температура воздуха, К;

H – высота здания, м;

z – высота, м;

$\varphi(z)$ – функция, определяющая характер распределения температуры воздуха по высоте помещения;

ρ_0 – плотность наружного воздуха, кг/м³;

V_0 – скорость ветра, м/с;

$A(z, y, \alpha)$ – функция аэродинамических коэффициентов здания;

P_R – внутреннее статическое давление, Па.

Эта формула позволяет учесть характер изменения по высоте температуры воздуха, скорости ветра в зависимости от характера подстилающей поверхности, барометрического давления; учесть температурный градиент внутри помещений большой высоты; точно учесть аэродинамику здания – непостоянство его формы (в современных высотных зданиях очень часто форма здания меняется по мере увеличения высоты).

Известно, что с ростом высоты меняется барометрическое давление, понижается температура воздуха, а скорость ветра, наоборот, увеличивается. При этом характер роста скорости ветра определяется характеристиками подстилающей поверхности. При изучении аэродинамики отдельных зданий выделяют, например, открытые пространства, малоэтажную застройку, условия городского центра с плотной застройкой и т. д. Подробно эти вопросы разобраны, например, в работах Ф. Л. Серебровского [2] или в руководстве ASHRAE [3]. Подробный обзор различных источников приведен в статье [4].

Недостатком предложенной выше формулы является необходимость определения внутреннего давления. В реальном здании внутреннее давление будет меняться не только на разных этажах, но и в пределах одного этажа – это зависит от используемой системы вентиляции, но также и от геометрии здания, наличия плотных преград, перегородок, шахт, лестниц и т. д. Давление в здании определяется расчетом из условия соблюдения равенства масс воздуха, поступающего в здание и удаляемого из него. Такой расчет внутренней аэродинамики здания – достаточно сложная задача, рассмотрение которой выходит за рамки настоящей статьи.

Сравним результаты расчета разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций по предложенной формуле с расчетом по методике из нормативных документов. В СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [5] разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций ΔP_n , Па, определяются по формуле (2):

$$\Delta P_n = (H-h)(\rho_n - \rho_B)g + \frac{\rho_n v^2}{2}(c_n - c_3)k_{z(e)} - P_B, \text{ Па}, \quad (2)$$

где H – высота здания (от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты), м;

h – расстояние от уровня пола первого этажа до центра рассматриваемой ограждающей конструкции, м;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

ρ_B, ρ_n – плотность внутреннего и наружного воздуха, определяемые по формуле (3), кг/м^3

$$\rho_B = \frac{353}{273+t} \quad (3)$$

v – расчетная скорость ветра в холодный период года;

c_n и c_3 – аэродинамические коэффициенты соответственно для наветренной и подветренной поверхностей ограждений здания, принимаемые по СП 20.13330. Для зданий прямоугольной формы c_n принимается равным 0,8; c_3 принимается равным (-0,6);

$k_{z(e)}$ – коэффициент учета изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания, принимаемый по СП 20.13330;

P_B – условное давление в помещении, Па, от уровня которого отсчитаны первое и второе слагаемые формулы (2).

В СП 60.13330.2020 при отсутствии в помещении организованной вентиляции условное давление в помещении предлагается принимать по формуле (4) как полусумму барометрического и ветрового давления на верхней отметке здания (что примерно равно давлению в средней части здания):

$$P_B = \frac{H(\rho_n - \rho_B)g}{2} + \frac{\rho_n v^2}{4}(c_n - c_3)k_{z(e)}, \text{ Па}. \quad (4)$$

Проведем сопоставительные расчеты разности давлений по методикам, изложенным в [1] и [5], для здания высотой 300 м. В качестве исходных данных примем:

- температура наружного воздуха $-26 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура внутреннего воздуха $+18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- скорость ветра 5 м/с;
- высота здания 300 м;
- аэродинамический коэффициент для наветренной поверхности ограждений здания 0,8;
- аэродинамический коэффициент для подветренной поверхности ограждений здания $-0,6$.

Функцию распределения температуры по высоте помещения примем $\varphi(z) = 1$. Характер изменения скорости ветра по высоте примем для условий плотной городской застройки (городского центра).

Внутреннее статическое давление в здании примем условно-постоянным, равным 101 124 Па. Результаты расчета сведены в таблицу.

Таблица

Результаты расчета разности давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций

| Высота, м | Расчетная разность давления, Па, по методике [1] | Расчетная разность давления, Па, по методике [5] |
|-----------|--|--|
| 0 | 763 | 290 |
| 25 | 423 | 380 |
| 50 | 80 | 341 |
| 75 | -263 | 297 |
| 100 | -605 | 251 |
| 125 | -948 | 204 |
| 150 | -1289 | 155 |
| 175 | -1631 | 106 |
| 200 | -1971 | 57 |
| 225 | -2311 | 7 |
| 250 | -2651 | -43 |
| 275 | -2990 | -93 |
| 300 | -3328 | -144 |

Анализ результатов расчета показывает, что более точный учет изменения параметров наружного климата (температуры, барометрического давления и скорости ветра) по высоте существенно влияет на результаты расчетов фильтрации воздуха через ограждающие конструкции. Можно отметить, что в методике [1] более важное значение имеет не ветровая составляющая, а изменение наружного барометрического давления (что, кстати, очень хорошо согласуется с расчетными формулами изменения барометрического давления по высоте, приведенными в [3]). При этом в верхней части высотного здания наблюдается отрицательная разность давлений. Нейтральная линия находится между высотами 50 и 75 м для методики [1] и 225–250 м для методики [5]. При увеличении скорости ветра в два раза расчет по методике [5] даст результат, соответствующий положительной разности давлений по всей высоте здания. Расчет по методике [1] при увеличении скорости ветра в два раза показывает, что характер изменения разности давлений существенно не меняется (из-за

большой роли изменения наружного барометрического давления). Но, как уже было отмечено выше, в любом случае существенную роль будет играть правильное определение внутреннего давления.

В заключение следует отметить важное обстоятельство. В [5] указано, что для помещений со сбалансированной приточно-вытяжной вентиляцией величиной инфильтрации пренебрегают, а при поддержании в рассматриваемом помещении расчетного подпора воздуха организованными системами вентиляции (избыточного давления, повышенного по сравнению с атмосферным или давлением в соседних помещениях) за счет превышения количества приточного воздуха над вытяжным инфильтрационные тепловые потери не учитываются. При этом количество приточного воздуха, обеспечивающего этот подпор, должно быть учтено при расчете расходов тепла на вентиляцию. Поскольку в высотных зданиях традиционно используются механические приточно-вытяжные системы вентиляции, может сложиться представление, что в расчете разности давлений нет необходимости. Но это не так. Известны примеры строительства высотных зданий, в которых используется естественная вентиляция [6]. Механическая вентиляция может отключаться, например, в общественных зданиях в ночное время. И в последние годы специалисты все чаще и чаще обращают свое внимание на так называемые адаптивные, регулируемые по потребности системы вентиляции, обеспечивающие высокий уровень комфорта при оптимальном энергопотреблении, – эти системы также могут отключаться на некоторое время.

Литература

1. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.
2. Серебровский Ф. Л. Аэрация жилой застройки. – М., 1971.
3. ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI Edition.
4. Табунщиков Ю. А., Шилкин Н. В. Аэродинамика высотных зданий // АВОК. – 2004. – № 8.
5. СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».
6. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003.