

УДК 622.278

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ОХЛАЖДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ТЕПЛОВОЗА

Гусенцова Е.С.

AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF GAS FLOW IN COOLING DEVICE OF DIESEL LOCOMOTIVE

Gusentsova E.S.

В статье выполнена классификация конструкций шахт охлаждающих устройств отечественных и зарубежных тепловозов. На ее основании разработана расчетная схема и математическая модель аэродинамических характеристик течения газа. Модель включает уравнение движения газа, уравнение неразрывности и теплопроводности. Для замыкания системы дифференциальных уравнений обоснована и использована k - ε модель турбулентности. Обоснование выполнено с использованием П-теоремы (теоремы Букингема). Точного решения полученной системы уравнений не существует. Среди численных методов, метод контрольного объема является наиболее универсальным для численного интегрирования подобных уравнений. С его использованием построена программа интегрирования разработанной математической модели аэродинамических характеристик течения газа.

Ключевые слова: охлаждающее устройство тепловоза, уравнение неразрывности, математическое моделирование, теорема Букингема

Введение. В настоящее время проявились тенденции, которые определяют развитие тепловозного парка железных дорог. На примере некоторых секций тепловозов, которые освоены ведущими локомотивостроительными компаниями и практически готовыми для широкого внедрения, можно проследить общие пути совершенствования основных агрегатов и конструктивных устройств на ближайшую перспективу. Наиболее характерными в этом отношении являются магистральные тепловозы ТЭП150, 2ТЭ116, УД, АС 6000 компании General Electric (GE), SD90MAC отделения Electro Motive компании General Motors (EMD GM), универсальный тепловоз Blue Tiger компании Adtranz и GE. Совершенствование конструкций тепловозов позволяет значительно расширить сферу использования тепловозной тяги, повысить грузо- и пассажирооборот, уменьшить стоимость перевозок.

Особое значение эта задача приобретает для автономных тяговых транспортных установок - теп-

ловозов, в которых значительная часть энергии расходуется на дополнительные нужды, что, в конце концов, потенциально снижает эффективность тепловозной тяги.

Одним из возможных путей решения этой задачи является оптимизация аэродинамических характеристик как самих вентиляторов, так и проточной части шахты системы охлаждения теплоносителя энергетической установки тепловоза, что может обеспечить значительный позитивный эффект в техническом, экономическом и социальном аспектах – уменьшить износ, снизить непродуктивные затраты энергии как самих систем, так и объектов регулирования, уменьшить эксплуатационные затраты, повысить безопасность движения поездов и их конкурентоспособность на мировом рынке.

Постановка проблемы. Охлаждающие устройства являются одним из сложных и габаритных узлов тепловоза. Они поглощают до 75% мощности, которая тратится на собственные нужды тепловозов. Охлаждающие устройства включают панели радиаторов, вентиляторные установки, воздухозаборники и выпускные устройства, шахты, фильтры, жалюзи, вентиляторы с направляющими и спрямляющими аппаратами, и другие элементы.

Разработка рациональных конструкций систем охлаждения связана с решением сложных задач интенсификации теплообмена, уменьшения аэродинамического сопротивления, размеров и массы больше габаритных элементов систем, улучшения компоновки их в кузове тепловоза. Необходимо проведение специальных дорогостоящих исследований с учетом влияния на аэродинамические характеристики устройств, их основных параметров, элементов конструкций и режимов работы, зависящих от скорости воздушного потока.

Исследованию аэродинамических характеристик проточных частей систем охлаждения тепловозов уделяется недостаточно внимания, поэтому остается актуальной задача разработки теоретиче-

ских основ расчета аэродинамических характеристик, их математического моделирования, анализа причин возникновения аэродинамических потерь давления и способов их устранения.

Анализ последних исследований и публикаций. В выполненных различными организациями исследованиях основное внимание уделялось улучшению характеристик вентиляторов (жалюзийному аппарату, спрямляющему устройству и рабочему колесу). Разрабатывались и испытывались различные конструкции противосрывных устройств, которые позволяли расширить рабочую зону вентилятора, повысить надежность его работы. В отечественной и зарубежной литературе достаточно много внимания уделяется вопросам повышения экономичности силовых установок тепловозов [1-6]. Рассмотрены различные пути решения этих задач.

Однако в стороне остались вопросы совершенствования аэродинамики проточной части охлаждающего устройства. Это, как показывают расчеты, позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление и, тем самым, повысить эффективность энергетической установки тепловоза.

Цель статьи. Учитывая вышеизложенное, в представленной работе приведена математическая модель аэродинамических проточной части систем охлаждения температуры теплоносителей энергетической установки тепловоза с учетом обоснованной модели турбулентности.

Результаты исследований. Выполнена классификация конструкций охлаждающих устройств. Объектом математического моделирования была шахта охлаждающего устройства. При расчете движения воздуха без учета относительной скорости набегающего потока оправданным является использование не полной трехмерной, а упрощенной двухмерной модели, поскольку ширина похода в радиатор в несколько раз превышает высоту. Кроме того, учитывая симметричность большинства конструкций, расчетная схема упрощена. При вычислениях рассматривался не вся площадь, а ее половина. Таким образом, расчетная схема для проточной части охлаждающего устройства имеет вид, представленный на рис. 1.

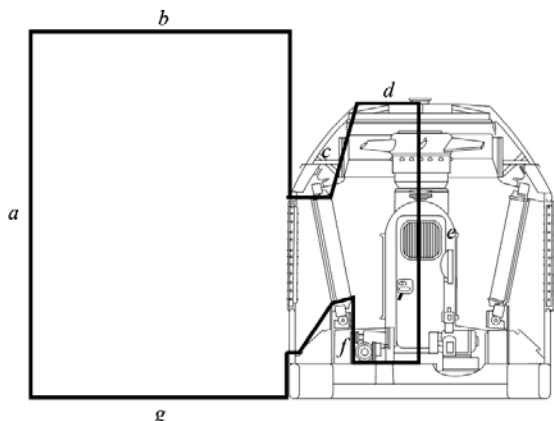


Рис 1. Расчетная схема шахты холодильника

Граничные условия: a, e – атмосфера; c, e, f – стенки шахты; $u, v = 0$; d – разряжение перед вентилятором; $p = -300$ Па; g – поверхность земли.

Исследования показали, что течение воздуха в шахте системы охлаждения тепловоза можно рассматривать как турбулентное течение вязкой, несжимаемой жидкости.

Базовыми уравнениями, описывающими установившееся турбулентное течения без учета массовых сил, в декартовой системе координат, является уравнение движения Рейнольдса [6, 7]. Поскольку силы тяжести практически не влияют на картину течения в шахте, уравнение движения использовано в виде

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = -\frac{\text{grad } P}{\rho} + \nu \Delta \bar{v}. \quad (1)$$

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности

$$\text{div } \bar{v} = 0$$

где ρ , \bar{v} и P – плотность, скорость и давление среды;

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ – динамическая вязкость среды;}$$

и уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right], \quad (2)$$

где T – температура среды;
 c – массовая теплоемкость;
 k – теплопроводность среды

У простейшем случае однофазной среды \bar{q} определяется уравнением Фурье

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad } T. \quad (3)$$

Еще одним уравнение, дополняющим систему, является уравнение состояния

$$p = \rho R T, \quad (4)$$

где R – газовая постоянная.

Приведенная система уравнений (1-4) содержит десять неизвестных и является незамкнутой. Для расчета турбулентного течения принята гипотеза замыкания для турбулентных напряжений тепловых потоков.

Выполнен детальный анализ гипотез турбулентности, что позволило обосновать для данного случая $\bar{k} - \varepsilon$ модель. Одной из причин широкого использования $\bar{k} - \varepsilon$ модели турбулентности является возможность строгого обоснования ее приме-

нимости с помощью П-теоремы [3].

На рис. 2. показан характерный профиль осредненной скорости вблизи твердой стенки.

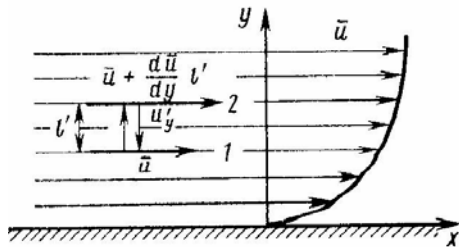


Рис.2. Распределение скорости вблизи твердой поверхности

На распределение скорости для пристеночного течения оказывает влияние твердая поверхность, поэтому турбулентная вязкость зависит от градиента пульсационных скоростей - $\frac{\partial u'}{\partial n}$, т.е.:

$$v_t = f\left(v, k, \frac{\partial u'}{\partial n}\right)$$

или, согласно П-теореме (теорема Букингема), в соответствии с которой: если известны все переменные, определяющие изучаемый процесс, то можно сразу же преобразовать их, применив первую часть теоремы Букингема: «Если какое-либо уравнение однородно относительно размерностей (все члены имеют одинаковую размерность), то его можно преобразовать к соотношению, содержащему набор безразмерных комбинаций величин- критериев подобия».

Для данного случая ее применение выглядит следующим образом.

$$\Pi = f(\Pi_1, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_{M-m}),$$

где Π, Π_i – безразмерные комплексы,
 M – число определяющих параметров,
 m – число независимых размерностей.

В классе LMT размерности учитываемых в выражении для v_t величин есть:

$$[v_t] = [v] = \frac{M^2}{c}; [k] = \frac{M^2}{c^2}; \left[\frac{\partial u'}{\partial n}\right] = \frac{1}{c}$$

Разность чисел определяющих параметров и независимых переменных равна единице и из них составляется один безразмерный комплекс наряду с безразмерным комплексом, включающим искомую величину турбулентной вязкости:

$$M = 3, m = 2, M - m = 1: \Pi = \frac{v_t}{v}; \Pi_1 = \frac{k}{v\left(\frac{\partial u'}{\partial n}\right)}$$

Таким образом, имеем

$$\frac{v_t}{v} = f\left(\frac{k}{v\left(\frac{\partial u'}{\partial n}\right)}\right)$$

В случае течения воздуха в шахте охлаждающего устройства, когда k и v могут быть приняты постоянными

$$\frac{v_t}{v} \sim \left(\frac{k}{v\left(\frac{\partial u'}{\partial n}\right)}\right)^2 = \frac{k^2}{v^2\left(\frac{\partial u'}{\partial n}\right)^2}$$

или

$$v_t \sim \frac{k^2}{v\left(\frac{\partial u'}{\partial n}\right)^2}$$

Анализируя последнее выражение, можно прийти к зависимости:

$$v_t \sim \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{или} \quad v_t = \text{const} \frac{k^2}{\varepsilon},$$

Что совпадает с уравнением $\bar{k} - \varepsilon$ модели.

Граничные условия для системы уравнений приведены на рис.1.

Вывод. Точного решения полученной системы уравнений не существует. Среди численных методов, метод контрольного объема является наиболее универсальным для численного интегрирования подобных уравнений [7, 8, 9]. С его использованием построена программа интегрирования приведенной выше математической модели аэродинамических характеристик течения газа. Проведенные эксперименты показали адекватность разработанной математической модели, что позволяет рекомендовать ее для оптимизации проточной части охлаждающих устройств.

Л и т е р а т у р а

1. Андрийчук Н.Д. Термодинамика для инженеров-строителей/ Н.Д. Андрийчук., А.А. Коваленко А.А., В.И. Соколов. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2005. – 304 С.
2. Горбунов Н.И., Кравченко Е.А., Михеев С.А. К вопросу о создании высокоскоростного локомотива/ Н.И.Горбунов, Е.А.Кравченко, С.А.Михеев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2006. - №8 (102), С.108-111.

3. Гусенцова Е.С. Математическая модель аэродинамических характеристик проточной части охлаждающего устройства тепловоза/ Е.С. Гусенцова, Ю.И. Осенин // Сборник материалов XIII всеукраинской научной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук в исследованиях молодых ученых» - Черкассы: Брама, 2011. – С. 355-358.
4. Коняев А.Н. Проблемы транспорта в реформируемой экономике// Транспорт. 36. наук. пр. Східноукраїнського державного університету. – Луганськ.: 1998. – С. 3-9.
5. Куликов Ю.А. Системы охлаждения силовых установок тепловозов/Куликов Ю.А. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 С.
6. Пригожин И. Современная термодинамика/ Пригожин И., Кондепуди Д. – М.: Мир, 2002. – 461 С.
7. Crumpton P. L., Moinier P., Giles M. B. An Unstructured Algorithm for High Reynolds Number Flows on Highly Stretched Grids // Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods for Laminar and Turbulent Flows, 21-25 -July 1997, University of United Kingdom, Swansea. 1997.
8. Nirsch G. Numerical Computation of Internal and External Flows. New York: John Wiley and Sons. 1990.
9. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. 1992. N 92-0139.

References

1. Andrijchuk N.D. Termodinamika dlya inzhenerov-stroitelej/ N.D. Andrijchuk., A.A. Kovalenko A.A., V.I. Sokolov. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dallya, 2005. – 304 S.
2. Gorbunov N.I., Kravchenko E.A., Miheev S.A. K voprosu o sozdanii vysokoskorostnogo lokomotiva/ N.I.Gorbunov, E.A.Kravchenko, S.A.Miheev // Visnik Skhidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya. – 2006. - №8 (102), S.108-111.
3. Gusencova E.S. Matematicheskaya model' aehrodinamicheskikh harakteristik protochnoj chasti ohlazhdayushchego ustrojstva teplovoza/ E.S. Gusencova, YU.I. Osenin // Sbornik materialov XIII vseukrainskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh «Aktual'nye problemy estestvennyh i gumanitarnyh nauk v issledzovaniyah molodyh uchenyh» - Cherkassy: Braма, 2011. – S. 355-358.
4. Konyaev A.N. Problemy transporta v reformiruemoj ehkonomie// Transport. Zb. nauk. pr. Skhidnoukraïns'kogo derzhavnogo universitetu. – Lugansk.: 1998. – S. 3-9.
5. Kulikov YU.A. Sistemy ohlazhdeniya silovyh ustanovok teplovozov/Kulikov YU.A. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 280 S.
6. Prigozhin I. Sovremennaya termodinamika/ Prigozhin I., Kondepudi D. – М.: Мир, 2002. – 461 S.

7. Crumpton P. L., Moinier P., Giles M. B. An Un-structured Algorithm for High Reynolds Number Flows on Highly Stretched Grids // Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods for Laminar and Turbulent Flows, 21-25 -July 1997, University of United Kingdom, Swansea. 1997.
8. Nirsch G. Numerical Computation of Internal and External Flows. New York: John Wiley and Sons. 1990.
9. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. 1992. N 92-0139.

Гусенцова Е.С. Аеродинамічні характеристики течії газу в охолоджуючому пристрої тепловозу

У статті виконано класифікацію конструкцій шахт охолоджуючих пристроїв вітчизняних і зарубіжних тепловозів. На її підставі розроблено розрахункову схему і математичну модель аеродинамічних характеристик течії газу. Модель включає рівняння руху газу, рівняння нерозривності і теплопровідності. Для замикання системи диференціальних рівнянь обґрунтована і використана k-ε модель турбулентності. Обґрунтування виконано з використанням П-теорема (теорема Букінгема). Точного рішення отриманої системи рівнянь не існує. Серед чисельних методів, метод контрольного об'єму є найбільш універсальним для чисельного інтегрування подібних рівнянь.

Ключові слова: охолоджуючий пристрій тепловоза, рівняння нерозривності, математичне моделювання, теорема Букінгема

Gusentsova E.S. Aerodynamic characteristics of gas flow in cooling device of diesel locomotive

The classification of structures mines cooling equipment of domestic and foreign locomotives is made. On its basis the design scheme and mathematical model of the aerodynamic characteristics of the gas flow designed. The model includes the equation of gas motion, the continuity equation, and thermal conduction. The k-ε turbulence model is chosen to close the system of differential equations. Justification is performed by using P-theorem (Buckingham theorem). There is no exact solution for resulting system of equations. Among the numerical methods, control volume method is the most versatile for the numerical integration of these equations. The integration program of mathematical model of the aerodynamic characteristics of gas flow is developed. The experiments showed the adequacy of the developed mathematical model that allows us to recommend it for the optimization of the cooling devices flow part.

Keywords: diesel locomotive cooling device, continuity equation, mathematical modeling, Buckingham theorem

Гусенцова Е.С. – асистент кафедри «Гідрогазодинаміка» ЧНУ ім. В. Даля, e-mail: marlazinge@rambler.ru

Рецензент: д.т.н., проф. Соколов В.І.

Стаття подана 25.03.2016