



Эффект тяги: от движущей силы естественной вентиляции к головной боли высотных зданий

Д. М. Денисихина, канд. физ.-мат. наук, заместитель генерального директора ООО «ММ-Технологии», доцент ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»

М. В. Самолетов, исполнительный директор ООО «ММ-Технологии»

Ключевые слова: высотное здание, эффект тяги, stack effect, воздухораспределение, уровень нейтрального давления, перепад давления, дисбаланс системами вентиляции, вертикальное зонирование здания

Коллективом ООО «ММ-Технологии» за последние пять лет накоплен теоретический и практический опыт, основанный на моделировании более 30 высотных зданий, проектируемых в России, и натурном обследовании нескольких таких объектов, расположенных в Москве.

Данная статья предваряет цикл публикаций, посвященных эффекту тяги (stack effect, стак-эффект) в высотных зданиях России. Ее цель – проследить, как вслед за увеличением количества этажей и изменениями технических решений меняется воздушный режим здания; как от классической схемы движения воздушных потоков при естественной вентиляции происходит переход к схеме в условиях действия эффекта тяги в высотных зданиях. В рамках данной статьи будем рассматривать жилые здания.

Эффект тяги, возникающий в холодный период года, приводит к серьезным проблемам при эксплуатации высотного здания зимой.

Набравшее популярность высотное строительство в России заставляет по-новому взглянуть на привычные представления о распределении воздушных потоков в жилых зданиях. При этом ситуация в здании изменяется вместе с увеличением высоты самого здания.

В настоящее время в мире отсутствует единая однозначная трактовка понятия «высотное здание». В СП 267.1325800.2016 приводится только один критерий для определения высотности здания: к высотным жилым зданиям относятся все здания

высотой более 75 м. В то же время, например, Советом по высотным зданиям и городской среде (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, СТБУН) приводится более подробная градация высотности, согласно которой выделяются здания от 150 м (высотные), от 300 м (сверхвысотные) и от 600 м (мегавысотные).

При исследовании эффекта тяги и проблем, вызываемых им при эксплуатации зданий, а также с учетом российских норм и мирового опыта нами выделены следующие классы зданий (для климатических условий г. Москвы):

- **класс 1.** Здания до 35 м – мало-, средне- и многоэтажные;

- **класс 2.** Здания от 35 до 75 м – повышенной этажности;
- **класс 3.** Здания от 75 до 150 м – квазивысотные;
- **класс 4.** Здания от 150 до 300 м – высотные;
- **класс 5.** Здания от 300 до 600 м – сверхвысотные;
- **класс 6.** Здания выше 600 м – мегавысотные.

Отметим, что данное разделение на классы достаточно условное и четкой границы нет. С увеличением высоты здания меняются подходы к борьбе с последствиями эффекта тяги, требования к объемно-планировочным и инженерным решениям. Как следствие, меняется картина воздушных потоков в здании.

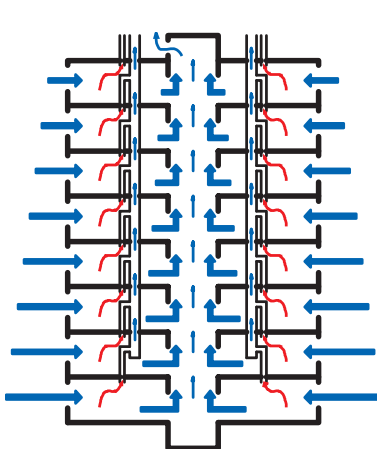
Ниже покажем, как одни и те же решения из полезных и необходимых для нормальной работы классической естественной вентиляции превращаются во вредные и опасные при увеличении высоты здания. Большие проблемы возникают в здании именно тогда, когда само здание «выросло», а организацию воздушного режима ему оставили как «маленькому».

КЛАСС 1. Здания до 35 м – мало-, средне- и многоэтажные

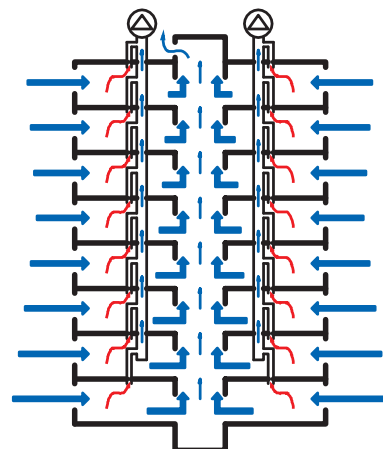
Для зданий данного класса эффект тяги позволяет успешно использовать схему естественной вентиляции квартир.

При этом:

- 1) приток воздуха осуществляется через открытые форточки, неплотности в окнах, микрощелевое проветривание;
- 2) вытяжные сборные каналы проходят снизу до верха здания;



■ Рис. 1. Схема воздушных потоков для зданий класса 1



■ Рис. 2. Схема с вентилятором на вытяжном сборном канале

3) шахты лифтов, при наличии, проходят снизу до верха здания и в оголовках имеют сообщение с улицей. Последнее направлено на то, чтобы при движении лифтовой кабины по шахте не происходило заметного сжатия/разрежения воздуха (поршневой эффект), а также для охлаждения двигателей.

Сечения вытяжных каналов подбираются таким образом, чтобы при естественной тяге, возникающей при температуре наружного воздуха $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, для каждой квартиры соблюдалась норма воздухообмена. При этом расчет, в соответствии с методикой, ведется при условии открытой форточки. Т. е. расчетный расход воздуха, основанный на нормативном воздухообмене, при естественной вентиляции является достаточно условной величиной, реализующейся при определенной температуре наружного воздуха и беспрепятственном поступлении уличного воздуха в квартиру.

На рис. 1 представлена хорошо знакомая схема воздушных потоков, формирующаяся зимой в жилом здании при естественной вентиляции квартир.

КЛАСС 2. Здания от 40 до 75 м – повышенной этажности

Чем выше становится здание, тем сильнее отличие в величине тяги нижних и верхних этажей, тем больший разброс в величине расхода наружного воздуха, поступающего в квартиру в холодный период года. Кроме того, современные здания стали оснащать клапанами проветривания (оконными или стеновыми). Последние создают дополнительное сопротивление естественному движению воздуха в системе естественной вентиляции. Как следствие, сечения шахт, рассчитанные, как правило, на условие «открытой форточки», при $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ не обеспечивают поступления нормативного расхода воздуха в жилые помещения.

Установка вытяжного вентилятора на сборном канале (рис. 2) способствует выравниванию расхода наружного воздуха, поступающего в квартиры нижних и верхних этажей в холодный период года. Также наличие вентилятора обеспечивает работу системы вентиляции квартир, когда температура на улице выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С увеличением высоты здания в холодный период года увеличивается и тяга. Через открытые клапаны нижних этажей заметно возрастает расход наружного воздуха. В этом случае жильцы прикрывают клапаны, но тогда при низких температурах наружного воздуха на них начинает собираться существенный перепад давления. Например, при высоте здания 70 м и температуре на улице $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ перепад давления на прикрытом клапане может достигать 50–100 Па. В результате в квартире возникает шум/свист. Перепад давления будет еще больше расти с уменьшением температуры наружного воздуха и с увеличением высоты здания.

КЛАСС 3. Здания от 75 до 150 м – квазивысотные

С дальнейшим увеличением высоты здания проблемы на нижних жилых этажах продолжают усугубляться, в т. ч. становятся критичными проблемы со свистом приточных клапанов. Требуется разработка компенсационных мер. Одним из решений является установка клапанов

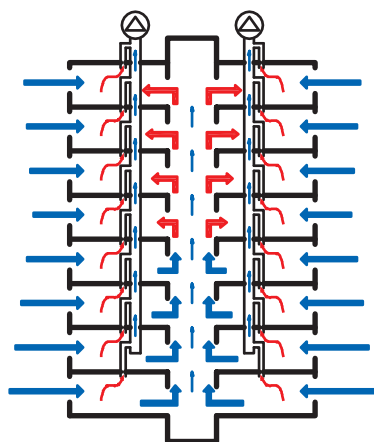


Рис. 3. Схема воздушных потоков при герметичных оголовках лифтовых шахт

постоянного расхода на спутники вытяжного канала. Данные клапаны собирают на себе часть перепада давления, который до этого собирался на приточном клапане. Это позволяет «разгрузить» приточный клапан и устранить шумы. Кроме того, такая мера ограничивает расход наружного воздуха проектными значениями – не возникают сквозняки.

Первый этаж современных высотных зданий представляет собой, как правило, общий вестибюль. В результате значительные перепады давления, имеющие место для нижних этажей здания, распределятся на дверях по пути от улицы к лифтовой шахте. Возникает опасность формирования значительных перепадов давления и на самих дверях лифтовых шахт. Так, для здания высотой 140 м при температуре на улице $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ между всеми дверями первого этажа может распределиться около 270 Па. Встает вопрос о необходимости правильной организации входных групп, планировки пути от входа до лифтов, создания дисбаланса системами вентиляции и прочее.

Так, распространенное решение организации положительного дисбаланса системами вентиляции в вестибюле, направленное на сокращение количества инфильтрующегося в вестибюль уличного воздуха, приводит к дополнительному увеличению перепадов давлений на дверях лифтов. Отметим, что при перепаде давления на дверях в лифтовую шахту выше 25 Па двери могут перестать нормально закрываться, лифт не сможет уехать с этажа, появится шум.

В высотных зданиях оголовки лифтовых шахт или машинные помещения не должны

напрямую соединяться с улицей. Такое соединение приводит к росту перепадов давлений на нижних этажах. Как следствие, увеличится перепад давлений на дверях лифтов и расходы воздуха по лифтовым шахтам. Возникает шум/свист, заклинивание дверей.

При исключении открытых соединений оголовков лифтовых шахт и машинных помещений лифтов с улицей схема потоков в здании меняется и становится такой, как показано на рис. 3. В этом случае для охлаждения лифтового оборудования может использоваться либо сплит-система, либо приточно-вытяжная система, способная поддерживать перепад давления между верхней частью лифтовых шахт и улицей.

КЛАСС 4. Здания от 150 до 300 м – высотные

Начиная с некоторой высоты трудно обеспечить нормальное функционирование здания в холодный период года при организации естественного притока через клапаны в фасаде. Это связано с необходимостью

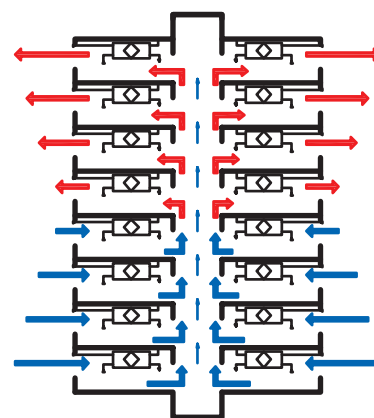


Рис. 4. Схема потоков воздуха в здании при использовании механической приточно-вытяжной вентиляции

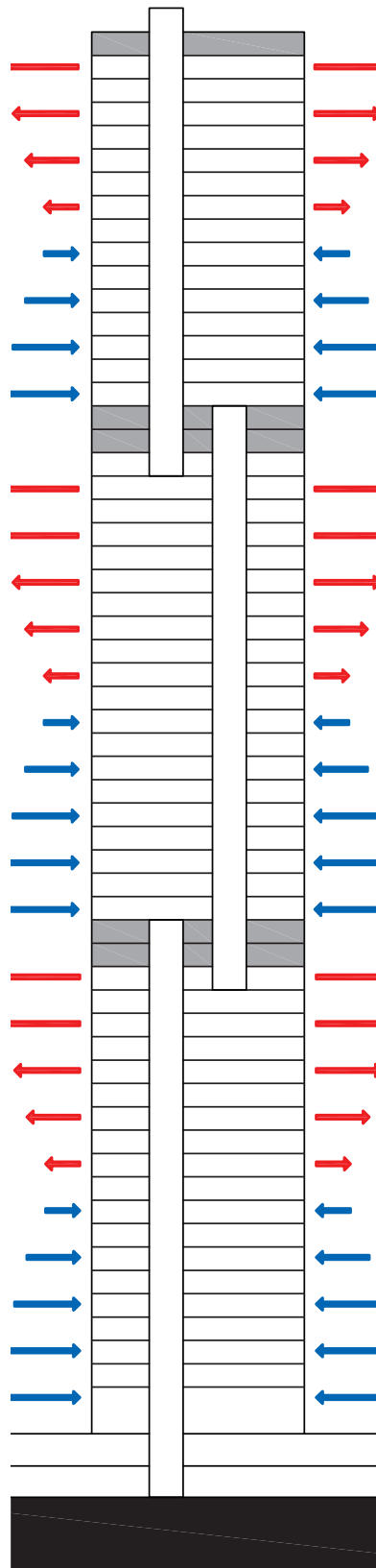
собирать заметную часть перепада давления на фасаде: все, что удастся собрать на внешней оболочке здания, не соберется на внутренних дверях, и пользоваться зданием становится комфортно. Приточные клапаны в этом случае становятся помехой, так как приводят к «разгерметизации» фасада, не позволяя эффективно собирать на нем перепад давления.

Держать перепад давления на фасаде можно при установке приточной механической системы вентиляции. В этом случае картина распределения воздушных потоков в здании, в т. ч. направление течения через фасад, меняется и становится как на рис. 4.

Следует обратить внимание, что при использовании поквартирных вентиляционных установок для поддержания «полезного» перепада давления на фасаде следует поддерживать такой же перепад и в воздухозаборном канале установок. Причем для верхних и нижних этажей здания собираемые перепады давлений имеют противоположный знак.

КЛАСС 5. Здания от 300 до 600 м – сверхвысокие

Для зданий выше 300 м следует применять вертикальное зонирование лифтовых шахт, лестничных клеток и шахт инженерных систем. Т. е. разделять шахты, идущие через все здание и являющиеся основным источником эффекта тяги, на отдельные вертикальные участки. При таком зонировании лифт идет только до определенного этажа, называемого скай-лобби. Затем первая группа лифтовых шахт



■ Рис. 5. Схема потоков воздуха в здании при вертикальном зонировании лифтовых шахт

заканчивается и начинается вторая, например как показано на рис. 5. Пассажиры выходят на этаже пересадки (скай-лобби) и через тамбуры попадают в лифтовой холл к лифтам, идущим на этажи следующей зоны. Такая мера позволяет разбить один большой эффект тяги на несколько эффектов меньшего масштаба.

Отметим, что в практике строительства и проектирования зданий выше 300 м в России реального вертикального зонирования лифтовых шахт не происходит. Всегда остается хотя бы один лифт (пожарный или ВИП-лифт), идущий с нижних этажей на самый верх, сводя на нет усилия по вертикальному зонированию здания. Как следствие, в здании вынужденно появляются серии шлюзов (проход от лифтов к помещениям через несколько последовательно открываемых герметичных дверей). Это затрудняет комфортное пользование зданием.

Для классов 3–5 помимо объемно-планировочных решений, разрабатываемых под конкретное здание, необходимо предусматривать эффективную схему организации дисбалансов систем вентиляции для отдельных групп помещений, лифтовых шахт. Такие дисбалансы при правильной регулировке способны перераспределять перепады давлений между преградами, повышая комфорт при использовании здания.

Чем выше здание, тем больше оно должно становиться похожим на космический корабль или подводную лодку. Возникает необходимость отделить внутреннее пространство от наружной среды. Разгерметизация в виде открываемых в холодный период года форточек не допускается.

КЛАСС 6. Здания выше 600 м – мегавысокие

Здания этого класса требуют, по сути, тех же решений, что и класса 5, но их выполнение должно происходить еще с большей точностью и технологичностью. Высокие требования

к герметичности фасада, обязательное вертикальное зонирование лифтовых шахт, лестничных клеток, организация последовательных шлюзов, двойных тамбуров в местах выхода на улицу (снизу и сверху здания), тщательный подбор взаимной герметичности дверей на пути движения воздушных потоков в здании.

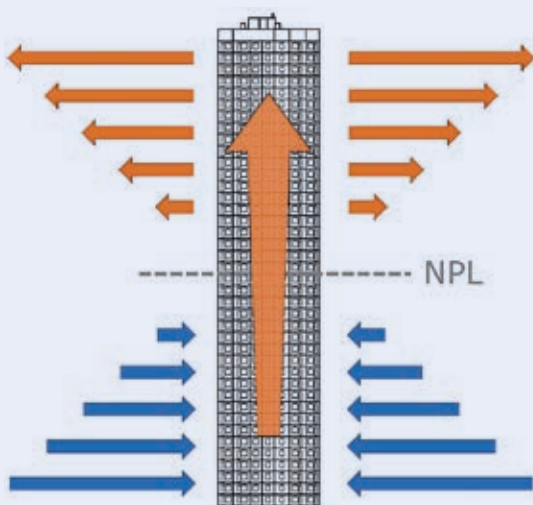
Выводы

Резюмируем: stack effect – это привычный эффект тяги, благодаря которому успешно функционирует классическая схема естественной вентиляции. И одновременно с этим stack effect становится головной болью зданий, высота которых превышает

Теоретическая часть

Эффект тяги (stack effect) возникает из-за отличия плотностей наружного и внутреннего воздуха. Плотность воздуха зависит от его температуры, и чем больше разница температур наружного и внутреннего воздуха, тем сильнее эффект тяги. Так, холодный наружный воздух имеет более высокую плотность, а следовательно, он «тяжелее» внутреннего теплого воздуха. Под действием своего веса он давит на оболочку здания, причем чем ниже этаж, тем сильнее давление.

Таким образом, на нижних этажах формируется перепад давления со стороны улицы к внутренним вертикальным шахтам (наружный воздух стремится затекать в здание через неплотности). В верхней части формируется обратный перепад давлений от вертикальных шахт к улице (воздух стремится из здания вытекать). Часть здания, в которую воздух стремится затекать, отделяется от части, из которой воздух стремится вытекать, так называемым уровнем нейтрального давления (NPL – neutral pressure level) (рис. 6). Положение NPL зависит от свойств воздухопроницаемости оболочки зданий, проницаемых ограждающих конструкций, геометрии самого здания и дисбалансов, создаваемых системами вентиляции.



■ Рис. 6. Stack effect в здании. Затекание и вытекание воздуха по высоте лифтовых шахт, лестничных клеток

Т. е. по всем ограждающим конструкциям здания на каждой высоте устанавливается свой перепад давления. Величина перепада давления ΔP на высоте h здания связана с высотой положения уровня нейтрального давления h_{NPL} (линии NPL) и плотностями внутри (ρ_i) и снаружи (ρ_o) здания по формуле:

$$\Delta P = (\rho_o - \rho_i) g (h_{\text{NPL}} - h). \quad (1)$$

Таким образом, проведенное в начале статьи разбиение зданий по высоте на классы 1–5 справедливо для конкретного масштаба ΔT , в рассмотренном случае для расчетного значения наружной температуры для Москвы -26°C и температуры внутреннего воздуха $+20^\circ\text{C}$. Очевидно, что чем теплее зимой климат, тем меньше масштаб эффекта тяги согласно (1), и наоборот. Так, например, для г. Екатеринбурга расчетная температура для холодного периода года -32°C , соответственно, максимальные значения ΔP будут примерно на 15 % больше в сравнении с аналогичным зданием в Москве.

Поэтому высоты, указанные при делении зданий на классы с позиции масштаба эффекта тяги, при распространении на различные климатические регионы должны быть умножены на коэффициент:

$$K_{\text{ht}} = (T_i / T_{\text{о город}} - 1) / (T_i / T_{\text{о Москва}} - 1), \quad (2)$$

где T_i , $T_{\text{о город}}$ – внутренняя и наружная температура в $^\circ\text{K}$ для рассматриваемого здания.



С НАМИ КОМФОРТНО

КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Вентиляционное оборудование
- Кондиционеры
- Чиллеры и фанкойлы
- Увлажнители воздуха
- осушители воздуха
- Системы автоматики



70–100 м (для климата Москвы, Санкт-Петербурга).

Основные «симптомы головной боли» в холодный период года:

- заклинивание дверей лифтов на нижних этажах;
- затрудненность открытия наружных дверей, дверей в лифтовые холлы, квартиры;
- шум в здании, возникающий из-за прохода воздуха через неплотности;
- неконтролируемые потоки воздуха (сквозняки).

Снизить непосредственно саму тягу можно несколькими способами:

- разбить вертикальные связи (шахты) по высоте на отдельные участки с организацией шлюзов между участками;
- понизить температуру воздуха в вертикальных шахтах. В этом случае уменьшится перепад температур (и, соответственно, разность плотностей) внутри шахт и снаружи здания, а следовательно, сократятся максимальные перепады давлений (1).

Кроме снижения самой тяги, можно минимизировать ее негативные последствия. Для этого:

- 1) можно предусмотреть последовательно расположенные преграды (шлюзы с дверьми) на пути движения воздуха от вертикальных шахт к фасаду. Преграды должны быть согласованы между собой по степени герметичности, чтобы иметь возможность правильным образом распределять перепады давлений;
- 2) наиболее эффективным способом является сбор перепадов давления на неэксплуатируемом фасаде (в холодный период года не допускается открывание

форточек, отсутствуют стеновые, оконные клапаны). При этом автоматически разгружаются внутренние двери, которые постоянно эксплуатируются обитателями здания;

- 3) разрабатывается эффективная схема организации дисбалансов систем вентиляции для отдельных групп помещений, лифтовых шахт.

Отметим, что набор конкретных архитектурных и инженерных решений зависит не только от высоты здания, но также определяется его объемно-планировочными решениями, в т. ч. особенностями организации входной группы. Нельзя автоматически распространять все решения одного здания на другое здание такой же высоты.

Литература

1. Simmonds P. ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall, and Megatall Building Systems. 2015.
2. Росс Д. Проектирование систем ОВК высотных общественных многофункциональных зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004.
3. Эффект тяги в высотных зданиях – проблемы и решения // АВОК. – 2016. – № 3.

В последующих статьях планируется детально рассмотреть трудности при разработке объемно-планировочных решений, проектировании систем ОВиК и ПВ, возникающие вследствие особенностей функционирования высотного здания в холодный период года, а также привести конкретные решения, направленные на уменьшение негативных последствий эффекта тяги.



Москва, улица Тимирязевская, 1, строение 4.
Тел.: (495) 981 1515, (499) 755 1515.
Факс: (495) 981 0117.

Санкт-Петербург, улица Разъезжая, 12, офис 43.
Тел.: (812) 441 3530. Факс: (812) 441 3535.

www.ARCTIKA.ru