

3. Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic façade system / T. Salameh [et al.] // Solar Energy. – 2020. – Vol. 199 – P. 617–629.

4. Investigation of Energy Saving Using Building Information Modeling for Building Energy Performance in Office Building / H. Fitriani [et al.] // Civil Engineering and Architecture. – 2022. – Vol. 10, № 4. – P. 1280–1292.

5. Implementation of BIM Energy Analysis and Monte Carlo Simulation for Estimating Building Energy Performance Based on Regression Approach: A Case Study / F. Tahmasebinia [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12, № 4. – P. 449.

6. Gao, X. Research on Building Energy Consumption Based on BIM / X. Gao, Y. Wu, Y. Li // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – Vol. 474, № 7. – P. 072022.

7. СН 4.02.03-2019. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введ. 2019–12–16. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 68 с.

УДК 697.9 +51-74

### **Анализ возможностей применения топологической оптимизации в конструктивных элементах систем отопления и вентиляции**

Борухова Л. В., Летун Е. А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Проведено исследование методов и возможностей топологической оптимизации. Приведены результаты исследований в области применения топологической оптимизации в элементах систем отопления и вентиляции*

Топологическая оптимизация является относительно новой методологией в инженерной оптимизации. Первые работы, связанные с применением топологической оптимизации в проектировании конструкций, появились в 1980-е годы.

Следующий важный шаг в развитии топологической оптимизации был сделан в 1990-х годах, когда методы оптимизации были введены для управления геометрией и топологией конструкций. Это позволило исследователям использовать более сложные и точные модели конструкций и применять для решения более широкого спектра задач.

В 1993 году был предложен метод эволюционной оптимизации [1], позволяющий достичь оптимальной формы с помощью обучения программного обеспечения следовать определенному эволюционному пути.

В дальнейшем, с появлением новых материалов и технологий, в том числе аддитивного производства, топологическая оптимизация стала получать все большее распространение и использоваться в самых разных областях, включая автомобильную промышленность, авиацию, микроэлектронику, медицинскую технику, энергетику и др.

Сегодня топологическая оптимизация продолжает развиваться и совершенствоваться, появляются новые методы и алгоритмы, которые позволяют получать более точные и эффективные результаты.

Существует ряд различных методов топологической оптимизации, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Чтобы выбрать оптимальный метод для решения конкретной задачи, необходимо иметь информацию о всех доступных методах. Также необходимо учитывать характеристики конкретной задачи, размерность пространства, количество ограничений, необходимую точность, доступность ресурсов и т. д.

Метод эволюционной оптимизации конструкции (Evolutionary Structural Optimization – ESO) использует эволюционный алгоритм для изменения топологии структуры. Путем удаления наиболее нагруженных элементов и замещения их наиболее легкими элементами, создается новая топология, которая оптимизирует жесткость и массу структуры. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут достигнуты целевые значения оптимизируемых параметров.

Метод двунаправленной эволюционной оптимизации конструкции (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO) работает похожим образом, но использует двунаправленный эволюционный алгоритм. BESO обычно считается более эффективным, чем ESO.

Метод пенализации для твердого изотропного тела (Solid Isotropic Material with Penalization – SIMP) является одним из наиболее популярных методов топологической оптимизации. В методе SIMP каждый элемент структуры имеет плотность, которая может изменяться от 0 до 1. Если плотность элемента близка к 0, это означает, что элемент находится в отключенном состоянии, а если плотность близка к 1, элемент находится в активном состоянии. Чем выше плотность элемента, тем больше его жесткость и тем меньше деформации при нагрузке.

Основным преимуществом метода SIMP является его простота и эффективность. Он может быть легко реализован в виде программного обеспечения и может работать с различными типами ограничений и условий задач.

Метод множества уровней (Level Set Method – LSM) представляет кривую или поверхность в неявном виде, приняв ее в качестве нулевого уровня многомерной функции, а затем изучает деформацию этой введенной функции.

Преимуществом LSM является то, что он может легко учитывать сложные геометрические формы и не требует аналитического описания поверхности 디자인а. Однако его недостатком является сложность вычислений.

В методе движущихся асимптот (Method of Moving Asymptotes – MMA) строится функция асимптотически эквивалентная к исходной и оптимизируется вместо исходной, что существенно ускоряет сходимость метода.

Также существует ряд как принципиально других, так и комбинаций либо улучшений, приведенных выше методов: ESO-SIMP (комбинация методов ESO и SIMP), GCMMA (Globally Convergent Method of Moving Asymptotes), SNOPT (Sparse Nonlinear OPTimizer) и IPOPT (Interior Point OPTimizer), Guide-Weight Method, eXtended Finite Element Method (XFEM), CutFEM Method, PolyTop Method, The Bound Optimization BY Quadratic Approximation (BOBYQA).

Топологическая оптимизация для решения задач гидродинамики и теплообмена может быть применена для улучшения конструкции элементов систем отопления и вентиляции.

Для теплообменных аппаратов топологическая оптимизация позволяет интенсифицировать теплообмен и минимизировать гидравлическое сопротивление. Это достигается путем изменения формы каналов, либо оптимизации количества и расположения интенсифицирующих теплообмен устройств, с целью увеличения площади теплообменной поверхности и повышения эффективности передачи теплоты.

Широкое применение топологическая оптимизация нашла в проектировании радиаторов охлаждения элементов микроэлектроники. Это связано с тем, что в микроэлектронике очень важно обеспечить оптимальное тепловое распределение, чтобы избежать перегрева и повреждения элементов.

В результате топологической оптимизации радиаторов, расположенных непосредственно на источнике тепла, получают геометрические формы, представленные на рис. 1 [2].

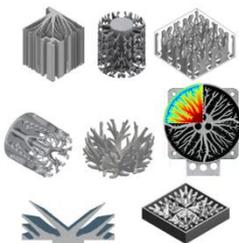


Рис. 1. Геометрические формы радиаторов охлаждения элементов микроэлектроники, полученные с помощью топологической оптимизации

Другим вариантом охлаждения элементов микроэлектроники является использование промежуточного охлаждения. Промежуточным теплоносителем является вода или гликолевая смесь.

Топологическая оптимизация в таком случае используется для оптимизации формы и расположение каналов устройств съема тепла и радиаторов. Результаты топологической оптимизации таких устройств приведены на рис. 2 [3; 4].

Топологическая оптимизация проточных частей (коллекторов, каналов) позволяет находить наиболее оптимальные геометрические характеристики, учитывая требуемые параметры (минимальное/заданное сопротивление потоку, минимальный вес). Результаты приведены на рис. 3 [5].

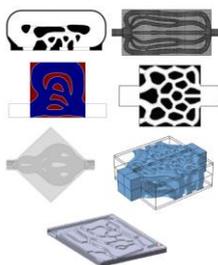


Рис. 2. Результаты топологической оптимизации теплообменных устройств, используемых для охлаждения микроэлектроники



Рис. 3. Результаты топологической оптимизации геометрических характеристик проточных частей

Рассматривается возможность применения топологической оптимизации для оптимизации формы воздуховодов [6]. Результаты оптимизации приведены на рис. 4. Одной из задач при проектировании воздуховодов является минимизация потерь давления в системе. Это достигается за счет оптимизации формы воздуховодов, что позволяет снизить потери давления и уровень аэродинамического шума.

С помощью топологической оптимизации возможна оптимизация барьеров для глушения шума в помещениях [7].

Топологическая оптимизация позволяет создавать оптимальные конструкции, учитывая требования к жесткости, прочности, эффективности теплообмена, гидравлической производительности, уровню шума и другим характеристикам. Соответственно, возможно широкое применения топологической оптимизации для ряда элементов систем отопления и вентиляции.

Наиболее эффективное использование топологической оптимизации в системах отопления и вентиляции возможно в следующих конструктивных элементах:

- в теплообменниках для оптимизации формы каналов и их расположения;
- в увлажнителях для оптимизации формы отверстий и элементов, направляющих поток;

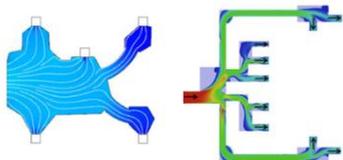


Рис. 4. Результаты топологической оптимизации геометрических характеристик воздуховодов

– в воздухораспределителях систем вентиляции и кондиционирования воздуха для оптимизации потерь давления, равномерности распределения воздуха по сечению воздухораспределителя, эжекции окружающего воздуха;

- в клапанах для оптимизации формы диска либо проточных частей;
- в отопительных приборах для оптимизации поверхности теплообмена;
- в фасонных изделиях трубопроводов и воздуховодов для оптимизации проточных частей;
- в устройствах глушения шума для оптимизации структуры шумопоглощающего материала;
- в коллекторах, разветвляющих устройствах для оптимизации проточных частей.

### Литература

1. Xie, Y. M. A simple evolutionary procedure for structural optimization / Y. M. Xie, G. P. Steven // Computers & Structures. – 1993. – Vol. 49, № 5. – P. 885–896.

2. Investment casting and experimental testing of heat sinks designed by topology optimization / T. Lei [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127 – P. 396–412.

3. Zhou, T. Study of the Performance of a Novel Radiator with Three Inlets and One Outlet Based on Topology Optimization / T. Zhou, B. Chen, H. Liu // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, № 6. – P. 594.

4. Concurrent optimization of the internal flow channel, inlets, and outlets in forced convection heat sinks / J. Zhao [et al.] // Struct Multidisc Optim. – 2021. – Vol. 63, № 1. – P. 121–136.

5. Othmer, C. Implementation of a Continuous Adjoint for Topology Optimization of Ducted Flows / C. Othmer, E. de Villiers, H. Weller // 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. – Miami: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

6. Manuel, M. C. E. Optimal duct layout for HVAC using topology optimization / M. C. E. Manuel, P. T. Lin, M. Chang // Science and Technology for the Built Environment. – 2018. – Vol. 24, № 3. – P. 212–219.

7. Dühring, M. B. Acoustic design by topology optimization / M. B. Dühring, J. S. Jensen, O. Sigmund // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Vol. 317, № 3–5. – P. 557–575.

УДК 697.3.4

### **Теплопередача через ограждающие конструкции тоннельных сооружений метрополитенов**

Сизов В. Д.<sup>1</sup>, Кононов Д. А.<sup>1</sup>, Белениник О. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет,

<sup>2</sup> ОАО «Минскметропроект»

Минск, Республика Беларусь

*В работе рассмотрены основные понятия и уравнения теплопередачи через ограждающие конструкции тоннельных сооружений. Способы определения теплофизических характеристик грунтов и ограждающих конструкций, коэффициента теплоотдачи, определения температуры грунтов и определение постоянного теплового потока в грунт из тоннельных сооружений.*

При работе метрополитена тепло, выделяемое в тоннелях, ассимилируется вентиляционным воздухом и частично поступает через ограждающие конструкции тоннелей в окружающий грунт. Теплопередача в грунты происходит при нестационарном режиме, так как температурное поле грунтов