

Устойчивость работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых зданий

Волов Г.Я., канд. техн наук, директор ОДО «Энерговент» (Минск)

«Видя, хоть одну формулу в статье, я откладываю ее в сторону» (Афоризм моей мамы – очень хорошего инженера)

Общеизвестно, что в последнее время, в связи с новыми требованиями к строительным конструкциям, понизилась устойчивость работы естественной вентиляции многоэтажных зданий. В статье приводится анализ математической модели системы вентиляции 9-и этажной секции, анализируются основные случаи потери устойчивости работы таких систем.

Системы естественной вентиляции многоквартирных жилых зданий (МКД) – основные системы вентиляции, которые нашли применение вплоть до сегодняшних дней. Понятны основные причины, которые легли в основу применения таких систем в практике строительства: простота и, практически, полное отсутствие эксплуатационных затрат.

Разработки В.В.Батурина, П.Н.Каменева, И.Ф.Ливчака, В.Е.Константиновой, М.М.Грудзинского и др. позволили понять и правильно применить основные механизмы работы систем естественной вентиляции. Хорошо известны основные недостатки таких систем, которые проявились в домах постройки 50...80х годов прошлого века. Это и проникновение запахов из нижележащих этажей на вышележащие и повышенная инфильтрация, особенно в холодную и ветреную погоду и воздухообмен, который сильно зависит от наружного климата. Все эти недостатки вызывали сильный дискомфорт в наших жилых домах. Для решения проблем дискомфорта, да и в рамках борьбы за энергосбережение, были предложены очень эффективные окна (оконные блоки) с высоким термическим сопротивлением и исключительно низкой воздухопроницаемостью, а также дополнительные местные отсосы с вентиляторами над плитами и бытовые вентиляторы в санитарных узлах (ванных комнатах). Появление новых окон и вентиляторов привело, как к устранению вышеизложенных проблем, так и к появлению новых, ранее неведомых: критическое уменьшение воздухообмена квартир, рост выше допустимой относительной влажности, опрокидывание циркуляции каналов – спутников. Эти проблемы не были отражены в классических разработках и поэтому представляют интерес такие современные исследования, в которых новые проблемы представлены. Можно отметить работы А.Д.Кривошеина [1], Е.Г.Малявиной [2] и др. Особенно следует отметить работы А.Д.Кривошеина в части выявления неустойчивости работы систем естественной вентиляции и опрокидывание циркуляции в рамках применяемых для расчета математических моделей.

Насколько можно понять (в статьях не всегда подробно приводят алгоритмы расчетов), все вышеперечисленные авторы описывали воздушные потоки в зданиях в виде графовой структуры, узлами которой являются отдельные помещения. При этом придерживались следующих допущений: а) воздух является несжимаемой средой (отсюда и закон сохранения массы в узлах) и б) поведение здания квазистационарное (при каждом из граничных условий ищется одно стационарное решение), а динамический переход (переходной процесс) – это переход из одного стационарного состояния в другое. Можно говорить о третьем допущении: постоянстве и одинаковости температур воздуха в помещениях, но оно кажется, не столь критичным. Для специалистов по вентиляции 20

века, да и начала 21, эти допущения кажутся вполне приемлемыми и их применение всегда приводило к правильным результатам. Увы, это не совсем так и виднейшие специалисты это достаточно хорошо понимали (см., например, классическую работу В.М.Эльтермана [3]). Приведу простой пример «нарушения» закона сохранения массы в узле (напомню, что узлом в рассматриваемых работах считалось целое помещение). Пусть в помещении работает естественная система приточно-вытяжной вентиляции, при этом в помещении поддерживается давление воздуха P_1 . Включили достаточно мощный вытяжной вентилятор, который начал отсасывать из помещения воздух и через некоторое время давление упало до значения P_2 и перестало падать. Вот именно в переходном процессе, когда давление падало с P_1 до P_2 и «нарушается» закон сохранения в узле, т.к. по закону Клайперона-Менделеева с уменьшением давления при постоянных объеме и температуре падает масса, т.е. часть воздуха ушла из самого помещения (узла). Именно последнее и не допускали предыдущие теоретические подходы. Второе допущение о том, что система при заданных граничных условиях может иметь только одно стационарное состояние противоречит опыту работы систем вентиляции многоэтажных зданий: при одних и тех же граничных условиях (габариты здания, степень открытости окон и дверей, наружных температурах и ветре и т.д.) система может иметь не только одно, но и два устойчивых состояния с «нормальной» (т.е. не «опрокинутой») или опрокинутой циркуляцией. Об этом даже никто уже и не спорит, но теоретическое объяснения этому факту предыдущие работы не дают (в работе А.Д.Кривошеина появляется опрокидывание циркуляции при определенных граничных условиях, но при этих же условиях у него невозможно наличие нормальной циркуляции). Мы используем два заковыченных термина «нормальная» и «опрокинутая» циркуляция, предполагая, что специалисты по вентиляции понимают, о чем тут речь.

Не секрет, что математическое моделирование использовалось как основной инструмент получения информации всеми, указанными выше, авторами. Математическое моделирование сводилось, сводится и будет сводиться к составлению и решению систем алгебраических уравнений. Наиболее простые процессы (стационарные) не используют для своего описания уравнения, в которые входит время (дифференциальные), в то время как для более тонкого (динамического) описания они необходимы. Почему же я назвал уравнения алгебраическими, только потому, что решение систем уравнений проводится численными методами, в которых дифференциальные уравнения заменяются алгебраическими, т.е. мы не решаем задачу в квадратурах, когда необходимо получить функцию, а не число.

В последние несколько десятков лет, благодаря развитию ЭВМ, появились программы динамического математического (имитационного) моделирования. Самым, наверное, известным представителем таких программ является Simulink (член семейства Matlab). В практике вентиляции нашли применение (за пределами СНГ) такие программы, как BLAST (EnergyPlus) и, в особенности, TRNSYS. Автор настоящей статьи использует программу МОДЭН (версия 3.23), разработанную ОДО «Энергогент» (РБ, Минск) [4] (на рис. 1 приведено главное окно калькулятора программы МОДЭН). Все вышеперечисленные программы позволяют вводить дифференциальные уравнения в свои системы и решать их различными известными методами. В программе МОДЭН используется метод Зейделя для решения систем уравнений.

Не моя цель анализировать и сравнивать программы, поэтому перейдем к основной теме статьи: выполнить анализ динамической работы системы естественной вентиляции простой секции 9-и этажного дома с помощью программы имитационного моделирования МОДЭН. Хотя основной задачей является рассмотрение системы естественной

вентиляции, именно в таком режиме системы работают большее время в году, но, мы понимаем, в современных жилых домах присутствуют как вытяжные вентиляторы в квартирах, так и на дефлекторах, которые хотя и включаются эпизодически, системы уже нельзя в полной мере назвать естественными.

Секция дома (см. рис. 2), которую мы рассматриваем, содержит не только систему вентиляции, но и систему отопления. Роль системы отопления в предыдущих моделях [5], не учитывалась, но, как показала практика, именно эта система часто влияет на решение жильца по вопросу проветривания квартиры. Система вентиляции состоит из двух систем – сборных вентиляционных шахт (BE1 и BE2), оканчивающихся дефлекторами и каналами – спутниками на каждом этаже. Система BE1 имеет на каждом канале – спутнике вентилятор с местным отсосом (имитируем кухонную вытяжку), а BE2 имеет только вытяжную решетку (имитируем ванну-туалет без вытяжного вентилятора). Система отопления состоит из одного П-образного проточного стока (без замыкающих участков). На каждом этаже по два окна, комнаты, хотя и разделены перегородкой с дверью, но аэродинамическое сопротивление стены не учитываем (двери полностью открыты). Межэтажные перекрытия полностью герметичны – с этим можно и поспорить, но такая у нас модель. Ветер всегда дует со стороны системы BE1. Теплотери в доме только через окна и стены. Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) оснащен автоматикой и позволяет имитировать различные режимы подачи теплоты в систему отопления. Нормированный воздухообмен в одной такой квартире (этаже) примем равным $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Система уравнений, описывающая модель, содержит 4515 уравнений.

Достаточно трудно в статье представить динамику работы системы. Для представления динамики мы будем проводить с моделью здания некоторые вычислительные эксперименты (опыты), меняя определенные параметры. При моделировании окон мы используем два типа окон, которые назовем «старые» и «новые». «Старые» окна – окна в деревянных переплетах с высокой воздухопроницаемостью в закрытом состоянии, «новые» окна – современные стеклопакеты с низкой воздухопроницаемостью. «Новые» окна, при необходимости, можно открывать, тогда их воздухопроницаемость становится равной воздухопроницаемости «старых» закрытых окон. Последовательность проведения и параметры экспериментов (серия 1) приведены в таблице 1.

Эксперимент 1 отражает состояние здания постройки 50...70 годов в эти же периоды эксплуатации. Воздухообмены в помещениях (см. рис. 4) значительные, хотя и сильно разнятся по этажам, но близки к проектным. Температура по этажам в пределах $21...26^\circ\text{C}$, т.е. несколько выше нормируемой. С наступлением «периода энергосбережения» теплоснабжающие организации, видя «перетопы» по квартирам, решили понизить график и перевести его со $105/70^\circ\text{C}$ на $95/60^\circ\text{C}$.

Эксперимент 2 отражает именно такой факт. Воздухообмены в квартирах практически не изменились, а вот температуры упали до $17...22^\circ\text{C}$. Привыкшие к теплу жители стали искать противоядие таким решениям. Они сами, либо с помощью ЖЭС, поменяли «старые» окна на «новые» - стеклопакеты.

Эксперимент 3 показал, что это привело не только к резкому росту температур в квартирах (при закрытых окнах), но и снижению воздухообменов до очень низких значений на всех этажах и, особенно, последних. Именно в таком состоянии с нашим домом начинают происходить разные «странные» явления. Поскольку вытяжная вентиляция в домах недостаточная жильцы устанавливают на кухнях механические вытяжки.

Эксперимент 4, показал (кривая 1 на рис. 5), что последовательное включение вытяжных вентиляторов в квартирах, начиная с квартир 1-го этажа, не привело к изменению циркуляции в шахте ВЕ2, а дополнительное включение вентилятора при дефлекторе Д1 опрокинуло тягу в шахте! «Опрокинутая» циркуляция характеризуется в результате счета на модели отрицательными значениями расходов воздуха на участках сети, в отличие от «нормальной».

Эксперимент 5. Отключение вентиляторов в обратной последовательности (кривая 2 на рис. 5) не привело к восстановлению «нормальной» циркуляции. Нам потребовалось дополнительное включение вентилятора дефлектора Д2 (на системе ВЕ2), чтобы восстановить циркуляцию.

Эксперимент 6, те же условия, что и в эксперименте 4, но наружная температура минус 5°C (кривая 3 на рис. 5). Последовательное включение вытяжных вентиляторов в квартирах, начиная с квартир 1-го этажа, привело к изменению циркуляции в шахте ВЕ2 уже при включении вентилятора на 8-ом этаже.

Эксперимент 7. Отключение вентиляторов в обратной последовательности (кривая 4 на рис. 5) не привело к восстановлению «нормальной» циркуляции. Нам потребовалось дополнительное включение вентилятора дефлектора Д2 (на системе ВЕ2), чтобы восстановить циркуляцию.

Эксперимент 8, те же условия, что и в эксперименте 4, но наружная температура плюс 5°C (кривая 5 на рис. 5). Последовательное включение вытяжных вентиляторов в квартирах, начиная с квартир 1-го этажа, привело к изменению циркуляции в шахте ВЕ2 уже при включении вентилятора на 4-ом этаже.

Эксперимент 9. Отключение вентиляторов в обратной последовательности (кривая 6 на рис. 5) не привело к восстановлению «нормальной» циркуляции. Нам потребовалось дополнительное включение вентилятора дефлектора Д2 (на системе ВЕ2), чтобы восстановить циркуляцию.

Физическое объяснение. Наблюдаемое явление легко объяснимо, опрокидывание циркуляции связано с недостатком воздуха для работы системы ВЕ2. Созданное дефлектором Д1 и вентиляторами системы ВЕ1 разрежение преодолевает противодавление, создаваемое дефлектором Д2. После опрокидывания циркуляции дефлектор Д2 перестает создавать гравитационный напор и восстановление циркуляции возможно только с применением дополнительного побудителя тяги в системе ВЕ2. Здесь наглядное подтверждение того, что система естественной вентиляции при одинаковых граничных условиях может иметь два **устойчивых** состояния, т.е. в этом случае система, пользуясь языком термодинамики, необратима.

Рассмотрим теперь ситуацию связанную с опрокидыванием циркуляции в канале-спутнике системы ВЕ2 – 9-го этажа, наблюдаемую при наличии разности отметок дефлекторов Д1 и Д2. Мы рассмотрим ситуацию при наружной температуре +5°C, скорости ветра 0 м/с, закрытых «новых» окнах и переменной разности отметок (Нд1-Нд2) от 0 до 1 м с (шаг 0,2 м). На рис. 6 видно, что при разности отметок от 0 до 0,6 м циркуляция в каналах «нормальная», причем расход в канале-спутнике ВЕ1 имеет тенденцию к росту, а в системе ВЕ2 к падению. При разности отметок 0,8 м происходит опрокидывание циркуляции в канале-спутнике системы ВЕ2 и при этом наблюдается резкий рост расхода в канале-спутнике системы ВЕ1. Следует отметить, что такое поведение носит обратимый характер, т.е., если мы будем уменьшать разность отметок, то мы вернемся к «нормальной» циркуляции в канале-спутнике.

Физическое объяснение. Разность отметок дефлекторов приводит к разному гравитационному давлению создаваемыми ими. Дефлектора создают необходимое

разрежение для поступления воздуха в помещение (как на всасе вентилятора). Более высоко расположенный дефлектор Д1 создает такое разрежение в помещении 9-го этажа, которое не может преодолеть дефлектор Д2. Это напоминает работу двух параллельно работающих вентиляторов, причем один имеет напор больше чем другой, что приводит (при отсутствии обратных клапанов) к обратной циркуляции через низконапорный вентилятор.

Проведем два эксперимента (серия 2) при наружной температуре 5°C (таблица 2), нумерацию экспериментов для удобства продолжим. Задачей экспериментов является показ влияния скорости ветра и разности высот установки дефлекторов на воздухообмены в помещении 9 этажа при разных состояниях окон и вентилятора в помещении.

Эксперимент 10. В начальном состоянии 1 (см. рис. 7, окна закрыты и вентилятор вытяжки не работает) по каналам-спутникам ВЕ1 и ВЕ2 осуществляется «нормальная» циркуляция, включение вентилятора на вытяжке в помещении (состояние 2) приводит к опрокидыванию циркуляции в канале-спутнике ВЕ2, открытие окна (состояние 3) приводит к восстановлению «нормальной» циркуляции в канале-спутнике ВЕ2, отключение вентилятора и закрытие окна возвращает систему в исходное состояние.

Эксперимент 11. В начальном состоянии 1 (см. рис. 7, окна закрыты и вентилятор вытяжки не работает) в канале-спутнике ВЕ1 осуществляется «нормальная», а в ВЕ2 «опрокинутая» циркуляция, включение вентилятора на вытяжке в помещении (состояние 2) не меняет картину, открытие окна (состояние 3) приводит к восстановлению «нормальной» циркуляции в канале-спутнике ВЕ2, отключение вентилятора и закрытие окна возвращает систему в исходное состояние.

Таким образом, мы еще раз убеждаемся в обратимости процессов опрокидывания циркуляции только в канале-спутнике, а также в возможности восстановления «нормальной» циркуляции даже при неблагоприятных условиях (ветер и разная высота установки дефлекторов, работающих на одно помещение) при открывании окон (или иных воздушных клапанов).

Как мы увидели, работы системы естественной вентиляции жилых домов сильно зависит от многих факторов (наружная температура, ветер, расположение дефлекторов, температурный график системы отопления, открывание окон, работа вентиляторов), а распределение температур в квартирах (см. рис. 4) сильно неравномерно по этажам (неравномерность может быть несколько сглажено самими жильцами).

На рис. 8 приведен пример системы, которая позволяет полностью избежать всех вышеперечисленных проблем. Секцию дома в модели мы перевели на приточно-вытяжную механическую вентиляцию. При трансформации (изменении) существующей системы было выполнено следующее:

1. Установили приточно-вытяжной блок с теплоутилизатором (коэффициент теплоутилизации в расчете был принят 80% по явному теплу),
2. Один из вытяжных каналов (бывший ВЕ2) сделали приточным и подали воздух в помещения.
3. Все вытяжки из помещения перевели на существующий вытяжной канал (бывший ВЕ1).
4. Установили термостат с трехходовым клапаном и замыкающий участок на одном из нагревательных приборов.

Хотя с технической реализацией могут быть вопросы, но, я думаю, что современные оборудование и методы монтажа позволят их все решить.

Провели два эксперимента (№№12 и 13) (окна в помещениях закрыты). Термостаты позволили поддерживать в помещениях требуемую температуру, а воздухообмены

значительно подровнялись по этажам (см. таблицу 3) и приняли значения близкие планируемому ($60 \text{ м}^3/\text{ч}$).

За пределами статьи остались, хотя построенная модель позволяет на них ответить, например, такие интересные вопросы:

- ✓ как влияние утепление здания на температурный график работы системы отопления?
- ✓ каково распределение температур в квартирах в течение отопительного периода?

Хочется надеяться, что методы имитационного моделирования отопительных и вентиляционных систем начнут широко внедряться в практику не только научных работников, студентов, но и проектных организаций.

Заключение

1. Неустойчивая работа систем естественной вентиляции характеризуется переменным воздухообменом создаваемым системой, неравномерностью воздухообмена и температур внутреннего воздуха по этажам, опрокидыванием циркуляции в поэтажных каналах-спутниках и целиком в вентиляционных шахтах.
2. Опрокидывание циркуляции в шахтах носит необратимый характер и требует включения дополнительных источников тяги, будь то вентилятор или повышенный ветровой напор.
3. Опрокидывание циркуляции в канале-спутнике носит обратимый характер и «нормальная» циркуляция восстанавливается после снятия условий, которые привели к опрокидыванию, либо за счет открытия окон (приточных клапанов).
4. Внедрение дефлекторов с вентиляторами и регулируемых приточных устройств в квартирах позволит повысить надежность систем, однако кардинальным решением может считаться только внедрение приточно-вытяжной механической вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$dH=(Hd1-Hd2)$ – разность отметок дефлекторов систем ВЕ1 и ВЕ2, м;

$Hd1$ ($Hd2$) – отметка установки дефлектора, м;

L – воздухообмен, м³/ч;

$Tв$ – температура воздуха в помещениях, °С;

$Tнар$ – температура наружного воздуха, °С;

$T1_{\text{макс}}$ – расчетная температура подающего теплоносителя в системе отопления, °С;

$T2_{\text{макс}}$ – расчетная температура обратного теплоносителя в системе отопления, °С;

w – скорость ветра, м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеин А.Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха. – Изв. вузов. Строительство, 2011, №4, с. 42-53.
2. Малявина Е.Г., Бирюков С.В., Дианов С.Н. Воздушный режим высотного здания. Часть 1. Воздушный режим при естественной вытяжной вентиляции. – Журнал АВОК, 2004, №8, с. 6-12.
3. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. – М., Химия, 1980. – 288 с.
4. www.energovent.com
5. Волон Г.Я. Анализ работы системы вентиляции многоэтажного здания. – Энергия и Менеджмент. – 2011, №2, с. 16-21.

Таблица 1.

Параметры экспериментов серии 1.

№№	Тнар, °С	w, м/с	Т1макс	Т2макс	Окна	Вентилятор на вытяжке	Вентилятор	
							Д1	Д2
1	-28	0	105	70	«старые»	Не работает	-	-
2	-28	0	95	60	«старые»	Не работает	-	-
3	-28	0	95	60	«новые»	Не работает	-	-
4	-28	0	95	60	«новые»	1...9 включение	+	-
5	-28	0	95	60	«новые»	9...1 отключение	-	-
6	-5	0	95	60	«новые»	1...8 включение	-	-
7	-5	0	95	60	«новые»	8...1 отключение	-	-
8	5	0	95	60	«новые»	1...3 включение	-	-
9	5	0	95	60	«новые»	3...1 отключение	-	-

Таблица 2.

Параметры экспериментов серии 2.

№№	w, м/с	Нд1, м	Нд2, м	Состояние			
				1	2	3	4
10	0	35	35	<i>Окна закрыты/в ентилятор отключен</i>	<i>Окна зарыты/ве нтилятор включен</i>	<i>Окна открыты/ве нтилятор включен</i>	<i>Окна закрыты/ве нтилятор отключен</i>
11	4	35	34				

Таблица 3.

Воздухообмены по помещениям при применении приточно-вытяжной механической вентиляции

№№	Этаж	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Тнар, °С									
12	-28	57,24	56,16	55,44	54,72	53,64	52,56	51,84	51,48	70,92
13	5	52,2	51,84	51,48	51,48	51,12	50,76	50,4	51,12	55,44

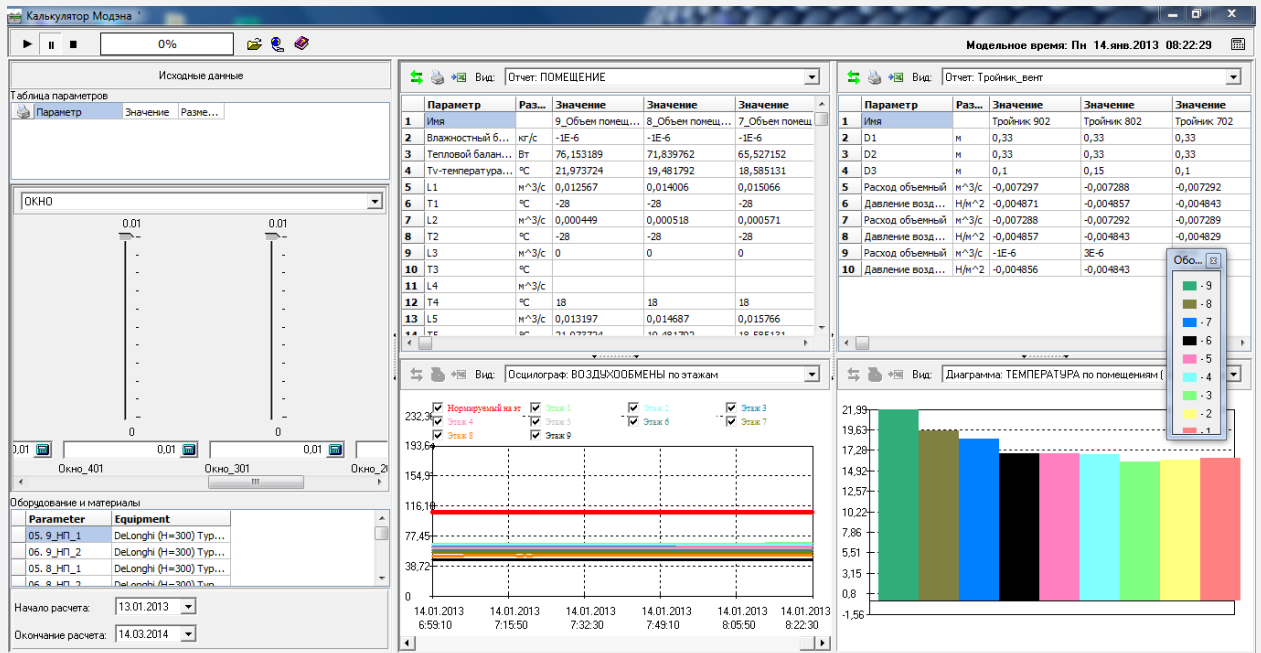


Рис. 1. Главное окно калькулятора программы МОДЭН

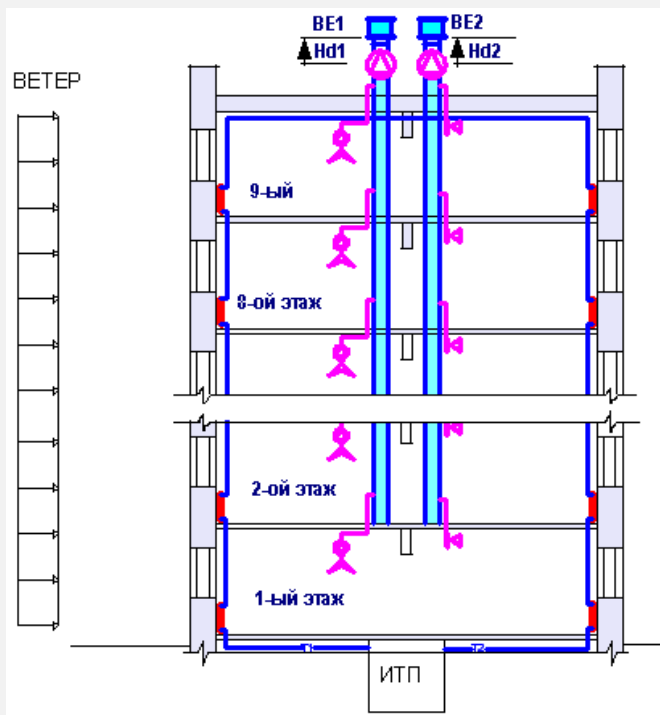


Рис. 2. Секция 9-и этажного жилого дома

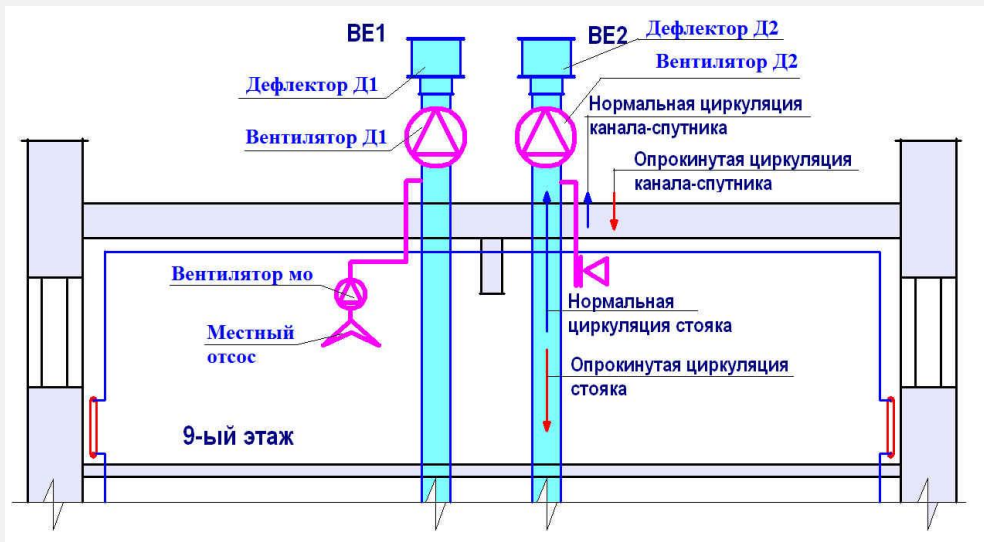


Рис. 3. Помещение 9-го этажа

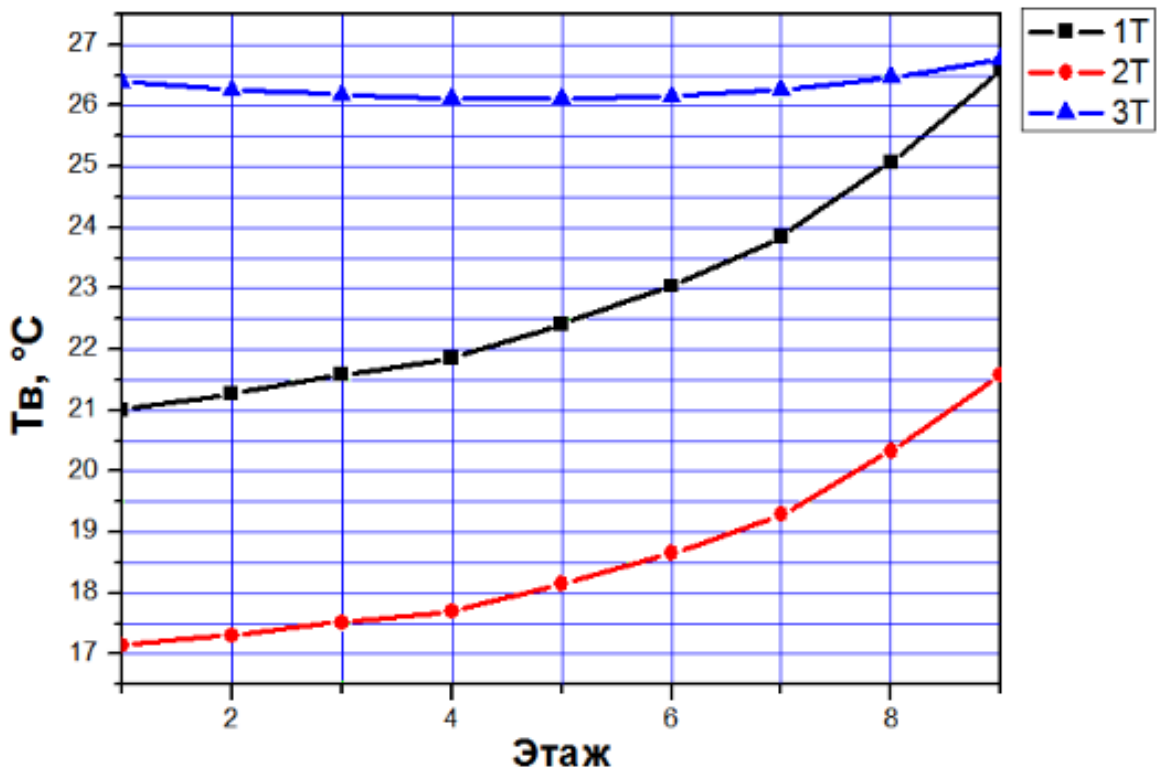
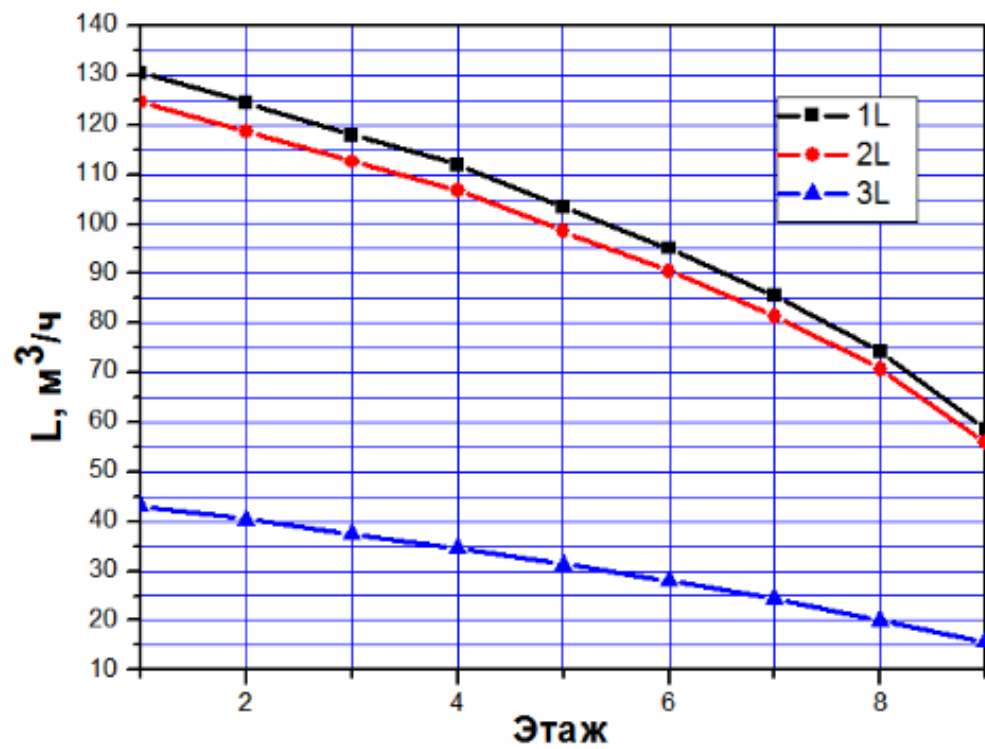


Рис. 4. Воздухообмены(L) и температуры внутреннего (Tв) воздуха по этажам при $T_{нар} = -28^\circ\text{C}$, $w = 0$ м/с, и 1L(T) – график теплоносителя 105/70°C (старые окна), 2L(T)- график теплоносителя 95/60°C (старые окна), 3L(T)- график теплоносителя 95/60°C (новые окна).

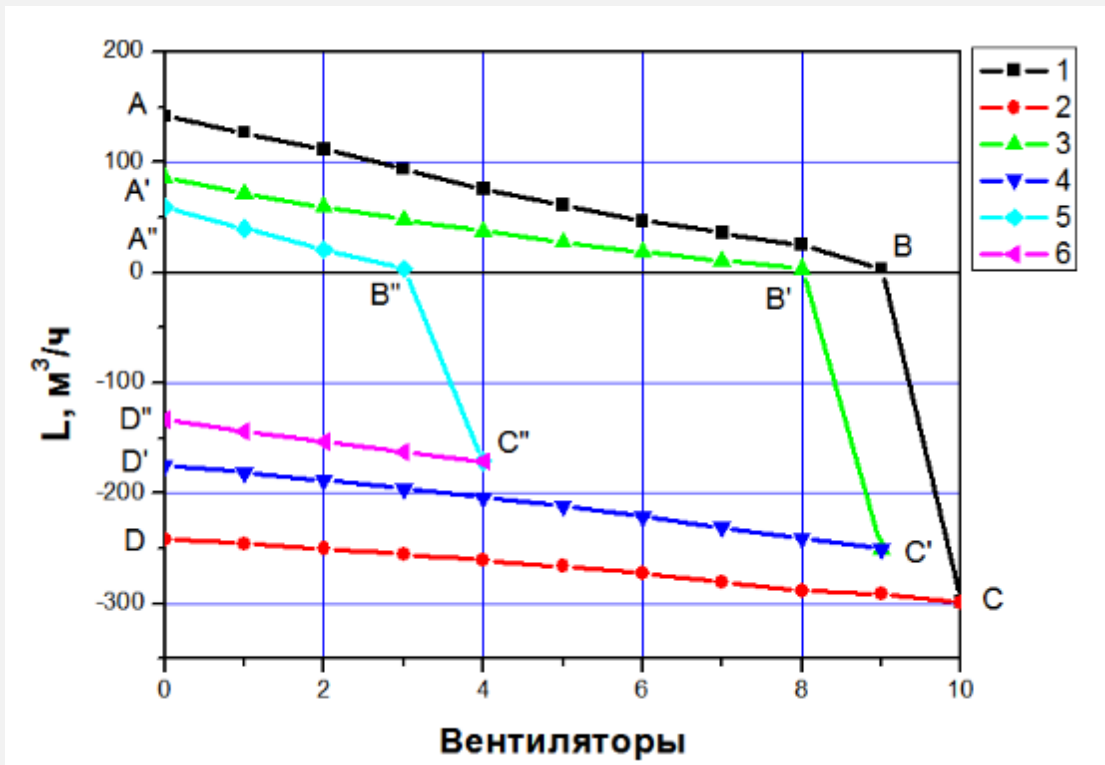


Рис. 5. Опрокидывание циркуляции воздуха в шахте системы ВЕ2: 1 (3, 5) – последовательное включение вентиляторов, 2(4, 6) – последовательное отключение вентиляторов; 1 (2) - $T_{нар}=-28^{\circ}\text{C}$, 3 (4) - $T_{нар}=-5^{\circ}\text{C}$, 5 (6) - $T_{нар}=5^{\circ}\text{C}$, $w=0\text{ м/с}$,

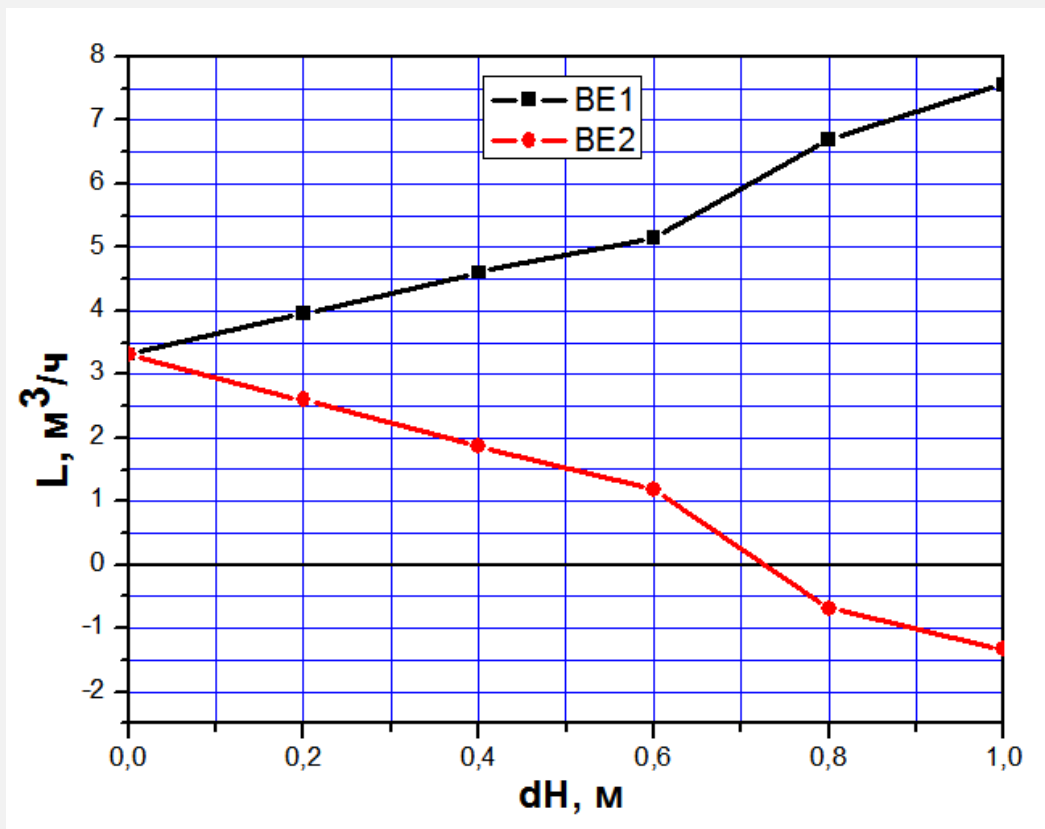


Рис. 6. Зависимость воздухообмена (L) по системам в помещении 9 –го этажа в зависимости от разности отметок дефлектором при $T_{нар}=5^{\circ}\text{C}$, $w=0$ м/с и закрытых (новых) окнах.

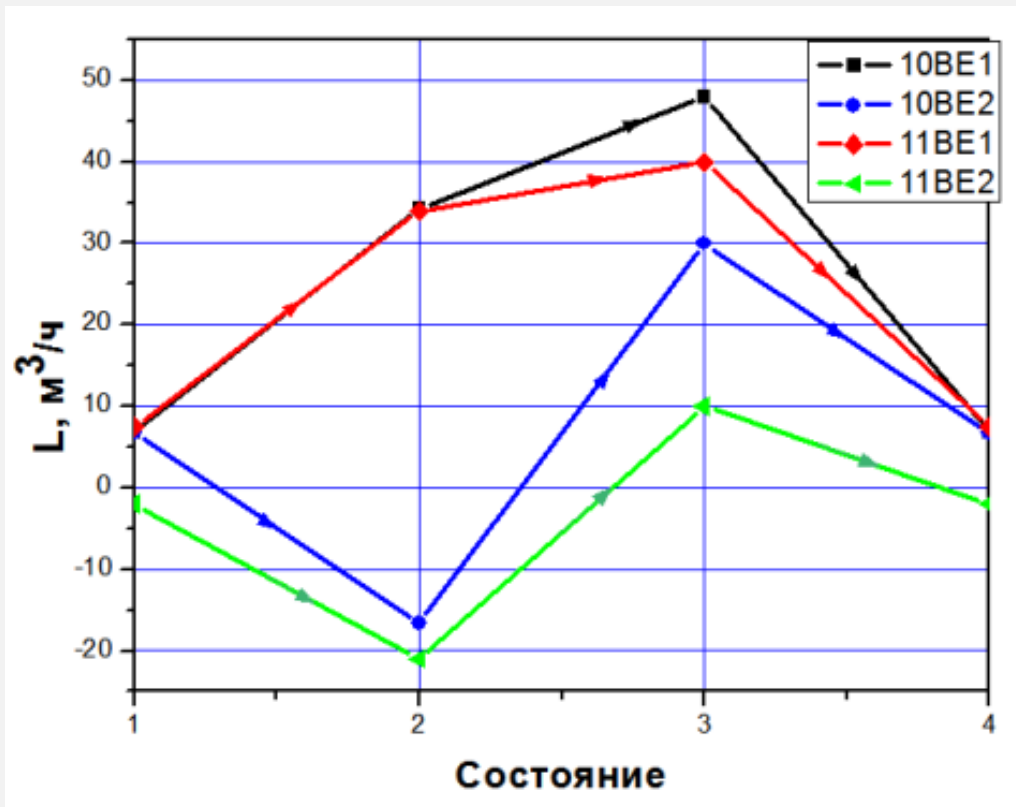


Рис. 7. Зависимость воздухообменов в помещении 9-го этажа от состояния окон и вентиляторов. Состояния: 1. Окна закрыты/вентилятор отключен; 2. Окна зарыты/вентилятор включен; 3. Окна открыты/вентилятор включен; 4. Окна закрыты/вентилятор отключен.

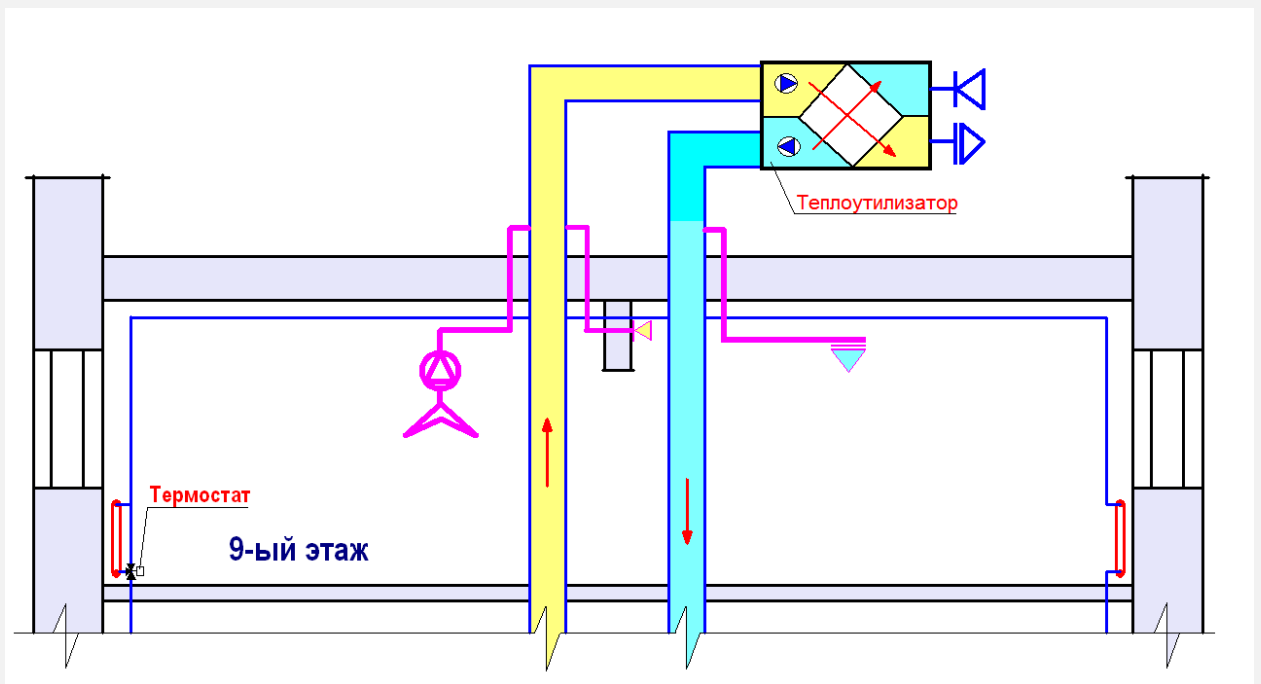


Рис. 8. Современное решение с организацией приточно-вытяжной механической вентиляции