



Аттестат аккредитации
№ RA.RU.21CT39
Зарегистрирован в реестре аккредитованных
лиц 20.05 2015 г.

190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская, д.4,
тел. (812)316 -1222, 9441013
e-mail: tdatsuk@mail.ru

**Испытательный центр СПбГАСУ
Центр физико-технических испытаний строительных конструкций**

Техническое Заключение

ПО ОТЧЕТУ

ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЗОНЕ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
УСТАНОВКЕ ПОДОКОННОГО КЛАПАНА**

**шумозащитного заполнения оконных проемов зданий при строительстве Объекта:
«Подключение Западного скоростного диаметра (севернее развязки с
Благодатной улицы) к Широтной магистрали скоростного движения с устройством
транспортной развязки с Витебским проспектом».**

Санкт-Петербург
2023 год

ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения работ по изготовлению, доставке и монтажу шумозащитного заполнения оконных проемов зданий с установкой ПШУ при строительстве Объекта: «Подключение Западного скоростного диаметра (севернее развязки с Благодатной улицы) к Широтной магистрали скоростного движения с устройством транспортной развязки с Витебским проспектом» были проведены теплотехнические расчеты на предмет возможности промерзания подоконного клапана типа Nordvind City при установке в стандартном варианте и с учетом утепления зоны примыкания клапана.

Методология численного моделирования изложена в приложении А. Правила для чтения полей распределения температур приведены в приложении Б.

Допущения, принимаемые для расчетов, позволяют произвести оценку конструкций с достаточной степенью объективности с учетом дополнительных факторов, таких как относительная влажность и скорость воздуха .

Так как целью моделирования является не определение интегральных характеристик, а получение минимальных значений температуры на поверхности конструкции для оценки наихудшей ситуации, в качестве граничных условий при моделировании вместо стандартных значений коэффициентов внутреннего и внешнего теплообмена, применение которых является некорректным и может привести к существенному искажению получаемых минимальных значений температуры на поверхности, в расчет введены корректирующие параметры. Корректировка сводится к учету изменения направления и величины скорости движения воздуха при обтекании конструкции вблизи места расположения светопрозрачного заполнения с подоконным клапаном и нагревательного прибора.

При этом значения точки росы, физических свойств применяемых материалов, термическое сопротивление конструкции (с учетом трехмерности узлов соединения), принимаются в соответствии с нормативными требованиями.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведено численное моделирование процесса теплопередачи в холодный период года (температура наружного воздуха минус 24° С) через ограждающую конструкцию (сопротивление теплопередаче $R=3\text{ м}^2 \text{ К/Вт}$). В процессе расчета

получено распределение температуры на поверхностях и в объемном пространстве наружной стены в месте расположения подоконного клапана.

Расчет выполнен в программе StarCCM+.

Целью расчёта является:

- определение соответствия представленных схем монтажа конструкций нормативам по температурным и влажностным параметрам, принятым в проекте.

1. Описание математической модели

Математическая модель состоит из узла примыкания подоконного клапана, области наружного воздуха и области внутреннего помещения (рис.1). Численная модель повторяет условия климатической камеры для проведения теплотехнических испытаний.

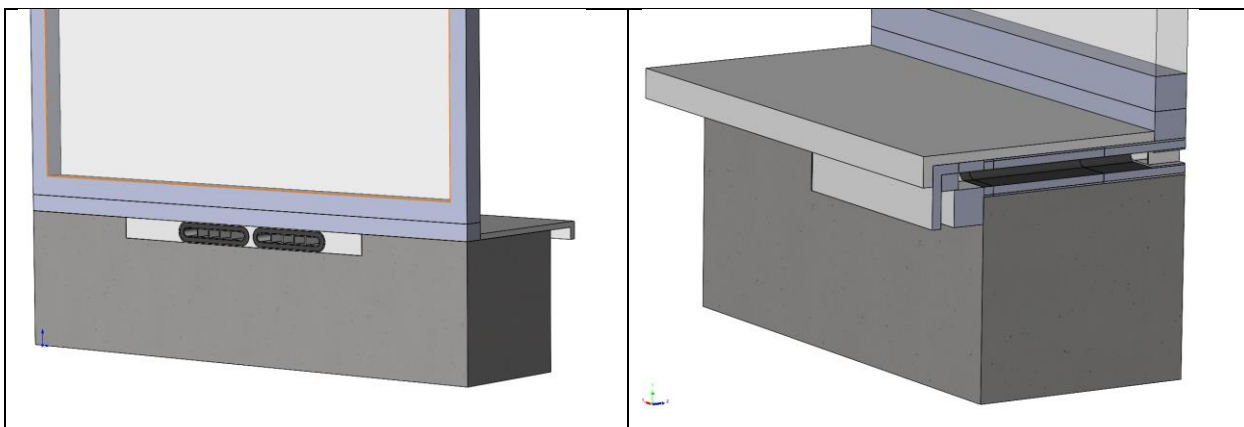


Рис. 1 Общий вид расчетного фрагмента

Трехмерная модель фасада построена согласно проектным данным (планам и разрезам) и учитывает все значимые элементы конструкции. В качестве допущения не учитываются резьбовые крепежные элементы, т.к. их влияние на формируемые температуры ничтожно мало.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

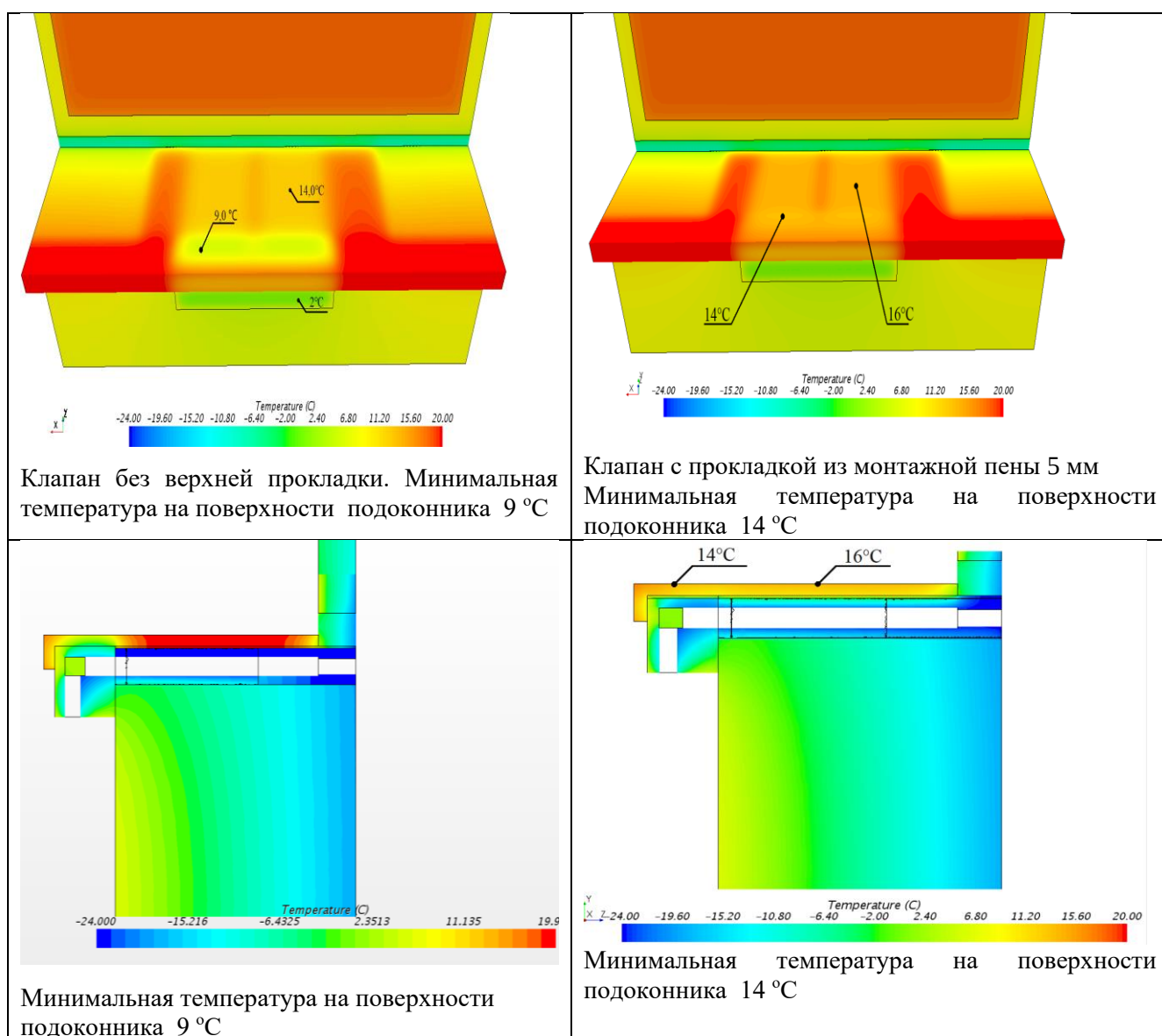


Рис. 2. Сравнение температурных полей при установке клапана с прокладкой из монтажной пены 5 мм и без прокладки

При установке клапана с верхней прокладкой из монтажной пены на поверхности подоконника конденсат не выпадает. Точка росы при принятой в проекте относительной влажности (55%) составляет 10,7°C (таб.1).

При средней температуре воздуха в помещении 20°C минимальное значение опускается до 9°C в районе смыкания потоков холодного и теплого воздуха. Все

остальные зоны не имеют вероятности образования конденсата. С учетом изменения №2 к СП 50.13330 температура на поверхности подоконника превышает 7,7 °С, которые являются критерием оценки.

Таблица 1. Значения точки росы.

Температура воздуха (°С)	Температура точки росы (°С) при относительной влажности (%)													
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
30	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1
29	9,7	12	14	15,9	17,5	19	20,4	21,7	23	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1
28	8,8	11,1	13,1	15	16,6	18,1	19,5	20,8	22	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1
27	8	10,2	12,2	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1
26	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	4,5	6,7	8,7	10,4	12	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22	3,6	5,9	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,1
21	2,8	5	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	1,9	4,1	6	7,7	9,3	10,7	12	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19	1	3,2	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	-0,6	1,4	3,3	5	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	-1,4	0,5	2,4	4,1	5,6	7	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	-2,2	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	-2,9	-1	0,6	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	-3,7	-1,9	-0,1	1,3	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	-4,5	-2,6	-1	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-5,2	-3,4	-1,8	-0,4	1	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-6	-4,2	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

** для промежуточных показателей, не указанных в таблице, определяется средняя величина.*

Учитывая тот факт, что в холодный период года относительная влажность в помещении, как правило, находится на достаточно низком уровне 30-35%, то для данного типа конструкций в соответствии с таблицей определения точки росы определяем, что при внутренней температуре +20°С и относительной влажности менее 35% **отсутствие конденсата гарантировано.**

Температура внутренней поверхности подоконной зоны с установленным клапаном будет определяться исходными данными, которые принимаются согласно СП 50.13330:

- сопротивлением теплопередаче конструкции (с учетом узлов соединения в 3D);
- значениями наружной и внутренней температуры воздуха;
- влажностью внутреннего воздуха.

На поверхности клапана без учета действия нагревательного прибора (радиатор) температура ниже точки росы, рис.3.

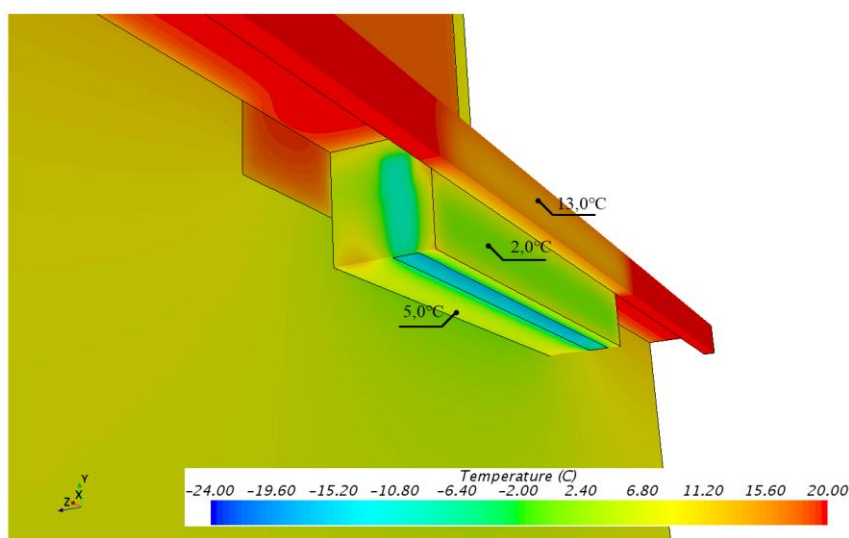


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности клапана

Температура на кромке подоконника выше точки росы (13°C). При наружной температуре минус 24°C , температура на поверхности клапана ниже точки росы, что может привести к выпадению конденсата.

Однако при установке нагревательных приборов за счет конвективного потока температура на поверхности клапана будет выше точки росы.

При этом необходимо выявить наиболее рациональный вариант взаимного расположения радиатора в подоконной нише. Для прогнозирования распределения температуры при установке радиатора вблизи наружной поверхности светопрозрачной конструкции проведена серия расчетов, направленная на получение температурных полей в помещении.

2. Результаты моделирования температурных полей в помещении

На рис. 4 приведены температурные поля в вертикальном и горизонтальном сечении при установке нагревательных приборов разного типа (радиатор и конвектор).

При установке радиатора температурное поле в помещении равномерное с незначительным градиентом температуры. Температура на поверхности клапана более 15°C , что препятствует образованию конденсата.

Следует также отметить, что при установке радиатора, вследствие того, что теплоотдача происходит в основном (более 95%) за счет радиационной составляющей теплообмена, температура поверхности пола у наружной стены выше, чем при установке конвектора. Что также можно рассматривать как положительный результат.

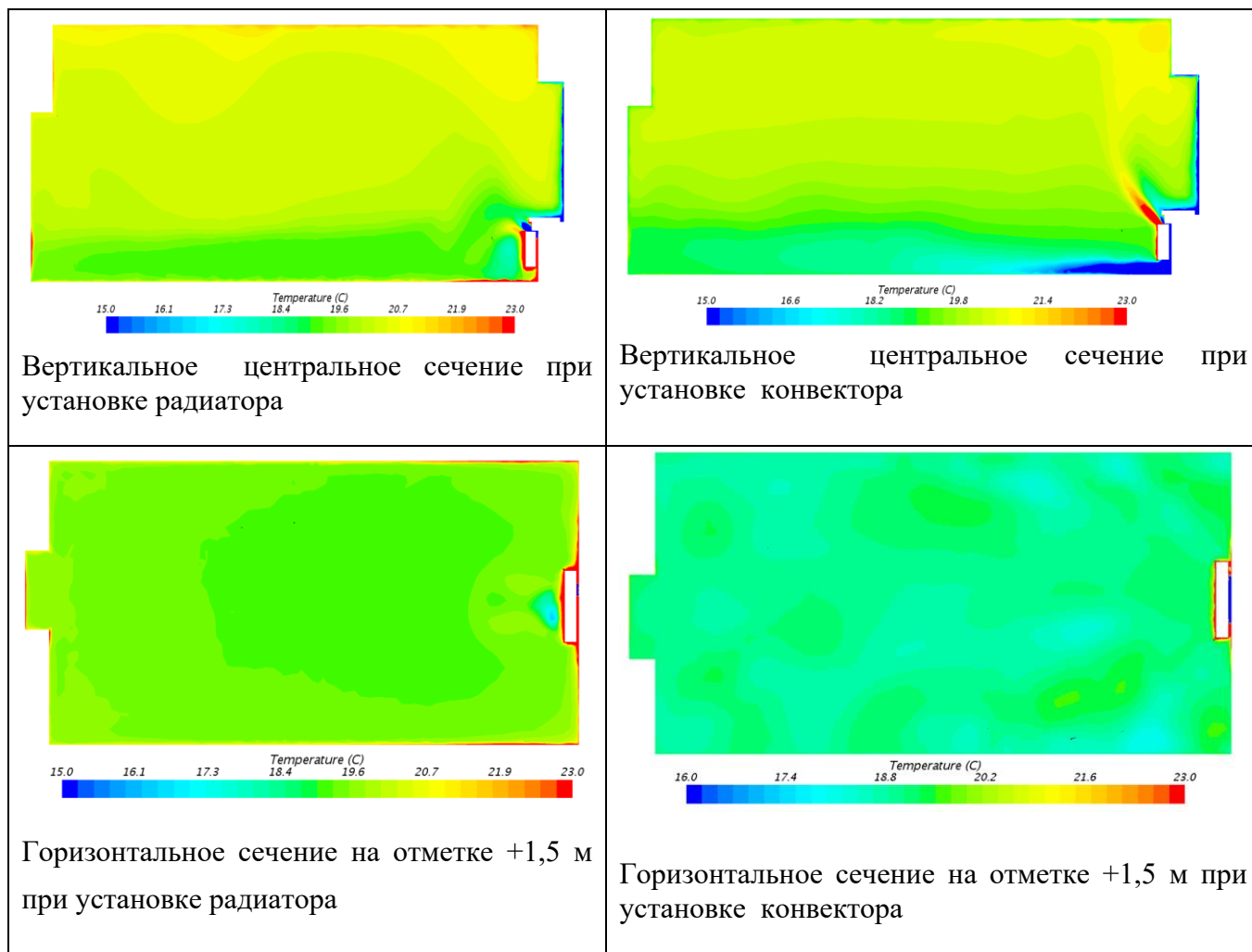


Рис. 4 Температурные поля в вертикальном и горизонтальном сечении при установке нагревательных приборов разного типа (радиатор и конвектор).

Поля скорости воздуха в помещении, полученные при расчете, приведены на рис. 5. Анализ полей скорости показал, что при установке радиатора вблизи нагревательного прибора имеет место незначительное возмущение потока. Подвижность воздуха в 1.5 раза выше средней по помещению.

Более сильная конвективная струя от конвектора вносит большее возмущение, увеличивая подвижность воздуха не только в зоне расположения прибора, но и вертикальной плоскости. По сравнению с действием конвектора при работе

радиатора распределение скорости в нижней части помещения (ниже 1.5 м) более равномерное.

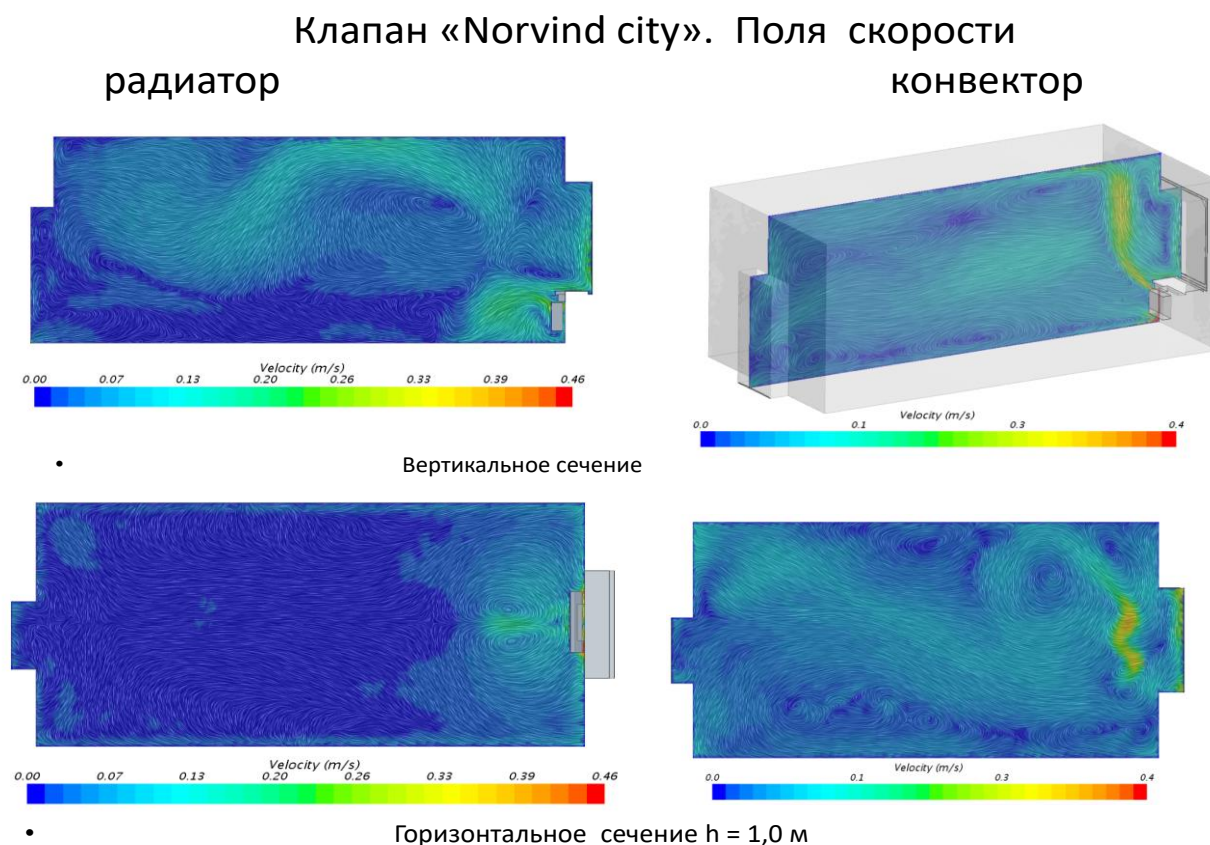


Рис. 5 Поля скорости воздуха в вертикальном и горизонтальном сечении при установке нагревательных приборов разного типа (радиатор и конвектор).

ВЫВОДЫ

Предлагаемые условия монтажа шумозащитного заполнения оконных проемов зданий с установкой ПШУ при строительстве Объекта: «Подключение Западного скоростного диаметра (севернее развязки с Благодатной улицы) к Широтной магистрали скоростного движения с устройством транспортной развязки с Витебским проспектом» типовые варианты подоконного клапана типа Nordvind City были исследованы на вероятность получения минимальных значений температуры на поверхности подоконника с учетом особенности установки и действия нагревательного прибора.

По результатам моделирования выявлено, что на всех конструктивных элементах результирующее значение температуры выше точки росы при работе нагревательных приборов.

Выполненные расчеты показали, что предложенный способ установки клапана типа «Nordvind City» соответствует требованиям нормативных документов СП 50.13330.

Список литературы:

1. Самарский А. А.; Гулин А. В. Численные методы. -М.: Наука, 1989.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840с.
4. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости / Л. Гидрометеиздат, 1986. с. 330.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. тт. I, II. -М.: Мир, 1991.
6. Денисихина, Д. М. Конвективно-радиационный теплообмен человека в задачах математического моделирования распределенных параметров микроклимата в помещениях // Вестник гражданских инженеров. 2014. №38(57), С. 143-150.
7. Гримитлин А.М., Дацюк Т.А., Денисихина Д..М. Математическое моделирование вентиляционных процессов (монография). – СПб.: «АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД».2013. – 192 с. ISBN. 972-5-902146

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«Методология численного моделирования»

В качестве инструмента исследования выбрано математическое моделирование в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS) в программе StarCCM+.

В рамках математического моделирования проводятся следующие этапы:

1. Построение трехмерной модели помещения Объекта и его ограждающих конструкций
2. Построение расчётной сетки
3. Создание математической модели функционирования объекта
4. Расчёт модели
5. Анализ результатов моделирования.

Моделирование турбулентного течения проводилось в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS):

Данный подход моделирования турбулентности является в настоящее время наиболее широко используемым при решении практических задач.

Уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

уравнение сохранение импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} + \bar{\bar{\tau}}_t) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

тензор вязких напряжений, определен с помощью реологического закона Ньютона

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu (\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \bar{\bar{I}} \quad (3)$$

а тензор турбулентных напряжений – в соответствии с обобщенной гипотезой Буссинеска

$$\bar{\bar{\tau}}_t = \mu_t (\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{\bar{I}} - \frac{2}{3} \rho k \bar{\bar{I}} \quad (4)$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} [\rho E + p]) = \nabla \cdot (\vec{V} \cdot [\bar{\bar{\tau}} + \bar{\bar{\tau}}_t]) - \nabla \cdot (\bar{q} + \bar{q}_t) \quad (5)$$

где ρ — плотность воздуха; $\vec{V}$ — скорость потока; T — температура воздуха; λ — теплопроводность воздуха; C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; t — время.

Для нахождения характеристик турбулентности необходимо использование той или иной модели турбулентности, например k-ε:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

генерационный член в уравнениях переноса (6) и (7)

$$P = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) \cdot \nabla \vec{V},$$

P_B – дополнительный генерационный член, учитывающий влияние сил плавучести на характеристики турбулентности

$$P_B = -\frac{1}{Sc_t} \frac{1}{\rho} \vec{g} \cdot \nabla \rho,$$

где k — кинетическая энергия турбулентности; ε — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ — полуэмпирические коэффициенты модели турбулентности.

Система уравнений (1)-(7) дополняется уравнениями радиационного теплообмена.

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, $\vec{s}$ – вектор направления излучения, $\vec{s}'$ – вектор рассеяния, a – коэффициент поглощения, σ_s – коэффициент рассеяния, I – полная интенсивность излучения, зависящая от радиус-вектора и направления излучения, Φ – фазовая функция, определяющая диаграмму рассеяния, Ω' – телесный угол, σ – постоянная Стефана -Больцмана

$$5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Аппроксимация конвективных членов осуществляется с помощью противопоточной схемы второго порядка точности. Для аппроксимации вязких членов используется стандартная симметричная схема второго порядка точности.

Поля скорости и давления рассчитывались с помощью процедуры PISO в сочетании с многосеточным алгоритмом AMG.

Смысл численного решения дифференциального уравнения состоит в том, чтобы получить значения искомой переменной в рассматриваемом пространстве. В численном методе рассматриваются значения переменных в конечном числе точек расчетной области. Метод дискретизации сводится к получению системы алгебраических уравнений, которые являются дискретными аналогами исходных дифференциальных уравнений. При этом предполагается, что при достаточно мелкой сетке, решение дискретных уравнений является хорошим приближением к точному решению исходных дифференциальных уравнений. Дискретизация дифференциальных уравнений может быть выполнена разными методами, при этом используемая схема должна быть устойчивой и сходящейся.

В общем случае процедура решения задачи сводится к следующим этапам:

1. Выполняется дискретизация дифференциальных уравнений, т.е. переход к алгебраическим уравнениям относительно искомых переменных (скорости, давления, температуры и т.п.) в конечном числе точек в пределах расчетной области.
2. Производится решение алгебраических уравнений.

В настоящее время наиболее распространены следующие методы решения уравнений Рейнольдса:

- конечных разностей;
- контрольного объема;
- конечных элементов.

В последнее время приоритет отдается методу контрольного объема.

Метод контрольного объема

Преимущества этого метода заключается в том, что в его основе лежат законы сохранения. Поэтому, в отличие от метода конечных разностей, метод контрольного

объема обеспечивает консервативность численной схемы, что позволяет даже на относительно грубых сетках получать приемлемые по точности решения.

При дискретизации уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу, расчетная область разбивается на большое количество непересекающихся элементарных объемов, таким образом, чтобы каждый объем содержал только одну расчетную (узловую) точку. Совокупность элементарных объемов называется расчетной сеткой. Ячейки сетки могут иметь различную форму. Наиболее часто используются шестигранники (гексаэдры) и четырехгранники (тетраэдры). Метод контрольного объема позволяет использовать ячейки с произвольным числом граней (пирамиды, призмы, сложные многогранники и т.п.).

Решение системы основных уравнений представляется в виде набора значений искомых параметров в центрах этих объемов. Например, если разбить объем помещения на 1000 отдельных элементарных объемов (ячеек), то в результате решения мы будем иметь 1000 значений температуры, скорости, давления и т. д.

Интегрирование дифференциальных уравнений производится по каждому элементарному объему. Интегралы вычисляются с использованием интерполяционных формул, при помощи которых определяют значения искомых переменных между расчетными точками. В результате получают дискретный аналог исходных уравнений в узловых точках, который отражает закон сохранения изучаемых переменных в каждом конечном объеме.

Следует отметить, что в большинстве современных расчетных гидродинамических пакетах таких как «STAR-CCM+», «FLUENT», «CFX», «OpenFoam» и многих других для дискретизации уравнений модели реализован метод контрольного объема.

Расчетные сетки

Процесс построения сетки относится к ключевым моментам проведения численного эксперимента. Выбор и построение адекватной для рассматриваемой задачи расчетной сетки является достаточно сложной и трудоемкой процедурой. Рациональный выбор сетки может значительно упростить численное решение. Сетки, которые используются при проведении расчетов можно разделить на следующие типы:

- регулярные;
- неструктурированные;
- гибридные.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

«Разъяснения к полям распределения температур»

Для чтения полей распределения температур применены следующие правила:

1. Шкала под картинкой каждый раз выбирается исходя из того, какой элемент модели необходимо рассмотреть подробно. Однако крайние цифры на этой шкале не говорят о том, что значений больше или меньше этих чисел в модели нет.
2. Изменяя диапазон температур на шкале, мы можем регулировать разрешение нужной для анализа области модели. Так как в данном случае для расчета важно понимание распределения температур внутри модели, то был выбран диапазон $[-20;20]$ °С.
3. Внесение корректировки диапазона на шкале, не изменяет результат, полученное решение идентично для задаваемых диапазонов.

Директор сектора ФТИСК ИЦ СПбГАСУ

