

уплотнительный жгут, а плиты утеплителя наружной теплоизоляции в области дисков перекрытий укладывать на сплошной клеевой слой;

– плиты утеплителя по контуру оконных проемов, укладывать на сплошной клеевой слой (в особенности контролировать места на краях плит, обращенных к оконным проемам);

– места примыкания оконных коробок к стенам заполнять пенным утеплителем на всю глубину оконной коробки без пропусков.

Кроме того, опыт применения самонесущих конструкций из штучных материалов совместно с системами наружной теплоизоляции показывает, имеет смысл предусматривать, хотя бы с внутренней стороны наружной стены, нанесение тонкого штукатурного слоя.

Вопрос повышенной воздухопроницаемости наружных стен зданий повышенной этажности следует рассматривать в совокупности с работой системы естественной вентиляции. Например, располагаемое давление для шестого этажа в 20-ти этажном здании будет составлять не менее 20 Па при расчетных условиях и без учета ветрового давления на поверхность фасадов здания. Для таких условий на нормативном уровне следует рассмотреть обязательные мероприятия и технологические схемы установки оконных заполнений и возведения стен из крупнопористых материалов, в особенности таких, как щелевые блоки из поризованной керамики и щелевые керамзитобетонные блоки.

### Литература

1. Сюльжина, А. Технология дала трещину / А. Сюльжина // Советская Белоруссия (№ 234) – 2014. – 9 дек. – С. 3.

2. Отчет о научно-технической работе «Теплотехнические исследования наружных ограждающих конструкций на объекте «Строительство 144-квартирного 20-этажного жилого дома в квартале ул. Аэродромная – ул. Левкова – у. Володько» с выдачей рекомендаций» / НИИЛ СТЭСЗ БНТУ. – Х. Д. № 5567/15 с. – Минск, 2016. – 46 с.

УДК 620.92; 620.97

### **Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплоотраса**

Бубырь Т. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Для решения задачи повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользова-*

ния. Для проведения исследований предложено создать и использовать виртуальную экспериментальную установку, разработанную на базе программного комплекса ANSYS. Рассматривается проведение эксперимента на базе шестифакторного ротatableльного плана второго порядка. Получены уравнения регрессии второго порядка для расчетов целевых функций. Для полученных уравнений регрессии установлены значимые коэффициенты, определена адекватность полученных уравнений регрессии.

Несмотря на современную тенденцию применения бесканальной прокладки теплопроводов, теплотрассы в непроходных каналах имеют достаточно большой удельный вес в существующих системах централизованного теплоснабжения Беларуси (около 50 %). Учитывая высокую стоимость изготовления и прокладки теплопроводов, их полная замена с применением инновационных технологий, в городах республики займет еще не одно десятилетие. Поэтому остаются актуальными разработка и исследование технологий повышения энергоэффективности эксплуатации теплопроводов в непроходных каналах [1].

Предлагается принудительная вентиляция канала наружным воздухом с последующим охлаждением воздуха и утилизацией отводимой теплоты. На рис. 1 показана принципиальная схема непроходного канала теплотрассы с указанием основных материальных и тепловых потоков при прокачке воздуха через канал.

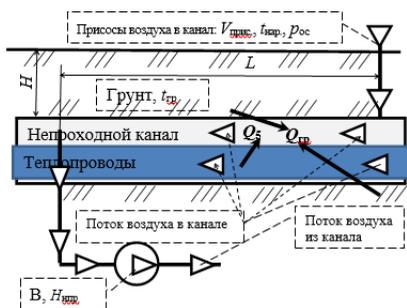


Рис. 1. Принципиальная схема тепловых потоков в продуваемом непроходном канале:

$H$  – заглубление канала, м;  $L$  – длина вентилируемого участка, м;  
 $V$  – вентилятор;  $Q_с$ ,  $Q_{гр}$  – соответственно поток рассеяния тепловой энергии трубопроводами сетевой воды и поток теплового взаимодействия со стенками канала, кДж/ч;  $V_{прис}$  – расход воздуха, прокачиваемого на участке  $L$  канала, м<sup>3</sup>/ч;  
 $t_{нар}$ ,  $t_{гр}$  – соответственно температуры поступающего воздуха в канал и стенок канала, °С;  $p_{ос}$  – давление окружающей среды, кПа;  $H_{впр}$  – напор, обеспечиваемый вентилятором, кПа

Исследование процессов аэродинамики и теплообмена в подобных объектах, имеющее своей целью получение приемлемой достоверности результатов, требует принципиально новых подходов, одним из которых является вычислительный эксперимент на основе применения методов конечных разностей, конечных элементов и граничных элементов [2]. В качестве одного из универсальных решений является применение программного комплекса ANSYS, наиболее удобной из CAE-систем, предназначенных для компьютерного моделирования и анализа различных физических процессов, в рамках которого удобно построить виртуальную экспериментальную установку.

Была построена 3D-модель различных конфигураций каналов, проведена дискретизация областей на конечные элементы, на рис. 2 показан общий вид расчетной сетки.

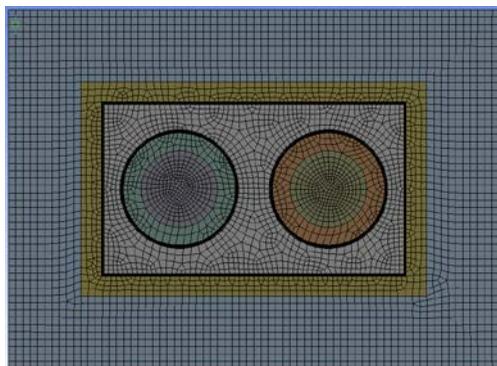


Рис. 2. Общий вид расчетной сетки

Используя таблицы планов проведения активного эксперимента [2–4], рекомендации по выбору того или иного плана [4–5] к реализации принят шестифакторный, ротatableльный план второго порядка. Функции отклика исследовались в зависимости от следующих факторов:

- характерный размер, определяющий геометрию канала в поперечном сечении, –  $X_{\text{попр}}$ , м ( $X_1$ );
- характерный размер, определяющий геометрию канала в продольном сечении, –  $X_{\text{прод}}$ , м ( $X_2$ );
- скорость потока воздуха в канале –  $\omega$ , м/с ( $X_3$ );
- температура прямой  $t_{\text{псв}}$  и обратной  $t_{\text{осв}}$  сетевой воды, °С ( $X_4$ );
- температура наружного воздуха  $t_{\text{н.вз}}$ , °С ( $X_5$ );

– температура грунта на глубине залегания канала  $t_{гр}$ , °C ( $X_6$ ).

Функциями отклика определены:

- потери напора при продувке канала воздухом;
- удельные тепловые потоки к воздуху;
- суммарный от трубопроводов сетевой воды;
- отдельные от трубопроводов прямой и обратной сетевой воды;
- от ограждающих конструкций канала.

Уравнение в общем виде для поверхности отклика второго порядка приведено ниже:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_1^2 + b_3 \cdot X_2 + b_4 \cdot X_2^2 + b_5 \cdot X_3 + b_6 \cdot X_3^2 + b_7 \cdot X_4 + b_8 \cdot X_4^2 + b_9 \cdot X_5 + b_{10} \cdot X_5^2 + b_{11} \cdot X_5 + b_{12} \cdot X_6^2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{14} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{15} \cdot X_1 \cdot X_4 + b_{16} \cdot X_1 \cdot X_5 + b_{17} \cdot X_1 \cdot X_6 + b_{18} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{19} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{20} \cdot X_2 \cdot X_5 + b_{21} \cdot X_2 \cdot X_6 + b_{22} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{23} \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{24} \cdot X_3 \cdot X_6 + b_{25} \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{25} \cdot X_4 \cdot X_6 + b_{27} \cdot X_5 \cdot X_6$$

Вычисление коэффициентов регрессии для принятых функций отклика осуществлялось по формулам [5], проведена оценка адекватности и работоспособности полученных уравнений регрессии.

Значимость коэффициентов полученных уравнений регрессии подтверждалась после проверки с использованием  $t$ -критерия Стьюдента [5]. Для наглядности были построены карты Парето, показывающие значимость коэффициентов уравнений регрессии, на рис. 3 представлена карта Парето для коэффициентов уравнения регрессии для суммарного потока теплоты к воздуху.

Красной линией на рис. 3 обозначен критический уровень  $p$ -значения, соответствующий уровню 0,05, который принимается во многих областях исследований. Таким образом,  $p$ -значение 0,05 здесь рассматривается как «граничный приемлемый» уровень ошибки.

Однако, для математических экспериментов, имеющих место в рассматриваемом случае, не следует игнорировать менее значимые коэффициенты регрессионных зависимостей [5].

Выводы:

1. В виду сложности создания адекватной физической модели и не возможности проведения полноценного промышленного эксперимента на действующем объекте с целью получения исходной информации для разработки методики проектирования системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах на базе программного комплекса ANSYS проведено численное исследование с применением методов планирования активного эксперимента.

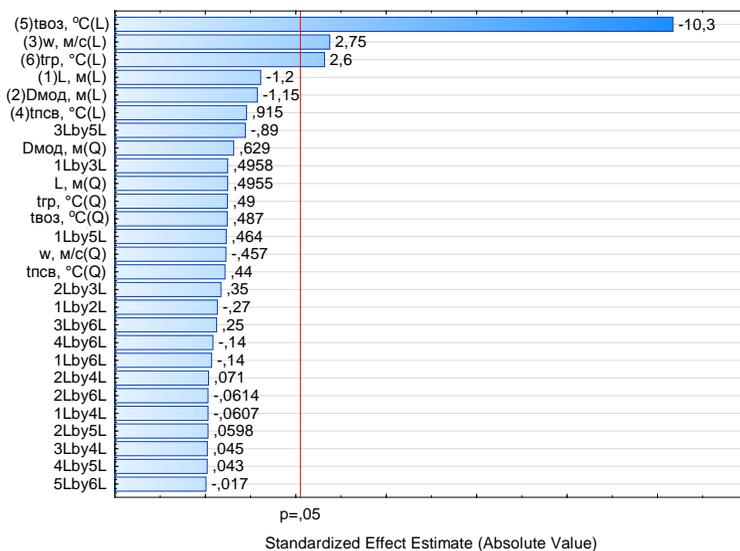


Рис. 3. Карта Парето значимости коэффициентов регрессии для уравнения суммарного потока теплоты

2. Получены регрессионные зависимости для безразмерных факторов, позволяющие определить тепловые потоки от поверхностей, омываемых потоком воздуха, к названному потоку, подтверждена их адекватность общепринятыми статистическими методами.

3. Осуществлен переход к регрессионным соотношениям для значимых факторов и с помощью карт Парето выявлены значимые коэффициенты, показано соответствие их значимости физическим представлениям о протекающих процессах.

### Литература

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 4 (97). – С. 2–6.
2. Самарский, А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики: учеб. пособие для вузов / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – М.: Наука, 1992. – 424 с.
3. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1984. – 520 с.

4. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности.) / В. Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

5. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание, 2013. – 584 с.

УДК 624.131.436

### **Температурный режим грунтов с заложенными коллекторами тепловых насосов**

Костюкевич И. Г.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В результате физико-математического моделирования годового температурного воздействия наружного воздуха для г. Минска получен график температурного режима массива грунта в течение года.*

Исследование нестационарного теплового взаимодействия грунтовых коллекторов тепловых насосов с массивом грунта предполагает разработку физико-математических моделей конструктива исследуемого объекта, описание с помощью дифференциальных уравнений процессов переноса теплоты и формулировку краевых условий.

Перенос теплоты в исследуемом грунтовом массиве может быть представлен уравнением

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}[\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)] + q_v, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C$  – теплоемкость грунта,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $T$  – температура грунта,  $\text{К}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

Применительно к рассматриваемой задаче источник  $q_v = 0$ .

В уравнении не учтены процессы фильтрации грунтовых вод и их влияние на теплофизические характеристики грунтового массива. Математическое описание фильтрации грунтовых вод должно учитывать связь этого процесса с режимом погоды и временами года. Это практически неразрешимая задача и в настоящее время многими исследователями учитывается только фрагментарно, путем фиксированного для интервала времени значения теплофизических коэффициентов, включая учет влияния процессов промерзания и протаивания.

Уравнение энергии для несжимаемого потока жидкости в трубопроводе: