

# РАСЧЁТ АЭРОДИНАМИКИ ЗДАНИЯ С ОТКРЫТЫМ ПОДПОЛЬЕМ И ОЦЕНКА ЕГО ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГРУНТА

**Рожкова К.В., Грибовский Г.В.**

ООО «НТЦ «Симмэйкерс», Москва, Россия; [info@simmakers.ru](mailto:info@simmakers.ru)

В работе рассмотрено компьютерное моделирование в ANSYS CFX аэродинамики здания с открытым подпольем в двумерной постановке задачи, а также представлена оценка теплового влияния сооружения на окружающую среду, в частности, на температуру грунта в подполье. В работе представлены результаты двумерных полей скорости ветра и средней температуры грунта в подполье. Также представлен расчёт температуры воздуха в подполье согласно СП 25.13330.2020, приложению Д, и сопоставление расчёта с данными, полученными по результату компьютерного моделирования.

## AERODYNAMICS SIMULATIONS OF BUILDING WITH AN OPEN CRAWL SPACE AND ASSESSMENT OF ITS THERMAL IMPACT ON THE GROUND SURFACE

**Rozhkova K.V., Gribovskii G.V.**

LLC STC Simmakers, Moscow, Russia; [info@simmakers.ru](mailto:info@simmakers.ru)

The study considers ANSYS CFX computer simulation of the building aerodynamics with an open crawl space in a two-dimensional problem formulation, and also presents an assessment of the thermal effect of the building on the environment, in particular, on the temperature of the ground surface. The study presents the results of two-dimensional fields of wind speed and average ground temperature in the open crawl space. Also, the calculation of the air temperature in the underground according to SP 25.13330.2020 (Appendix D) and a comparison of the calculation with the data obtained from the result of the computer simulation are presented.

**Введение.** При проектировании зданий и сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) одним из популярных проектных решений является обустройство зданий на сваях с открытым подпольем. Данный подход обеспечивает сохранение в мёрзлом состоянии основания сооружения при условии регулярной его очистки от снегового покрова при эксплуатации и теплоизоляции здания.

При проектировании зданий с открытым подпольем наиболее актуальной задачей является оценка теплового влияния сооружения на грунт и скорость ветра в подполье. Это особенно актуально для строений с большой площадью, где наблюдаются заметные повышения температуры в подполье и понижение скорости ветра [1,6]. Скорость ветра является важным параметром при оценке коэффициента теплообмена для поверхности грунта и конденсаторной части сезонно-охлаждающих устройств, а также других поверхностей для компьютерного моделирования теплового состояния мёрзлых грунтов в таких программных комплексах, как Frost 3D [3].

Сегодня в инженерной практике полагается, что температура воздуха и скорость ветра в подполье соответствуют значениям в естественных условиях. Простых инженерных методик, которые позволяют оценить скорость ветра в подполье и тепловое воздействие от сооружения практически нет. Температуру воздуха в открытом подполье можно оценить согласно СП 25.13330.2020 (далее СП 25), приложению Д [4], зная модуль вентилирования и положив за неизвестную температуру воздуха в подполье.

В данной работе рассматривается компьютерное моделирование аэродинамики здания с открытым подпольем в двухмерной постановке задачи с учётом радиационного теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX. По результату расчётов представлены данные по скорости ветра и температуре воздействия здания на грунт. Произведено сравнение температур, полученных вследствие компьютерного моделирования и расчета по СП 25.

**Постановка задачи.** ANSYS CFX – программный комплекс для моделирования процессов гидрогазодинамики, где численно решается уравнение Навье-Стокса методом конечных элементов. В ANSYS CFX рассматривалась задача двумерного обтекания

воздухом здания с открытым подпольем, где моделировались процессы конвективного и радиационного теплообмена с моделью турбулентности k-ε (интенсивность 5 %). Нестационарный аэродинамический расчёт производился до установления квазистационарного равновесия в модели.

Размеры расчетной области составили 70x35x0,1 м. Высота и ширина здания приняты равными  $h = 7$  м и  $l = 10$  м соответственно. Конечно-элементная сетка представлена на рис. 1 и состоит примерно из 450 тыс. узлов. Воздействие здания на окружающую среду учитывалось при помощи граничных условий. В общем, на границах модели были заданы следующие граничные условия (рис. 2):

- Поверхность грунта задана как адиабатическая стенка, а степень черноты поверхности была принята как для песка  $\epsilon_g = 0,76$  [4].
- На поверхности здания задан теплообмен по Ньютону с учётом теплообмена по Стефану-Больцману (ГУ 4-го рода), где была задана температура здания  $T_b = 22$  °С, коэффициент теплообмена  $\alpha = 1$  Вт/м<sup>2</sup> К и чернота поверхности для бетона  $\epsilon_b = 0,8$  [5].
- На левой грани задано условие входящего потока воздуха (Inlet), где задаётся скорость ветра  $v$ , температура воздуха  $T_{air}$ , °С и избыточное давление, равное 0 Па.
- На правой и верхней грани модели задано граничное условие на выходе (Outlet).
- В случае естественной конвекции ( $v = 0$  м/с) на верхней и боковых гранях было задано условие с открытой границей (Opening).

При расчётах варьировались следующие параметры:

- высота подполья  $s = 1,2$  м, 1,6 м, 2 м;
- скорость ветра  $v = 0$  м/с (естественная конвекция), 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с.
- температура воздуха  $T_{air} = -20$  °С,  $-10$  °С,  $0$  °С.

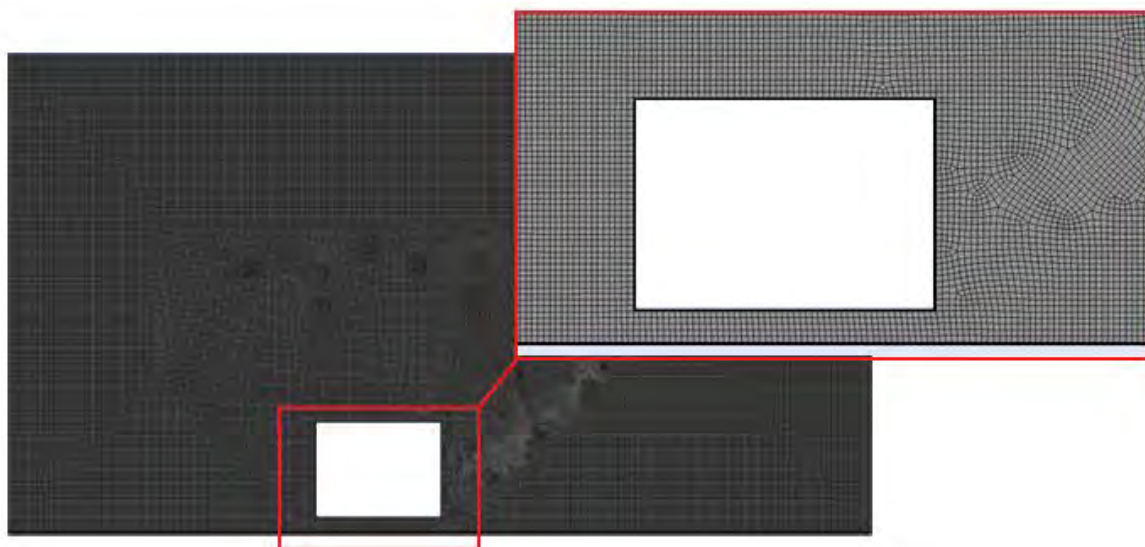


Рис. 1. Конечно-элементная сетка

Расчёт температуры подполья согласно СП 25, приложению Д, был произведён с помощью Калькулятора условий теплообмена Frost 3D. Пример расчёта в калькуляторе представлен на рис. 3. Площадь здания была принята равной 600 м<sup>2</sup>, что соответствует зданию 10x60 м. Площадь продухов была рассчитана как произведение периметра сооружения  $p = 140$  м на высоту подполья  $s$ . Коэффициент потери напора принят равным 1, т.к. в постановке задачи отсутствуют сваи и другие элементы, влияющие на

скорость потока. Описанные допущения необходимы для получения результатов и последующего сравнения результатов расчёта температур в ANSYS CFX с расчётом по СП 25.

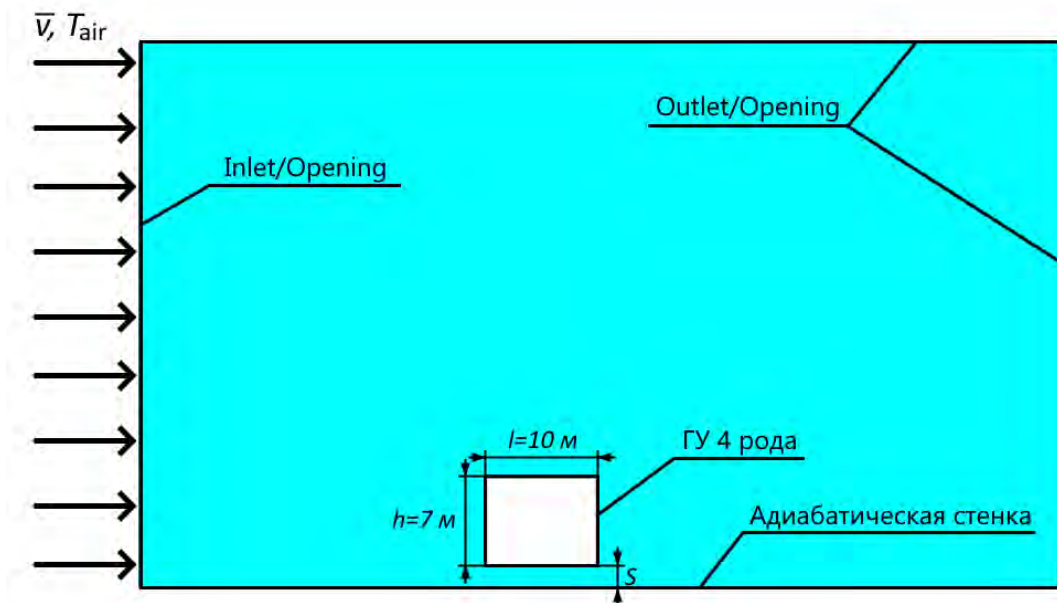


Рис. 2. Граничные условия

Расчет условий теплообмена	
Файл Справка	
<b>Результат</b>	
Температура в подполье	-19.809944909873 [°C]
<b>Входные параметры</b>	
Расчет температурного режима вентилируемого подполья	
Скорость ветра	3 [м/с]
Температура наружного воздуха	-20 [°C]
Температура воздуха в помещении	22 [°C]
Площадь сооружения	600 [м²]
<b>Вентилирование</b>	
Расчитать модуль вентилирования	
Площадь продухов	168 [м²]
Соотношение расстояния между зданиями (L) и высоты зданий (H)	L >= 5H
Аэродинамический коэффициент	Сооружение прямоугольной формы
Коэффициент потери напора	1
Объемная теплоемкость воздуха	1300 [Дж/м³·К]
Тепловое сопротивление перекрытий	1 [м²·К/Вт]
<input type="checkbox"/> Учет наличия цоколя	
<input type="checkbox"/> Учет наличия коммуникаций	

Рис. 3. Калькулятор условий теплообмена Frost 3D

**Результаты расчётов.** По результату компьютерного моделирования в ANSYS CFX было произведено 36 расчётов в зависимости от высоты подполья  $s$ , скорости ветра  $v$  и температуры воздуха  $T_{\text{air}}$ . Были получены следующие результаты:

- двумерные распределения полей температур и скорости ветра;
- усреднённые температуры по нижней грани грунта в подполье  $T_{\text{ср}}$ , °С;
- максимальная скорость ветра в подполье  $v_{\text{max}}$ , м/с;
- расчёты температуры в подполье согласно приложению Д СП 25,  $T_k$ , °С.

На рис. 4 представлен пример векторного поля скоростей воздуха для здания с высотой подполья 1,2 м и скорости ветра 3 м/с. Для всех конфигураций высоты подполья и скорости ветра хорошо виден характер обтекания здания потоком воздуха, где над зданием и в подполье наблюдается увеличение скорости воздуха. В случае подполья это может способствовать переносу тепла на поверхность грунта за пределами сооружения. Также перед зданием наблюдается характерное торможение потока и аэродинамическая тень за ним. Ввиду этого при проектировании систем термостабилизации основания сооружений необходимо учитывать розу ветров, характерную для рассматриваемой местности.

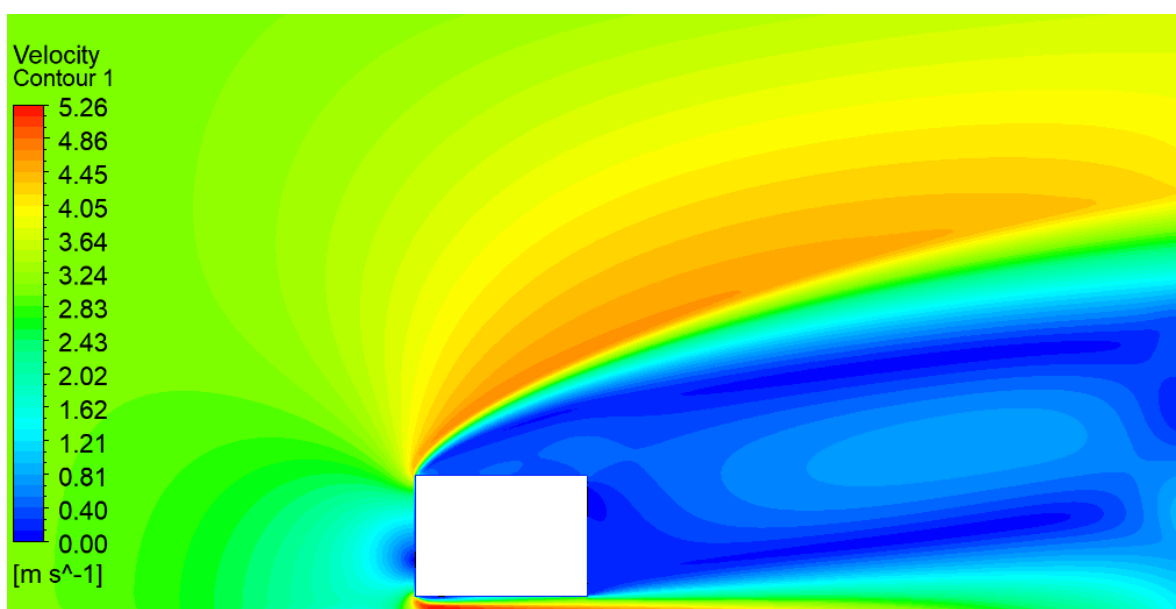


Рис. 4. Общий вид на всю модель с полем скоростей потоков воздуха при  $s = 1,2$  м и  $v = 3$  м/с

На рис. 5 представлено поле скоростей для сооружений с различной высотой проветриваемого подполья, при температуре окружающего воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра 3 м/с. Из этого рисунка можно оценить, как меняется характер обтекания здания в зависимости от высоты его подполья. На рис. 6 из графиков видно, что скорость ветра в подполье в среднем в 1,5 раза выше, чем в начальных условиях, что значительно уменьшает тепловое воздействие здания на грунт. Также за счет варьирования высоты подполья происходит перераспределение потоков воздуха, при котором одна часть потока обтекает здание сверху, а другая – через подполье. При высоте подполья 1,6 м наблюдается снижение на 8% и 15% максимальной скорости потока по сравнению с максимальной скоростью в подполье с высотой 1,2 м и 2 м соответственно.

В таблице ниже представлены значения средней температуры поверхности грунта под зданием, полученные в ANSYS CFX и с помощью калькулятора теплофизических свойств Frost 3D согласно СП 25, а также приведена их абсолютная разность. Расчёт  $T_k$  для случая естественной конвекции ( $v=0$ ) не приведён, т.к. методика СП 25 не

предназначена для такого случая. В случае естественной конвекции ( $v = 0$ ) температура воздуха в подполье значительно выше (до  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с  $v > 0$ .

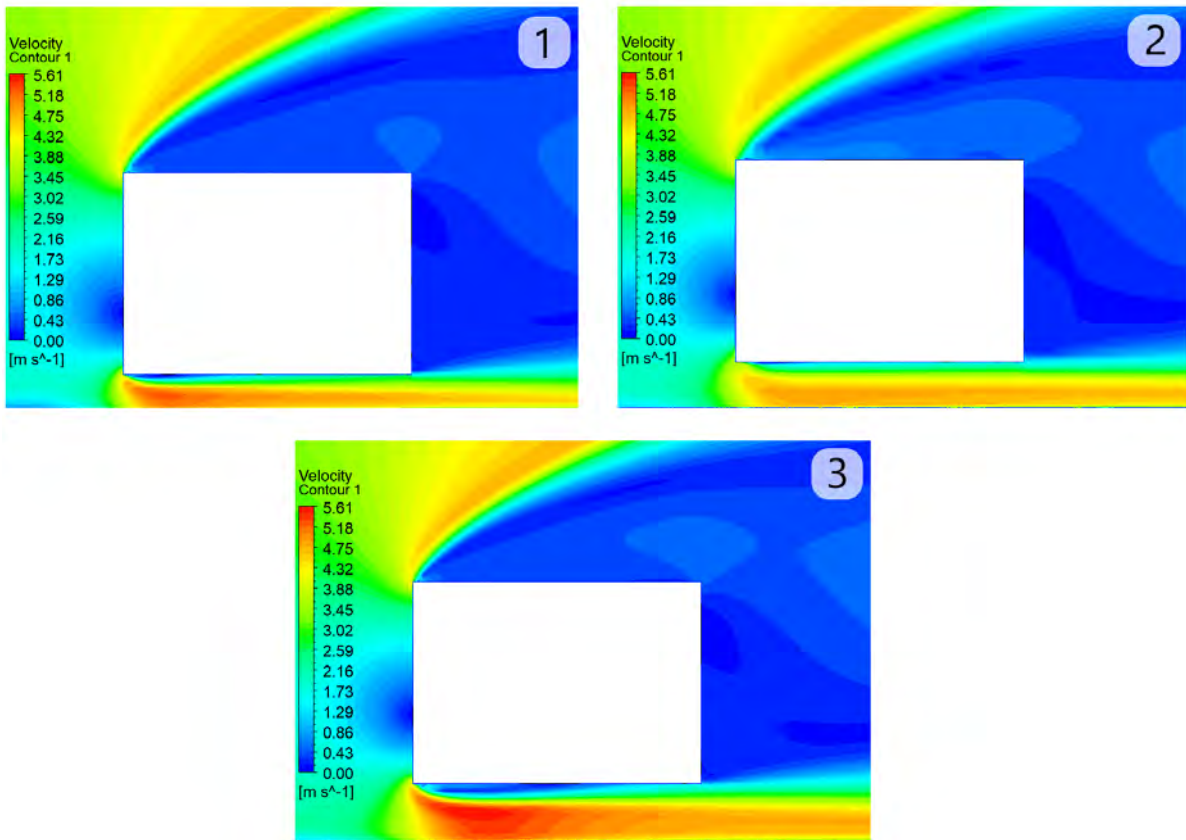


Рис. 5. Поле скоростей потоков воздуха при скорости ветра  $v = 3\text{ м/с}$  и высоте подполья  $s$ : 1) 1,2 м, 2) 1,6 м, 3) 2 м.

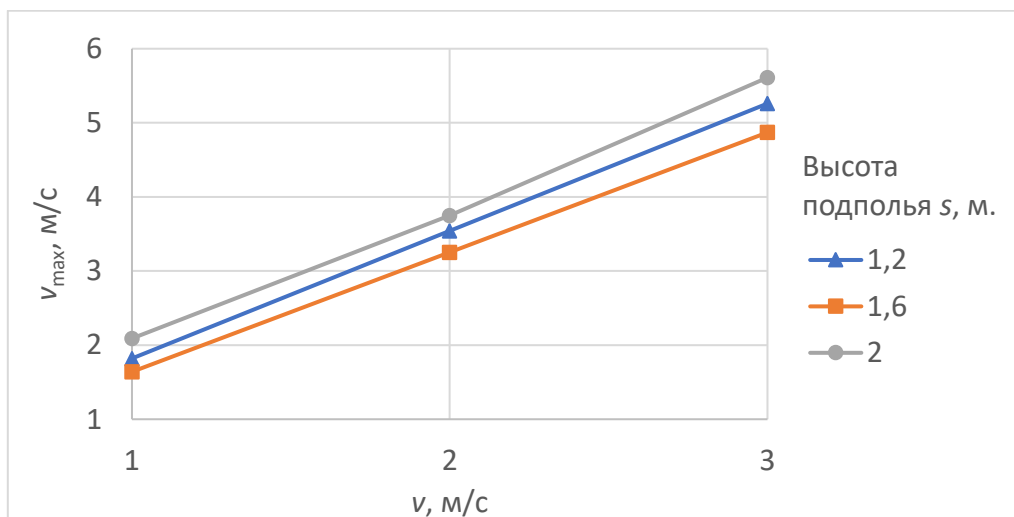


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости потока в подполье  $v_{max}$  от скорости ветра  $v$  и его высоты  $s$

Показатели температуры в подполье, полученные численным методом и с помощью калькулятора, достаточно близки к друг другу и при увеличении скорости ветра также уменьшаются до температуры воздуха. Расчёт согласно СП 25 даёт заниженные температуры от нескольких сотых до нескольких десятых градуса в

зависимости от высоты подполья и скорости ветра. Тем не менее, при увеличении скорости ветра данная разница уменьшается, а наименьшая разница между  $T_{air}$  и  $T_{cp}$  наблюдается для  $s = 1.6$ . При численном моделировании для  $s = 1.6$  м температуры  $T_{cp}$  оказались ниже, чем при  $s = 2$  и  $1,2$  м, что может объясняться наиболее неблагоприятной конфигурацией подполья.

Таблица. Температура воздуха в подполье, рассчитанная в ANSYS CFX  $T_{cp}$  и по СП 25  $T_k$  в зависимости от скорости ветра  $v$ , температуры воздуха  $T_{air}$  и высоты подполья  $s$

	Высота подполья 1,2 м			Высота подполья 1,6 м			Высота подполья 2 м		
$T_{air} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$									
$v, \text{ м/с}$	$T_{cp}$	$T_k$	$T_{cp} - T_k$	$T_{cp}$	$T_k$	$T_{cp} - T_k$	$T_{cp}$	$T_k$	$T_{cp} - T_k$
0	-18,137	-	-	-19,348	-	-	-18,390	-	-
1	-19,361	-19,730	0,369	-19,772	-19,800	0,028	-19,370	-19,840	0,470
2	-19,641	-19,860	0,219	-19,878	-19,900	0,022	-19,630	-19,910	0,280
3	-19,810	-19,910	0,100	-19,918	-19,930	0,012	-19,730	-19,940	0,210
$T_{air} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$									
0	-8,612	-	-	-9,500	-	-	-8,819	-	-
1	-9,502	-9,800	0,298	-9,830	-9,850	0,020	-9,558	-9,870	0,312
2	-9,702	-9,900	0,198	-9,906	-9,920	0,014	-9,720	-9,940	0,220
3	-9,811	-9,930	0,119	-9,945	-9,950	0,005	-9,800	-9,960	0,160
$T_{air} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$									
0	0,914	-	-	0,314	-	-	0,780	-	-
1	0,340	0,140	0,200	0,114	0,100	0,014	0,310	0,084	0,226
2	0,198	0,070	0,128	0,064	0,050	0,014	0,195	0,042	0,153
3	0,025	0,047	0,022	0,038	0,030	0,008	0,032	0,028	0,004

**Выводы.** В рамках данной работы в ANSYS CFX было произведено компьютерное моделирование аэродинамики здания с открытым подпольем в двумерной постановке при различных высотах подполья  $s$ , температуры воздуха  $T_{air}$  и скорости ветра  $v$ . Размеры здания составляли 10 м в ширину и 7 м в высоту. Температура ветра, полученная по результатам компьютерного моделирования, была сравнена с температурами, полученными согласно СП 25, приложению Д.

По результатам расчёта видно, что за зданием образуется ветровая тень [2] со значительно заниженными скоростями потока. Это говорит о том, что при проектировании систем термостабилизации грунта необходимо учитывать розу ветров для наиболее оптимального размещения конденсаторных блоков сезонно-охлаждающих устройств и обеспечения высокой эффективности их работы.

В открытом подполье для здания с рассматриваемыми габаритами максимальная скорость ветра  $v_{max}$  **выше в  $\approx 1,5$  раза по сравнению с начальной скоростью потока  $v$** , что способствует более эффективному охлаждению поверхности грунта. Зависимость  $v_{max}$  от высоты подполья  $s$  оказалась нелинейной, где максимум наблюдался при высоте подполья  $s = 2$  м, а минимум при  $s = 1,6$  м. Необходимы дополнительные исследования для выявления более подробной зависимости  $v_{max}$  от  $s$ , а также при других габаритах сооружения, в т.ч. с учётом свай в трёхмерной постановке.

Максимальная температура поверхности грунта наблюдалась при естественной конвекции ( $v = 0$ ) и была выше температуры воздуха более чем на  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $s = 1,2$  м. При увеличении скорости ветра, ожидаемо, тепловое влияние здания значительно уменьшается. Сравнение температур, полученных в результате компьютерного



моделирования и расчета по СП 25.13330.2020, приложению Д, показало хорошую корреляцию друг с другом. Разность между результатами уменьшалась при увеличении скорости ветра. Расчёт по своду правил всегда показывал температуры ниже, оптимистичнее, чем результаты расчёта в ANSYS CFX.

Стоит отметить, что двумерная постановка не учитывает в полной мере взаимодействия потока воздуха со зданием. Вследствие симметричных граничных условий здание представляется бесконечным, что существенно влияет на характер его обтекания. Тем не менее, полученные результаты позволили настроить и откалибровать компьютерную модель в ANSYS CFX, а также дали первичное представление о поведении потока воздуха в открытом подполье и его тепловом влиянии на окружающую среду. Так же численное моделирование позволяет определить смещение теплового поля из-за ветрового воздействия и оценить картину обтекания здания в целом, что не позволяет сделать методика СП 25.13330.2020. Необходимы дальнейшие исследования поведения потока воздуха и температуры в открытых подпольях, в частности, переход к трехмерной постановке задачи и явный учёт свай в расчёте.

#### Литература

1. Gaoa Q. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan Plateau [Text] / Q. Gaoa, Z. Wena, A. Brouchkovd, M. Zhange. //Cold Regions Science and Technology. –2020 –178.
2. Мягков, М. С. Архитектурная климатография: учебное пособие / М.С. Мягков, Л.И. Алексева. – Москва: ИНФРА-М, 2022. — 363 с.
3. Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов FROST 3D: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.frost3d.ru> (Дата обращения: 01.03.2022).
4. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва, 2020.
5. Таблица коэффициентов излучения (степени черноты)  $\epsilon$ , в зависимости от материала поверхности : [Электронный ресурс]. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/EmmisionCoefficients/EmmisionCoefficientsTable01/?>. (Дата обращения: 01.03.2022).
6. Федоровых Ю.Ю. Влияние строительных конструкций при расчете аэродинамического режима вентилируемого подполья технологических зданий и сооружений нефтегазовых месторождений [Текст] / Ю.Ю. Федоровых // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. ОАО «ТомскНИПИнефть», Томск, 24-25 сентября 2019, 4 с.