

На правах рукописи



ОЛЬШЕВСКИЙ
Вячеслав Янушевич

**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНЫХ
ПОТОКОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ КАНАЛАХ**

Специальность 05.23.16 – «Гидравлика и инженерная
гидрология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Петриченко Михаил Романович,
Доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Орехов Генрих Васильевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"

Купавых Светлана Викторовна, кандидат технических наук Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет"

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)

Защита состоится «20» июня 2018г. В ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета <http://www.spbstu.ru/science/defences/html>

Автореферат разослан « » _____ 2018г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.229.17,

Доктор технических наук, доцент



Сидоренко Геннадий Иванович

Актуальность темы исследования

Определение гидравлических характеристик свободно-конвективного течения (СКТ) воздуха в вентилируемых вертикальных каналах (средней скорости (расхода) воздуха, коэффициентов расхода (скорости), коэффициентов потерь) направлено на развитие «научных основ равновесия, движения и взаимодействия жидкостей и газов, закономерности движения обычных, взвесенесущих, аэрированных и стратифицированных потоков, прогнозирование их характеристик и кинематической структуры», согласно п.1 паспорта специальности 05.23.16.

Вертикальные вентилируемые каналы являются неотъемлемым конструктивным элементом наиболее распространённых ограждающих конструкций: систем навесных вентилируемых фасадов (НВФ), фасадов с буферными зонами, фасадов с невентилируемой воздушной прослойкой и др. Основной функционал вентилируемого канала – использование сил плавучести (свободной конвекции воздуха) для «проветривания» конструкции с целью поддержания сбалансированного тепло-влажностного режима стен.

Расчет гидравлических параметров вертикального вентилируемого канала либо не производится вовсе, либо используются эмпирические результаты частного характера. Размеры и геометрия вертикального канала должны определяться интегральными гидравлическими характеристиками воздушного потока.

Степень разработанности

Исследование гидродинамики при свободной конвекции начато в конце 19 – начале 20 века Буссинеском, Лоренцем, Эккертом. Буссинеском сформулированы основные допущения теории (в т.ч. гипотеза Буссинеска). Лоренц применил оптические методы визуализации для изучения свободно-конвективных течений. Эккерт записал и решил уравнения свободно-конвективных течений и теплопередачи в приближении пограничного слоя. Уравнение Эккерта для диффузии импульса в переменных безразмерная поперечная координата (ζ) , безразмерная функция тока (f) $f''' + 3ff'' + 2f'^2 + \theta = 0, D(f) = (\zeta): 0 < \zeta < \infty, f(0) = f'(0) = f'(\infty) = 0$, относится к типу уравнения Шази. Изучение свойств решений уравнения Шази выполнено в последнее время В.П. Вариним с применением методов теории аналитических функций. Важно, что «согласно риману, свойства аналитической функции определяются ее особенностями, которые невозможно изучать, оставаясь на вещественном интервале. «Выход» в комплексную плоскость автоматически означает выход (отображение) на Риманову поверхность решения» и изучение точек ветвления римановой поверхности решения». Использование аналитических методов расчета в теории СКТ практически прекращено и переложено на численные методы. Новые результаты и методы решения уравнений Блазиуса, Крокко, Шази (плоские (расщепляющие) ряды, выход в комплексную плоскость) дают оценки для характеристик СКТ. Например, В.П. Вариним получено эталонное значение постоянной Блазиуса на 101 знак.

Работы Ю.А. Соковишина и Ю.Е. Карякина по методам сингулярных возмущений порядка выше первого в теории СКТ и струйных течениях вязкой среды, выполнены до 1989 и обобщены в цикле книг и справочных изданий. Эти работы появились сразу же после перевода монографии Ван-Дайка и до появления книг Найфэ и Дж. Коула. Обоснованием метода построения высших приближений для уравнений с малым параметром при старшей производной служит теорема Каплуна, содержащая достаточные условия существования решения сингулярно возмущенного уравнения (содержащего малый параметр у старшей производной), равномерно сходящегося к решению невозмущенного уравнения на всем интервале изменения независимой переменной.

Существенный прогресс в изучение структуры СКТ внесены экспериментальными работами Ю.С. Чумакова. Численное моделирование вязких СК-течений в расплавах выполнено, в частности, в работах Е.М. Смирнова, на кафедре «Гидроаэродинамики» СПбПУ.

Изучению свободной конвекции и переноса пассивной примеси в строительных конструкциях содержат работы, выполненные в МГСУ школой В.Г. Гагарина. В этих работах основное внимание уделяется определению температурно-влажностного состояния строительных ограждений. Близкая по содержанию тематика разрабатывается С.В. Корниенко (ВГТУ). В СПбПУ гидравлика вентилируемых каналов изучалась Д.В. Немовой и М.В. Петроченко. Ими получены расчетные зависимости для средней скорости и перепада давления по ходу потока. Д.В. Немовой поставлена задача о влиянии рустов на пропускную способность канала и получены предварительные оценки для средней скорости. Также сделаны оценки для средней температуры и относительной влажности воздуха.

Существует некоторое количество российских и зарубежных исследований по конструктивному оформлению загроможденных вентилируемых каналов, перегороденных противопожарными рассечками. Загромождение вертикального вентилируемого канала сопротивлениями в виде перфорированных перегородок снижает коэффициент скорости и, как следствие, уменьшает среднюю скорость СКТ по сравнению с не загроможденным каналом. Большое внимание уделяется материалу рассечек. Этот материал должен удовлетворять всем требованиям пожарной безопасности, в особенности самому главному - не дать пожару распространиться по всему фасаду.

Из рассмотренных работ можно следует, что противопожарные рассечки являются надежным средством защиты фасада здания от распространения пламени. Необходимо выявить каким образом устройство данной системы повлияет на функциональность НВФ.

Научная новизна

Научная новизна состоит в развитии гидравлических методов расчета свободно-конвективных течений в вертикальных воздушных каналах.

Проведено моделирование воздушного потока на физической модели вертикального канала с переменным по высоте распределением тепловой нагрузки, изменяемым зазором и боковой приточностью. Выполнены эксперименты по определению сравнительной пропускной способности каналов в условиях загромождения (противопожарными рассечками). Изучена связь скорости конвективного испарения влаги с поверхности утеплителя при различных гидравлических условиях свободно-конвективного течения.

Достоверность результатов исследований верифицируется, где возможно, сравнением с решениями тестовых задач и сопоставлением с результатами численного моделирования полей скорости и температуры в СКТ.

Теоретическая значимость работы содержится в последовательном применении тривиальных (скалярных) расслоений для описания СКТ в вертикальных каналах, в использовании экспериментальных (физическое моделирование) результатов и методов CFD для описания СКТ в вертикальных обогреваемых каналах.

Тривиальные (или скалярные) расслоения определяются как отображения из базы в слой [Б.С. Булдырев, В.С. Павлов, Линейная алгебра, Л., ЛГУ, 1985] и естественно возникают в результате перехода от «точных» дифференциальных уравнений СКТ к осредненным по расходу (или сечению потока) распределениям («гидравлическое (одномерное) приближение»). Дело в том, что уравнения, получаемые для тривиальных расслоений обладают теоремами существования и единственности, а т.н. полные гидродинамические системы обладают гарантиями существования и единственности решений только в исключительных, в основном, близких к линейным, постановках.

Например, для описания диффузии импульса в СКТ в одномерном (погранслоном) приближении возникает т.н. уравнение типа Шази:

$$y''' + 3yy'' - 2y'^2 + z = 0,$$

с неизвестной $y(x)$ и заданной $z(x)$, $0 < z(x) < 1$. Решения уравнения Шази и свойства этих решений детально изучены [В.П. Варин, Special Solutions To Chazy Equation, препринты ИПМ имени Келдыша, №43, 2015].

Например, для решения предельных задач для уравнений типа Шази, Крокко, Хартри используются разложения решений в плоские (расщепляющие) ряды. Этот аппарат обоснован в работах Варина В.П., Брюно А.Д., ИПМ РАН.

Существование и единственность решения предельных задач обосновывается теоремными результатами и тщательной валидацией результатов анализа. Например, В.П. Вариным недавно опубликовано эталонное значение постоянной Блазиуса на 101 знак после десятичной точки.

Практическая значимость работы заключается:

- в том, что удастся прогнозировать величину средней скорости в воздушной прослойке, конфигурацию пьезометрической линии, оценить интенсивность переноса температуры, теплового потока и влаги в воздушной прослойке НВФ. Численное моделирование термогравитационного движения в программном комплексе ANSYS позволили рассчитать распределения скорости и температурного напора в условиях термогравитационной конвекции воздуха при одностороннем обогреве прослойки. Полученные результаты способствуют принятию правильных проектных решений;

- в определении оптимальных размеров воздушной прослойки систем НВФ в условиях термогравитационной конвекции. Сформулированы конкретные предложения по увеличению пропускной способности воздушной прослойки систем НВФ путем внесения конструктивных изменений в традиционные системы НВФ.

Методология и методы исследования основаны на гидравлическом (одномерном) приближении, использующем вместо полей гидромеханических переменных распределения (функционалы) гидравлических элементов по ходу потока. Эти функционалы, в основном, изображают конвективные производные некоторых гидромеханических величин. Например, пусть $B := \int_{\mathcal{V}} \beta d^3x$ - распределение (величина) B ,

заданная на контрольном объеме V , $\beta := dB/dV$ – объемная плотность распределения B . Тогда конвективная производная $(d/dt)_{conv}B$ определяется как поток объемной плотности β через контрольную поверхность A , $Q_A(\beta)$:

$$Q_A(\beta) := \left(\frac{d}{dt} \right)_{conv} B = \int_A \beta u_n d^2x, u_n := (\mathbf{n}, \mathbf{u}).$$

При реализации работы использовалось: численное моделирование, аналитические оценки, гидравлический эксперимент на физической модели вертикальной вентилируемой прослойки и в натуральных условиях на строительных объектах Санкт-Петербурга.

Цель и задачи работы

Из обзора источников следует, что, несмотря на большой объем исследований по данной теме, гидравлические методы расчета течений в вертикальных вентилируемых каналах требуют уточнения и усовершенствования в деталях. Именно, неизвестно как влияют типовые конструктивные элементы канала (русты, расщечки) на пропускную способность канала; как влияет распределенный подвод теплоты на среднюю скорость СКТ в канале; наконец, практически отсутствуют методики, позволяющие оценивать работу конструкций в различных климатических условиях. Недостаточно проработано физическое моделирование переноса консервативной и пассивной примеси (энтальпии, водяного пара) в вертикальных вентилируемых каналах строительных конструкций.

Целью работы является совершенствование и уточнение гидравлических методов расчета и проектирования проточной части НВФ, адаптированных к реальным конструкциям вертикальных вентилируемых прослоек навесных вентилируемых фасадов и иных строительных конструкций в условиях термогравитационного (свободно-конвективного) течения воздуха.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Уточнить и конкретизировать известные методы определения интегральных гидравлических характеристик воздушных потоков (скорость, коэффициент скорости, коэффициент трения) в вертикальных каналах.

2. Произвести физическое моделирование вентилируемых воздушных каналов, для определения интегральных характеристик потока (скорость, коэффициент скорости, коэффициент трения). Определить интенсивность переноса пассивной консервативной примеси (энтальпии и влаги).

3. Произвести численное моделирование вертикальных вентилируемых воздушных каналов для определения экспериментальных характеристик потока в различных климатических условиях;

4. Разработать рекомендации для проектирования систем НВФ в различных экстремальных условиях работы (большой перепад температур, ветровая нагрузка).

Положения, выносимые на защиту

1. Количественные оценки для интегральных характеристик свободно-конвективного потока: средней скорости, потерь напора, средней по расходу температуры в условиях термогравитационной конвекции воздушных прослоек.

2. Результаты натурных и физических экспериментов по определению интегральных характеристик свободно-конвективного потока в вертикальном обогреваемом канале. Результаты численного моделирования СКТ в вертикальных вентилируемых прослойках (каналах).

Содержание диссертации. Диссертация состоит из Введения, 3 глав и заключения с выводами и рекомендациями.

Во введении описаны цели работы и формулировки необходимые для достижения целей.

Показано, что существуют вопросы, лежащие в области гидравлики и гидромеханики СКТ, связанные с обеспечением работоспособности навесных фасадов. Проработка этих вопросов лежит в области определения научной специальности 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология, что указано в п.1 Паспорта специальности.

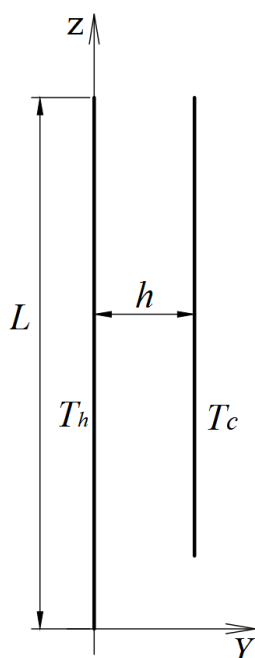


Рис. 1. Схема вертикального вентилируемого канала.

Первая глава содержит элементарные оценки, связанные с предельной задачей Буссинеска для вязкого СКТ. Приближение пограничного слоя для СК-неизотермической пристеночной струи в вертикальном канале $z > 0$, рис.1. В этом приближении уравнение движения в направлении (y), перпендикулярном оси канала, сводится к тождеству $\partial p / \partial y = 0$. Остается 1 (z) компонента скорости, температурный напор и 3 дифференциальных равенства (уравнение импульсов в проекции на ось z) + условие неразрывности + уравнение энергии (теплопередачи):

$$u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} = g\theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y},$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0,$$

$$u_z \frac{\partial \theta}{\partial z} + u_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\nu}{\sigma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2},$$

где $\theta := \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$, τ - температурный перепад и $\tau = \rho \nu \partial u_z / \partial y$ сдвиговое напряжение (трения),

ν , σ - коэффициент вязкости и число Прандтля. Компоненты скорости исключаются введением функцией тока. В этом случае, после несложных преобразований получаем систему квазилинейных уравнений, пятого порядка, на функцию тока $f = f(\zeta)$ и на температурный напор $\theta = \theta(\zeta)$:

$$\frac{d^3 f}{d\zeta^3} + 3f \frac{d^2 f}{d\zeta^2} - 2 \left(\frac{df}{d\zeta} \right)^2 + \theta = 0,$$

$$\frac{d^2 \theta}{d\zeta^2} + 3\sigma f \frac{d\theta}{d\zeta} = 0.$$

Выписанная система (Эккерт, 1929) определена на промежутке $0 < \zeta < \infty$. Это – система квазилинейна содержит уравнение импульсов. Уравнение энергии - линейно. Предельные условия для этой системы пятого порядка ставятся так:

$$f(0) = f'(0) = f'(\infty) = \theta(0) - 1 = \theta(\infty) = 0.$$

Здесь: $\zeta = y/\delta$, $\delta = \delta(z)$ – толщина пограничного слоя на горячей грани $y=0$. По определению, эта предельная задача для системы ОДУ рассматривается на промежутке значений $0 < \zeta < \infty$.

Можно доказать, что: $\delta(z) = 4 \sqrt{4 \frac{\nu^2 z}{g}}$, $\psi = \nu \cdot Gr_\delta f(\zeta)$, ψ - функция тока, $\mathbf{u} := \text{rot}(\psi \mathbf{i})$. Легко

подсчитать, что даже для весьма длинных каналов величина $\delta \ll h$, h – ширина канала. Поэтому в поперечном масштабе толщины пограничного слоя свободно-конвективное движение простирается за пределы пограничного слоя. Тогда:

$$\int_0^\infty f'^2 f d\zeta = 1/8 \int_0^\infty f \theta d\zeta.$$

Выражение, стоящее в левой части этого равенства представляет инвариант Акатнова. Этот

инвариант сохраняется в том и только в том случае, если $\int_0^\infty f \theta d\zeta = \int_0^\infty \theta d\zeta \int_0^\zeta u(s) ds = \int_0^\infty u ds \int_s^\infty \theta d\zeta$

$= 0$. Оба интеграла (слева и справа) существуют. Действительно, пусть $df/d\zeta := u(f)$,

$0 < f < a = f(\infty)$ и тогда: $\int_0^\infty f'^2 f d\zeta = \int_0^a f u(f) df < \infty$.

Можно доказать, что в любом СКТ перенос импульса равномерно (по параметру θ) ограничен: $\int_0^\infty f'^2 f d\zeta \leq 1/12$, и инвариант Акатнова ни в каком допустимом (виртуальном) СКТ не превосходит $1/12$.

Из системы Эккерта получаются такие автомодельные распределения для скорости и перепада температуры: $f'(\zeta) = \zeta \exp(-3a\zeta)$, $\theta(\zeta) = \exp(-3\sigma a \zeta)$, $a := f(\infty)$, $a^4 = 1/27$, см. рис.2. На этом же графике точками обозначены результаты решений Эккерта для распределения скорости и температуры в пограничном слое на вертикальной пластине.

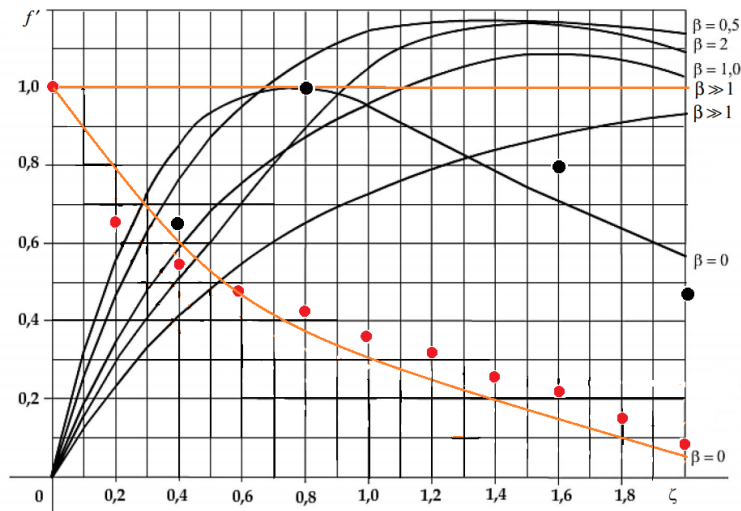


Рис. 2. График распределения безразмерной скорости и безразмерного температурного напора по толщине пограничного слоя в зависимости от спутности потока.

С увеличением координаты z происходит размазывание эпюр скорости и температуры. Например, максимум скорости удаляется от горячей стенки и смещается вглубь канала, сжимая область ненулевых скоростей, как показано на рис.3.

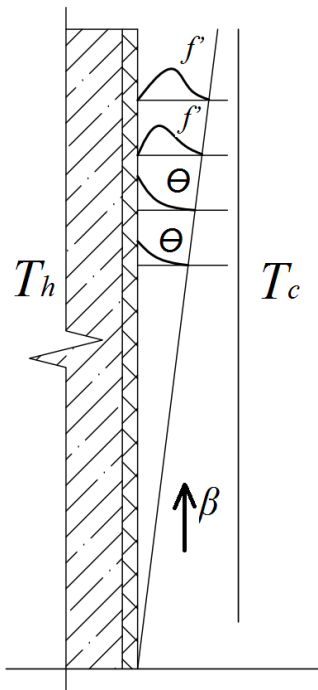


Рис. 3. Формирование СКТ в вентилируемом канале.

ввиду $\tau_w > 0$ получаем: $d\alpha_2/dz < 0$, т.е. при отсутствии подогрева происходит стабилизация потока, $\alpha_2 \downarrow 1+0$. Это означает, что канал в условиях СКТ играет роль спрямляющей решетки, если по длине канала прекращается подогрев потока.

Проинтегрируем уравнение импульсов в размерной форме по y от 0 до ∞^1 , или, что тоже, от 0 до h , тогда:

$$\frac{d}{dz} \int_0^{\infty} u_z^2 dy = -\frac{\tau_w}{\rho} + g \int_0^{\infty} \theta dy.$$

Дериватив слева представляет изменение количества движения. Перепишем интеграл от квадрата продольной

скорости так: $\int_0^{\infty} u_z^2 dy \cong \alpha_2 v^2 h = \alpha_2 v Q$, α_2 – корректив

квадрата скорости (корректив количества движения, корректив Буссинеска), Q – расход воздуха. В канале без рустов (в «идеальном канале»), v , Q не зависят от продольной координаты z .

Следовательно, условие динамического равновесия принимает вид: $vQ \frac{d\alpha_2}{dz} = -\frac{\tau_w}{\rho} + g \int_0^h \theta dy$,

где $Q := vh$ – расход воздуха в канале, h – ширина канала, α_2 – корректив квадрата продольной скорости (корректив Буссинеска или корректив количества движения), τ_w – касательное напряжение трения на стенке. Если $\int_0^h \theta dy = 0$

т.е., если в каком-либо сечении потока подогрева нет, то,

Для однородного вдоль оси Z движения получается условие динамического равновесия $\tau_w - \rho g \int_0^h \theta dy = 0$. Роль гидравлического уклона в СКТ играет среднее

арифметическое значение температурного напора $J = 1/h \int_0^h \theta dy$.

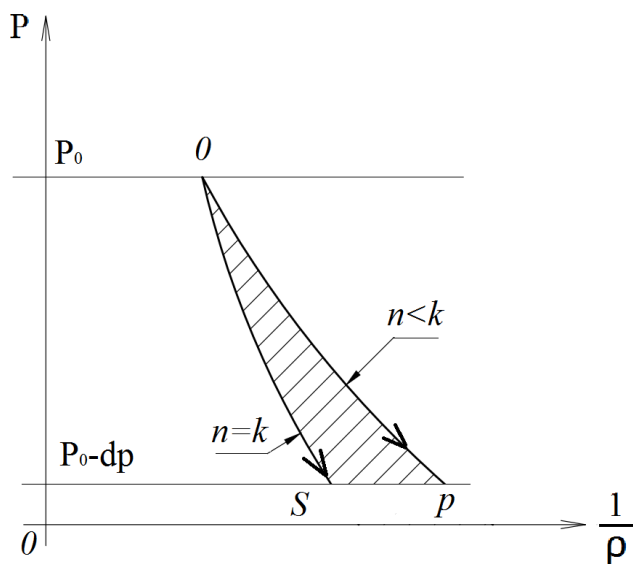
Доказано, что СКТ в вертикальном канале подобно пристеночной струе (настильному факелу) в следующем: Инвариант Акатнова

$A = \int_0^{\psi_\infty} \psi u d\psi = \int_0^\infty u^2 dy \int_0^z u dz = \int_0^\infty u dz \int_z^\infty u^2 dy$ удовлетворяет условию $\frac{dA}{dz} = \int_0^\infty u dz \int_z^\infty \theta dy$. Очевидно,

инвариант Акатнова для СКТ постоянен, если, $\forall y > 0, \int_y^h \theta dy = 0$,

Таким образом, решения предельных задач для уравнений Буссинеска и Эккерта позволяют:

- найти связь между интенсивностью подвода теплоты и скоростью течения;
- найти распределения скорости и температурного напора в пограничном слое подъемной силы;
- оценить средние значения распределений (среднюю скорость, расход, уклон) для СКТ.



Гидростатика воздушного канала и развитие модели Буссинеска.

Термостатика канала. Рассматривается вертикальный столб $0 < z < L$ совершенного газа. Условия равновесия имеют вид:

$$(dp)_n + \rho g dz = 0,$$

причем нижний значок у круглой скобки обозначает показатель политропы. Если $n=k$, воздушный столб находится в равновесии. Это равенство интерпретируется как уравнение на $p=p(z)$, причем $p(0)-p_0=0$, p_0 – давление на уровне земли.

Интегрирование уравнения равновесия приводит к равенству:

Рис. 4. Профицит технической работы

$$\pi_n(\zeta) = \left(1 - \frac{n-1}{n} \zeta\right)^{\frac{n}{n-1}}, \zeta := \frac{gz}{RT_0}, 0 < \zeta < \Lambda = \frac{gL}{RT_0}, \pi := \frac{p}{p_0}.$$

Рассмотрим, см. рис.4, термодинамическое состояние столба газа в координатах: $1/\rho, p$. Изменение давления при изменении плотности изображается отрезками политроп, соединяющих ординаты $p=p_0$ и $p < p_0$ и изображающими состояние воздушного столба от сечения к сечению при падении давления. Площадь криволинейной трапеции, ограниченной прямыми $\omega=0, p-dp < p_0$ изображает техническую работу dl_T расширения воздушного столба. Если $n=k$, техническая работа расширения минимальна и воздушный столб неподвижен – нет подвода теплоты: вес столба воздуха уравновешен силой гидростатического давления. При $n < k$ возникает внешний теплообмен, интенсивность

которого определяется значением разности $1/n-1/k$. Политропа проходит положе и возникает избыточная техническая работа, затрачиваемая на создание кинетической энергии и преодоление сопротивления канала. Можно показать:

$$\frac{dl_n - dl_k}{RT_0} = d\pi_n - d\pi_k = d\left(\frac{v^2}{2\varphi^2}\right)/(RT_0),$$

$$\frac{l_n - l_k}{RT_0} = \pi_n - \pi_k = \frac{\zeta^2}{2} \frac{k-n}{nk},$$

$$\zeta^2(1/n - 1/k) = \frac{v^2}{\varphi^2 RT_0},$$

$$v = \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{1/n - 1/k}.$$

Давление тяги, Δp_T . Определяется как разность давлений на «холодной» внешней (нижний значок «с») и на «горячей» внутренней (нижний значок «h») сторонах канала при $z=0$:

$$\Delta p_T = gL(\rho_c - \rho_h).$$

Давление тяги затрачивается на создание скоростного напора, $\rho_c v^2/2$, и на преодоление сопротивления канала, $\xi \rho_c v^2/2$, ξ коэффициент потерь. Поскольку давления на выходе из канала в «горячем» потоке воздуха и в неподвижном воздухе совпадают, то:

$$v = \varphi \sqrt{2gL(1 - \rho_h/\rho_c)} = \varphi \sqrt{2gL(1 - T_c/T_h)}.$$

Для определения n имеем равенство:

$$1/n = 1/k + \frac{2RT_c}{gL} \frac{T_h - T_c}{T_h}.$$

Показатель политропы процесса n – косвенная мера теплообмена. Чем меньше значение n , тем интенсивнее теплообмен между воздушным потоком и «горячей» гранью канала если β – число Стэнтона, то.

$$\beta \cdot k \cdot \frac{L}{h} = \frac{k-n}{n-1},$$

и получается, что интенсивность теплообмена β связана с показателями политропы и адиабаты:

$$\beta = \frac{h}{L} \frac{k-n}{k(n-1)}.$$

Следовательно, $n = k(1 - \beta L/h) / (1 - k\beta L/h)$, $1, n \xrightarrow{\beta \rightarrow \infty} 1$. Такую же роль играет обратный

калибр канала L/h , а именно: $n \xrightarrow{L/h \rightarrow \infty} 1$.

Тогда:

- давление тяги определяется интенсивностью передачи теплоты от горячей грани к воздушному потоку, задаваемой показателем политропы n , определяющим величину числа Стэнтона;

- давление тяги определяет техническую работу потока, расходуемую на кинетическую энергию потока и на работу преодоления сопротивления вертикального канала.

Пьезометрическая линия (распределение давления) по высоте канала при произвольном значении показателя политропы n получена выше:

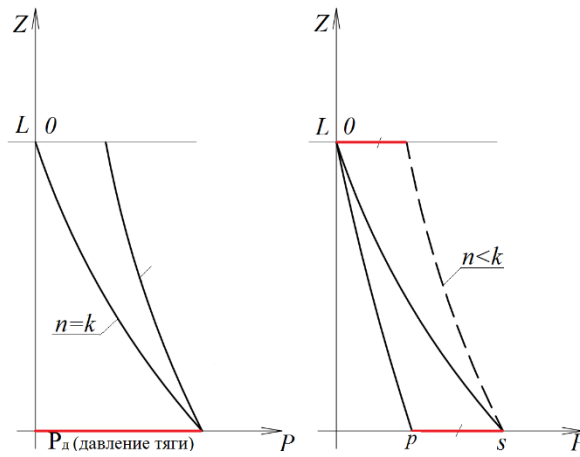


Рис. 5. Определение давления тяги и пьезометрической линии.

$$\pi_n(gz/RT_0 := \zeta) = \left(1 - \frac{n-1}{n}\zeta\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Пусть z (или ζ) фиксирована. Тогда $\pi_n > \pi_k$, $n < k$. Значит, пьезометрическая линия подогреваемого газа, $n < k$, пройдет правее линии давления в не подогреваемом (холодном) воздухе и при $z=L$ давление на выходе из канала с подогреваемым воздухом больше, чем давление в канале с холодным, не подогреваемым воздухом: $\pi_n(gL/RT_0) > \pi_k(gL/RT_0)$. Но это невозможно, поэтому перепад давления $\pi_n - \pi_k$ реализуется на входе в канал как давление тяги, см. рис. 5.

Изложенное позволяет величину коэффициента скорости φ и коэффициента потерь давления ξ связать с измеримыми в эксперименте величинами. Именно, если измерены v – средняя скорость воздуха, T_c – температура холодного воздуха и T_h – температура горячей грани. Тогда:

$$\varphi = \frac{v}{\sqrt{2gL(1-T_c/T_h)}},$$

$$\xi = 1/\varphi^2 - 1 = \frac{2gL}{v^2}(1-T_c/T_h) = \frac{2}{Fr}(1-T_c/T_h) \geq 0,$$

где $Fr := v^2/gL$ – число Фруда.

Получается, что в условиях СКТ коэффициент потерь давления определяется температурным фактором и числом Фруда. Из условия $\varphi \leq 1$ получается:

$$\frac{2}{Fr}(1-T_c/T_h) \geq 1 \rightarrow Fr \leq 2; \xi \geq 1 - \frac{T_c}{T_h} \geq 1$$

и точная верхняя граница числа Фруда не превосходит 2; эта граница не может быть улучшена.

Средняя скорость в СКТ пропорциональна:

$$\sqrt{k-n} = \sqrt{\alpha \frac{k}{k+\alpha}}, \alpha := \beta k \frac{A_w}{A},$$

Отсюда следует:

$$\sqrt{k-n} \leq \sqrt{k-1}.$$

Для средней скорости СКТ в вертикальном канале справедлива такая оценка сверху:

$$v \leq \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{1-1/k}.$$

Видно, что эффективность проветривания канала возрастает при увеличении коэффициента скорости φ , при увеличении высоты L канала и при уменьшении температуры холодного воздуха (в холодном воздухе тяга лучше, чем в теплом).

Выводы к главе 1:

- простейшая гидродинамическая модель Буссинеска позволяет утверждать, что СКТ в вертикальном прямоугольном канале подобно настильному факелу. Роль «насоса», создающего расход и импульс играет тепловой поток от нагретой грани в воздух;

- для интенсификации течения необходимо обеспечить максимальную теплопередачу по ходу потока;

- интенсивность переноса теплоты от нагретой грани в поток воздуха определяется величиной показателя политропы n , или, что тоже, интенсивностью передачи теплоты от горячей грани канала к потоку воздуха.



Рис. 6. Экспериментальная установка

Вторая глава содержит результаты экспериментального определения гидравлических элементов СКТ на физической модели вертикального обогреваемого канала. Из материалов введения и главы 1, следует, что необходимо выяснить, как влияет на пропускную способность канала распределение теплоты вдоль горячей грани, частота рустов, как степень загромождения канала влияет на величины v , n , φ и, наконец, какова интенсивность переноса влаги (интенсивность сушки).

Экспериментальная установка подробно описана в тексте, фото, см. рис.6; для измерения средней скорости и температуры воздушного потока использовался термоанемометр Testo – 435-2/.

Исследуется влияние обратного калибра L/h на среднюю скорость v и на коэффициент скорости φ . Увеличение обратного калибра увеличивает давление тяги как $L^{1/2}$; одновременно увеличивает потери давления (напора) по длине канала. Если канал длинный, то, очевидно, доминируют потери давления (напора) по длине. В гидравлически длинном канале $\varphi \cong \sqrt{h/(\lambda L)} \leq 1$, λ - число Дарси.

Следовательно, $\lambda L/h \geq 1, L/h \geq 1/\lambda$, и, в реальных конструкциях НВФ обратный калибр воздушного зазора должен быть не меньше (примерно) 50...70, а величина ширины канала не превышать 1/100 его длины. Для низких значений L оптимальное значение h недостижимо по требованиям противопожарной безопасности. Наоборот, в высотных конструкциях значение h получается слишком большим, крепеж фасада

слишком тяжелым.

Результаты экспериментов по определению $v=v(L/h)$, $\varphi=\varphi(L/h)$ для идеального канала (без рустов) приводятся на рис. 7-8 при различных способах обогрева воздушного потока. Нумерация батарей ведется снизу вверх, 1,2,3.

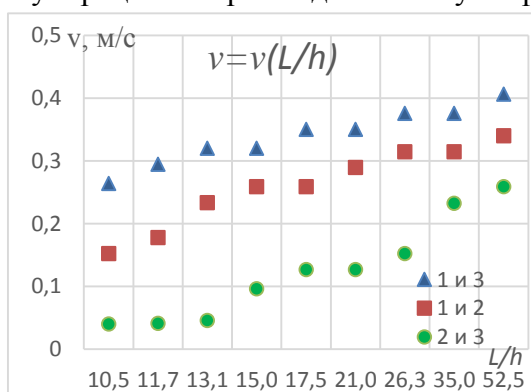


Рис. 7. График зависимости средней скорости v от L/h , русты закрыты

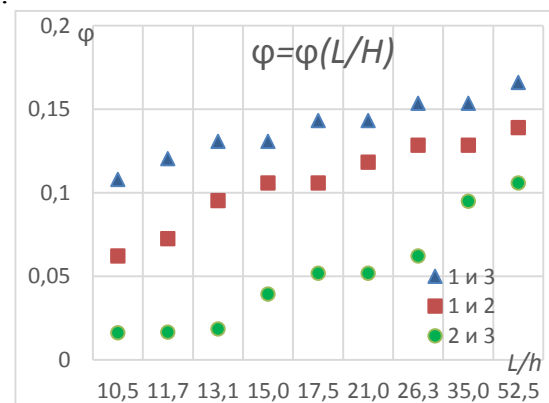


Рис. 8. График зависимости коэффициента скорости φ от L/h , русты закрыты

Увеличение обратного калибра L/h в пределах экспериментальных результатов не позволяет выйти на оптимум (максимум) средней скорости и на максимум φ , хотя по коэффициенту скорости и наблюдается снижение темпа увеличения. Далее, во всех экспериментах зафиксировано: снижение φ в канале с рустами по сравнению с каналом без рустов; влияние степени обогрева канала на среднюю скорость. Именно, влияние обогрева наиболее существенно проявляется в уменьшении v и φ при отключении (нижней) батареи 1. Это связано с уменьшением давления тяги на входе в вертикальный канал: расход воздуха через нижнее входное отверстие падает.

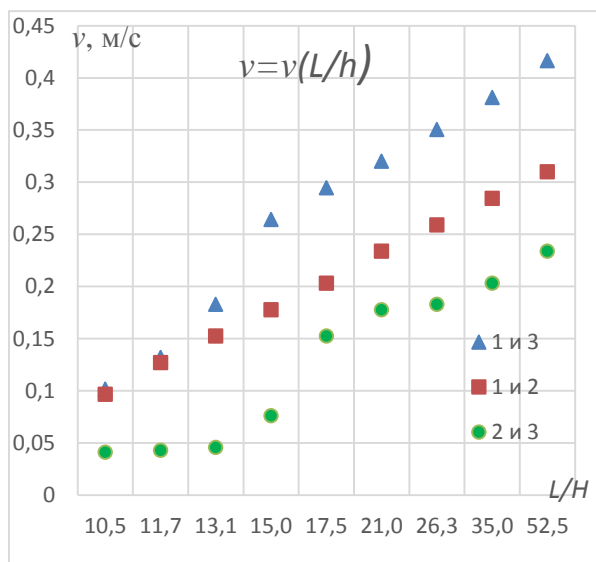


Рис. 9. График зависимости средней скорости v от L/h , русты открыты.

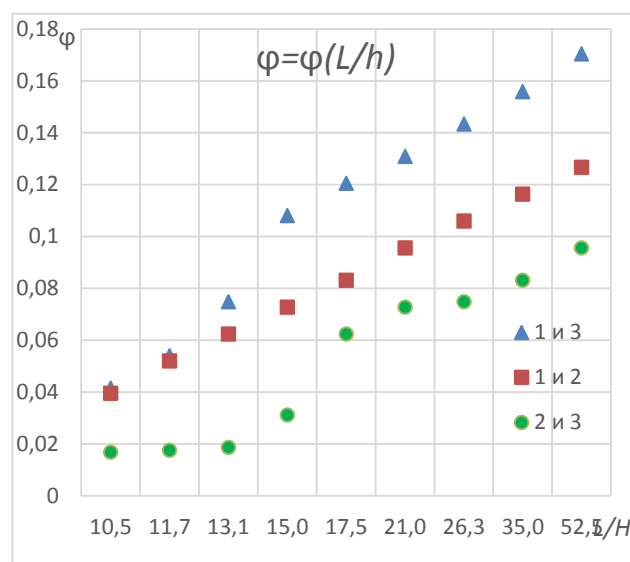


Рис. 10. График зависимости коэффициента скорости φ от L/h , русты открыты.

Влияние рустов на пропускную способность канала рассматривается в сравнении с идеальным каналом без рустов. Результаты измерений приводятся на рис. 9-10. Наличие рустов срывает тягу канала за счет его разгерметизации, как показано на рис. 11. Эпюра избыточного давления между холодным и горячим воздухом реализуется в виде технической работы потока в СКТ.

Площадь эпюры A_{id} . При наличии рустов треугольник превращается в «пилу» площадью «тяги» A . При наличии рустов площадь $A < A_{id}$ на величину незаштрихованных треугольников. Действительно, всякий руст «срывает» вакуум в канале и поэтому тяга падает. Тогда $A/A_{id} = \left(\frac{v}{v_{id}}\right)^2 \left(\frac{\varphi_{id}}{\varphi}\right)^2$, и, пренебрегая изменением коэффициента скорости,

получим: $A/A_{id} = \left(\frac{v}{v_{id}}\right)^2 \left(\frac{\varphi_{id}}{\varphi}\right)^2$, и, пренебрегая изменением коэффициента скорости,

получим: $v/v_{id} = \sqrt{A/A_{id}} < 1$. Легко доказать, что $A/A_{id} = \frac{1}{r+1}$, r – число рустов.

Тогда:

$$v/v_{id} = \varphi/\varphi_{id} \sqrt{\frac{1}{r+1}} \leq \sqrt{\frac{1}{r+1}} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}, r = 0(1) \dots \infty.$$

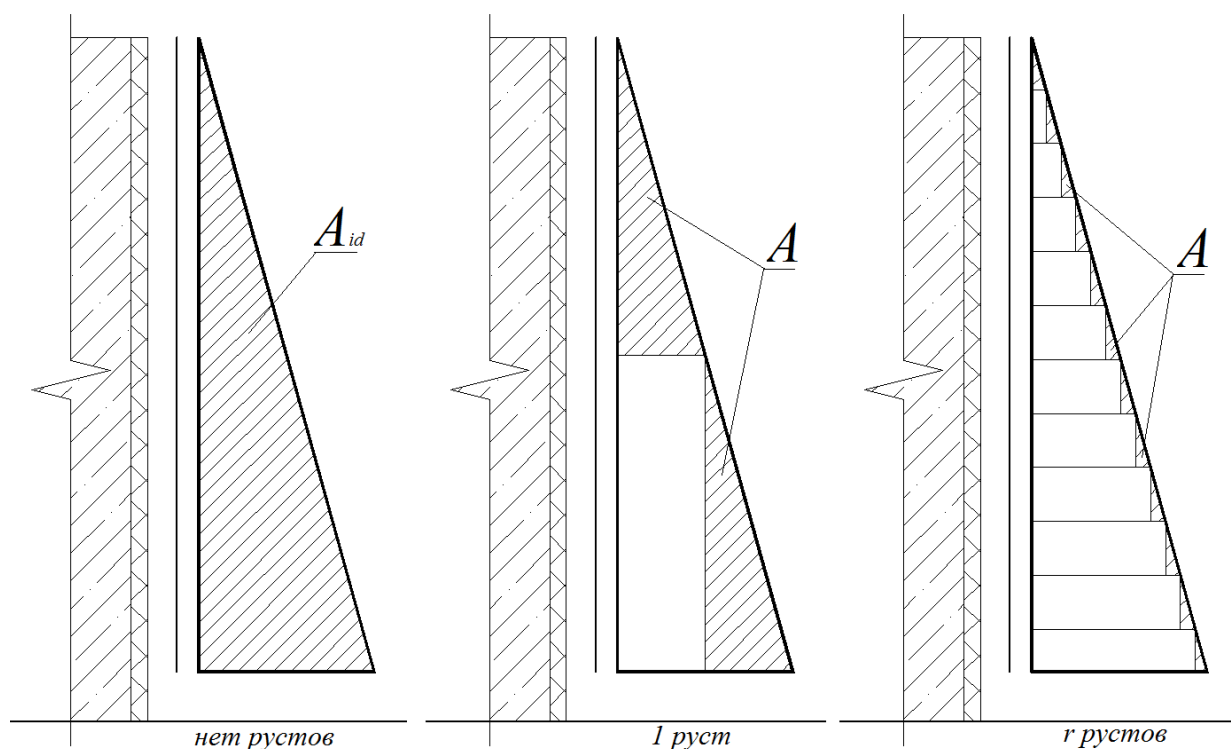


Рис. 11. Влияние рустов на давление тяги.

Следовательно, наличие рустов как минимум на 30% снижает среднюю скорость в канале независимо от обратного калибра L/h и распределения теплового потока по обогреваемой грани.

Загромождение канала противопожарными рассечками. Противопожарная рассечка перегораживает воздушный канал, уменьшая тем самым L и среднюю скорость. Существуют перфорированные рассечки, допускающие перетекание воздуха от секции к секции, обладающие увеличенным (по сравнению с незагроможденным каналом) гидравлическим сопротивлением. Сравнение пропускной способности не загроможденного и загроможденного рассечками каналов приводится на рис.12. Несложно пересчитать коэффициенты скорости на коэффициенты потерь давления по стандартной формуле $\xi = 1/\varphi^2 - 1$. Из рис.12 следует, что противопожарная рассечка резко снижает пропускную способность канала, срывая СКТ.

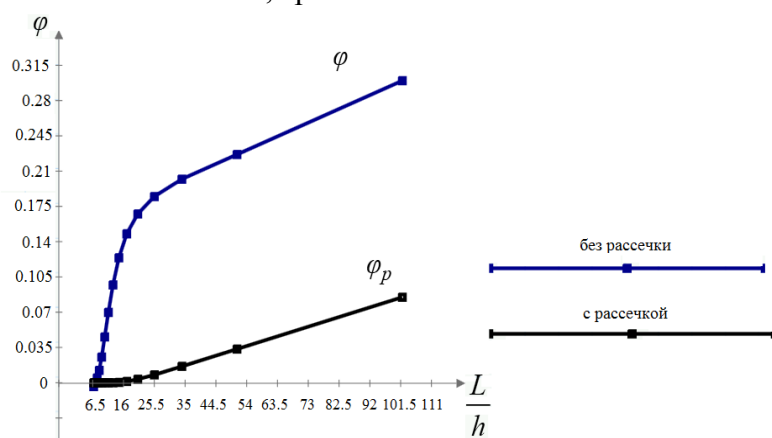


Рис. 12. Влияние противопожарной рассечки на пропускную способность канала

По этой причине применение рассечек оправдано только в экстремальных условиях работы канала. Предлагается конструкция рассечки, не загромождающей канал в штатных условиях и срабатывающая при повышении температуры газа в воздушном зазоре за счет освобождения от удерживающих рассечку связей.

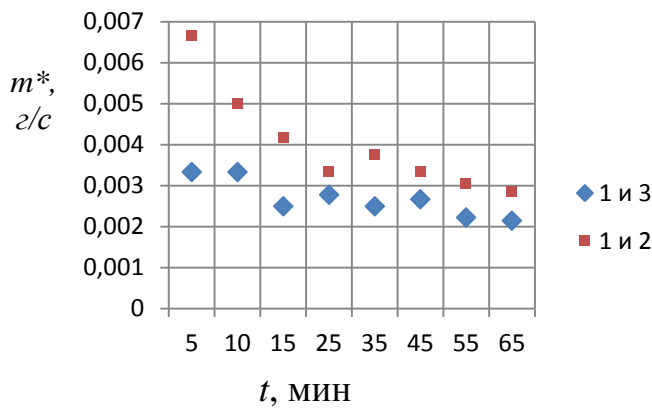


Рис. 13. Мгновенная скорость испарения влаги

Перенос пассивной (влаги) примеси в СКТ. Измерялась скорость испарения воды с поверхности утеплителя при различных комбинациях включения нагревателей, см. рис.13. Наилучшую скорость испарения показывает комбинация 1 – 2. При включении батарей в комбинации 1 – 3 скорость испарения снижается, т.к. утеплитель размещен в середине канала напротив 2-й батареи и следовательно не нагревается.

Диффузионное число Нуссельта (число Льюиса), $N_{D\delta}$, отнесенное к толщине δ пограничного слоя подъемной силы, вычисляется так:

$$N_{D\delta} := \left(\frac{d\Omega}{d\zeta} \right)_{\zeta=0} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \exp \left(-3\sigma_D \int_0^{\zeta} f(\tau) d\tau \right) d\zeta},$$

σ_D – диффузионное число Прандтля. С увеличением f число Льюиса возрастает экспоненциально, т.е. интенсивность испарения влаги «отслеживает» расход воздуха, а коэффициент массоотдачи обратно пропорционален толщине пограничного слоя, т.е. $z^{-1/4}$. Особый интерес представляет случай «слабой» диффузии, в условиях которой $\sigma_D \gg 1$. Тогда:

$$N_{D\delta} := \left(\frac{d\Omega}{d\zeta} \right)_{\zeta=0} \cong \frac{1}{\int_0^{\infty} \exp(-\sigma_D \zeta^3) d\zeta} = \frac{3\sqrt[3]{\sigma_D}}{\Gamma(1/3)} = 1,1\sqrt[3]{\sigma_D},$$

В предположении $\sigma_D \gg 1$, естественно, интенсивность массообмена уже не зависит от гидродинамических распределений. Если же $\sigma_D \ll 1$, то распределение относительной влажности поперек потока близко к линейному, как в твердой среде: $\Omega = \zeta, N_{D\delta} = 1$ и не зависит от средней скорости воздуха.

В главе 3 решаются задачи сопряженного теплообмена. Была построена модель для различных высот зданий. Также в модели варьируется воздушный зазор между слоем утеплителя и облицовочным слоем от 40 мм до 300мм.

В представленных расчетах конвекция и теплообмен описываются уравнением Навье-Стокса в нестационарной постановке, с учетом приближения Буссинеска. Эта задача сводится к расчету течения несжимаемой жидкости и газа при наличии массовых сил и пропорционально локальному перепаду температур.

Были решены: уравнение теплового баланса и уравнение Навье-Стокса, усредненное Рейнольдсом (RANS). На границе между двумя телами задано условие равенства температур и расхода.

Представленные графики показывают форму безразмерной скорости, температуры и координаты для сравнения различных значений зазора (40мм, 150мм, 300мм). Формула перевода в безразмерную величину скорости всплытия: $V_b = (g\beta\Delta TL)^{1/2}$

Ниже приведены температурные профили на высоте 15м для здания высотой 30м

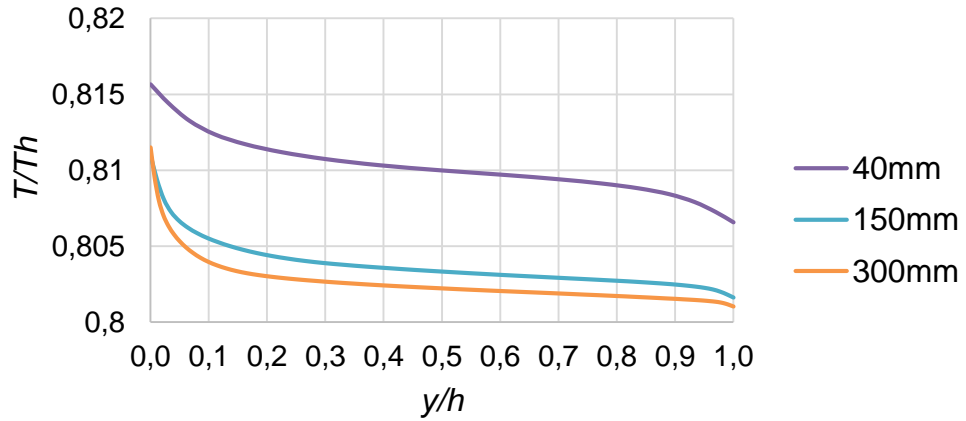


Рис. 14. Температурные профили в зазорах различной ширины на высоте 15м ($T_c=235,4K$)

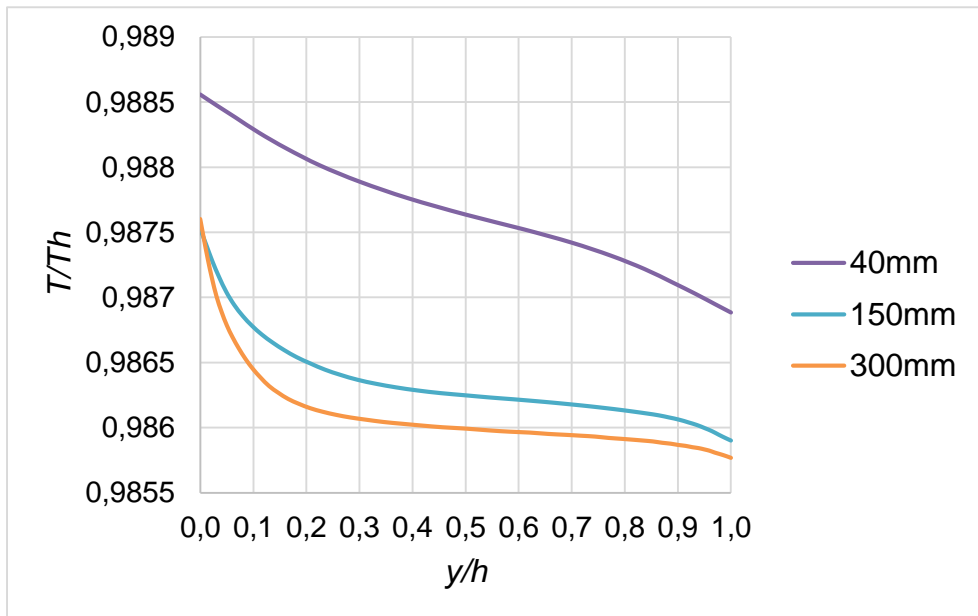


Рис. 15. Температурные профили в зазорах различной ширины на высоте 15м ($T_c=289,8K$)

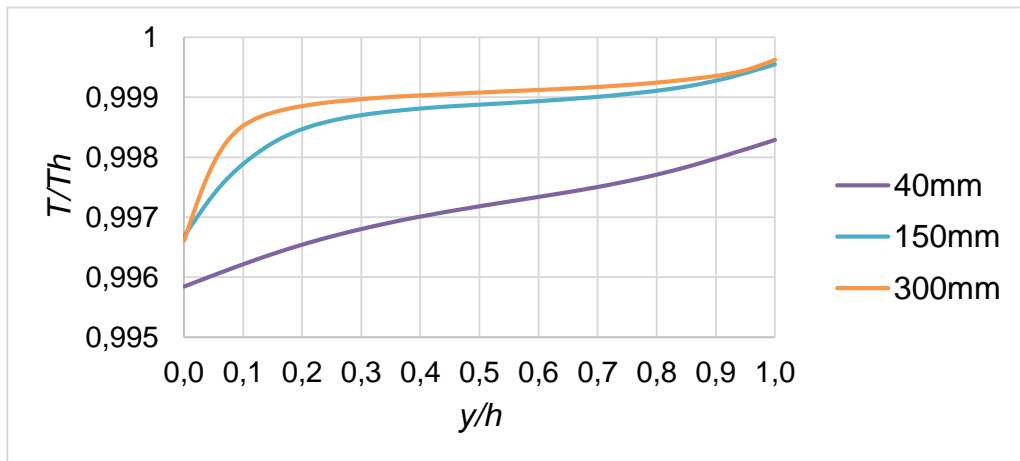


Рис. 16. Температурные профили в зазорах различной ширины на высоте 15м ($T_c=300K$)

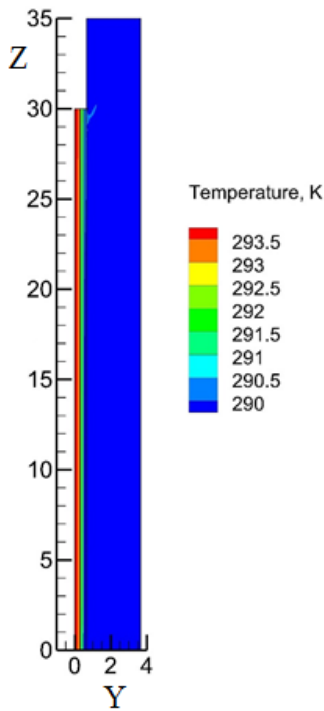


Рис. 17. Распределение температуры в вентилируемом зазоре и в его окрестности

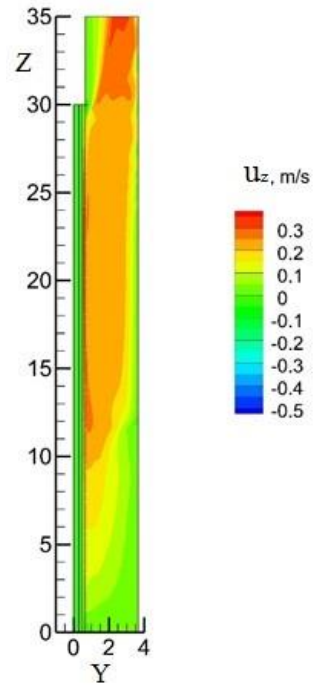
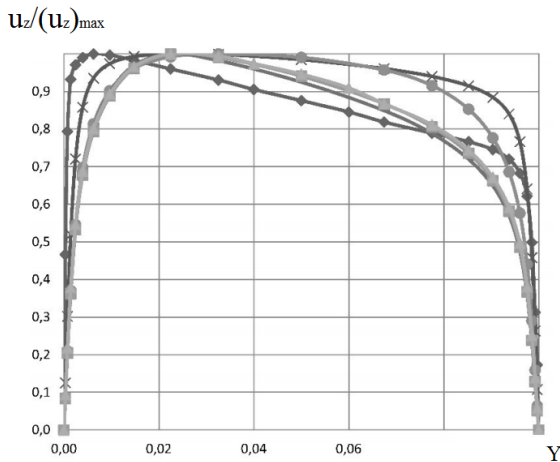


Рис. 18. Распределение скорости в вентилируемом зазоре и в его окрестности



◆ — $z = 2$; × — $z = 2,5$; ● — $z = 4$; — — $z = 8$; ■ — $z = 17$; ▲ — $z = 20$

Рис. 19. Безразмерный профиль вертикальной компоненты скорости v в зазоре шириной 0,1 м.

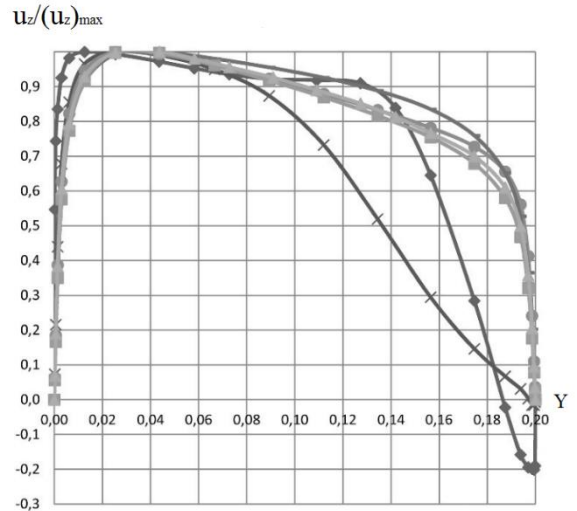


Рис. 20. Безразмерный профиль вертикальной компоненты скорости v в зазоре шириной 0,2 м.

Выводы по главе 3:

1. Результаты численного моделирования распределений скорости и температуры в вертикальных воздушных каналах в условиях СКТ, в целом, соответствуют прогнозам главы 1. Именно, в «узких» каналах ($h=40$ мм) распределение скорости и температуры по ширине канала «более однородное», чем в каналах большей ширины на таком же удалении от входа;

2. Равномерного движения ни в каком из каналов, ни в узком, ни в широком, не наблюдается, см. изоахи и линии тока на цветном рисунке. Выделяются 2 области неравномерного движения – вход в канал и сечения с абсциссой, близкой к $z=L$. Температурные распределения отличает нелинейность по ширине канала.

Заключение

1. СКТ в вертикальном канале с обогреваемой гранью по распределению скорости и температуры подобно неизотермическому настильному факелу (пристеночной струе). Инвариант Акатнова $A = \int_0^{\psi_\infty} \psi u d\psi = \int_0^\infty u^2 dy \int_0^z u dz = \int_0^\infty u dz \int_z^\infty u^2 dy$ не сохраняется вдоль

потока и удовлетворяет условию $\frac{dA}{dz} = \int_0^\infty u dz \int_z^\infty \theta dy$, показывающему, что роль внешнего источника мощности играет тепловой поток, передаваемый воздуху от горячей грани канала;

2. Показано, что средняя скорость СКТ в вертикальном вентилируемом канале прямо пропорциональна высоте канала и интенсивности передачи теплоты на горячей грани. Интенсивность передачи теплоты определяется разностью $1/n - 1/k$ обратных значений политропы и адиабаты. Показано, что $\sqrt{k-n} = \sqrt{\alpha \frac{k}{k+\alpha}}$, $\alpha := \beta k \frac{A_w}{A}$, где β - число

Стэнтона, $\beta := \frac{Nu}{\sigma \sqrt{Gr_h}}$, $Gr := \frac{gh^3}{\nu^2}$, A_w - площадь обогреваемой грани, A - площадь

проходного сечения канала; показано, что существует оптимальное значение обратного калибра канала $(L/h)_{opt} = 1/\lambda$;

3. По результатам физического моделирования можно сделать выводы:

- средняя скорость СКТ возрастает при увеличении L/h независимо от распределения тепловой нагрузки по горячей грани канала, независимо от количества рустов, независимо от условий входа и выхода из канала; средняя скорость СКТ в канале с рустами меньше, чем в равновеликом канале без рустов, за счет срыва вакуума;

- загромождение канала противопожарными рассечками уменьшает среднюю скорость СКТ по сравнению с незагроможденным каналом. Поэтому исчезает главный функционал НВФ – диффузионная сушка утеплителя. Можно поступать следующим образом: в конструкции фасадов предусмотреть терморпары (датчики температуры), которые будут регистрировать увеличение температуры выше определенного предела. При пожаре сигнал от датчика температуры передается на пульт управления системы рассечек и происходит их опускание поперек всего воздушного зазора и СКТ прекращается, прекращая доступ кислорода к зоне возгорания;

4. Результаты численного моделирования распределений скорости и температуры в вертикальных воздушных каналах в условиях СКТ, в целом, соответствуют прогнозам главы 1. Именно, в «узких» каналах ($h=40$ мм) распределение скорости и температуры по ширине канала «более однородное», чем в каналах большей ширины на таком же удалении от входа; равномерного движения ни в каком из каналов, ни в узком, ни в широком, не наблюдается, см. изолинии скорости на цветном рисунке. Выделяются 2 области неравномерного движения – вход в канал и сечения с абсциссой, близкой к $z=L$. Температурные распределения отличает нелинейность по ширине канала.

5. Русты играют роль локальных источников или стоков, создающих области резкоизменяющегося течения в окрестности разреза руста, уменьшая, тем самым коэффициент скорости ϕ и тягу канала.

Список условных обозначений

Латинские буквы:

p – давление (термодинамическое, гидродинамическое, гидростатическое);

t – время;

y, z – декартовы координаты, соответственно, поперечная и продольная

T – температура;

\dot{m} – массовая скорость (параметр Фанно); $\dot{m} := \rho v$;

v – средняя скорость;

Q – объемный расход;

A – поверхность (сечения потока) и ее площадь;

V – объем и его величина;

$d^m x$ – элементы площади ($m=2$) и объема ($m=3$);

f – безразмерная функция тока;

f' – безразмерная скорость;

f'' – безразмерное трение;

C_f – безразмерный коэффициент;

h, L – размеры вертикального канала, соответственно ширина и длина (высота);

n, k – показатели политропы и изоэнтропы (адиабаты);

$Q_A(s)$ – поток гидромеханической переменной;

S , имеющей поверхностную плотность распределения s через поверхность A :

$$S := \int_A s d^2 x; Q_A(s) := \int_A s u_n d^2 x;$$

\mathbf{u} – вектор скорости;

u_n – нормальная компонента вектора скорости, $u_n = (\mathbf{u}, \mathbf{n})$;

\mathbf{n} – единичный вектор (внешней) нормали;

a – коэффициент температуропроводности;

$$\alpha_m - \text{корректив } m\text{-й степени скорости, } \alpha_s = \frac{\int u^s dA}{v^s A}, \alpha_0 = \alpha_1 = 1;$$

ρ – плотность воздуха; β – коэффициент спутности и коэффициент массоотдачи; число Стэнтона;

$$\theta - \text{безразмерный температурный напор, } \theta := \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \in (0, 1);$$

$\zeta = y/\delta$ – безразмерная поперечная координата;

δ – толщина пограничного слоя подъемной силы;

σ – число Прандтля, $\sigma := \nu/a$;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

φ – коэффициент скорости;

ξ – коэффициент сопротивления (коэффициент потерь давления).

Ω – безразмерная концентрация водяного пара в воздухе;

N – число Нуссельта (Шервуда);

Gr – число Грасгофа;

Re – число Рейнольдса;

Fr – число Фруда.

Публикации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Петриченко М.Р., Субботина С.А., Хайрутдинова Ф.Ф., Рейх Е.В., Немова Д.В., Ольшевский В.Я., Сергеев В.В. Влияние рустов на воздушный режим в вентилируемом фасаде // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5(73). С. 40–48.
2. Н.И. Ватин, А.С. Горшков, А.Ю. Дадченко, П.П. Рымкевич, В.Я. Ольшевский. Воздухообмен, требуемый для нормализации температурно- влажностного режима холодных чердаков // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017, № 2 (53). С. 50–60
3. Стаценко Е.А., Мусорина Т.А., Островая А.Ф., Ольшевский В.Я., Антуськов А.Л. Влагоперенос в вентилируемом канале с нагревательным элементом // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 2 (70). С. 11–17.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS:

1. Vyacheslav, Olshevskiy, Elena Statsenko, Tatiana Musorina, Darya Nemova, Anastasia Ostrovaia. Moisture Transfer in Ventilated Facade Structures (2016). International Scientific Conference Week of Science in SPbPU – Civil Engineering (SPbWOSCE-2015)
2. Petrichenko M., Nemova D., Reich E., Khayrutdinova F., Olshevskiy V., Schilling R., Subbotina S. Impact of rustication joints on lightweight insulation in ventilated facade systems XV International conference “Topical problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology – 2016”.
3. Barabash A., Naumova E., Zhuvak O., Nemova D., Olshevskiy V. The efficiency of the ventilated gap of the double-skin facade systems using fire crosscuts (2016) XV International conference “Topical problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology – 2016”.
4. Musorina T., Olshevskiy V., Ostrovaia A., Statsenko E. Experimental assessment of moisture transfer in the vertical ventilated channel (2016). XV International conference “Topical problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology – 2016”.

Публикации в прочих изданиях:

1. Немова Д.В., Ольшевский В.Я., Цейтин Д.Н. Гидростатика термогравитационной конвекции в вертикальном канале // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013, №4(183). С. 295-301
2. Petrichenko, M., Vatin, N., Nemova, D., Olshevskiy, V. The Results of Experimental Determination of Air Output and Velocity of Flow in Double Skin Facades (2015). Applied Mechanics and Materials, 725-726, pp. 93-99