

# Роль уровня нейтрального давления при проектировании высотных зданий

www.souptstock.in

**Д. М. Денисихина, доцент СПбГАСУ, зам. ген. директора ООО «ММ-Технологии»**

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

**В. И. Воробьев, аспирант СПбГАСУ, инженер-проектировщик ООО «ММ-Технологии»**

**Ключевые слова:** высотное здание, эффект тяги, уровень нейтрального давления, перепад давления, герметичность ограждающих конструкций, шахта здания

В статье «Эффект тяги: от движущей силы естественной вентиляции к головной боли высотных зданий» [1] рассмотрена эволюция строительства жилых зданий с точки зрения адаптации архитектурных и инженерных решений к увеличению высоты здания, направленной на возможность его комфортной эксплуатации в холодный период года.

В настоящей статье подробно рассмотрена роль уровня нейтрального давления при формировании воздушного режима высотного здания, установление его естественного положения по вертикальным шахтам и управление этим положением для уменьшения негативных последствий эффекта тяги.

Физическая основа эффекта тяги связана с разницей плотностей наружного и внутреннего воздуха. Плотность воздуха существенно зависит от его температуры, и чем значительнее разница температур между наружным и внутренним воздухом, тем сильнее проявляется эффект тяги.

Так, в холодный период года наружный холодный воздух – «тяжелый», а воздух в вертикальных шахтах здания (лифтовые шахты, лестничные клетки, вентиляционные шахты и пр.) – «легкий». Между улицей и вертикальными шахтами здания возникает перепад давления, который тем больше, чем холоднее на улице (чем больше разница весов наружного и внутреннего воздуха).

Вследствие наличия неплотности в ограждающих конструкциях, под действием сформировавшегося перепада давления, начинается затекание наружного воздуха через фасады здания в шахты. При этом по закону сохранения массы суммы расходов

воздуха, втекающих и вытекающих из шахт, должны быть равны. В результате в нижней части шахты будет происходить затекание воздуха, а в верхней части – вытекание. Место условного разделения шахт на такие части называется уровень нейтрального давления (NPL – neutral pressure level) [2], нейтральная плоскость [3], нейтральная линия [4], нейтральная ось [5], плоскость равных давлений [6] и пр. В дальнейшем изложении мы будем придерживаться термина «уровень нейтрального давления», или NPL.

Уровень нейтрального давления – важный параметр, характеризующий эффект тяги и определяющий движение воздуха внутри здания на разных этажах. В частности, от положения NPL зависят величины перепадов давления, формируемых на ограждениях. В свою очередь, само положение NPL зависит от свойств воздухопроницаемости оболочки здания, внутренних ограждающих конструкций и элементов инженерных систем,

архитектурно-планировочных решений самого здания и работы систем вентиляции.

Представим, что все шахты здания одной высоты и «открыты» сверху, т. е. сопротивления для выхода воздуха из шахт практически нет. Тогда на всех этажах здания давление внутри будет ниже, чем снаружи, и, как следствие, уличный воздух будет затекать в такие шахты по всей высоте здания. При этом максимальный перепад давления между улицей и каждой шахтой будет определяться высотой шахты и разностью плотностей наружного и внутреннего воздуха (считаем, что потери давления при движении воздуха по шахте лифта, лестницы пренебрежимо малы), т. е. равняться располагаемому давлению:

$$\Delta P = (\rho_{\text{нар}} - \rho_{\text{внутр}}) g h_{\text{шахты}}, \text{ Па.}$$

В этом случае внизу каждой шахты перепад давления будет максимальным и будет постепенно уменьшаться по мере приближения к верхней точке шахты, где расположен свободный выход (рис. 1). Уровень нейтрального давления в этом случае находится на верхней отметке шахт.

Теперь представим, что шахты не имеют сверху свободного выхода. Создаваемый перепад давления между шахтами и улицей будет также приводить к затеканию наружного воздуха в шахты здания. Однако теперь воздух не может беспрепятственно выйти сверху и будет вынужден покидать шахты через неплотности, аналогичные тем, через которые он поступил (неплотности фасада, дверей на этажах, дверей в шахты лифтов и лестничных клеток, клапаны и неплотности в вентиляционных шахтах и пр.). Чтобы поступивший в здание воздух мог выйти наружу, давление внутри шахты на этажах вытекания должно стать выше давления на улице на соответствующей высоте. В результате давление внутри здания увеличится до некоего равновесного значения и установится новое положение уровня нейтрального давления (рис. 2).

При этом располагаемое давление для каждой шахты будет расходоваться на потери давления при затекании воздуха в шахту через неплотности и вытекании из нее. Например, при условии равномерной по высоте воздухопроницаемости ограждающих конструкций здания максимальный перепад давления на нижнем и верхнем этажах здания будет равен  $\approx \Delta p_{\text{расп}}/2$ . NPL при этом расположится посередине высоты шахт (рис. 3).

При увеличении герметичности верхней части здания по сравнению с нижней NPL по шахтам опустится. Это связано с тем, что для обеспечения равенства сумм расходов воздуха, втекающих и вытекающих из здания, давление внутри здания должно подняться (рис. 4).

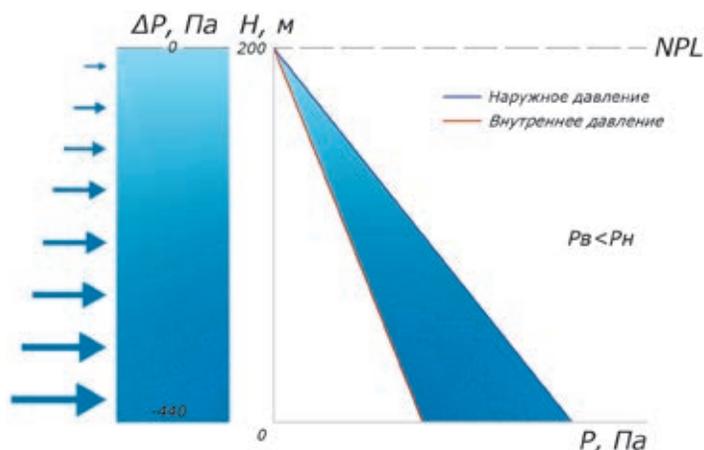


Рис. 1. Эпюра изменения давления по высоте здания

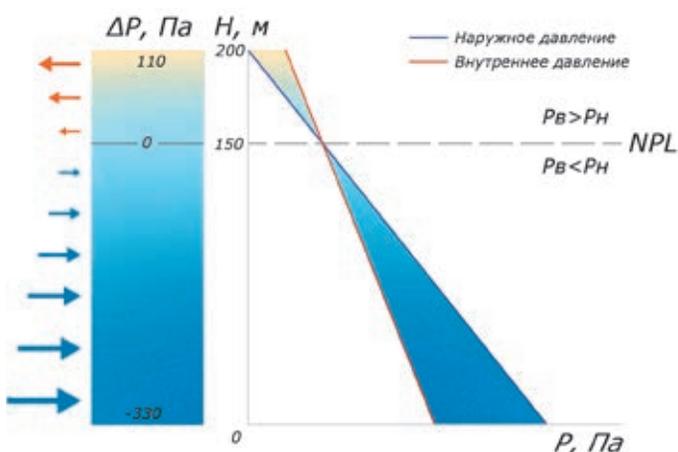


Рис. 2. Эпюра изменения давления по высоте здания

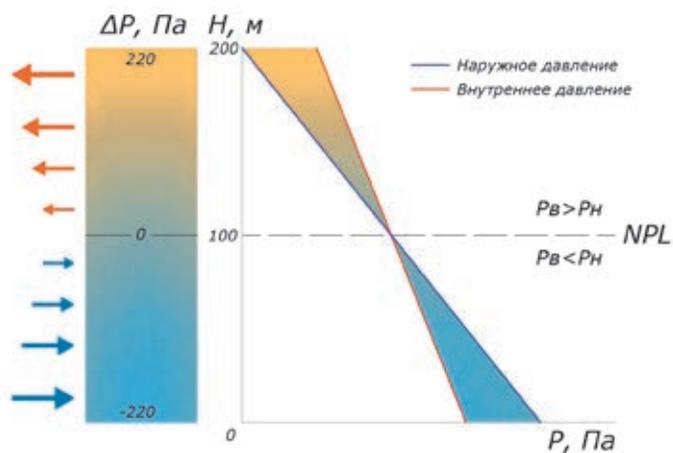


Рис. 3. Эпюра изменения давления по высоте здания

В случае если герметичность здания внизу существенно меньше, чем наверху (например, много входных групп с низкой герметичностью), воздух будет фактически без сопротивления поступать в здание. Практически весь располагаемый перепад давления в этом случае будет расходоваться на преодоление сопротивления при движении воздуха от шахты к улице. То есть давление внутри здания поднимется

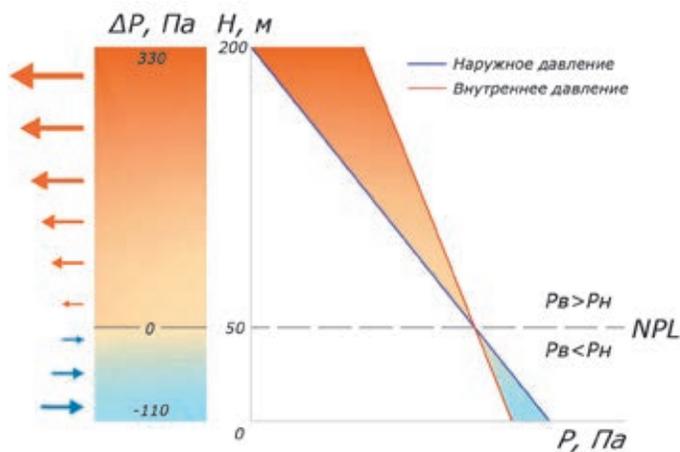


Рис. 4. Эпюра изменения давления по высоте здания

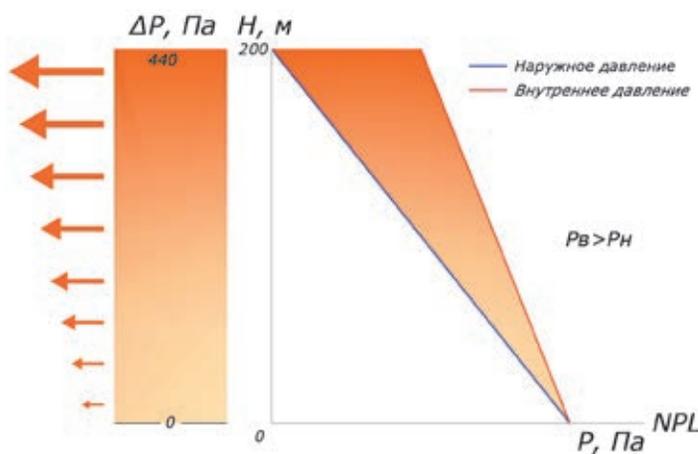


Рис. 5. Эпюра изменения давления по высоте здания

так, что по всей его высоте будет происходить вытекание воздуха через фасад здания (рис. 5).

Кроме герметичности ограждающих конструкций на положение уровня нейтрального давления в шахтах здания оказывают влияние неплотности в инженерных системах или в местах их прохождения между перекрытиями и перегородками. Одним из ярких примеров являются противопожарные клапаны в системах противодымной вентиляции, пронизывающие все здание и зачастую не обладающие достаточной герметичностью. Чем больше таких систем с негерметичными клапанами в верхней части здания, тем NPL будет выше.

Отдельно следует отметить влияние общеобменной вентиляции на положения уровней нейтрального давления в шахтах здания, а точнее, дисбалансов, создаваемых данными системами в здании. Так, положительные дисбалансы будут приводить к смещению NPL вниз, а отрицательные дисбалансы – к смещению NPL вверх. Под дисбалансами общеобменной вентиляции в данном случае подразумевается фактическое несовпадение расходов приточного и вытяжного воздуха. То есть дисбалансы, создаваемые механическими системами, примут участие в

установлении NPL в новое равновесное положение при выполнении закона сохранения массы по всему зданию. Важно отметить, что дисбалансы приведут к смещению NPL в конкретной шахте, только если у воздуха будет относительно беспрепятственный доступ к этой шахте. В противном случае проектные дисбалансы приведут к перераспределению перепадов давления между ограждающими конструкциями, практически не повлияв на положение NPL.

Отметим также, что NPL по каждой из шахт здания может располагаться на своей высоте, например как в часто встречающемся случае, представленном на рис. 6. Положение NPL для каждой из шахт определяется распределением герметичности конструкций по высоте здания между шахтой и улицей, а также дисбалансом, создаваемым механическими системами вентиляции. Шахты с отличающимся положением NPL начинают оказывать влияние друг на друга. В результате на ограждающих конструкциях между такими шахтами (например, на дверях между лестничной клеткой и шахтой лифта либо на дверях лифтовых холлов между двумя обособленными шахтами лифта) будут формироваться перепады давления. Последнее приведет к перетеканию воздуха из одной шахты в другую, что, в свою очередь, повлияет на положение NPL обеих шахт: более высокий NPL сдвинется вниз, более низкий – вверх. Такое взаимное влияние всех частей здания друг на друга затрудняет умозрительный анализ воздушного режима здания. Для ряда случаев, чтобы полноценно проанализировать влияние эффекта тяги на здание или комплекс зданий, требуется проведение моделирования эффекта тяги, а именно воздушного режима здания в холодный период года.

Итак, в зависимости от того, на какой высоте будут располагаться NPL по шахтам, будут формироваться различные перепады давления на внутренних ограждающих конструкциях по высоте здания. Эти перепады давления являются одним из отрицательных следствий действия эффекта тяги в высотных зданиях. Повышенные перепады давления могут формироваться на дверях квартир, офисов, лифтовых холлов, лифтов и препятствовать их нормальной эксплуатации.

В зависимости от направления открывания распашной двери повышенный перепад давления на ней может препятствовать открыванию/закрыванию дверей. И то, и то приводит к дискомфорту при использовании таких дверей. В СП 7.13130.2013 для систем противодымной вентиляции регламентирован перепад давлений на дверях не выше 150 Па. Это предел, при котором считается, что дверь еще

сможет открыть взрослый человек. При более высоких давлениях открыть такую дверь может оказаться невозможно. ГОСТ 31173-2016 «Блоки дверные стальные» в п. 5.3.9 указано: «Усилие, необходимое для открывания дверного полотна, не должно превышать 75 Н (эргономические требования)». То есть для дверного полотна площадью  $2 \text{ м}^2$  это равноценно давлению 75 Па. Таким образом, для комфортного использования условной двери  $2 \text{ м}^2$  перепад давления на ней не должен превышать 75 Па (равноценно усилию поднятия груза  $\sim 7,5 \text{ кг}$ ), а максимальный перепад давлений не должен превышать 150 Па (усилие 15 кг).

Также следует принимать во внимание, что высокий перепад давления может привести к повышенным расходам воздуха через ограждающую конструкцию, не обладающую достаточной герметичностью. Повышенный расход воздуха может привести к увеличению скорости воздуха в щелях конструкций и возникновению аэродинамического шума. Так, для дверей лифтовых шахт при расходе выше  $300\text{--}360 \text{ м}^3/\text{ч}$  возникает опасность генерации аэродинамического шума.

Рассмотрим, как влияет различное положение NPL в шахтах высотного здания на его эксплуатацию (рис. 7).

При смещении NPL в нижнюю часть здания (рис. 7а) располагаемое давление тратится на преодоление сопротивлений движению воздуха на нижних этажах в меньшей степени, чем на верхних. То есть суммарный перепад давления от улицы к шахте на нижних этажах снижается, а следовательно, облегчается эксплуатация входных дверей, дверей на пути к лифтовым шахтам, лестничным клеткам. Однако при этом на нижних этажах, как правило,

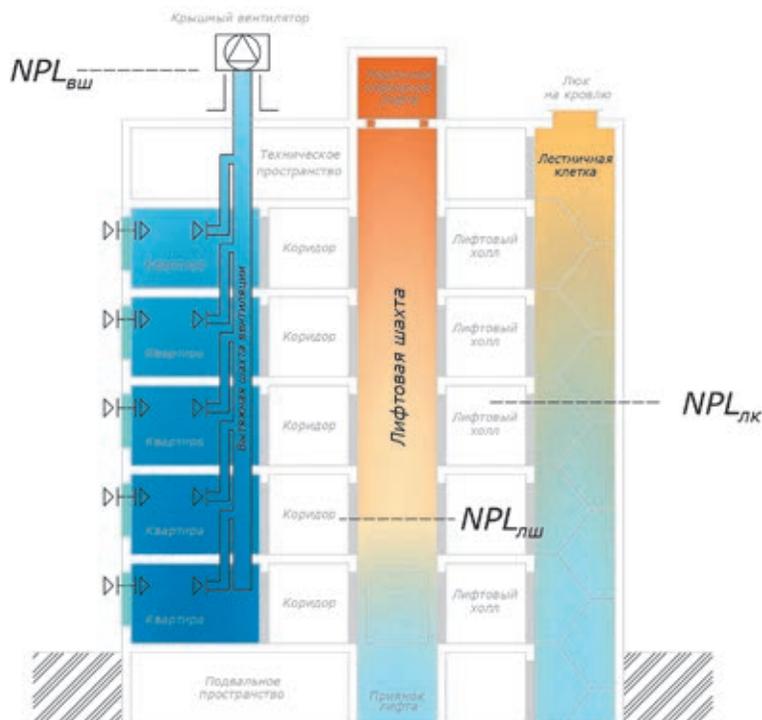


Рис. 6. Уровни нейтрального давления (NPL) по различным шахтам здания

возникают повышенные расходы воздуха. Это могут быть как контролируемые расходы, например организация дисбаланса, так и неконтролируемые, т. е. естественная инфильтрация. В любом случае повышенные расходы могут стать причиной возникновения шумов и повышенной нагрузки на системы отопления выше расчетных величин. Вторым моментом, характерным для низкого положения NPL, являются повышенные перепады давления на верхних этажах. Это может стать причиной проблем с эксплуатацией дверей и окон, а также выходов на террасы в верхней части здания в холодное время года. Отметим, что верхние этажи высотных зданий, как правило, отдаются под элитные офисы, апартаменты, пентхаусы, при этом эти этажи – одно из самых проблемных мест с точки зрения эффекта тяги.

Для жилых зданий с централизованной системой вытяжной вентиляции NPL по вытяжным шахтам располагается в верхней части. В таких зданиях низкое положение NPL по лифтовым шахтам будет приводить к росту перепада давления от лифтовой шахты к вытяжной шахте вентиляции. Как следствие, формируются значительные перепады давления и расходы воздуха, перетекающего через неплотности в ограждающих конструкциях из

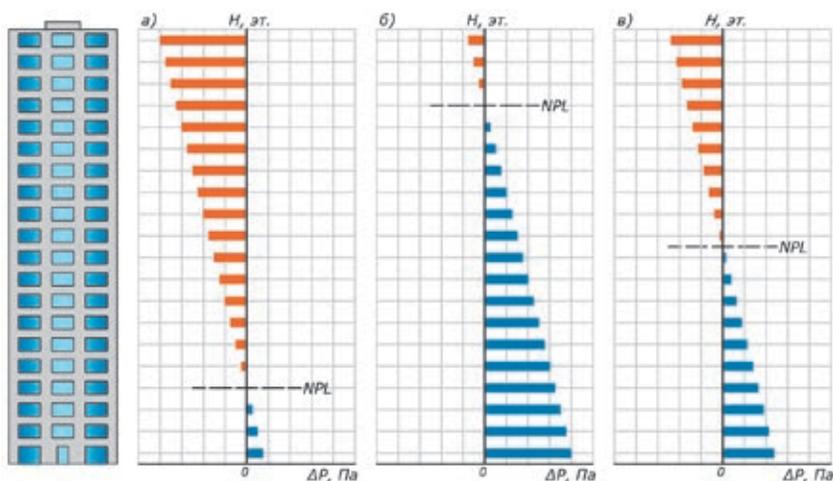


Рис. 7. Уровни нейтрального давления (NPL) по различным шахтам здания



Рис. 8. Примеры расположения NPL в зданиях по результатам расчетов

МОП в квартиры, что негативно влияет на воздухообмен в квартире.

При смещении NPL вверх (рис. 7б) снижаются перепады давления в верхней части здания, но теперь повышенные перепады будут наблюдаться в нижней части здания. Это приведет к снижению комфорта при эксплуатации дверей на пути от входа в здание к лифтовым шахтам и лестничным клеткам. Кроме того, открытые в неудачной комбинации двери могут привести к более серьезным проблемам, связанным с разгерметизацией, т. е. с беспрепятственным доступом наружного воздуха к вертикальным шахтам.

Для жилых зданий до определенной высоты положение NPL по шахте лифта на уровне кровли здания позволяет правильно работать вентиляции квартир. Сокращаются риски перетекания воздуха из МОП в квартиры. Однако для зданий выше 100–120 м положение NPL на кровле здания становится неприемлемым, т. к. приводит к недопустимо высоким перепадам давления на входных группах, что влечет за собой не только дискомфорт при эксплуатации, но и опасность нарушения работы лифтов.

Уровень нейтрального давления, расположенный посередине высоты здания (рис. 7в), приводит к снижению максимальных значений возможных перепадов давления в здании. То есть в нижней и верхней частях здания перепады давления будут одинаковыми и при этом минимальными из возможных. Это может быть полезно в эксплуатации некоторых зданий – например, если есть открываемые фасады или выходы на улицу и в нижней, и верхней частях, эксплуатируемые в холодное время.

Таким образом, показано, какое сильное, можно сказать, определяющее влияние оказывает положение NPL на воздушный режим здания и на распределение максимально возможных перепадов давления по этажам. При проектировании необходимо определить оптимальное для конкретного высотного здания положение NPL. Выбранное положение NPL, как правило, является компромиссом с точки зрения минимизации проблем, наиболее критичных в различных частях здания.

Ниже представлены проектируемые здания и уровень NPL, который по проекту предполагается поддерживать. Здания на рис. 8 отличаются не только высотой, но и типом системы вентиляции (естественный/механический приток), герметичностью фасада (наличие/отсутствие открываемых элементов на фасаде), требованиями к организации пространства входной группы (возможность организации тамбуров, лифтовых холлов) и др. Все перечисленные факторы влияют на принятие решения по высоте расположения уровня NPL.

При борьбе с негативными последствиями действия эффекта тяги важно рассматривать все здание целиком, а не только ту его часть, где в данный момент наблюдается проблема. Например, в результате необдуманных действий по борьбе с перепадами давления на нижних этажах можно получить большие проблемы в верхней части здания.

## Литература

1. Денисихина Д. М., Самолетов М. В. Эффект тяги: от движущей силы естественной вентиляции к головной боли высотных зданий // АВОК. – 2023. – № 8. – С. 28–37.
2. Росс Д. Проектирование систем ОВК высотных общественных многофункциональных зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика: теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Изд. 3-е. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006.
4. Табунчиков Ю. А., Шилкин Н. В. Расчет разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций высотных зданий // АВОК. – 2021. – № 3. – С. 14–19.
5. Дацюк Т. А., Уляшева В. М., Верховский А. А. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 24–32.
6. Пузач С. В., Ситников И. В., Лебедченко О. С., Комраков П. В., До Т. Т. Влияние неоднородного распределения температур по высоте помещения на высоту плоскости равных давлений при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – № 7–8. – С. 24–31.