

doi: 10.5862/MCE.50.6

Оптимизированная конструкция навесного вентилируемого фасада

*Магистр В.А. Емельянова;
ассистент Д.В. Немова;
студент Д.Р. Мифтахова,*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация. На сегодняшний день одним из самых универсальных видов облицовки по соотношению цена – качество по праву называют навесные фасадные системы. Навесной вентилируемый фасад характеризуется наличием вертикальной воздушной прослойки. Если монтаж системы произведен с нарушениями, образуются неветилируемые участки. Недостаточный воздухообмен приводит к снижению теплозащитных свойств конструкции.

Необходимо четко представлять, как работает вентилируемый зазор, и как его толщина влияет на работу всей системы. Установив связь размеров канала (высоты L и толщины h) со средней скоростью свободноконвективных течений, можно оптимально подобрать толщину воздушной прослойки. Это позволит системе работать максимально эффективно, тем самым окупая стоимость затрат на ее установку.

Целью данной работы является совершенствование конструкции НВФ, поиск методики определения гидравлически оптимального воздушного зазора и оценка экономии при установке системы с максимальной производительностью. В результате была доказана целесообразность применения гидравлически оптимального фасада.

Ключевые слова: гидравлика; навесной вентилируемый фасад; свободно-конвективное течение; вертикальная воздушная прослойка; цена потерь напора; гидравлически оптимальный канал

Введение

В настоящее время происходит поиск новых возможностей для повышения энергоэффективности зданий. Широко стали применяться ограждающие конструкции с использованием эффективных утеплителей, в их числе навесные вентилируемые фасады с вентилируемым воздушным зазором. Воздушная вентилируемая прослойка оказывает влияние на все теплофизические характеристики фасада, и ее правильная организация является важной практической задачей [1].

Навесной вентилируемый фасад (НВФ) – это конструкция, состоящая из утеплителя, материалов облицовки и под облицовочной конструкции. НВФ отличается от других типов фасадов наличием воздушного зазора под облицовкой. Воздушный зазор работает по принципу вытяжной трубы: перепад давления и разница температур снаружи и внутри зазора заставляют воздух в пространстве между наружной облицовкой и поверхностью изоляционного материала циркулировать. Создается тяга, воздух в вентилируемом промежутке поднимается вверх, за счет чего из него удаляется атмосферная и внутренняя влага. Чем выше температура воздуха в зазоре, тем больше воздушная тяга. Схема конструкции навесного фасада с воздушным зазором представлена на рисунке 1.

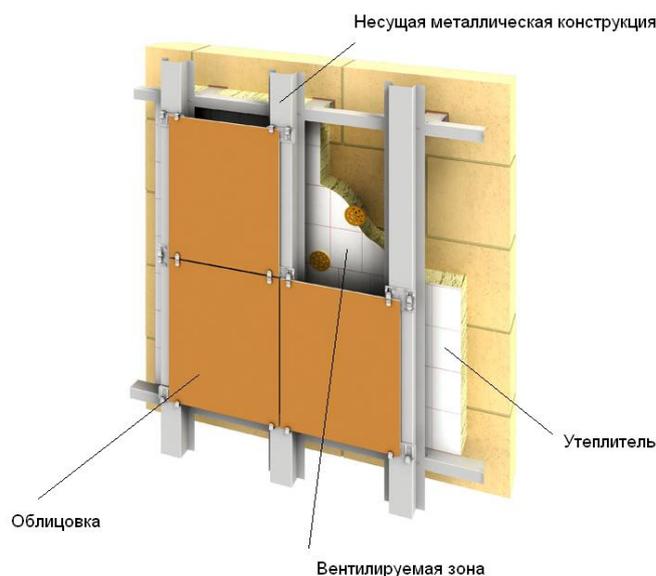


Рисунок 1. Схема конструкции навесного фасада с воздушным зазором

Целью данной работы было совершенствование конструкции навесного вентилируемого фасада, для этого поставлены следующие задачи:

- определение оптимальной ширины воздушной прослойки;
- оптимизация стоимостных показателей НВФ за счет изменения ширины вентилируемой воздушной прослойки.

Обзор литературы

Большой вклад в изучение характеристик свободноконвективных течений (СКТ) внесли российские и зарубежные исследователи. Определению теплофизических свойств вентилируемых воздушных прослоек и их влиянию на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций посвящены работы М.А. Михеева, Э.Р. Эккерта, Г.З. Гершуни, Ю.А. Соковишина, О.Г. Мартыненко, Е.И. Идельчика, В.Л. Шифринсона, Е.М. Жуховицкого, Г.А. Остроумова, Ю.С. Чумакова, С.Б. Колешко, В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокина, Х. Уонга, В.Н. Богословского, Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина, В.В. Козлова, Е. Ю. Цыкановского и многих других специалистов [2–19].

Гидравлика термогравитационных движений (ТГД) практически не представлена в обозримой литературе, в то время как количество частных гидродинамических решений огромно и нарастает по мере развития симуляторов для получения так называемых «точных» решений уравнений с частными производными невысокого порядка. Принципиальные вопросы верификации гидродинамических решений часто требуют особого исследования, что специально подчеркивается в работе [8]. Нормативно-техническая литература по расчету ТГД в элементах строительных конструкций и инженерных сетей зданий и сооружений бедна, но содержит некоторые эмпирические рекомендации, выверенные практикой проектирования. Например, имеются рекомендации по расчету средних скоростей и коэффициентов переноса, представляющие исключительно эмпирическую рецептуру.

С этой точки зрения гидравлические решения задач ТГД необходимы для рациональной оценки основных гидравлических характеристик свободно-конвективного потока (расхода и средней скорости, температуры, интенсивности переноса теплоты и влаги).

Под гидравлическими решениями понимаются решения не для плотностей распределений, а для распределений (или функционалов, или аддитивных функций множества – в других терминах). Известны работы по гидродинамике и тепло- и массообмену при ТГД в строительных конструкциях [20–30].

Приближение (или модель) Буссинеска применяется для расчета термогравитационных движений.

Предполагается, что:

- жидкость – совершенный газ, $p = R\rho T$;
- (*) движение баротропное, т. е. существует взаимно-однозначное отображение (биекция) $p : P \leftrightarrow \Pi, p = p(\cdot)$;
- статическое (термодинамическое) давление p следует условию равновесия $\frac{dp}{\rho} + g dz = 0$, координата z направлена вертикально вверх.

Применение модели Буссинеска в гидродинамических задачах позволяет исключить поверхностные силы статического давления и силу тяжести и записать теорему импульсов в виде $\frac{\partial u_z^2}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \langle u_y u_z \rangle = \nu \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + g\theta$, $\theta := \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \in [0,1]$, где T – температура; T_c, T_h – температуры холодного воздуха и горячей поверхности канала; y – координата, направленная поперек канала (рис. 2).

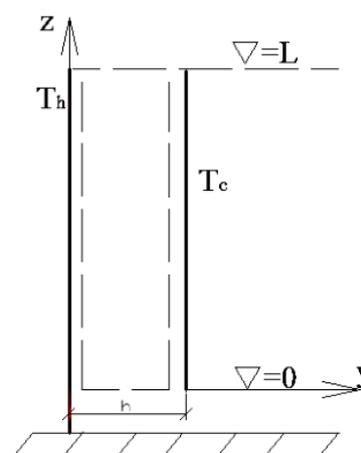


Рисунок 2. Схема вертикального канала

Отмеченное (*) условие, вообще говоря, не предполагается моделью Буссинеска, замыкаемой уравнением энергии: $\frac{\partial u_z \theta}{\partial z} + \frac{\partial u_y \theta}{\partial y} = \frac{\nu}{\sigma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}$, где σ – число Прандтля. Условие баротропности $p = p(\rho)$, аппроксимируемое степенной (политропной) зависимостью $p = A\rho^n$ (A – постоянная), при $n < k$ отвечает подводу теплоты в СКТ и интегрально заменяет решение уравнения энергии [31, 32].

Средняя скорость СКТ в вертикальном призматическом канале

При подводе теплоты к воздушному потоку $n \leq k$. Тогда:

- техническая работа расширения при отсутствии внешнего теплообмена,

$$l_{T,k} := - \int_{p_0}^p \left(\frac{dp}{\rho} \right)_k \text{ не превосходит технической работы политропного расширения } l_{T,n},$$

$$n \leq k, l_{T,n} := - \int_{p_0}^p \left(\frac{dp}{\rho} \right)_n, \forall p \leq p_0, \text{ где } p_0 \text{ – статическое давление при } z = 0 \text{ (рис. 3);}$$

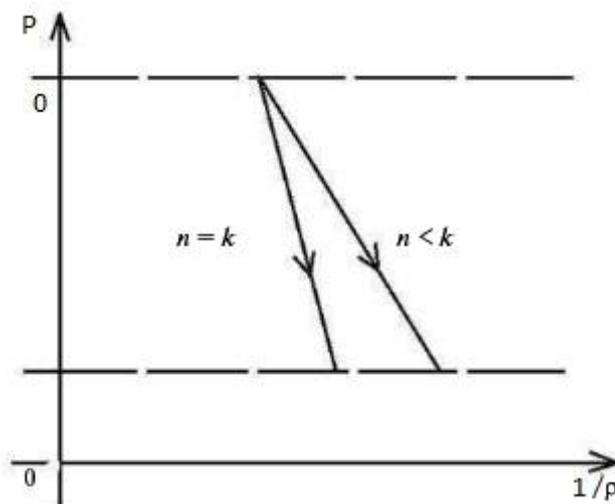


Рисунок 3. Техническая работа адиабатного и политропного потоков

- избыток технической работы $\Delta l_{T,n-k} = l_{T,n} - l_{T,k} > 0, k > n$ затрачивается на перемещение массы воздуха по воздушному каналу. Точнее, $\Delta l_{T,n-k} = \frac{v^2}{2\varphi^2}$, где $\varphi < 1$ – коэффициент скорости. По определению: $\varphi := \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_r}}$, ζ_r – коэффициент потерь, $\zeta_r > 0$.

Следовательно,

$$v = \varphi \Lambda \sqrt{RT_c} \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}, \Lambda := \frac{gL}{RT_c}. \tag{1}$$

Формула (1) приводится в работе [31]. В [33] сделана попытка найти зависимость показателя политропы n от интенсивности внешней теплопередачи в канале. По существу, это требует решения уравнения энергии для потока.

Величина разности $n^{-1} - k^{-1}$ может быть определена через среднюю температуру холодного воздуха T_c и горячей грани T_h и относительную длину канала Λ . Для этого необходимо введение

понятия давления тяги как разности давлений холодного и горячего воздуха на плоскости $z=0$ [33]. В приближении Буссинеска:

$$\Delta p := p_c - p_h = gL \left(\frac{p_c}{RT_c} - \frac{p_h}{RT_h} \right) = p_c \frac{gL}{RT_c} \left(1 - \frac{p_c - \Delta p}{p_c} \frac{T_c}{T_h} \right).$$

В безразмерных переменных $\Delta \pi := \frac{\Delta p}{p_c}$, $\theta := \frac{T_c}{T_h}$, $\Lambda := \frac{gL}{RT_c}$ из предыдущей формулы следует:

$$\Delta \pi := \Lambda \frac{1 - \theta}{1 - \Lambda \theta}. \quad (2)$$

Далее, из приближения Буссинеска получается:

$$\Delta \pi = \frac{\Lambda^2}{2} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{k} \right). \quad (2_1)$$

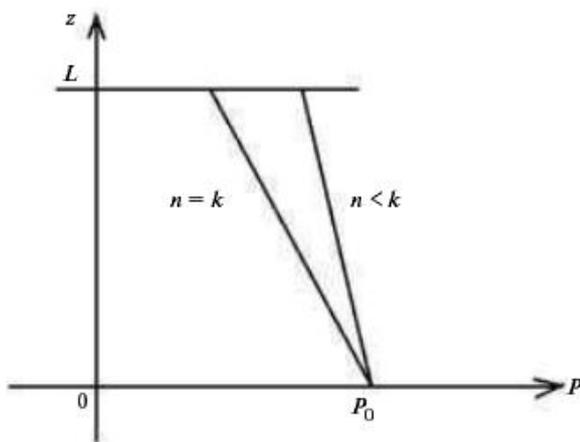


Рисунок 4. Распределение давления по координате z от давления p_0

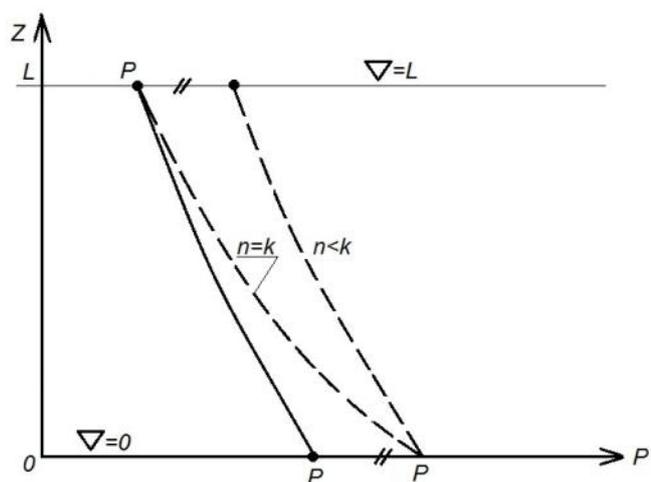


Рисунок 5. Линия давления СКТ в вертикальном щелевом канале

На рисунке 4 показано распределение давления по координате z от давления p_0 . Для реального вертикального канала давление в створе $z = L$ одинаково для холодного ($n = k$) и для горячего ($k > n$) столбов воздуха. Поэтому величина $\Delta \pi$ переносится на отметку $z = 0$ (рис. 5).

Из (2) и (2₁) следует:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{k} = \frac{2\Delta \pi}{\Lambda^2} = \frac{2}{\Lambda} \frac{1 - \theta}{1 - \Lambda \theta},$$

что является вполне очевидным результатом. Разность $n^{-1} - k^{-1}$ стилизует теплопередачу, вызывающую возникновение плавучести (архимедовой подъемной силы). Можно сделать вывод о том, что:

- величина этой силы возрастает при уменьшении $\theta = T_c/T_h$;
- с увеличением длины (высоты) канала тяга (драфт) возрастает. Например, если Λ мала, то для создания движения необходима большая разность $n^{-1} - k^{-1}$, т. е. интенсивный нагрев и наоборот, в длинном канале тяга создается меньшим нагревом.

В силу (1)

$$v = \varphi \sqrt{\frac{1 - \theta}{1 - \Lambda \theta}} \sqrt{2gL} = \varphi \sqrt{1 - \theta} \sqrt{2gL} = \sqrt{\frac{1 - \theta}{1 + \zeta_r}} \sqrt{2gL}. \quad (3)$$

Здесь $\zeta_r > 0$ – коэффициент потерь давления (или напора).

Согласно традиции Вейсбаха $\zeta_r = \lambda \frac{L}{h} + \sum \zeta_j$, где λ – число Дарси; ζ_j – коэффициент потерь напора на местных сопротивлениях, кроме коэффициента потерь напора на выход. Таким образом, (3) решает поставленную задачу.

Тогда

$$Q := vh = h \sqrt{\frac{1-\theta}{1+\zeta_r}} \sqrt{2gL}. \quad (4)$$

Рассматривая Q как функцию от L, h , $Q=Q(L, h)$, утверждаем:

$$Q(L, h) \geq 0, Q(L, h) \geq \sqrt{\frac{2gh^3}{\lambda} (1-\theta)} \geq 0, \quad (4_1)$$

и $Q(L, h)$ – монотонно возрастающая функция от L . Точно так же

$$Q(L, 0) \geq 0, Q(L, h) \approx h \sqrt{\frac{2gL(1-\theta)}{1+\sum \zeta_j \neq \infty}}, \frac{L}{h} = O(1) \text{ и, как и в предыдущем случае, } Q(L, h) \text{ –}$$

монотонно возрастающая функция от h . Из сравнения предельных значений $Q(L, h)$ следует:

$$\sqrt{\frac{h}{\lambda}} = \sqrt{\frac{L}{1+\sum \zeta_j \neq \infty}}.$$

Сравнивая условия, реализующие максимальный расход сквозь щель, получаем:

$$\frac{L}{h} = \frac{1+\sum \zeta_j \neq \infty}{\lambda}.$$

При больших размерах щели вертикальный канал с обогреваемой гранью подобен вертикальной обогреваемой пластине (ТГД в полуограниченной вертикальной плоскостью $y=0$ полупространстве). Естественно, в этом случае движение мало отличается от равномерного и $\sum \zeta_j \neq \infty = 0$. Значит, оптимальный размер канала, отвечающий максимуму пропускной способности:

$$\frac{L}{h} = \frac{1}{\lambda}.$$

Если местные потери напора отсутствуют (кроме потерь напора на выход), то в силу (4₁) максимальный расход составит:

$$Q_{\max} = \lambda \sqrt{1-\theta} \sqrt{2gL^3}. \quad (4_2)$$

Следовательно, чем меньше число Дарси λ , тем меньше скорость. Это парадоксально, но следует иметь в виду, что в оптимальном канале $h = \lambda L$, т. е. чем меньше λ , тем уже оптимальный канал. Значит, при заданной высоте канала его пропускная способность максимальна за счет увеличения средней скорости V в ТГД.

Итак, оптимальная ширина канала зависит от физических свойств воздуха и от температурного фактора θ . Канал, оптимальный при значении $\theta = 0,98$, окажется неоптимальным при $\theta = 0,95$. Для поддержания максимальной пропускной способности канала необходимо увеличивать его ширину при увеличении θ (при увеличении температуры T_c холодного воздуха) и уменьшать ширину канала при уменьшении θ [34–37].

Модель объекта исследования

Модель исследования – это наружная стена жилого здания в климатическом районе Санкт-Петербурга. Наружная стена представляет собой конструкцию НВФ с вентилируемой воздушной прослойкой. В качестве несущей подконструкции фасада принимается решение компании «Юкон Инжиниринг» АТС 234. Для данной системы кронштейны могут иметь длину 80, 120, 190, 220, 250 мм. Цены на них взяты из [38] (табл. 1).

Таблица 1. Цена на комплектующие для установки 1 м² НВФ при различной длине кронштейна

Длина кронштейна, м	0,080	0,120	0,153	0,190	0,220	0,250
Цена за 1 м ² НВФ с учетом НДС, руб	463,62	483,64	493,68	524,52	552,49	574,09

С целью определения экспериментальных характеристик воздушного потока В.Я. Ольшевским был проведен натурный эксперимент [39–40], основной целью которого было понимание реальной картины происходящего в прослойке НВФ. Объект исследования располагается в Санкт-Петербурге, ул. Орловская, д. 3. Это комплекс зданий, состоящий из 4 корпусов одинаковой высоты ($L = 28$ м), на которых располагается система навесных вентилируемых фасадов. Ширина зазора между утеплителем и облицовочным материалом на каждом из зданий разная и варьируется от 8 до 15 сантиметров. Эксперимент проводился с помощью термоанемометра путем опускания датчика, расположенного на телескопической трубке. После некоторого времени, когда установились показания, фиксировался результат.

Состав ограждающей конструкции:

- кирпичная кладка пустотностью 22 % – 380 мм;
- минераловатный утеплитель Rockwool – 100 мм;
- воздушный зазор;
- облицовочные керамогранитные плиты – 600х600 мм.

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты проведенных испытаний [40]

L, м	h, м	L/h	V, м/с	Q, м ² /с
28	0,08	350	0,5–0,6	0,040–0,048
28	0,10	280	0,3–0,4	0,030–0,040
28	0,12	233	0,2–0,3	0,024–0,036
28	0,15	186	0,2	0,030

На основе данных, полученных В.Я. Ольшевским [40], авторами данной статьи были построены графики зависимости скорости V и расхода Q от толщины вертикальной воздушной прослойки (ВВП) (рис. 6, 7).

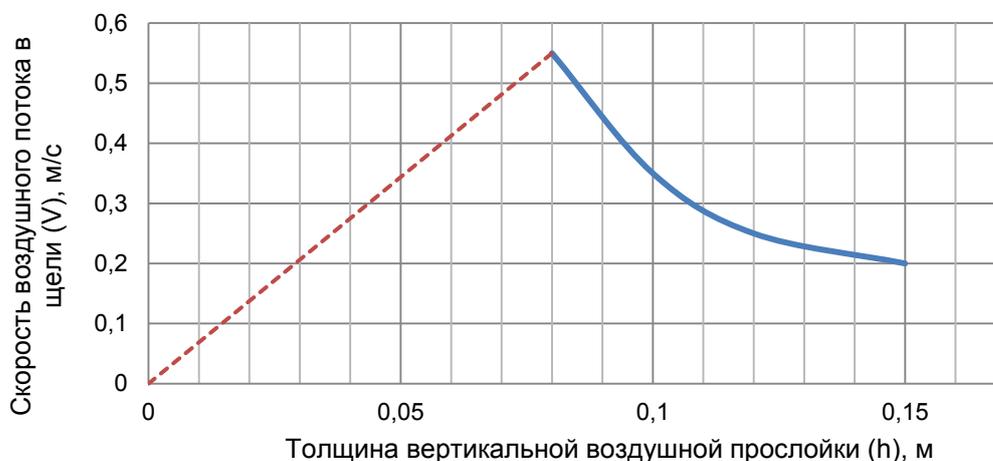


Рисунок 6. График зависимости скорости воздушного потока от толщины вертикальной воздушной прослойки

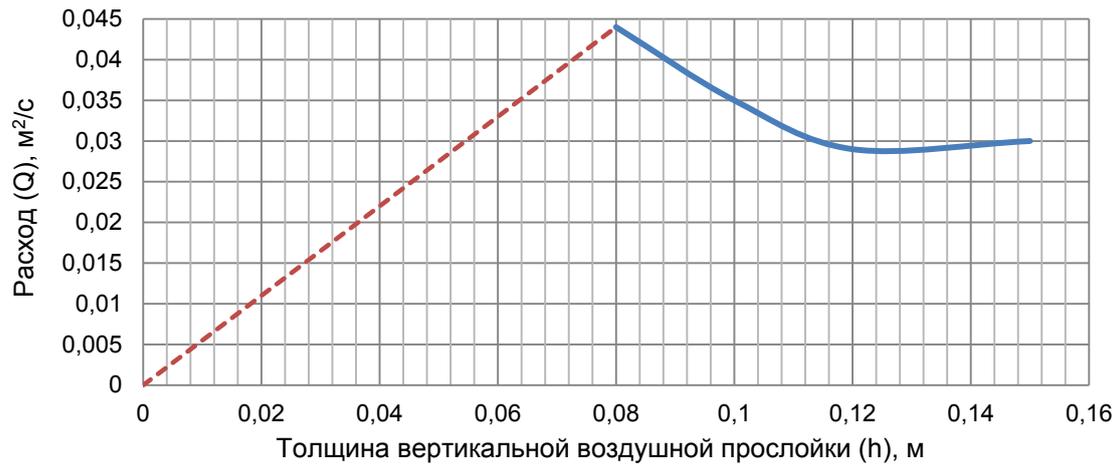


Рисунок 7. График зависимости расхода от толщины вертикальной воздушной прослойки

В длину кронштейна входят толщина ВВП и толщина утеплителя. В данных испытаниях утеплитель был толщиной 100 мм, следовательно, можно перейти от толщины воздушной прослойки к длине кронштейна. Графики зависимости скорости V и расхода Q от длины кронштейнов представлены на рисунках 8, 9.

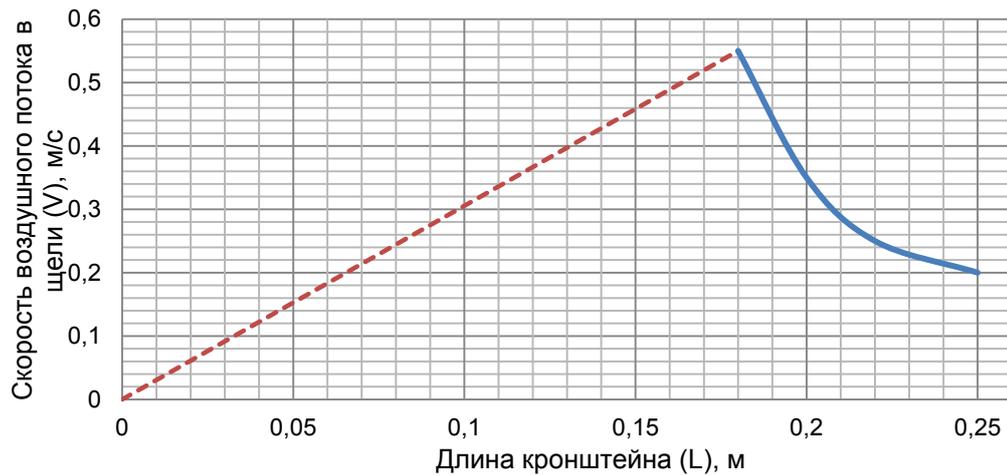


Рисунок 8. График зависимости скорости воздушного потока от длины кронштейна

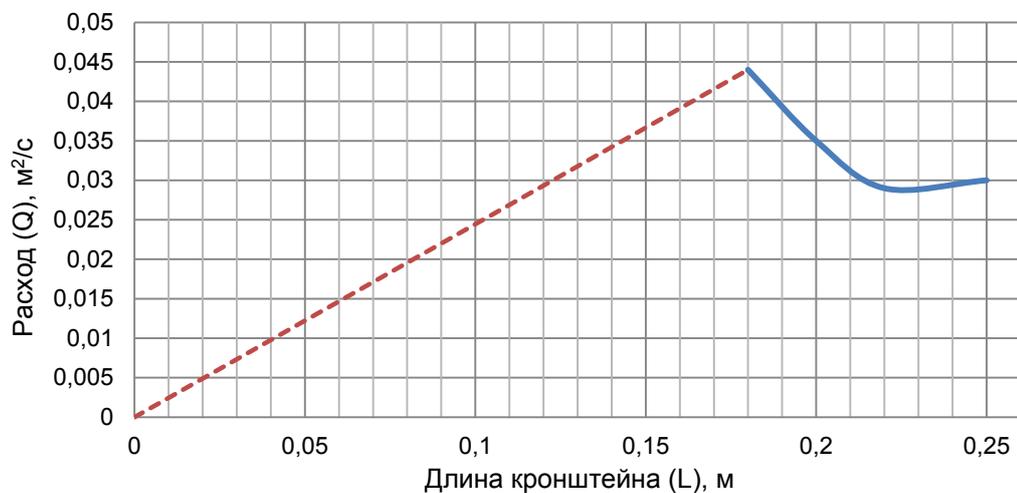


Рисунок 9. График зависимости расхода от длины кронштейна

Сведем данные, полученные для скорости V и расхода Q , а также цену на комплектующие для установки 1 м^2 фасада в таблицу 3.

Таблица 3. Сопоставление экспериментальных данных с ценами на комплектующие

Длина кронштейна, м	0,180	0,190	0,200	0,220	0,250
Цена за 1 м^2 НВФ с НДС, руб.	523,48	524,52	540,51	552,49	574,09
V , м/с	0,55	0,45	0,35	0,25	0,20
Q , $\text{м}^2/\text{с}$	0,044	0,0395	0,035	0,032	0,030

Графики зависимости скорости V и расхода Q от цены на комплектующие для установки 1 м^2 фасада представлены на рисунках 10, 11.

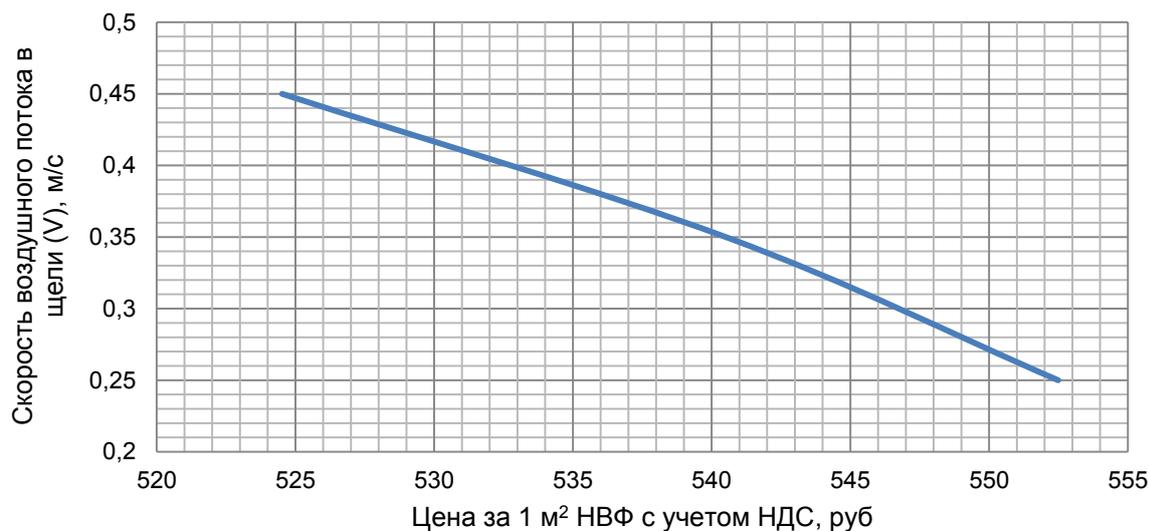


Рисунок 10. График зависимости скорости воздушного потока от цены 1 м^2 НВФ с учетом НДС

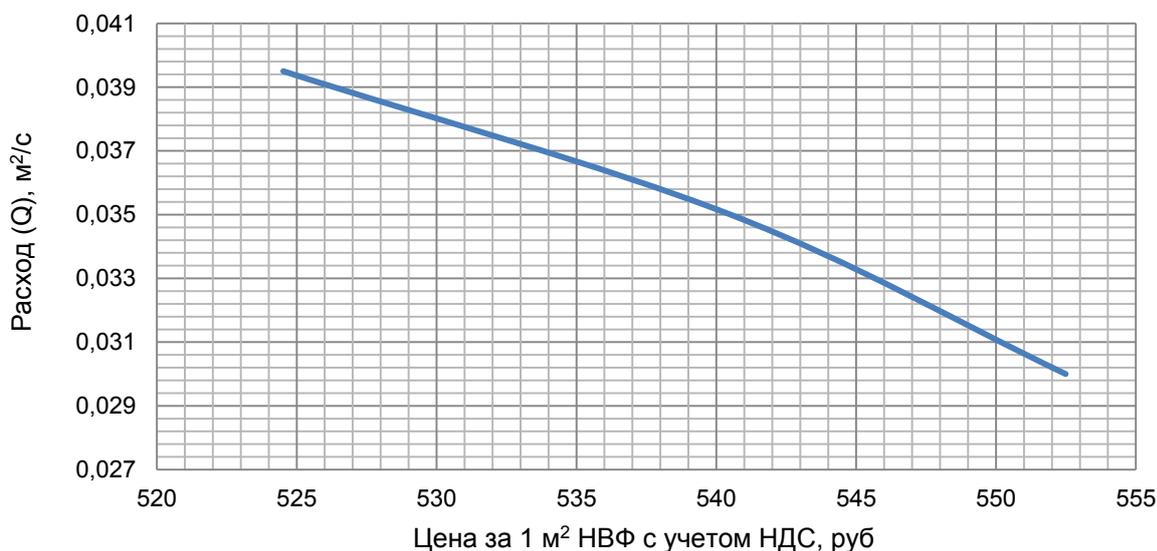


Рисунок 11. График зависимости расхода от цены 1 м^2 НВФ с учетом НДС

Экономически выгодный фасад

При проведении натурного эксперимента [40] для получения данных рассматривались здания высотой 28 метров с различными зазорами воздушной прослойки (0,08, 0,10, 0,12, 0,15 м).

Для наглядности обработки экспериментальных данных, воспользовавшись формулами Емельянова В.А., Немова Д.В., Мифтахова Д.Р. Оптимизированная конструкция навесного вентилируемого фасада

$$v = \varphi \sqrt{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \cdot 2gL}, \quad (5)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{1 + \lambda \cdot \frac{L_2}{h}}{1 + \lambda \cdot \frac{L_1}{h}}} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}, \quad (6)$$

мы можем получить теоретические значения параметров воздушного потока в вентилируемом зазоре для зданий, имеющих высоту, отличную от экспериментальных [40].

Рассмотрим три здания с применением НВФ:

- жилой дом «Князь Александр Невский», 35 этажей, высота 95 м (Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, д. 138, корп. 2);
- гостиница «Holiday Inn St. Petersburg MoskovskyeVorota», 17 этажей, высота 55 м (Санкт-Петербург, Московский пр., д. 97а);
- жилой дом, 8 этажей, высота 28 м (Санкт-Петербург, ул. Орловская, д. 3).

Скорости и расходы в воздушных зазорах были пересчитаны для вышеперечисленных зданий и представлены в таблице 4.

Таблица 4. Скорости и расходы в воздушных зазорах для вышеперечисленных зданий

h ВВП, м	Здание высотой 28 м		Здание высотой 55 м		Здание высотой 95 м	
	V1, м/с	Q1, м ² /с	V2, м/с	Q2, м ² /с	V3, м/с	Q3, м ² /с
0,080	0,55	0,044	0,771	0,062	1,013	0,081
0,090	0,45	0,041	0,631	0,057	0,829	0,075
0,100	0,35	0,035	0,491	0,049	0,645	0,064
0,120	0,25	0,032	0,364	0,044	0,479	0,057
0,150	0,20	0,030	0,280	0,042	0,368	0,055

На рисунке 12 приведены зависимости расходов Q1 (28 м), Q2 (55 м), Q3 (95 м) от цены на комплектующие на установку 1 м² фасада при различной длине кронштейнов.

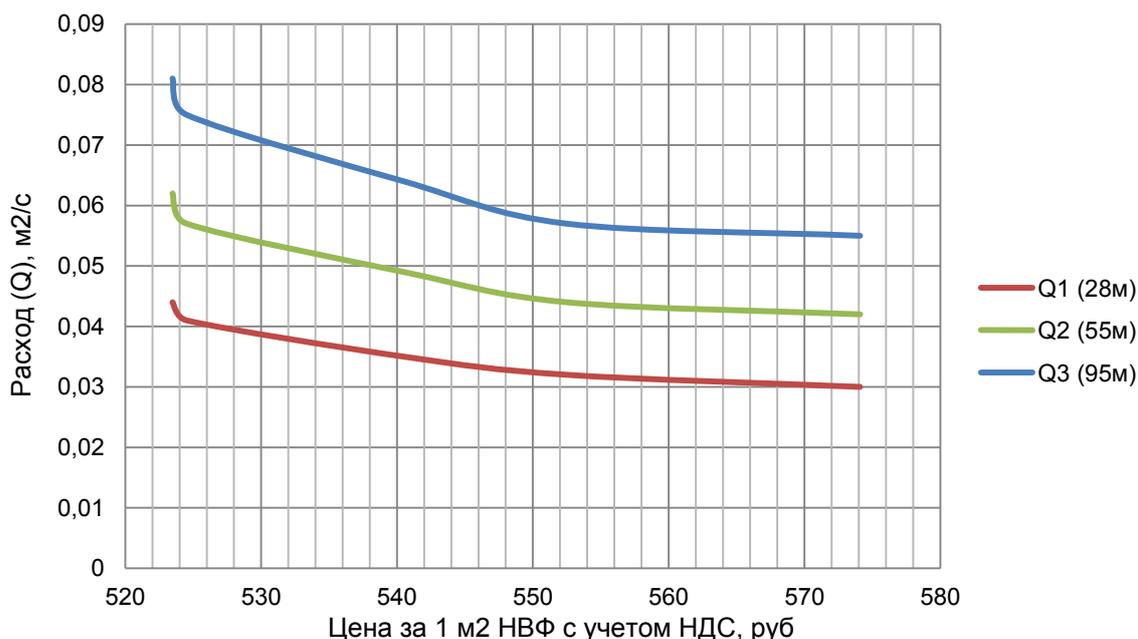


Рисунок 12. График зависимости расхода от цены 1 м² НВФ с учетом НДС

Оптимальный размер канала, отвечающий максимуму пропускной способности:

$$\frac{L}{h} = \frac{1}{\lambda}. \quad (7)$$

Следовательно, $\lambda = \frac{h}{L}$.

Значения коэффициентов гидравлического трения λ для каждого из зданий представлены в таблице 5.

Таблица 5. Значения коэффициентов гидравлического трения λ для каждого из зданий

h ВВП, м	$\lambda_1(28\text{м})$	$\lambda_2(55\text{м})$	$\lambda_3(95\text{м})$
0,080	0,002857	0,001333	0,000842
0,090	0,003214	0,0015	0,000947
0,100	0,003571	0,001667	0,001053
0,120	0,004286	0,002	0,001263
0,150	0,005357	0,0025	0,001579

Изменение коэффициента гидравлического трения в зависимости от высоты здания представлено на рисунке 13.

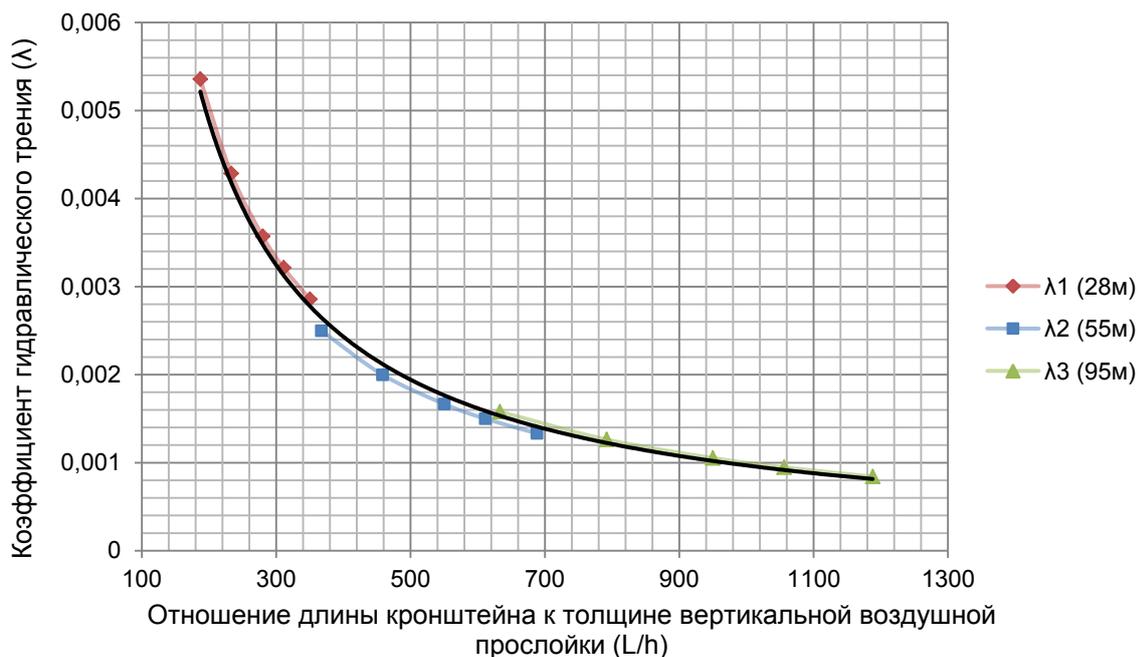


Рисунок 13. График зависимости коэффициента гидравлического трения от отношения L/h

Сведем все данные в таблицу 6.

Таблица 6. Расходы для рассматриваемых зданий

L1, м	L2, м	L3, м	h ВВП, м	L1/h	L2/h	L3/h	Q1(28м), м ² /с	Q2(55м), м ² /с	Q3(95м), м ² /с
28	55	95	0,08	350	688	1188	0,044	0,062	0,081
28	55	95	0,09	311	611	1056	0,041	0,057	0,075
28	55	95	0,10	280	550	950	0,035	0,049	0,064
28	55	95	0,12	233	458	792	0,032	0,044	0,057
28	55	95	0,15	187	367	633	0,030	0,042	0,055

Изменение расхода Q представлено на рисунке 14.

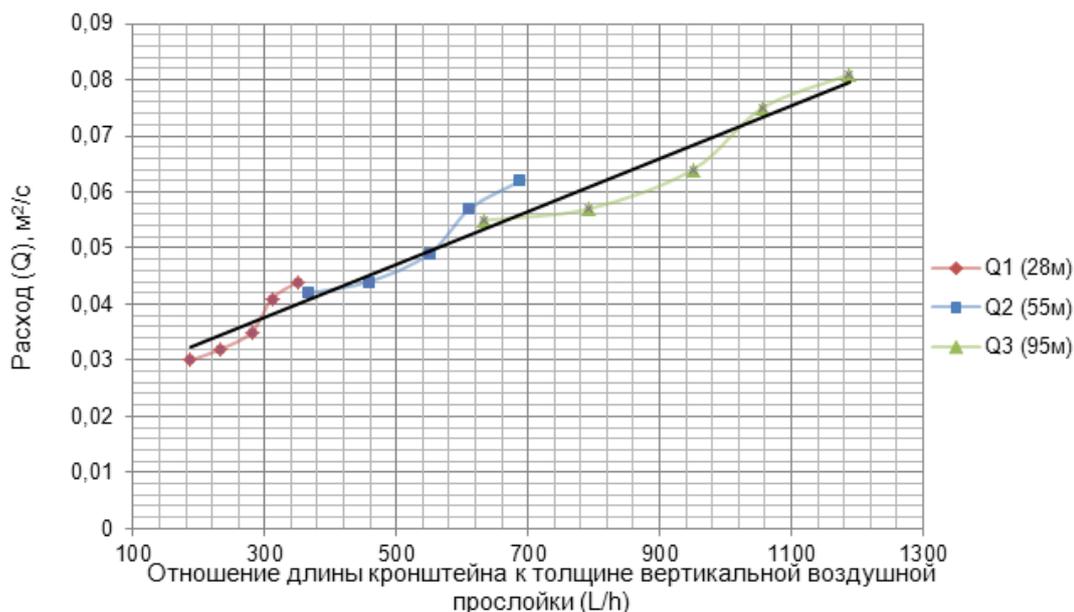


Рисунок 14. График зависимости расхода от отношения L/h

Как видно из таблицы 6, по мере увеличения высоты здания при той же толщине ВВП расход также возрастает. Сравним цены потерь $\frac{C}{Q}$ напора для рассматриваемых зданий.

Таблица 7. Цена потерь напора для рассматриваемых зданий

L кр, м	C, руб.	Q1(28м), м²/с	Q2(55м), м²/с	Q3(95м), м²/с	C/Q1, руб.·с/м²	C/Q2, руб.·с/м²	C/Q3, руб.·с/м²
0,18	463,62	0,044	0,062	0,081	10537	7518	5720
0,19	524,52	0,041	0,057	0,075	12951	9241	7031
0,20	541,37	0,035	0,049	0,064	15429	11008	8376
0,22	552,49	0,032	0,044	0,057	17265	12635	9614
0,25	574,09	0,030	0,042	0,055	19136	13654	10389

Изменение цены потерь напора с увеличением расхода показано на рисунке 15.

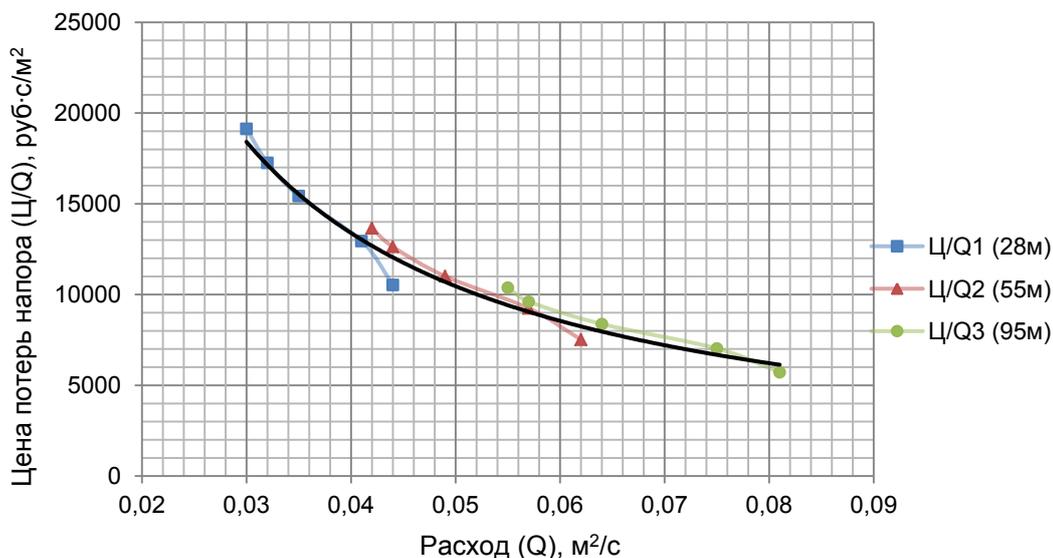


Рисунок 15. График зависимости цены потерь напора от расхода

Основные результаты и выводы

1. Давление тяги пропорционально разности $T_n - T_c$ температур горячей грани канала и холодного воздуха.
2. Интенсивность передачи теплоты от горячей стенки холодному воздуху пропорциональна $n^{-1} - k^{-1}$, $n < k$. Эта разность обратно пропорциональна Δ (приведенной высоте канала) и прямо пропорциональна относительному напору $1 - \theta = (T_n - T_c) / T_c$. Следовательно, чем короче канал, тем большая интенсивность теплопередачи требуется для реализации ТГД с фиксированной средней скоростью.
3. Гидравлически оптимальный канал, обладающий при фиксированных значениях ζ_r , θ , L максимальной пропускной способностью, имеет толщину h , в λ раз меньшую высоты канала (λ – число Дарси).
4. Выполненные расчеты показали, что при существующих типах кронштейнов сокращение затрат достигается на ограждающих конструкциях высотой не менее 50...60 м. Для зданий малой этажности не существует типоразмеров кронштейнов данного производителя.

Литература

1. Кузьменко Д.В., Ватин Н.И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» – термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13–21.
2. Явтушенко Е.Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 2(7). С. 55–61.
3. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel // Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 42. Issue 3. Pp. 169–177.
4. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Turbulent natural convection flow in a vertical channel with anti-symmetric heating // Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 44. Issue 10. Pp. 1207–1216.
5. Bodia J.R., Osterle J.F. The development of free convection between heated vertical plates // Journal Heat Transfer. 1962. Vol. 84. Issue 1. Pp. 40–43.
6. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica 1942. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–28.
7. Fedorov A.G., Viskanta R., Mohamad A.A. Turbulent heat and mass transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel plate channel // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1997. Vol. 18. Issue 3. Pp. 307–315.
8. Fedorov A.G., Viskanta R. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 16. Pp. 3849–3860.
9. Naylor D., Floryan J.M., Tarasuk J.D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Journal of Heat Transfer 1991. Vol. 113. Issue 3. Pp. 620–626.
10. Naylor D., Tarasuk J.D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Issue 2. Pp. 377–387.
11. Sparrow E.M., Azevedo L.F.A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit // International Journal Heat Mass Transfer. 1985. Vol. 28. Issue 10. Pp. 1847–1857.
12. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs // International Journal of Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 9. Pp. 2173–2185.
13. Miyamoto M. [et al] Turbulent Free Convection Heat Transfer From Vertical Parallel Plates // Proceeding of the International Heat Transfer Conference. 1986. Vol. 4. Pp. 1593–1598.
14. Badr H.M. [et al] Turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels // International Journal Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 43. Pp. 73–84.
15. Habib M.A. [et. al]. Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26. Issue 1. Pp. 77–87.

16. Yilmaz T., Gilchrist A. Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating // *Heat Mass Transfer*. 2007. Vol. 43. Issue 7. Pp. 707–719.
17. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A.A., Tarasova D.S. The Energy-Efficient Heat Insulation Thickness for Systems of Hinged Ventilated Facades // *Advanced Materials Research*. 2014. No. 941–944. Pp. 905–920.
18. Корниенко С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. №5. С. 389–394.
19. Туснина О.А., Емельянов А.А., Туснина В.М. Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8(43). С. 54–63.
20. Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №1. С. 47–61.
21. Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Свободная одномерная конвекция в воздушном зазоре навесных фасадов зданий с разными тепловыми потоками через облицовочный слой и стенку // *Жилищное строительство*. 2009. №9. С. 27–31.
22. Машенков А.Н., Чебурканова Е.В. Определение коэффициента теплотехнической однородности навесных фасадных систем с воздушным зазором // *Строительные материалы*. 2007. №6. С. 10–12.
23. Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Математическое моделирование конвективного теплообмена около стены здания в приближении пограничного слоя // *Известия вузов. Строительство*. 2011. №5. С. 65–71.
24. Машенков А.Н., Чебурканова Е.В. Графический анализ влажностного режима и паропроницаемости навесной фасадной системы с воздушным вентилируемым зазором типа Uкоп в диаграмме Шпайделя // *Жилищное строительство*. 2007. №11. С. 2–5.
25. Машенков А.Н., Косолапов Е.А. О методах численного решения двумерных уравнений Буссинеска для свободной конвекции // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. №3. С. 292–296.
26. Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Общая система уравнений Буссинеска для одномерной свободной конвекции в плоском вертикальном слое // *Приволжский научный журнал*. 2012. №2. С. 93–98.
27. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лушин К.И. Скорость движения воздуха в прослойке навесной фасадной системы при естественной вентиляции // *Жилищное строительство*. 2013. №10. С. 14–17.
28. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. №5. С. 297–305.
29. Лапин В.Г., Лапин С.В. Расчет конвективного движения воздуха в канале вентилируемого фасада при наличии горизонтальных щелей между плитками облицовки // *Приволжский научный журнал*. 2012. №2. С. 85–92.
30. Корнилов Т.А., Амбросьев В.В. Экспериментальные исследования влияния воздушного потока в зазоре на теплозащитные свойства вентилируемых фасадных систем // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. №3. С. 344–347.
31. Умнякова Н.П. Элементы навесных вентилируемых фасадов, определяющие их теплозащитные качества // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. №5. С. 372–380.
32. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №8(26). С. 51–56.
33. Немова Д.В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №2(37). С. 24–36.
34. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Достаточные условия существования свободноконвективного течения в вертикальном щелевом канале // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2012. №147. С. 276–282.
35. Петриченко М.Р., Петроченко М.В., Явтушенко Е.Б. Гидравлически оптимальная вентилируемая щель // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №2(37). С. 35–40.

36. Немова Д.В., Емельянова В.А., Мифтахова Д.Р., Экстремальные задачи расчета свободноконвективных движений в навесных вентилируемых фасадах // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 46–53.
37. Петроченко М.В. Основы гидравлического расчета СКТ в ограждающих строительных конструкциях. Автореферат дисс. канд.тех.наук. Санкт-Петербург, 2012. 20 с.
38. Прайс-лист на алюминиевую подконструкцию U-коп (03.12.2013.)
39. Немова Д. В., Ольшевский В. Я., Цейтин Д. Н. Гидростатика термогравитационной конвекции в вертикальном канале // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №183. С. 295–301.
40. Ольшевский В. Я. Результаты экспериментального определения скоростей и расходов в вентилируемых прослойках НВФ [Электронный ресурс]: магистерская диссертация. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Инженерно-строительный институт. Кафедра строительства уникальных зданий и сооружений. Санкт-Петербург, 2014.

*Варвара Алексеевна Емельянова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(904)5503696; эл. почта: shein91@mail.ru*

*Дарья Викторовна Немова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)8900267; эл. почта: darya.nemova@gmail.com*

*Динара Робертовна Мифтахова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(981)8883718; эл. почта: dinara.miftakhova@gmail.com*

© Емельянова В.А., Немова Д.В., Мифтахова Д.Р., 2014

doi: 10.5862/MCE.50.7

Specifics of surface runoff contents and treatment in large cities

V.N. Chechevichkin*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+79219581442; e-mail: filter-w@mail.ru***N.I. Vatin***Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+79219643762; e-mail: vatin@mail.ru*

Key words

surface runoff treatment; rainwater runoff; snowmelt runoff; infiltration runoff; heavy metals; petroleum derivatives

Abstract

The degree of surface runoff pollution in large cities has been assessed in modern conditions in the case study of production sites of St. Petersburg. Increased content of petroleum derivatives and heavy metal ions both in rainwater runoff and especially in snowmelt runoff has been revealed.

It has been established that the composition of infiltration runoff from the newly built-up sites within the city limits commonly depends on their background, especially in the places of former unauthorized dumps, which are usually buried under the building sites. The content of petroleum derivatives in such surface runoff can exceed significantly their content in the runoff of landfills. Most petroleum derivatives appear in the surface runoff as emulsified and associated with suspended matters forms, which are a source of secondary pollution of waste water as it is accumulated in settlers and traps of local waste water treatment plants.

Filtrational-sorptive technologies of surface runoff treatment are the most effective and simple in terms of both treatment and waste disposal.

References

1. Revelle P., Revelle C. *The environment issues and choices for society*. Boston: Jones and Barlett Publish, 1988. 650 p.
2. Hammer M.J. *Water and waste-water technology*. New-York–London: John Wiley & Sons, Inc. 1975. 400 p.
3. Heineman M., Eichenwald Z., Gamache M., Miner R., Keohan P. A comprehensive water quality model of Boston's drainage systems, World Environmental and Water Resources Congress 2013, Showcasing the Future. *Proceedings of the 2013 Congress*. 2013. Pp. 63–76.
4. Bressy A., Gromaire M.-C., Lorgeoux C., Saad M., Leroy F., G. Chebbo F. Efficiency of source control systems for reducing runoff pollutant loads, Feedback on experimental catchments within Paris conurbation. *Water Research*. 2014. Vol. 57. Pp. 234–246.
5. Denafas G., Ruzgas T., Martuzevičius D., Shmarin S., Hoffmann M., Mykhaylenko V., Ogorodnik S., Romanov M., Neguliaeva E., Chusov A., Turkadze T., Bochoidze I., Ludwig C. Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014. Vol. 89. Pp. 22–30.
6. *Rekomendatsii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverkhnostnogo stoka s selitebnykh territoriy, ploshchadok predpriyatiy i opredeleniyu usloviy vypuska yego v vodnyye obyekty* [Recommendations for the calculation of collection systems, disposal and treatment of runoff from residential areas, areas businesses and determining the conditions of release it into water bodies]. Moscow, Izdatelstvo «VST», 2006. 60 p. (rus)
7. *Svod pravil SP 42. 13330. 2011 Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i selskikh territoriy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.07.01-89* [Set of rules 42. 13330. 2011. City building. Planning and development of urban and rural areas. The updated edition of building code 2.07.01-89]. Moscow: Izdatelstvo «TsPP», 2011. 109 p. (rus)
8. Alekseyev M.I., Kurganov A.M. *Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhdevogo i talogo) stoka s urbanizirovannykh territoriy. Uchebnoye posobiye* [Organization diversion of surface (rain and melted) runoff from urbanized areas. Tutorial]. Moscow: Izdatelstvo ASV, 2000. 352 p. (rus)
9. Dikarevskiy V.S., Kurganov A.M., Nechayev A.P., Alekseyev M.I. *Otvedeniye i ochistka poverkhnostnykh stochnykh vod. Uchebnoye posobiye* [Draining and cleaning superficial wastewater. Tutorial]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 224 p. (rus)

10. Molokov M.V., Shifrin V.N. *Ochistka poverkhnostnogo stoka s territoriy gorodov i promyshlennykh ploshchadok* [Surface runoff treatment from urban and industrial sites]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 104 p. (rus)
11. Leonov Ye.A., Mikhaylova M.S. Problemy ochistki stochnykh vod s poverkhnosti avtomobilnykh dorog na primere koltsevoy avtomobilnoy dorogi vokrug Sankt-Peterburga [Wastewater treatment problem with the surface of the roads on the example of a ring road around St. Petersburg]. *Zhizn i bezopasnost*. 2002. No.3 Pp. 280–286. (rus)
12. Pshenin V.N., Kovalenko V.I. Zagryazneniye livnevyykh stokov s avtomobilnykh dorog [Contamination of stormwater runoff from roads]. *Vestnik INZhEKONA*. 2007. Vol. 6(19). Pp. 140–145. (rus)
13. Brombach H., Weiss G., Fuchs S. A new database on urban runoff pollution: Comparison of separate and combined sewer systems. *Water Science and Technology*. 2005. Vol. 51(2). Pp. 119–128.
14. Kolosova D.D., Vovk M.P., Molodkina L.M., Chusov A.N. Vliyaniye redoks-potentsiala sredy na effektivnost tekhnologii ochistki neftesoderzhashchikh zhidkikh otkhodov [Influence of the redox potential of the medium on the efficiency of the technology oily liquid waste]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2013. No. 3(178). Pp. 306–313. (rus)
15. Andrianova M.Yu., Vedmetskiy Yu. V., Kudoyarov M. F., Molodkina L. M., Patrova M. Ya., Fedorov M. P., Chusov A. N. *Kompleks ochistki toksichnykh neftesoderzhashchikh zhidkikh otkhodov* [Complex of treatment of toxic oily liquid waste]. Patent Russian Federation No. 126699. April 10, 2013. (rus)
16. Vatin N. I., Chechevichkin V. N., Chechevichkin A. V. Osobennosti ochistki vody iz r. Vuoksa v letniy period [Features of water purification from Vuoksa river during the summer period]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No.2(12). Pp. 23–26. (rus)
17. Andrianova M.Ju., Vorobjev K.V., Lednova Ju.A., Chusov A.N. A short-term model experiment of organic pollutants treatment with aquatic makrophytes in industrial and municipal waste water. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 587-589. Pp. 653–656.
18. Petrov Ye.G., Kirichevskiy D.S. Sorbtsionnaya tekhnologiya ochitski proizvodstvennykh i poverkhnostno-livnevyykh stokov [Sorption technology of cleanup production and surface stormwater runoff]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2005 No. 6. Pp. 34–36. (rus)
19. Vatin N., Golovkova N., Chechevichkin V. The hydroengineering constructions for continuous sorbent sewage treatment. *The International Youth Science Environmental Forum, "Ecobaltica 2008"*, St.-Peterburg, 26–28 june, 2008. Saint-Petersburg, 2012. Pp. 177–180.
20. Widiastuti N., Wu N., Any M., Zhang D. The potential application of natural zeolite for greywater treatment. *Desalination and Water Treatment*. 2008. Vol. 18. No. 1–3. Pp. 271–280.
21. Erdem E., Karapinar N., Donat R., The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *Colloid and Interface Sci*. 2004. Vol. 280. No. 2. Pp. 309–314.
22. Hus H.S., Chaoc J.H., Hot S.C.J. Removal of mixed heavy metal ions in wastes water by zeolite. *Journal of Hazardous Water*. 2005. Vol. 127. No. 1–3. Pp. 89–101.
23. Sutherland K. *Filters and filtrations Handbook*. Amsterdam: Butterworth – Heinemann – Elsevier, 2008. 523 p.
24. Kantsiber Yu.A., Shtykov V.I. Otsenka kharakteristik drenazhnogo stoka s selitebnykh i proizvodstvennykh territoriy Severo-Zapada Rossii [Evaluating drainage outflow from residential and industrial areas of North-West Russia]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No.4(30). Pp. 46–51. (rus)
25. Gonopolskiy A.M., Nikolaykina N.Ye., Mitashova N.I., Murashov V.Ye., Kushnir K.Ya. Mnogostadiynaya tekhnologiya ochistki filtrata poligonov tverdykh bytovykh otkhodov [Multistage technology to treat filtrate generated by communal solid waste sites]. *Water: chemistry and ecology*. 2008. No.2. Pp. 25–30. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 67–74